



Corso di

Laurea specialistica (*ordinamento ex D.M. 509/1999*)

in

Scienze Chimiche per la Conservazione ed il
Restauro

Tesi di Laurea

Studio del comportamento chimico-fisico di
tessuti in ambiente museale

Relatore

Prof. Guido Biscontin

Dott.ssa Eleonora Balliana

Co-Relatore

Dott.ssa Maria Romanò

Laureando

Debora Fedato

Matricola 803709

Anno Accademico

20012 / 20013

INDICE

Scopo	pag 1
Introduzione	pag 2
1. Classificazione delle fibre tessili	
1.1. Il cotone	pag 3
1.1.1. Struttura morfologica	pag 5
1.1.2. Composizione chimica e proprietà chimico-fisiche	pag 9
1.2. La seta	pag 12
1.2.1. Morfologia della seta	pag 13
1.2.2. Chimica della seta e proprietà	pag 17
Bibliografia	pag 20
2. Conservazione dei tessuti di cotone e seta in ambiente museale	
2.1. Condizioni ambientali sfavorevoli : problematiche per i tessuti e loro degrado	pag 22
2.1.1. Luce	pag 23
2.1.2. Parametri termo igrometrici	pag 24
2.1.3. Fattori meccanici e di conservazione	pag 27
2.1.4. Organismi e microorganismi	pag 29
2.1.5. Inquinanti gassosi	pag 32
2.2. Interazione particolato atmosferico <i>indoor-fibre</i>	pag 37
2.2.1. Il problema degli impolveramenti sui tessuti storico-artistici	pag 37
2.2.2. I depositi in ambiente museale	pag 38
2.2.3. Interazioni tra particelle e fibre	pag 41
2.3. Le normative vigenti in materia di conservazione dei tessuti	pag 43
Bibliografia	pag 47
3. Parte sperimentale	
3.1. Tecniche analitiche e metodi	pag 53
3.1.1. Microscopia	pag 53
3.1.1.1. Stereomicroscopio e microscopio polarizzato	pag 53
3.1.1.2. Microscopio elettronico a scansione	pag 53
3.1.2. Viscosimetria	pag 56
3.1.2.1. Determinazione grado di polimerizzazione del cotone	pag 56
3.1.2.2. Determinazione della viscosità intrinseca	

4. Risultati e discussioni

4.1. Scelta e caratterizzazione dei provini di tessuto tal quale	pag 81
4.1.1. Osservazione in microscopia ottica ed elettronica	pag 81
4.1.2. Prove fisico meccaniche	pag 86
4.1.3. Caratterizzazione FTIR-ATR	pag 87
4.1.4. Determinazione grado di polimerizzazione e viscosità intrinseca	pag 89
4.2. Valutazione ambiente museale di Palazzo Fortuny	pag 90
4.2.1. Monitoraggio microclimatico	pag 90
4.2.2. Illuminamento	pag 92
4.2.3. Caratterizzazione depositi polverulenti	pag 93
4.3. Studio del comportamento dei tessuti esposti a Palazzo Fortuny	pag 102
4.3.1. Osservazioni in microscopia ottica ed elettronica a scansione (SEM) e microanalisi (EDS)	pag 102
4.3.2. Indagini colorimetriche	pag 109
4.3.3. Indagini spettrofotometriche FTIR in riflettanza attenuata	pag 113
4.3.4. Valutazione variazioni grado di polimerizzazione (DP)	pag 114
4.3.5. Valutazione variazioni della resistenza e dell'allungamento a rottura	pag 115
4.4. Studio del comportamento dei tessuti esposti a cicli termoigrometrici in laboratorio	pag 118
4.4.1. Osservazioni in microscopia ottica ed elettronica a scansione (SEM) e microanalisi (EDS)	pag 118
4.4.2. Indagini colorimetriche	pag 126
4.4.3. Indagini spettrofotometriche FTIR in riflettanza attenuata	pag 130

4.4.4. Valutazione variazioni grado di polimerizzazione (DP)	pag 132
4.4.5. Valutazione variazioni della resistenza e dell'allungamento a rottura	pag 133
5. Conclusioni	pag 138
Bibliografia generale	pag 140
Indice delle tabelle e delle figure	pag 147
Ringraziamenti	

SCOPO

Lo scopo del presente lavoro di tesi è di caratterizzare le interazioni tra tessuti di interesse storico-artistico e le polveri presenti all'interno degli ambienti museali. Mentre infatti numerosa è la letteratura sui più comuni processi di degrado dei tessuti come ad esempio i fenomeni di foto/termo-ossidazione, depolimerizzazione dovuta ad agenti inquinanti gassosi e biodeterioramento, pochi sono al momento gli studi specifici sugli effetti che le deposizioni particellari hanno sui tessuti, in relazione alle diverse condizioni di ambientali (temperatura e umidità relativa). Negli ultimi anni è cresciuta notevolmente la consapevolezza del problema rappresentato dalle deposizioni di particolato sui manufatti musealizzati in quanto, a lungo andare, ne implicano la pulitura, operazione non sempre compatibile con il loro stato di conservazione e modificano il loro aspetto superficiale, di particolare importanza nel caso dei tessuti storico artistici. Molti sono infatti i punti ancora non chiari per quanto riguarda la composizione delle polveri presenti e il loro grado di coesione con i tessuti e soprattutto il reale rischio ad essi associato e gli effetti nocivi che nel tempo possono causare.

Nel presente studio, si è cercato quindi di valutare e monitorare le interazioni tra tessuti e particolato in seguito a deposizioni naturali ed artificiali di polveri, stazionate per determinati periodi di tempo su provini di tessuto esposti a diverse condizioni ambientali. Si è poi proceduto alla caratterizzazione chimico-morfologica del particolato con cui i tessuti sono venuti a contatto e a una valutazione delle possibili variazioni delle caratteristiche fisico-meccaniche e chimiche dei tessuti causata dalle deposizioni stesse utilizzando diverse tecniche analitiche e strumentali (FTIR_ATR; microscopia ottica ed elettronica, misure di stress meccanici, etc.) al fine di avere una comprensione quanto più completa delle interazioni ed equilibri esistenti tra depositi e tessuti.

INTRODUZIONE

Il presente lavoro di tesi è stato portato a termine grazie alla collaborazione tra Innovhub SSI – Divisione Stazione Sperimentale per la Seta di Milano che ha gentilmente messo a disposizione le proprie conoscenze, il Dipartimento di Scienze Ambientali, Informatiche e Statistiche dell'Università Ca' Foscari di Venezia e Palazzo Fortuny* di Venezia che si è prestato come ambientazione di una fase di studio.

All'interno dell'ampio settore dei beni culturali, i tessuti di interesse storico-artistico rappresentano dei sistemi particolarmente sensibili alle condizioni di esposizione, che non sempre risultano essere adeguate in ragione, talvolta, delle notevoli dimensioni di alcune tipologie di manufatti (arazzi, tessuti d'arredo). Numerosi studi hanno già largamente dimostrato che, per quanto riguarda i materiali tessili di interesse storico-culturale, parametri ambientali come luce, inquinanti gassosi, biodeteriogeni (insetti e microrganismi), giocano un ruolo fondamentale nei processi di invecchiamento e degrado innescando fenomeni dannosi di foto-ossidazione, depolimerizzazione, e biodeterioramento [1,4-6], che possono portare anche in tempi brevi alla perdita del manufatto stesso.

Oltre ai tradizionali e ben riconosciuti fattori di degrado, negli ultimi decenni è cresciuta considerevolmente la consapevolezza della pericolosità e contributo da parte del particolato normalmente presente nelle aree espositive e nei luoghi di stoccaggio (sottoforma di aerosol, polveri, fibre, ecc.), che può contribuire all'azione di altri fattori o essere esso stesso un fattore primario di degrado sia estetico che chimico delle opere d'arte. Alcuni oggetti come tessuti antichi particolarmente fragili possono infatti risultare gravemente danneggiati e impossibili da pulire con i normali metodi di pulitura come il lavaggio in acqua o le puliture a secco (spazzolature o *gommage*), con evidenti ricadute negative sulla loro conservazione. Grazie alle conoscenze acquisite negli ultimi anni è oggi possibile ridurre la pericolosità di alcuni fattori di degrado come la luce, la temperatura e l'umidità. Per quel che riguarda invece il controllo e la gestione della qualità del particolato è molto più difficile anche perché la filtrazione dell'aria è spesso economicamente onerosa [7]. Inoltre, non essendo sempre nota la natura del particolato stesso, gli effetti dannosi che può provocare e il grado di adesione con i diversi supporti tessili diventa in molti casi complesso dettare delle linee guida o dei sistemi standardizzati di filtrazione.

Per questo motivo si è deciso di monitorare e caratterizzare nel tempo le deposizioni di particolato all'interno di Palazzo Fortuny ed osservare gli effetti su tessuti esposti ad hoc anche in relazione a variazioni termoigrometriche al fine di stimare gli effetti del particolato sulla conservazione dei tessuti e di comprendere come la velocità di deposizione del particolato possa incidere sulla percepibilità del bene da parte del visitatore. Coni dati raccolti si è cercato inoltre di valutare la possibilità di un intervento preventivo sui tessuti basato sulla gestione del particolato alla voce di un concetto di restauro sostenibile con riduzione degli oneri economici e socio-culturali.

La sperimentazione è stata effettuata su tessuti di origine naturale nuovi, bianchi per ridurre al minimo le variabili presenti nello studio che potrebbero confondere la lettura dei risultati, già di per sé complessi per i numerosi fattori di degrado che sono normalmente presenti in atmosfera museale non controllata. Sono state scelte due tipologie di tessuto: un tessuto di cotone[†] per le fibre vegetali e un tessuto di seta[‡] per le fibre animali per avvicinarsi alle tipologie di tessuti che sono conservati a Palazzo Fortuny.

* Per gentile concessione dell'Arch. Daniela Ferretti. Palazzo Fortuny, museo facente parte del circuito Musei Civici Veneziani

† Fornito direttamente dalla fabbrica Fortuny s.p.a., Venezia

‡ Donato dalla Sig.ra Morassutti, restauratrice tessile dell'Opificio Pietre Dure

La sperimentazione è stata articolata in due parti. La prima parte è stata effettuata a Palazzo Fortuny e consiste nella valutazione delle variazioni chimiche e fisiche di provini di tessuti esposti per tre mesi alle condizioni museali, non controllate, in cui sono esposti i tessuti Fortuny. I provini sono stati esposti nel salone principale al piano nobile del Palazzo e contemporaneamente sono stati monitorati i parametri termo igrometrici e l'illuminamento.

Al termine dei mesi di stazionamento dei campioni, è stato valutato che l'accumulo di polvere era esiguo a causa dei prolungati tempi di deposizione delle polveri, si è perciò deciso di effettuare una seconda parte di studio in laboratorio preparando dei provini del tutto identici a quelli esposti in museo sui quali è stata eseguita una deposizione forzata di polveri raccolte in prossimità del luogo in cui erano stati posizionati i provini della prima parte di studio.

Per poter valutare al meglio le possibili interazioni tra particolato e fibre, i provini sono stati collocati in due sistemi chiusi contenenti il minor volume d'aria possibile, così da minimo minimizzare il possibile contributo da parte di inquinanti gassosi, normalmente presenti in atmosfera, e al buio per poter trascurare gli effetti fotodegradativi e foto-ossidativi. All'interno dei due sistemi si sono volute creare due situazioni termoigrometriche differenti corrispondenti rispettivamente a una situazione estiva standard, con cicli di 12 ore variabili da 25°C a 50°C al 60% di umidità relativa, e una situazione estrema, in cui i cicli termici sono rimasti tali ma l'umidità relativa è stata portata a valori elevati intorno al 90%. Per entrambi i casi la durata totale dei cicli è stata di 240 ore per un totale di 10 giorni.

I depositi di particolato sono stati caratterizzati sia attraverso microscopia elettronica a scansione (SEM) che microanalisi EDS e analisi in spettrofotometria IR (FTIR). Le variazioni di comportamento chimico-fisico dei provini di entrambe le parti di studio sono stati valutati attraverso osservazione in microscopia ottica ed elettronica, colorimetria, analisi spettrofotometria FTIR in riflettanza attenuata (FTIR-ATR), prove fisico-meccaniche e valutazione del grado di polimerizzazione per il cotone e della viscosità intrinseca per la seta.

Bibliografia

- [1] Ezio Martuscelli, *Degradazione delle fibre naturali e dei tessuti antichi. Aspetti chimici, molecolari, strutturali e fenomenologici*, Firenze 2006
- [2] Eastop, D. M. Brooks, *To clean or not to clean?*, Preprints of the 11th Triennial Meeting of the ICOM Committee for Conservation, Edinburgh, 1996, pp. 687-91
- [3] M. Saito, M. Otani, A. Yabe, A, *Work of adhesion of oily dirt and correlation with washability*, Textile Research Journal 55, n 3, 1985, pp. 157-64.
- [4] A. Timar-Balazsy, D. Eastop, *Chemical Principles of Textiles Conservation*, Oxford 1999
- [5] F. Pertegato, *Restauro dei materiali tessili*,
- [6] G. Caneva, M.P. Nugari, *La biologia nel restauro*, Firenze 1994
- [7] W. W. Nazaroff et al., *Airborne particles in museums*, Getty Conservation Institute, USA 1993

·1·

CLASSIFICAZIONE DELLE FIBRE TESSILI

In questa sezione verranno fornite delle conoscenze generali utili per classificare le fibre tessili per poi passare in modo più approfondito al cotone e alla seta protagonisti di questo studio. Saranno approfondite in particolare struttura, composizione chimica e proprietà chimico fisiche delle fibre tessili.

1 Classificazione delle fibre tessili

Le fibre tessili possono essere classificate in base alla loro natura chimica in tre classi: naturali (animali, vegetali e minerali tipo amianto), artificiali (da polimeri di origine biologica, modificate o non modificate chimicamente) e sintetiche (da polimeri di sintesi). Le fibre animali e vegetali trovano poi un'ulteriore suddivisione legata alla loro origine. Le fibre vegetali ad esempio si possono dividere in fibre animale e vegetali, con ulteriori sottodivisioni legate alla parte della pianta dalla quale vengono ricavate o come vengono prodotte. Le fibre animali ad esempio possono essere ricavate dal bulbo pilifero (lana) o da secrezioni (seta).

In figura 1.1 viene riportato uno schema generale della classificazione delle fibre

In questa tesi ci occuperemo di fibre naturali e in particolare del cotone, di origine vegetale, e della seta, di origine animale [1], le cui caratteristiche verranno descritte nelle seguenti pagine.

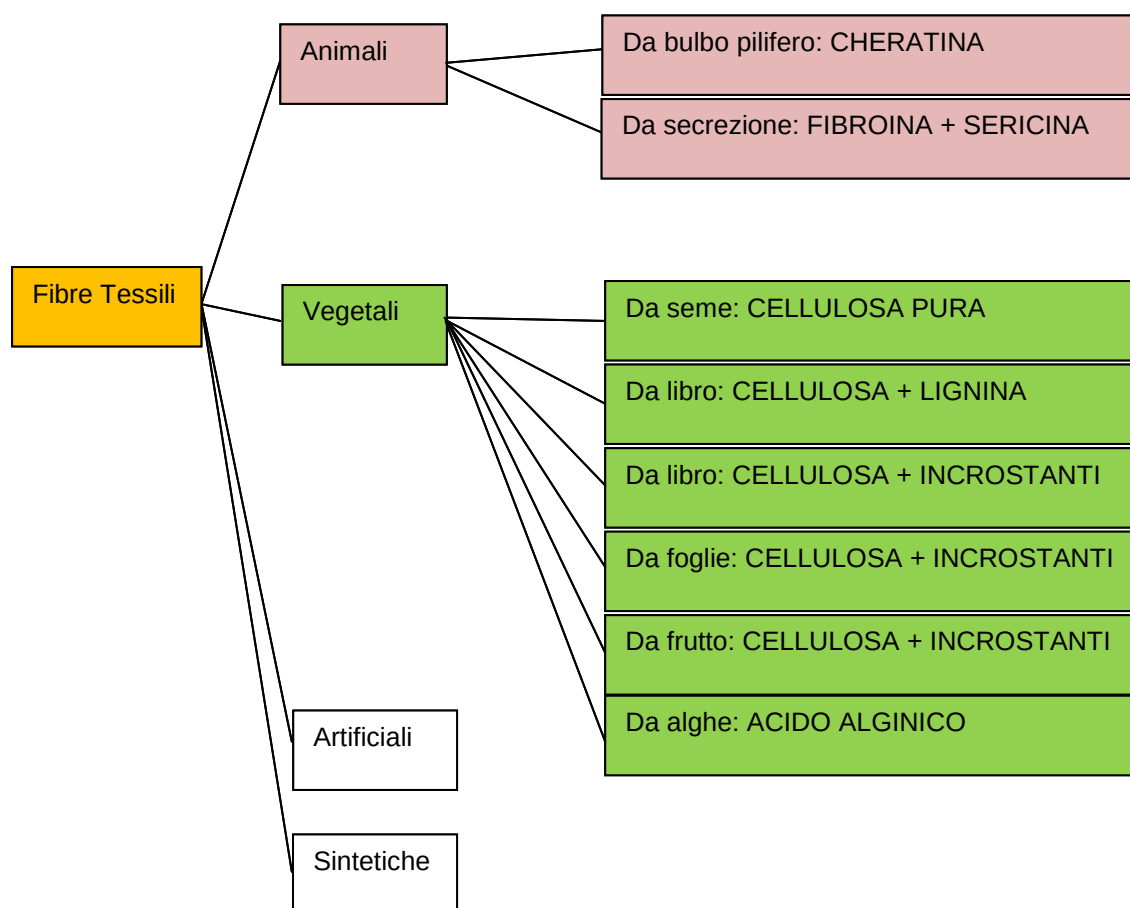


Figura 1.1: Classificazione fibre tessili [1, 2]

1.1 Il cotone

Il cotone, detto anche pelo vegetale, appartiene alle fibre vegetali ed è conosciuto sin da tempi antichissimi ma il suo utilizzo risulta poco diffuso in Europa fino al XVIII° secolo, quando, con l'avvento delle macchine filatrici e il passaggio alle produzioni industrializzate, diviene una delle fibre più utilizzate al mondo [3].

Il cotone viene ricavato da dicotiledoni, che appartengono alla famiglia delle *Malvaceae*, genere *Gossypium*. Le varietà attualmente maggiormente coltivate per il settore tessile commerciale sono:

- *Gossypium Arboreum*
- *Gossypium Herbaceum*
- *Gossypium Hirsutum*
- *Gossypium Barbadense*
- *Gossypium Peruvianum* o *Religiosum*
- *Gossypium Vitifolium*
- *Gossypium Brasiliensis*
- *Gossypium Sakellaridis*

A seguito della fioritura, la pianta produce dei frutti a forma di capsule (figura 1.2 a) costituite al loro interno da un numero di logge variabili da 3 a 5 (figura 1.2 b). Le logge, ospitano i semi del frutto che, durante la maturazione della capsula, sviluppano una peluria che si avvolge su sé stessa e va a riempire tutto lo spazio disponibile all'interno dell'involucro. A maturazione ultimata avviene la deiscenza della capsula e le fibre, che erano al suo interno, fuoriescono distendendosi e liberando la bambagia (figura 1.2 c) [4].

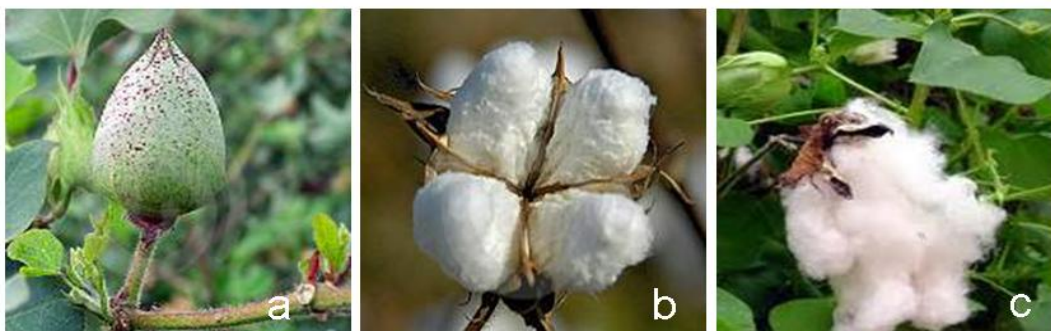


Figura 1.2: Immagini relative alla fase di maturazione della pianta di cotone: a) frutto a capsula*; b) deiscenza della capsula di fibre -bambagia- ***; c) Capsula matura aperta costituita da quattro logge. **

*

* Figura 1.2 a) foto Rcmathiraj (<http://it.dreamstime.com>),

** figura 1.2 b) Foto Eyemark (<http://it.dreamstime.com>),

*** figura 1.3 c) Mo Fayyaz (www.botany.wisc.edu)

La figura 1.3 illustra in immagini il processo di crescita delle fibre del cotone, in genere suddiviso in cinque fasi [1, 5]:

- a) Iniziazione
- b) Allungamento della cellula e formazione della cuticola e della parete primaria
- c) Deposizione della parete primaria
- d) Deposizione della parete secondaria
- e) Maturazione

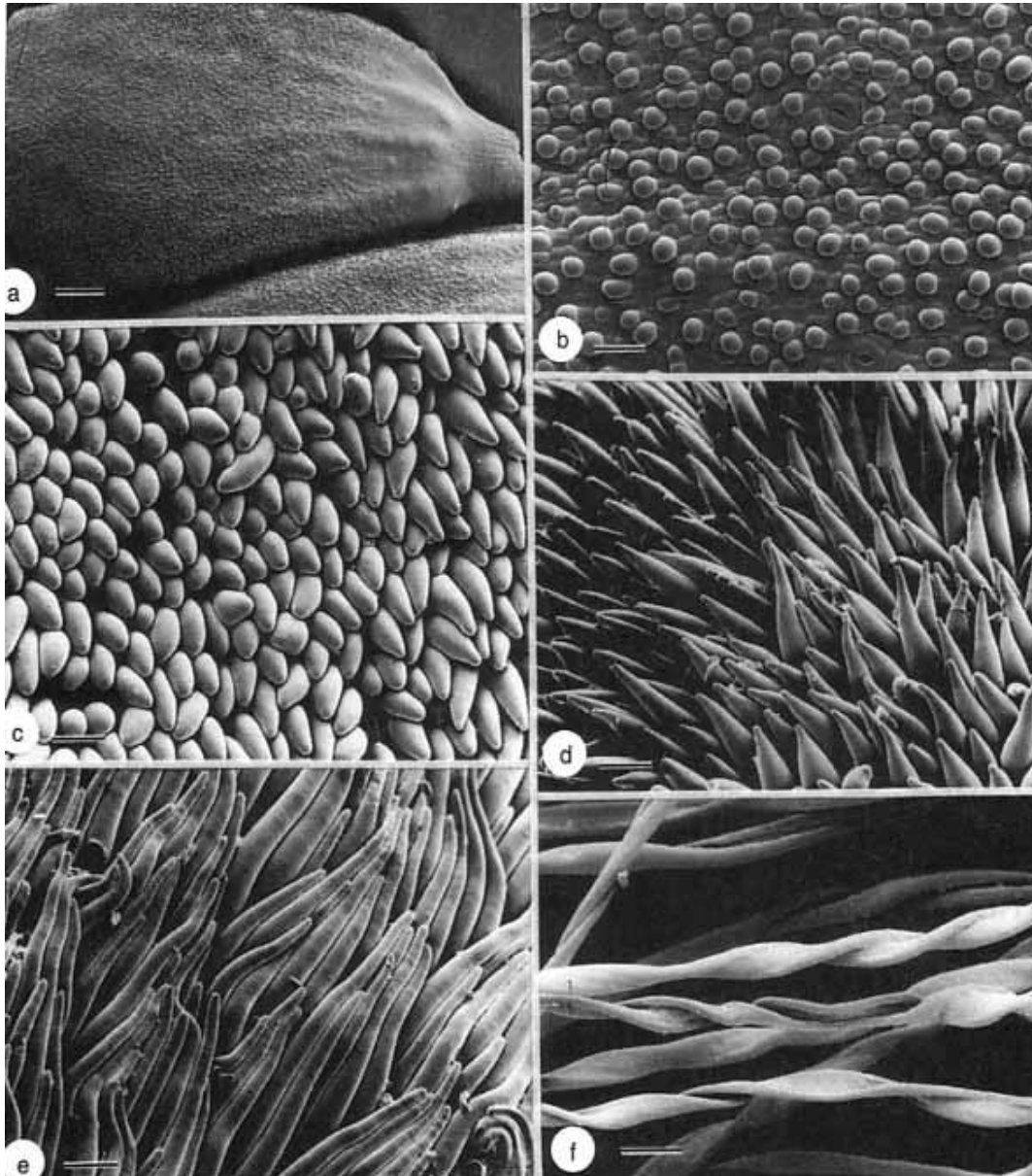


Figura 1.3: immagini SEM delle varie fasi di sviluppo delle fibre di cotone:

- a) ovulo di cotone il giorno della fioritura;
 - b) fibre iniziali (primordia), il giorno della fioritura;
 - c) fibre di cotone all'inizio del giorno dopo quello della fioritura;
 - d) fibre di cotone alla fine del giorno dopo quello della fioritura;
 - e) fibre di cotone tre giorni dopo quello della fioritura;
 - f) fibre di cotone mature (circa 48 giorni dal giorno della fioritura);
- Scala delle barre: 200 μm in (a), 30 μm in (b-f) [1, 5]

1.1.1 Struttura morfologica

La struttura morfologica di una fibra tessile è un elemento fondamentale per identificarne la natura (naturale, artificiale o sintetica) e per capire se ha subito determinati processi di lavorazione come ad esempio la mercerizzazione per il cotone o la sgommatura per la seta. Per struttura morfologica s'intende la definizione delle caratteristiche fisiche rilevabili nella fibra tra cui il colore, la forma e la sezione trasversale e longitudinale della fibra.

Nel caso del cotone, il colore dipende dalla sua provenienza geografica e può variare dal bianco per le qualità americane, al giallognolo di quelle egiziane fino ad arrivare al rossiccio in quelle cinesi.

All'osservazione al microscopio in luce polarizzata, le fibre del cotone si presentano come un unico pelo vegetale unicellulare avente forma tubolare, caratterizzato da un'estremità libera e una ancorata alla superficie esterna del seme. La lunghezza del pelo è variabile da 10 (per le varietà orientali) a 50mm (per quelle americane) e il diametro delle fibre è variabile da 12 a 40µm, con un rapporto lunghezza/diametro 1000-1500 [3, 6].

Il filamento di cotone in sezione trasversale è formato essenzialmente da 4 parti (figura 1.4) che vengono chiamate *cuticola*, *parete primaria*, *parete secondaria* e *lume*. La *cuticola* (0,05 µm) è una membrana che normalmente non appare se non si immerge la fibra nel *Reattivo di Schweitzer** ed è composta essenzialmente da cere, pectine, cutina, suberina e piccole quantità di proteine. Lo strato sul quale aderisce la cuticola è la *parete primaria* (0,4 µm). Composta da cellulosa ed emicellulosa, la parete primaria si presenta come una struttura a rete (composta da microfibrille cristalline) disposta trasversalmente rispetto all'asse della fibra. Continuando a procedere verso l'interno della fibra si incontra un terzo strato detto *parete secondaria* (8-10 µm) formata da strati concentrici. Nella parte più centrale della fibra si trova il *lume*, di dimensione variabile a seconda delle qualità del cotone. Il lume è ciò che resta del filamento protoplasmatico che, nel periodo dello sviluppo della cellula fibrillare, condensa gli zuccheri prodotti dalla fotosintesi in macromolecole di cellulosa. Contiene sostanze non cellulosiche di natura proteica che vengono idrolizzate con enzimi proteolitici come la tripsina [1, 4, 7].

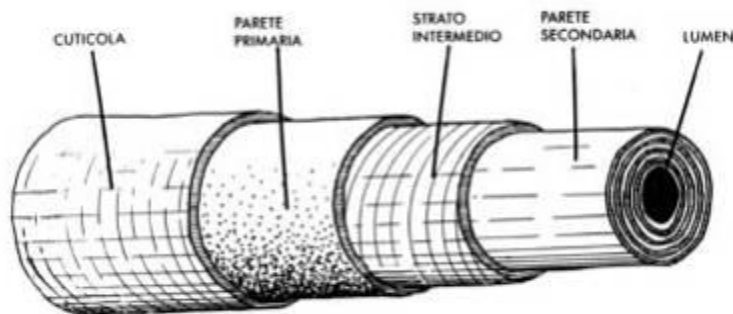


Figura 1.4: Struttura fibra di cotone.

<http://www.lammatest.rete.toscana.it/lammatest/hbin/fibrenaturali-vegetali.php>

* *Reattivo di Schweitzer* è un ossido idrato di rame sciolto in ammoniaca, lo si può preparare in più modi. Ad esempio, si disciolgono in 100 cm³ d'acqua 10 g di CuSO₄·5H₂O e si aggiungono ad ammoniaca fino a che il precipitato che va formandosi si ridiscioglie. Successivamente si precipita con poca soluzione di idrato di sodio al 10% l'idrato di rame sciolto precedentemente in ammoniaca; si raccoglie il precipitato, lo si lava ed ancora umido lo si discioglie in ammoniaca concentrata. Questo reattivo viene assorbito solo dalla parte interna della fibra provocandone il rigonfiamento, a causa di ciò la cuticola, anche se molto elastica si rompe; scioglie la cellulosa ma non le membrane lignificate o suberificate e neppure le fibre animali [3, 4].

Nelle pagine successive vengono presentate delle schede che riassumono ed evidenziano le diverse caratteristiche del cotone greggio e del cotone che ha subito un processo di mercerizzazione*. Grazie ad immagini effettuate attraverso il microscopio elettronico, si possono apprezzare le differenze sia della sezione longitudinale delle fibre che di quella trasversale.

* Particolare lavorazione a cui il cotone è sottoposto che prende il nome dal chimico inglese John Mercer che per primo l'ha brevettata per simulare il processo che già veniva effettuato sul lino che prevedeva la sbianca e la nobilitazione delle matasse tramite bollitura e l'aggiunta di sostanze mordenti. Il metodo prevede il trattamento del cotone in condizioni di trazione con alcali (solitamente idrossido di sodio) a 30° Bé (Baumé) e poi viene sciacquata abbondantemente. Con questo trattamento il cotone diviene tenace ed assume una lucentezza quasi sericea simile al rayon o al ramiè. Il cotone subisce questo processo di mercerizzazione per essere più reattivo nei confronti delle tinture e quindi dare la caratteristica al tessuto di prendere meglio il colore con notevole risparmio di colorante stesso. [3]

AL MICROSCOPIO [2.1][2.9]

COTONE GREGGIO

**Sezione
longitudinale**

I peli del cotone sono sempre ben distinti e non si presentano mai raggruppati in fasci. Ogni singola fibra (figura 1.5) ha una struttura simile a quella di un *nastro avvolto* a spirale, lungo il suo asse longitudinale, con andamento largo o stretto. Gli avvolgimenti sono in senso sinistrorso intervallati di tanto in tanto da zone prive di spirali e brevi tratti (non più di 5 o 6 avvolgimenti) in senso destrorso [6].

La fibra ha un diametro costante per $\frac{3}{4}$ della sua lunghezza e poi si restringe, assumendo una forma cilindrica che va assottigliandosi senza avvolgimenti fino ad arrivare all'estremità del pelo¹.

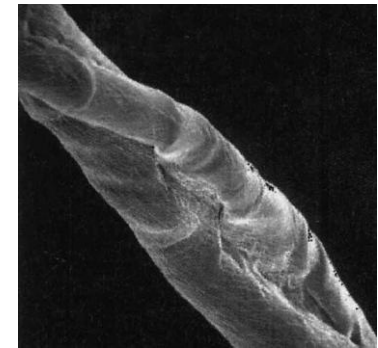


Figura 1.5: Micrografia elettronica fibra di cotone disidratata [1].

**Sezione
trasversale**

Anche le sezioni del cotone maturo (figura 1.6), come le fibre, sono ben isolate. La forma della sezione è variabile, si possono notare contorni ellissoidi, ovali, o a forma di S. In tutte le sezioni si distinguono bene i contorni del lume e delle pareti.

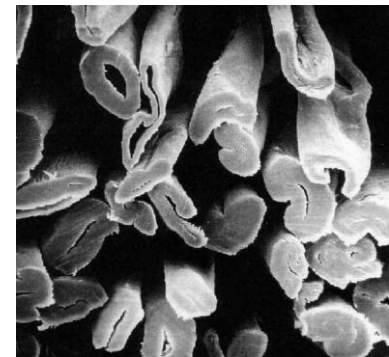


Figura 1.6: micrografia elettronica sezione trasversale fibra di cotone disidratata [1].

¹ <http://msa.ars.usda.gov/la/srrc/cotton/cotupcl.html> (2003)

COTONE MERCERIZZATO¹**Sezione
longitudinale**

Le fibre si presentano come esili cilindri lucenti e regolari aventi pareti lisce e pressochè prive di avvolgimenti. Il canale è quasi del tutto assente o mostrano un lume lineare che in qualche tratto può scomparire.
È privo di cuticola che ricopre le fibre in quanto i vari trattamenti subiti l'hanno compromessa. Figura 1.7

**Figura 1.9 Manca
immagine fibra di cotone
mercerizzato**

**Sezione
trasversale**

Le sezioni hanno forma circolare e al centro si nota un lume puntiforme o del tutto assente. Figura 1.8

**Figura 1.10 Manca
immagine sezione
trasversale**

Tabella 1.1 visione al microscopio cotone

1.1.2 Composizione chimica e proprietà chimico-fisiche del cotone

Il cotone è composto principalmente da cellulosa e da sostanze minori dette incrostanti quali ad esempio la lignina, la ligninocellulosa, le sostanze pectiche, la cutina e le sostanze resinose.

La cellulosa è un polisaccaride superiore con formula bruta $(C_6H_{10}O_5)_n$ che per idrolisi completa può essere trasformato in glucosio $(C_6H_{12}O_5)$.

La cellulosa si ottiene in natura per policondensazione di unità cellobiosio attraverso legami intermolecolari tra il carbonio 1 di una molecola di glucopiranosio, che presenta un ossidrilico, e il carbonio 4 di un altro glucopiranosio con lo stesso tipo di sostituito. Dalla policondensazione, si formano dei legami a ponte di ossigeno trasversi detti β 1-4 glicosidici tra diversi monomeri di cellulosa. (figura 1.9) [2, 4].

*

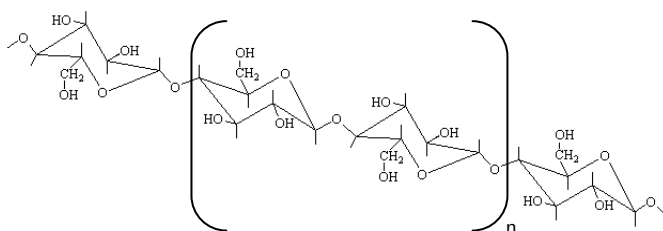


Figura 1.9: Struttura della cellulosa reale forma lineare

Il numero di unità monomeriche, che viene definito come il grado di polimerizzazione medio n , varia a seconda del vegetale dal quale la fibra è stata ricavata (ad es. abete $n=600$; cotone grezzo $n=2100$; linters di cotone $n=3000$) e determina caratteristiche chimico-fisiche decisamente diverse tra fibra e fibra.

Molto importante oltre al grado di polimerizzazione della fibra è il grado di cristallinità che dipende dalla disposizione delle singole catene polimeriche all'interno e lungo l'asse della fibra stessa. Le zone cristalline di una fibra tessile sono zone ordinate ovvero zone in cui le catene di macromolecole si dispongono in modo ordinato. Le zone invece in cui le catene di macromolecole si dispongono in modo disordinato, cioè senza allineamento, sono dette zone amorphe. Dal grado di cristallinità di una fibra dipendono molte delle caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche della fibra stessa. Ad esempio le zone cristalline consentono alla fibra di manifestare la sua resistenza meccanica, mentre le zone amorphe consentono l'assorbimento dell'acqua e delle sostanze chimiche permettendo alla fibra di essere tingibile.

Nel caso specifico del cotone, all'interno delle singole catene polimeriche si instaurano, favoriti dai legami β 1-4 glicosidici, dei legami idrogeno *intramolecolari* tra singole molecole di glucosio e legami *intermolecolari* tra molecole adiacenti che appartengono a catene diverse (figura 1.10). Ne derivano fasci di catene polimeriche detti *fibrille elementari* (0,05 μm), che si possono poi unire tra di loro originando degli aggregati superiori detti *microfibrille* (0,5 μm). Le *microfibrille* costituiscono delle strutture robuste ed insolubili in acqua che

*

assieme ad emicellulose, pectine e proteine strutturali creano le *macrofibrille* (5 μm) costituenti essenziali dello scheletro della parete cellulare vegetale [8].

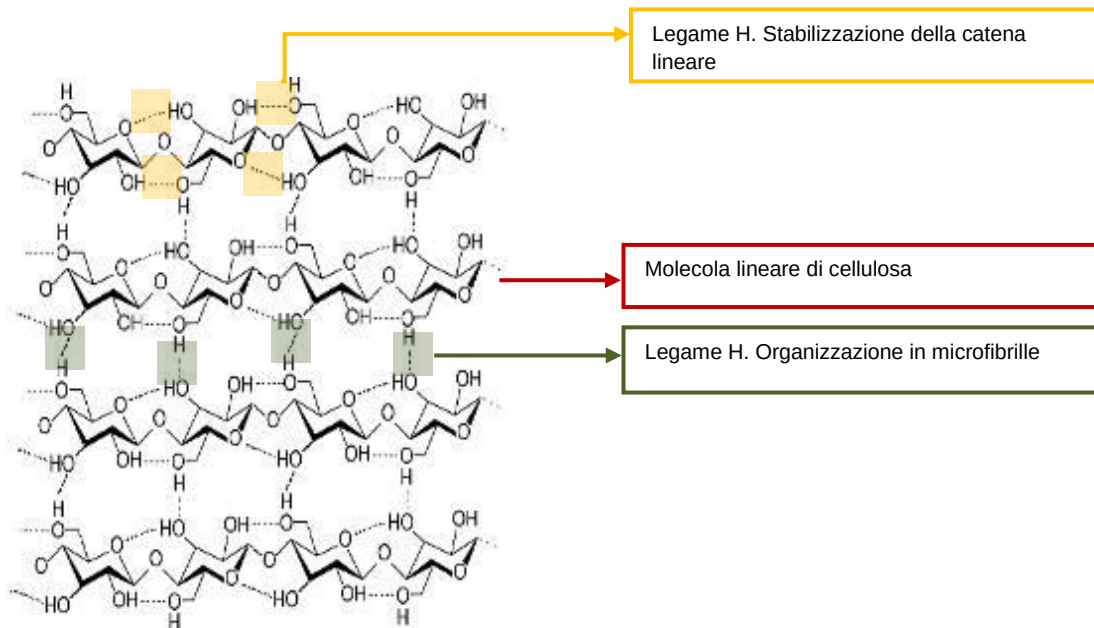


Figura 1.10: Legami intermolecolari cellulosa

In relazione a come si dispongono le fibrille elementari all'interno delle microfibrille si potranno creare delle zone ordinate e delle altre disordinate nelle fibre. Le parti in cui le fibrille elementari sono disposte parallelamente all'asse longitudinale delle fibre sono zone, a maggior ordine, definite cristalline mentre quelle in cui le fibrille elementari non hanno alcun grado di ordine formano le zone amorse (figura 1.11). Sempre in figura 1.11 è possibile notare come si aggregano le molecole di cellulosa nativa (detta anche *Cellulosa I*) nel reticolo cristallino [1, 8].

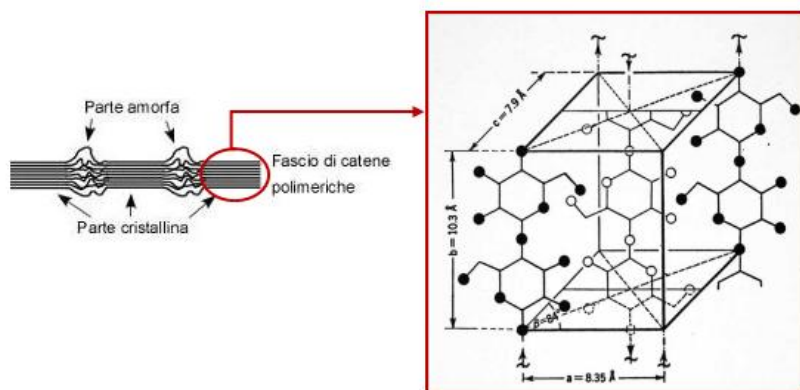


Figura 1.11: Parte amorfa e cristallina in una micro fibrilla* e corrispondente cella elementare a simmetria monoclinale avente le dimensioni $a = 8,35 \text{ \AA}$, $b = 10,3 \text{ \AA}$, $c = 7,9 \text{ \AA}$ e $\beta = 84^\circ$. [9] [10]

* Figura 1.11 http://it.wikipedia.org/wiki/File:Catene_cellulosiche.jpg

In tabella 1.2 sono riassunte le principali caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche delle fibre vegetali tra cui il cotone, come il peso specifico, la tenacità, l'allungamento a rottura, il recupero elastico e il comportamento che hanno nei confronti di parametri ambientali importanti come l'umidità (tasso di ripresa) e la temperatura (comportamento al calore e alla fiamma).

PRINCIPALI PROPRIETÀ DELLE FIBRE VEGETALI	
Peso specifico g/cm ³	Cotone: 1,4-1,5 g/cm ³ Cellulosa pura: 1,37 g/cm ³
Tasso di ripresa %	Relativamente basso per il cotone, intorno all'8,5%; il lino intorno al 12% mentre la canapa circa il 14%
Tenacità g/den	A secco g/dtex: cotone 3-5; lino 5-6,5 canapa 5 A umido g/dtex: cotone 120-130; lino 110; canapa 110
Allungamento a rottura %	A secco %: cotone 3-7 lino 2-4 canapa 3-5 A umido %: cotone 110-120 lino 110 canapa 110
Recupero elastico %	Per un allungamento del 2 % = 70 % Risulta essere un materiale relativamente anelastico, ha modulo elastico di gran lunga inferiore rispetto a quello del lino e delle altre fibre vegetali
Comportamento al calore	Fino a 100°C non subisce alterazioni, 120°C mantenuto per molte ore ingiallisce 150°C diventa bruno perché iniziano a decomporsi le molecole di cellulosa per opera del vapore d'acqua 200°C carbonizza completamente
Comportamento alla fiamma	Brucia facilmente con una fiamma viva e rilasciando un odore di carta bruciata. Lascia una cenere non troppo voluminosa e facilmente polverizzabile
Proprietà elettriche	Fibra antistatica
Igroscopicità	Assorbe bene l'umidità, la quantità d'acqua che può trattenere varia secondo la lavorazione che ha subito la fibra

Tabella 1.2 proprietà chimico-fisiche del cotone

1.2 La seta

La seta è prodotta dalla bava di alcuni lepidotteri allo stato larvale. La fibra di seta è infatti creata dalla loro bava che asciugando solidifica e va a costituire il bozzolo di protezione per la loro maturazione a crisalidi e farfalle (figura 1.12).

La seta comune più diffusa commercialmente è ricavata dal lepidottero *Bombix Mori* detto anche *Filugello* (dal latino follicellus, sacchetto) o *Bombice del gelso che da tempi lontanissimi è stato addomesticato per essere allevato*. In natura ci sono altri tipi di sete prodotte da bruchi selvatici (*Antherae yamamay*, *A. Pernyi*, *A. Mylitta*) che non sono tuttavia interessanti dal punto di vista commerciale o industriale [6].

Il ciclo dello sviluppo* del Bombice è riassumibile in sette fasi [3]:

- Deposizione delle uova da parte della femmina. Da 400 a 500, di colore giallo più meno intenso, con diametro massimo di 1 mm. Forma lenticolare per le varietà europee e a fuso per quelle orientali
- Sviluppo embrionale. Dopo 2-3 giorni i bozzoli subiscono una variazione del colore da giallo a rosso fino a divenire grigi, verso il 4-5 giorno lo sviluppo si rallenta e si arresta. Inizia un lungo periodo di riposo che dura fino all'aprile dell'anno successivo alla deposizione, quando le temperature tornano sopra i 15°C e prosegue fino alla nascita della larva.
- Nascita dei bachi. Le larve alla nascita sono scure, lunghe 3mm e pesano circa 0,50mg, sono voracissime e devono essere nutrite 5-6 volte al giorno. Il Bombice da gelso è così detto perché si ciba solo delle foglie dell'albero del gelso.
- Prima muta. Dopo 5-6 giorni la larva cessa di mangiare e resta immobile per 24 ore, tempo nel quale compie la muta. Durante questa fase il baco cambia pelle, trachea ed intestino al fine di aumentare la capacità di assimilazione del cibo.
- Mute successive. Risvegliandosi dal periodo di riposo della prima muta, riprende a mangiare e a scansione di 4-5 giorni compie in tutto 4 mute (o quattro dormite).
- Tessitura del bozzolo. Finite le mute, il baco è maturo e ha mediamente una lunghezza di 9 cm e un peso di 4g con una pigmentazione variabile. A questo punto il baco non si nutre più e inizia la così detta "salita al bosco" in cui, dopo essersi ancorato ad un punto (originalmente ad un ramo del gelso), il baco è pronto a tessere il bozzolo; questa fase dura circa 3-4 giorni.
- Sfarfallamento. Il baco impiega 15-20 giorni per trasformarsi in crisalide, passato questo periodo esce dal bozzolo sotto forma di un insetto perfetto. Per compiere questa operazione, il baco secerne un liquido alcalino a base di carbonato di sodio e fosfato di potassio che scioglie la sericina dei fili e permette di aprirsi un varco. Tale operazione porta inevitabilmente alla rottura dei fili. Il bozzolo viene perciò forato e reso inutilizzabile. E' per questo motivo che gli allevatori devono provvedere all'uccisione dell'insetto (col calore secco o umido) prima dello sfarfallamento, lasciando solo alcuni esemplari per l'accoppiamento e la riproduzione.

* Il ciclo dello sviluppo preso in considerazione è quello delle razze annuali monovoltine, tuttavia esistono razze che si caratterizzano per avere più generazioni e sviluppo embrionale continuo con diapausa sempre più breve che sono dette bivoltine, trivoltine, tetravoltine o polivoltine. [3]

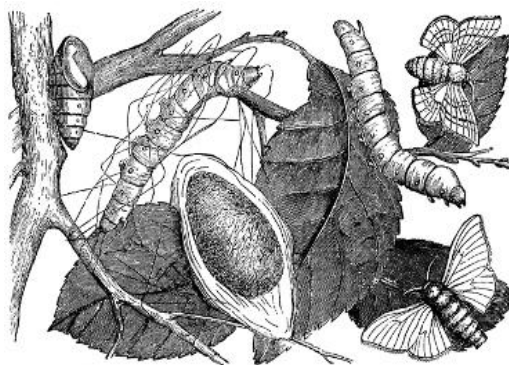


Figura 1.12: Ciclo di vita del Filugello

*

Il bozzolo è formato da un unico filamento che viene tessuto dal baco con movimenti molto precisi. La bava che secerne il baco è fluida all'interno del corpo dell'animale ma non appena entra in contatto con l'aria si solidifica passando dallo stato amorfo a quello cristallino a causa degli stiramenti meccanici ai quali è sottoposta. Le bavelle infatti, se esaminate attraverso i raggi X risultano formate da un fascio di cristalliti paralleli all'asse della bava. I filamenti di bava che compongono il bozzolo vengono depositi sotto forma di anse orizzontali a guisa di 8 in righe successive in maniera da non sovrapporsi troppo le une sulle altre come mostrato in figura 1.13. Verso l'interno gli strati di bava si infittiscono ed agglutinano fra loro al punto che la faccia interna risulta come cartilaginosa e non è più dipanabile [3].

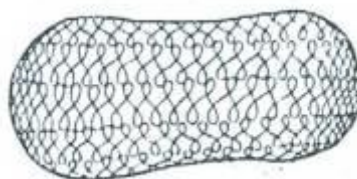


Figura 1. 13 Distribuzione schematica delle anse di bava del bozzolo [3]

1.2.1 Struttura morfologica

I filamenti serici di seta greggia sono di colore variabile dal bianco al verdognolo e sono formati da due bavelle di natura proteica la fibroina[†], avvolte da una camicia il cui costituente principale è la sericina, anch'essa una proteina dall'aspetto gommoso.

Le bavelle di fibroina per essere liberate dal rivestimento di sericina, che può ostacolare i processi di lavorazione e da cui si ottiene una seta ruvida al tatto, devono essere sottoposte al processo di sgommatura (detto anche purga). La seta greggia viene trattata con saponi ed alcali a temperature comprese tra 65 e 95°C o con enzimi idrolitici a temperature inferiori.

La perdita di peso si aggira dal 22 al 30% e da questo processo si ottiene la *seta cotta o sgommata*. Se la perdita di peso risulta inferiore (12-15%) si ottiene una sgommatura blanda e la seta è detta *seta raddolcita o souple* che si presenta al tatto ancora un po' ruvida [11].

Solitamente al processo di sgommatura, segue un trattamento che serve per far recuperare almeno in parte la perdita di peso avvenuta con il trattamento di sgommatura. Questo trattamento viene denominato carica della seta e viene ottenuto immergendo le fibre in

* Figura 1.13 http://etc.usf.edu/clipart/52600/52619/52619_silkworms.htm

[†] sostanza proteica facente parte delle scleroproteine: proteine fibrose, insolubili in acqua in ambiente neutro, difficilmente attaccabili da agenti chimici

soluzioni di sostanze organiche (generalmente tanniche) o con reattivi inorganici come sali di stagno, ferro o alluminio; oggi si usano quasi esclusivamente dei polimeri (acrilammidici) aggraffati alla fibrina. A seguito di questo processo i filamenti presentano diametro maggiore rispetto a quello della seta grezza e la superficie delle fibre presenta evidenti sfibrillature*.

In tabella 1.3 sono evidenziate le diverse caratteristiche della seta greggia e della seta che ha subito un processo di sgommatura. Grazie ad immagini di letteratura ottenute al microscopio elettronico, si possono apprezzare le differenze sia della sezione longitudinale delle fibre che di quella trasversale.

* per sfibrillazione si intende la suddivisione della fibra o il discostamento da essa di alcuni dei sottili elementi che la costituiscono

AL MICROSCOPIO [2.1][2.9]

SETA GREGGIA

Sezione longitudinale

Formata da due esili cilindri che corrono parallelamente gli uni agli altri quasi aderenti. I cilindri si presentano trasparenti, senza striature longitudinali o trasversali avvolti da sericina che riempie gli spazi liberi tra i due (figura 1.14)

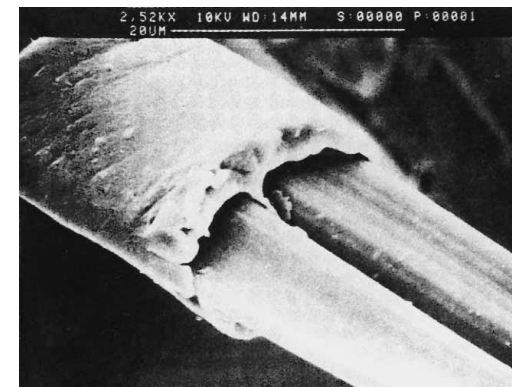


Figura 1.14: particolare bavelle di fibroina ancora attorniate dal loro involucro di sericina [12]

Sezione trasversale

Le fibre sono caratterizzate da una forma triangolare e sono unite a due a due avvolte da un sottile strato di sericina

manca figura 1.15 sezione trasversale fibra di seta greggia

Figura 1.15: micrografia elettronica di una sezione trasversale di fibra di seta

SETA SGOMMATA**DI ALLEVAMENTO**

Ciascun filamento ha l'aspetto di un cilindro sottile trasparente e liscio che non presenta struttura. Non sono presenti canali e neppure strie longitudinali o trasversali. Hanno diametro costante lungo tutta la fibra e presentano ogni tanto dei leggeri rigonfiamenti (figura 1.16⁺⁺⁺)

Sezione longitudinale**SELVATICA**

I filamenti si presentano come nastri solcati da numerose strie sottili longitudinali. In qualche zona appaiono più marcate, disposte in senso obliquo, si ha l'impressione che la fibra sia attraversata da bande oblique più scure.

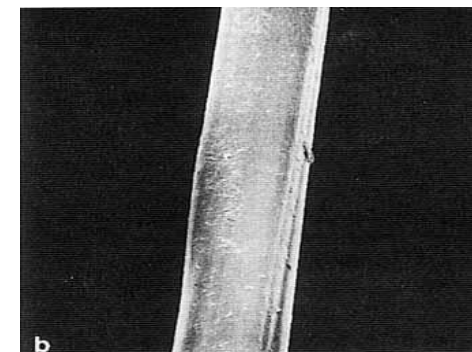


Figura 1.16: micrografia elettronica di una fibra di seta sgommata

DI ALLEVAMENTO

Le sezioni sono sempre isolate mai appiattite o circondate dalla sericina. La forma è generalmente triangolare con il lato minore rettilineo, un lato concavo e l'altro convesso e gli angoli sono arrotondati (figura 1.17^{##})

Sezione trasversale**SELVATICA**

Hanno diametro maggiore rispetto a quelle ricavate da bachi di allevamento (40μm). Le sezioni sono sempre isolate e hanno una forma triangolare caratteristica. L'osservazione della superficie dei triangoli permette di distinguere la struttura fibrillare della seta.

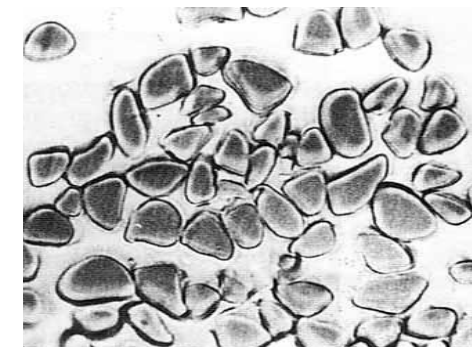


Figura 1.17 Sezione trasversale di fibre di seta sgommata

Tabella 1.3 caratteristiche microscopiche seta e seta sgommata

⁺⁺⁺ Figura 1.16 e 1.17 «New Materials and Technologies for the Conservation and Restoration of Cultural Heritage Consisting of Natural Fibrous Polymers», pag. 17, edited by E. Martuscelli, L. D'Orazio, CNR – Naples, Italy (2002)

1.2.2 Chimica della seta e proprietà

La seta è costituita essenzialmente da fibroina e sericina con la presenza di altri composti minori di tipo organico quali: sostanze grasse o cerosi, pigmenti di origine carotenoide, ecc. La tabella 1.4 riassume i composti principali che si riscontrano nella seta e la loro presenza in percentuale.

COMPOSTO	PERCENTUALE
Fibroina	70-80%
Sericina	20-28%
Sostanze grasse e cerosi	1-2%
Sostanze organiche (minerali)	0,3-0,5% (0,3-1,6%)
Pigmenti (carotinoidi)	0,1%

Tabella 1.4 composizione chimica della seta DA DOVE HO PRESO STA TABELLA??????

Considerando la natura proteica della seta è possibile descriverla in base alla sequenza amminoacidica, struttura primaria, e attraverso le strutture superiori più complesse formate dai ripiegamenti intercatena e da legami tra sub-unità uguali o diverse.

Struttura primaria

In tabella 1.5 viene riportata la composizione amminoacidica delle due proteine costituenti la seta grezza, analizzate in seguito a idrolisi acida [13].

Amminoacido	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{R} \end{array}$	Fibroina(%)	Sericina(%)
Glicina (Gly)	-H	42,9	13,5
Alanina (Ala)	-CH ₃	30,0	6,0
Serina (Ser)	-CH ₂ -OH	12,2	33,4
Tirosina (Tyr)	-CH ₂ -Ph-OH	4,8	2,6
Valina (Val)	-CH-(CH ₃) ₂	2,5	2,8
Acido Aspartico (Asp)	-CH ₂ -COOH	1,9	16,7
Acido Glutammico (Glu)	-CH ₂ -CH ₂ -COOH	1,4	4,4
Treonina (Thr)	-CH-OH-CH ₃	0,9	0,53
Fenilalanina (Phe)	-CH ₂ -Ph	0,67	0,53
Isoleucina (Ile)	-CH-(CH ₃)(CH ₂ CH ₃)	0,64	0,72
Leucina (Leu)	-CH ₂ -CH-(CH ₃) ₂	0,55	1,1
Arginina (Arg)	-(CH ₂) ₃ -NH-C-(NH ₂) ₂ ⁺	0,51	3,1
Prolina (Pro)	*	0,45	0,68
Lisina (Lys)	-(CH ₂) ₄ -NH ₂	0,38	3,3
Istidina	*	0,19	1,3
Metionina	-CH ₂ -CH ₂ -S-CH ₃	0,1	0,04
Cistina	-CH ₂ -S-S-CH ₂	0,03	--

Tabella 1.5 composizione amminoacidica fibroina e sericina [13]

*Strutture eterocicliche

**Valori espressi in percentuale

La sericina, attraverso il processo di sgommatura, viene eliminata e le fibre di seta sono quindi costituite quasi completamente da fibroina. Le macromolecole di fibroina presentano al loro interno zone amorfe e zone cristalline, caratterizzate dalla presenza di determinati amminoacidi che compongono quel tratto di catena.

Nella fibroina è possibile individuare tre fasi cristalline [13]:

- **fase I**, che costituisce il 60% della molecola, è caratterizzata da una struttura altamente cristallina ed è costituita principalmente da glicina, alanina, serina e tirosina;

- **fase II** che costituisce circa il 30% della molecola in cui predominano glicina, alanina, tirosina e valina;
- **fase III**, costituisce la parte amorfa della molecola ed è caratterizzata soprattutto da amminoacidi con gruppi laterali voluminosi o ionici. E' a queste zone che si deve l'elasticità della seta. Amminoacidi con gruppi laterali ingombranti facilitano i movimenti delle fibre altrimenti impediti dai ponti idrogeno intercatena.

Strutture superiori

Le lunghe catene polipeptidiche sono orientate parallelamente all'asse della fibra e gli amminoacidi principali presenti lungo la catena sono glicina e alanina (figura 1.8*). I legami che tengono unite queste catene sono legami deboli a idrogeno o legami salini.

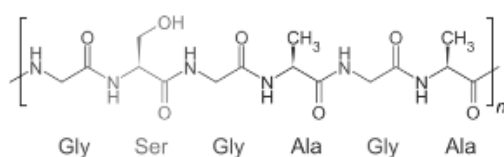


Figura 1.21 Struttura primaria fibroina

La fibrina ha una struttura pressoché lineare che non si avvolge a formare α – eliche, ma si dispone a zig-zag con i sostituenti a lato come in un foglio pieghettato. Le catene che sono disposte planarmente lungo l'asse della fibra, presentano legami a idrogeno ed elettrostatici con le catene contigue. Questa struttura consente una elevata interazione fra le molecole, con una elevata cristallinità che causa maggiore rigidità e minore rigidità rispetto alle fibre da pelo come la lana.

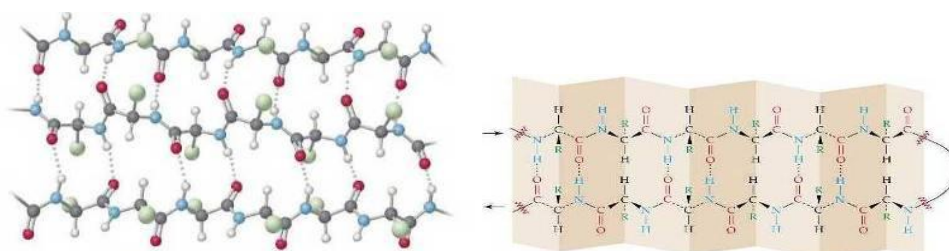


Figura 1.19: Struttura spaziale fibroina

* Figura 1.18 http://en.wikipedia.org/wiki/File:Silk_fibroin_primary_structure.svg

Figura 1.19 http://bio1151b.nicerweb.com/Locked/media/ch05/protein_beta.html

Nella tabella 1.6 vengono riassunte le principali caratteristiche chimico-fisiche e meccaniche delle fibre di seta e il suo comportamento in relazione ai parametri ambientali.

PRINCIPALI PROPRIETÀ DELLA SETA	
Peso specifico	Seta grezza: 1,33 g/cm ³ Seta sgommata: 1,25 g/cm ³
Tasso di ripresa	11,00%
Tenacità	Seta condizionata: 2,8-5,2 g/den Seta bagnata: 2,4-4,9 g/den
Allungamento a rottura	Seta condizionata: 13-25% Seta bagnata: 5-30%
Recupero elastico	Per un allungamento del 2 % = 92 % Per un allungamento del 5 % = 52 %
Comportamento al calore	Fino a 130°C non subisce alterazioni, 130-150°C ingiallisce, diviene fragile 170°C carbonizza completamente
Comportamento alla fiamma	Brucia lentamente emanando un debole odore di corno bruciato, rigonfia e emana vapori con reazione alcalina per la presenza di ammoniaca e lascia un residuo carbonioso sferoidale
Proprietà elettriche	Cattiva conduttrice di elettricità

Tabella 1.6 proprietà chimico fisiche della seta

Bibliografia

- [1] Pedemonte E., Princi E., Vicini S., *Fibre Tessuti e Moda*, Venezia 2012
- [2] Quaglierini Carlo, *Manuale di Merceologia Tessile*, Bologna 2007
- [3] Giua Michele, *Trattato di Chimica Industriale Vol. VI Tomo 2*, Torino 1957-1963
- [4] Quaglierini Carlo, *Chimica delle fibre tessili*, Bologna 2012
- [5] D. M. Oosterhuis, J. Jernstedt, *Morphology and Anatomy of the Cotton Plant*, in «Cotton», New York 1999
- [6] Villavecchia G. V., *Trattato di Chimica Analitica*, Milano 1967
- [7] W. J. Roberts, *Cotton*, in «Encyclopedia of Textiles, Fibers, and Nonwoven Fabrics», New York 1984
- [8] Campanella L. e altri, *Chimica per l'arte*, Bologna 2011
- [9] *Enciclopedia of Textiles, Fibres, and Nonwoven Fabrics*, Editore M.Grayson, John Wiley and Sons, New York, pag. 525 (1984)
- [10] J. E. McIntyre, M. J. Denton, *Fibers*, in «Encyclopedia of Polymer Science and Engineering», vol. 6, pp 647-839, John Wiley and Sons, New York (1986)
- [11] V.G. Colombo, *Appunti di Tecnologia e Merceologia Serica*, Milano 1945
- [12] M. Romanò, G. Freddi, *Seta e microscopia a scansione*, in «Dipinti su tela», a cura di G. C. Scicolone, Nardini Editore, pp. 61-76, Firenze (1993).
- [13] Gian Maria Colonna, *Metodi per la valutazione dello stato di conservazione di manufatti in seta*, AA.VV. *Dipinti su tela e metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993

·2·

**CONSERVAZIONE DI TESSUTI DI
COTONE E SETA IN AMBIENTE
MUSEALE**

In questo capitolo si parlerà della conservazione dei tessuti di seta e cotone in ambiente museale, in particolare si svilupperanno le principali problematiche di degrado legate a condizioni ambientali e di mantenimento non idonee a tessuti storico-artistici. Sarà poi presentata una parte seconda parte riguardante il problema degli impolveramenti, in cui verranno definite le composizioni dei depositi in ambiente museale e le interazioni tra particolato atmosferico indoor e le fibre. Infine verranno esposte le linee guida legislative dettate dal Ministero dei Beni Culturali in termini di conservazione di manufatti tessili all'interno di aree espositive.

CONSERVAZIONE DEI TESSUTI DI COTONE E SETA IN AMBIENTE MUSEALE

I tessuti storici sono materiali particolarmente sensibili alle condizioni ambientali di conservazione. I processi di degrado e le relative cinetiche sono inoltre notevolmente influenzati dalla natura chimica delle fibre (naturali, artificiali, animali, etc.) che li compongono e dai processi tecnologici che hanno subito (ad es. tinture e colorazioni). Essenziale per la loro conservazione, sia per quanto riguarda le aree espositive che per le zone di deposito, è l'identificazione dei fattori di degrado, del rischio a loro associato in relazione con la natura del tessuto e le condizioni al contorno nonché del loro monitoraggio nel tempo in forza di una conservazione di tipo preventivo. Conservazione preventiva in quanto la messa in atto di condizioni ottimali di conservazione non è sempre realizzabile soprattutto all'interno di edifici storici, quali regge, palazzi civici e nobiliari, ville, complessi ecclesiastici, etc. ritenuti essi stessi sistemi complessi che spesso costituiscono beni culturali vincolati a particolari restrizioni e regole edilizie.

Di seguito verranno esposti i principali fattori di degrado per i tessuti, dando particolare spazio per quanto riguarda le polveri e il particolato che è il tema del presente studio, e le misure consigliate per minimizzare loro pericolosità.

2.1 Le condizioni ambientali sfavorevoli: problematiche per i tessuti e loro degrado

Per comprendere a pieno i processi di degrado che coinvolgono i tessuti di interesse storico-artistico è bene capire gli effetti che ciascuno di essi provoca su questi manufatti. I processi di degrado sono in genere legati a dei fattori che possono favorire o meno la loro formazione nel momento in cui le condizioni di conservazione discostano da quelle ideali o vi siano degli eventi particolari (alluvioni, infiltrazioni, ecc.).

Le principali cause di degrado dei tessuti sono legate agli inquinanti gassosi (organici ed inorganici), alle deposizioni (polveri, pollini, fibre, etc.), a fattori meccanici (tensioni dovute ad ancoraggi o particolari dettagli legati al tessuto stesso), alla luce (sia naturale che artificiale), alla temperatura e all'umidità (fattori strettamente connessi tra di loro), e ai biodeteriogeni [1]. A tutte queste cause, che agiscono spesso in maniera sinergica, si somma la presenza dell'ossigeno che innesca fenomeni ossidativi dei tessuti naturali e può in alcuni casi essere esso stesso un fattore accelerante del degrado funzionando da catalizzatore o acceleratore delle reazioni [2].

In seguito viene riportata una breve descrizione dei fattori di degrado rilevanti per i tessuti storico artistici al fine di comprendere in modo completo non solo la loro pericolosità ma anche lo stretto legame esistente tra essi.

2.1.1 Luce

La luce, in condizioni di assenza d'ossigeno, è responsabile di fenomeni fotodegradativi delle fibre tessili che provocano, scolorimenti, infragilimenti e conseguente variazione delle proprietà meccaniche. Come già accennato, la sensibilità delle fibre alla luce sarà variabile non solo in base alle caratteristiche stesse della luce ma anche alle caratteristiche chimico-fisico e alla natura della fibra stessa. I processi foto ossidativi vengono inoltre fortemente accelerati dalla presenza di una componente UV nello spettro della luce che illumina i manufatti e dalle condizioni di pH delle fibre, variabili secondo la natura delle fibre. [2,3].

All'interno delle fibre di origine naturale, le fibre proteiche sono in assoluto le più sensibili a processi degradativi legati alla luce. La maggiore predisposizione delle fibre proteiche al foto degradamento è dovuta alla presenza di gruppi cromofori, legati alle macromolecole componenti le fibre, che accelerano i processi di degrado. La configurazione degli orbitali molecolari di questi gruppi cromofori consente infatti delle transizioni elettroniche (del tipo $\pi \rightarrow \pi^*$, $n \rightarrow \sigma^*$, $n \rightarrow \pi^*$) dovute all'assorbimento di radiazione nel visibile e nel non lontano UV. La presenza di questi gruppi cromofori si può riscontrare anche negli additivi e in composti estranei che vengono incorporati durante la lavorazione dei tessuti [3-5]. Tra i tessuti di tipo proteico, la seta ad esempio tende a diventare fragile e ingiallire sensibilmente a causa di azioni fotodegradative.

Volendo andare ad indagare in maniera più accurata il processo di degrado legati alla luce è possibile individuare degli steps comuni a tutte le fibre e legati semplicemente a come la luce interagisce con le fibre componenti i tessuti. In primo luogo avviene l'assorbimento dei fotoni incidenti che danno luogo a molecole eccitate, successivamente, avviene il trasferimento di energia e la scissione della catena o di gruppi laterali. Si originano così dei macroradicali che provocano reazioni di depolimerizzazione o di reticolazione. I tipi di reazioni a cui possono dar luogo i radicali di neoformazione dipendono dalla temperatura di transizione vetrosa della fase amorfa della fibra (al di sotto della T_g il processo di depropagazione a monomero non può proseguire), e dalla presenza o assenza di atomi di idrogeno terziari lungo la catena macromolecolare [2].

Le fibre cellulosiche sono invece più resistenti alla luce rispetto a quelle proteiche ma non per questo esenti da problematiche. Le radiazioni che più pericolose per le macromolecole cellulosiche sono quelle con energia paragonabile a quella di alcuni legami primari presenti lungo le catene e cadono nella regione del vicino ultravioletto come si può vedere dalla figura 2.1 a) [6]. L'assorbimento preferenziale da parte della cellulosa delle radiazioni nella regione del vicino UV è dimostrata anche da spettri che mostrano l'assorbanza di composti che contengono cellulosa in funzione di varie lunghezze d'onda incidenti. Si può notare infatti come, man mano che ci si avvicina verso lunghezze d'onda paragonabili alla luce visibile, gli assorbimenti diminuiscono drasticamente (figura 2.1 b) [1,5,6].

L'assorbimento di radiazioni UV da parte della cellulosa innesca in genere una serie di reazioni fotochimiche basate sulla formazione di radicali liberi, che rappresentano, in presenza di ossigeno, la prima fase dei processi di foto-ossidazione della cellulosa. In assenza d'ossigeno, le molecole di cellulosa possono subire un processo di fotolisi diretta, che porta alla rottura dei legami C-C, C-O e C-H la cui energia di dissociazione è rispettivamente pari all'incirca a 335, 337, 418 J/mol [2,5].

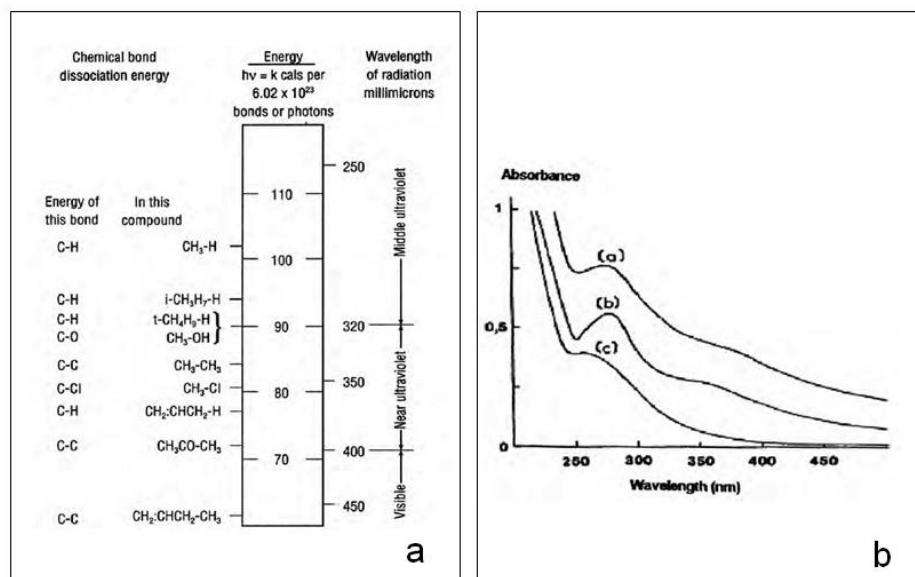


Figura 2.1 a) Diagramma che evidenzia l'energia di dissociazione di alcuni legami correlata alla lunghezza d'onda delle radiazioni incidenti [1.22].; b) Curve di assorbanza in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente (dal visibile al lontano ultra-violetto): a) legno; b) lignina; c) cellulosa [2.6]

2.1.2 Parametri termoigrometrici

Temperatura

La temperatura di per se non rappresenta un fattore di degrado, ai normali valori ambientali di conservazione, ma può essere un fattore rilevante quanto ad esempio viene associata con variazioni di umidità. La temperatura diventa fattore di degrado nel momento in cui i suoi valori divengono eccessivi o subisce delle variazioni cicliche, sia per la matrice tessile che per le eventuali tinture o decorazioni.

Tra le fibre tessili le più sensibili alla termo-degradazione sono quelle proteiche, mentre quelle cellulosiche sono generalmente più resistenti. In base alla stabilità delle fibre alla temperatura (termo stabilità) è possibile disporre le fibre in ordine decrescente: lino, cotone, lana, seta [7].

La temperatura può inoltre incidere sui fenomeni di invecchiamento chimico in seguito a particolari fasi di tessitura o lavorazione delle fibre stesse. I legami covalenti che costituiscono le macromolecole possono subire infatti dei processi di termolisi in assenza d'ossigeno tra i 150°C e i 500°C, differenti a seconda degli atomi coinvolti. I meccanismi responsabili della termolisi possono essere di due tipi in relazione ai punti del polimero che vengono attaccati [8]:

- scissioni dei legami della catena con conseguente formazione di prodotti volatili, monomeri e frammenti della catena in cui si notano le unità strutturali originali;
- reazioni che coinvolgono i sostituenti laterali prevedono conseguenti meccanismi di eliminazione e ciclizzazione del polimero costituente la fibra.

La temperatura a cui sono conservati i tessili può inoltre incidere notevolmente su fenomeni di invecchiamento fisico che è la conseguenza di una condizione di non equilibrio [4]. Le macromolecole che costituiscono le fibre, siano esse proteiche o cellulosiche, presentano fasi amorfe e fasi cristalline.

Quando un polimero viene tenuto per tempi relativamente lunghi ad una temperatura inferiore alla T_g^1 le macromolecole (o segmenti di esse), che si trovano nella fase amorfa, tendono ad aumentare il loro grado di ordine [2,9]. Questo processo di *ordering* o *densification* comporta una riduzione del volume libero, dell'entalpia e della mobilità molecolare. Il materiale diviene quindi più duro e rigido (stato fragile-vetroso) esibendo al tempo stesso tempi di rilassamento viscoelastici maggiori [2,9]. Il tessuto risulterà perciò più sensibile agli stress meccanici e potranno formarsi con facilità rotture o variazioni del suo spetto in relazione ad esempio di variazioni di temperatura o umidità.

La tabella 2.1 riporta i valori di temperatura di transizione vetrosa delle fibre naturali (cotone, seta, lana). Come si può notare la T_g delle fibre è in genere notevolmente superiore a quella dell'ambiente, pertanto le fibre, se conservate allo stato secco a temperatura ambiente, possono subire profondi fenomeni di invecchiamento fisico [2].

Temperatura di transizione vetrosa (T_g) di fibre naturali allo stato secco (°C)	
Cotone (cellulosa)	220-230
Seta (fibroina)	175
Lana (cheratina)	160

Tabella 2.1 Temperatura di transizione vetrosa di fibre naturali allo stato secco

Umidità

L'umidità rappresenta un fattore importante nel degrado dei tessuti in quanto sono materiali particolarmente igroscopici. Anche per l'umidità come per la temperatura, i danni maggiori saranno legati a variazioni sensibili dei valori di umidità e potranno essere influenzati dalla natura chimica delle fibre e dai processi di lavorazione che hanno subito. Le fibre tessili naturali, al contrario di quelle sintetiche, risultano essere molto più sensibili alle variazioni igrometriche in quanto caratterizzate da un maggiore tasso di ripresa, che descrive la massima percentuale d'acqua che una fibra può contenere a determinate condizioni di temperatura e umidità relativa. In tabella 2.2 sono riportati i tenori di umidità percentuale di materiali tessili per diversi valori di umidità relativa (ϕ) a $T=20^\circ\text{C}$ [10]. Al variare dell'umidità relativa ambientale, le fibre tessili data la sottigliezza della maggior parte di esse, tendono a raggiungere in pochi minuti l'equilibrio. Molte potranno perciò essere le variazioni che un tessuto può subire nell'arco di una giornata anche con variazioni minime di umidità [11].

Materiale	Umidità relativa %					
	30	40	50	60	70	100
SETA						
Grezzo (italiana)	4.9	5.8	6.8	7.7	8.6	26.0
Sgommata	6.6	7.9	9.2	10.5	11.9	24.0
COTONE						
Grezzo (americano)	4.3-5.6	5.2-6.2	6.2-6.9	7.1-7.5	8.2	30.0
Mercerizzato	4.2	4.9	5.6	6.3	7.1	27.0
Fili	5.0	5.6	6.2	6.8	7.4	16.0
Grezzo (egiziano)	5.5	6.4	7.3	8.2	9.0	32.0
Fili (fils)	5.3	6.0	6.6	7.3	8.0	17.0

Tabella 2.2 Tenori di umidità di seta in percentuale e cotone al variare dell'umidità relativa ambientale

¹ La temperatura di transizione vetrosa, detta T_g , è una temperatura o un intervallo di temperature centrato su di una temperatura caratteristica, alla quale avviene il cambiamento di struttura di un polimero da amorfo a cristallino. Il cambiamento di struttura dei polimeri implica variazioni nei comportamenti infatti, passando da una struttura amorfa ad una cristallina i materiali polimerici passano da un comportamento plastico ad uno rigido tipicamente fragile.

L'assorbimento d'acqua per quanto riguarda i tessuti cellulosici è dato dai gruppi ossidrilici che consentono la formazione di legami idrogeno con le molecole d'acqua la cui diffusione non avviene nelle zone cristalline ma solamente in quelle amorphe; il grado di umidità sarà perciò proporzionale all'estensione di queste regioni [13]. Nella figura 2.2 si può notare la curva di equilibrio dell'umidità specifica del materiale in percentuale¹. Dalla curva che descrive l'assorbimento/desorbimento d'acqua si può notare come l'assorbimento avvenga in maniera marcata per valori di umidità relativa superiori all'85% e il diserbi mento diviene marcato a tenori di umidità relativa inferiori al 35%.

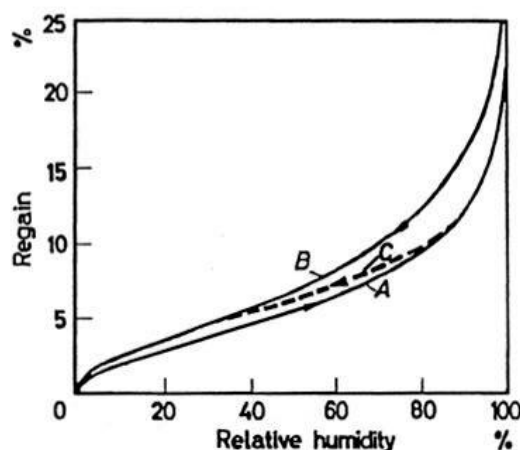


Figura 2.2 Curva di equilibrio umidità specifica, umidità relativa.
Curva A-assorbimento, Curva B-Desorbimento, Curva C –Intermedio

Al variare quindi del tasso di umidità a cui sono esposti i tessuti di interesse storico artistico verranno influenzate le proprietà meccaniche come il carico a rottura, i moduli elastici e le proprietà termiche come si può vedere dalla figura 2.3 che riporta in particolare le curve sforzo deformazione fibre tessili (tenacità in funzione dell'estensione) per diversi valori di umidità relativa [2,13].

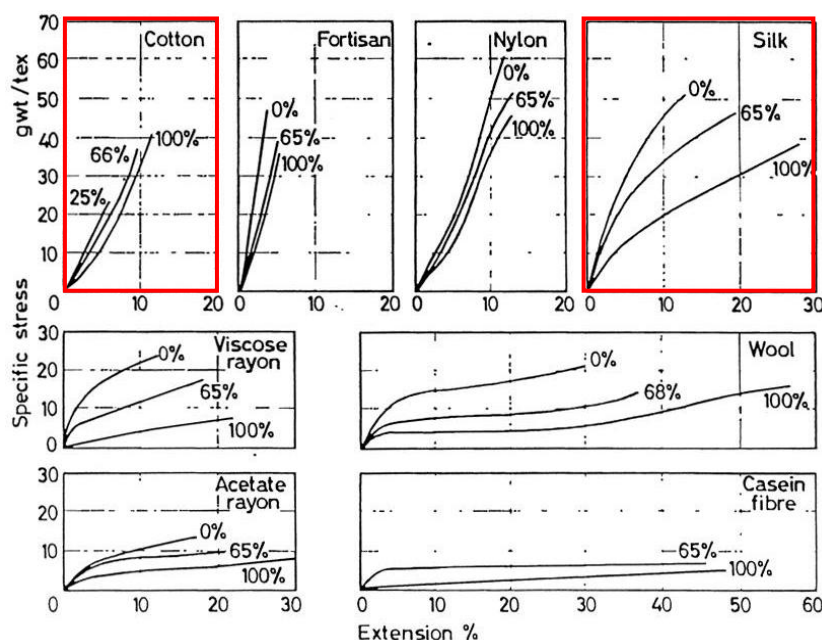


Figura 2.3 Curve sforzo-deformazione per diverse fibre naturali in relazione a vari tassi di umidità relativa [13]

¹ rapporto tra il peso dell'acqua assorbita dalla fibra – ad un prefissato livello di umidità ambientale – ed il peso della fibra secca moltiplicato per cento definito anche Regain

Oltre a variazioni a livello dimensionale e di proprietà fisico-meccaniche, l'acqua che viene assorbita dalle fibre dei tessuti agisce da plastificante per le zone amorphe causando una diminuzione della T_g . Questo fenomeno è tanto più rilevante quanto maggiore è la quantità d'acqua assorbita. Un tessuto conservato quindi per tempi relativamente lunghi in un ambiente con un basso grado di umidità (o addirittura allo stato secco) ed a T inferiori alla T_g può subire profondi fenomeni di invecchiamento fisico con conseguente infragilimento e quindi minore resistenza alle sollecitazioni fisico-meccaniche come mostrato in figura 2.4 [13].

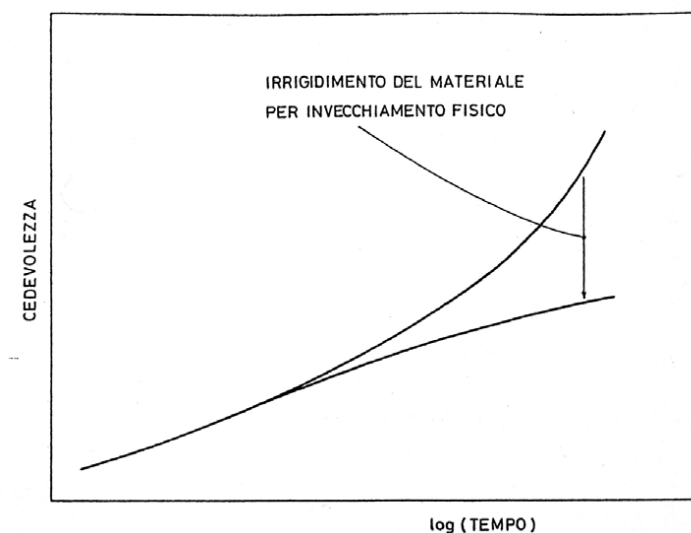


Figura 2.4 Modificazione della curva di cedevolezza a seguito del processo di invecchiamento fisico durante una prova di sollecitazione [1.3]

L'azione dell'acqua si esplica con reazioni di tipo idrolitico che possono determinare, la rottura della catena polipeptidica. Il grado di idrolisi dipende oltre che dal tempo, dal pH, dalla temperatura e dalla quantità di acqua disponibile. I meccanismi di reazione idrolitica avvengono secondo in modo simile a quelli legati ad attacchi da parte di acidi e basi che vengono descritti nelle sezioni successive [13].

2.1.3 Fattori meccanici e di conservazione

I tessuti di interesse storico sono per tutta la durata della loro esistenza sottoposti ad azioni meccaniche dal momento della loro creazione, alle fasi di lavorazione e finissaggio, durante la loro fase di utilizzo, fino al momento della conservazione ed esposizione, che prevedono anch'esse cicli di ripiegamento-dispiegamento o di dover auto sostenere per lunghi periodi il loro stesso peso. Durante tutte queste fasi del loro ciclo di vita si verificano dei processi di deterioramento che portano alla rottura delle catene e micro-macro fratture nelle fibre. Fenomeni questi irreversibili da un punto di vista meccanico in quanto provocano decadimenti del modulo elastico, con conseguenti deformazioni, rotture e spesso sfibrillamento superficiale con perdita anche di lucentezza (figura 2.5) [14].

Durante il loro ciclo di vita, le fibre possono subire essenzialmente 2 tipologie di sollecitazioni: nella direzione del proprio asse oppure deformazioni di tipo torsionale. Dove, in entrambi i casi la risposta da parte del tessuto a queste sollecitazioni dipenderà, oltre che dalle caratteristiche intrinseche del tessuto stesso, principalmente dal tempo di durata esercitata della sollecitazione stessa. Al momento della esposizione dei tessuti, è perciò fondamentale valutare quali tipi di tensioni meccaniche andranno a crearsi e che deformazioni meccaniche potranno provocare non solo in tempi prolungati ma anche in tempi brevi [2,15].

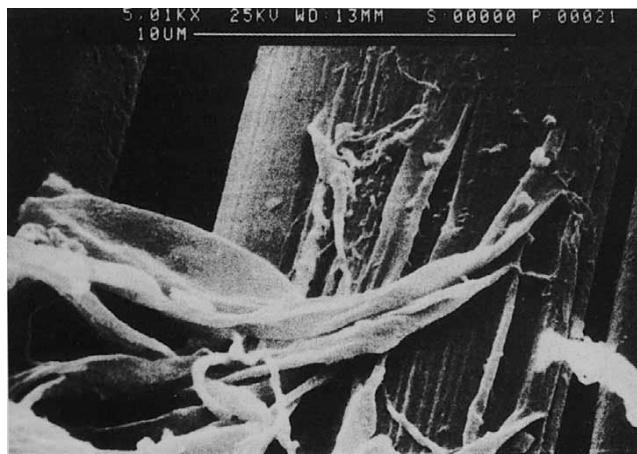


Figura 2.5 Micrografie elettroniche a scansione di: un tessuto in seta con evidenti fenomeni di sfibrillazione delle fibre derivanti da processi di abrasione meccanica; [15]

Il fatto che i tessuti siano materiali fortemente igroscopici inoltre li rende meno resistenti alle sollecitazioni meccaniche. Con l'assorbimento d'acqua avviene infatti un indebolimento delle forze che tengono insieme tra loro le microfibrille con conseguenti rotture caratteristiche di forma conoidali (come mostrato in figura 2.6) quando sottoposte a trazione [15].



Figura 2.6 Estremità fibra di cotone conoidale dovuta a deterioramento meccanico [5]

In base a come vengono conservati i tessuti all'interno dei depositi o magazzini, è possibile individuare delle categorie legate alle loro caratteristiche e alle esigenze conservative attuate per evitare o meglio ridurre al minimo i possibili deterioramenti di tipo meccanico [3]:

- 1- **tessuti piatti** sono tessuti che devono essere immagazzinati in piano poiché consente meglio alle fibre di rilassarsi e al tessuto di recuperare la sua tensione naturale. Questo tipo di tessuti è preferibile che non vengano piegati, se dovesse essere necessario va introdotto un rotolo di carta non acida all'interno della piega per evitare che questa si schiacci;
- 2- **tessuti arrotolati** vanno disposti attorno ad un cilindro di cartone ricoperto da poliestere o poliuretano oppure da un tubo in PVC il tessile deve essere separato dal tubo da una carta non acida o tessuto greggio, lavato, non sbiancato. Il tessuto deve essere arrotolato con il tubo posto perpendicolarmente agli orditi e mantenendo il dritto (*verso*) del tessuto verso l'esterno. Il tutto può essere ricoperto con un tessuto inerte e stivato all'interno di sostegni adeguati (normalmente tubi in metallo) che poi vengono appesi a catene pendenti dal soffitto o appoggiati a sostegni in legno o metallo
- 3- **costumi e altri manufatti tridimensionali** sono frequenti i danni determinate dalla forma e dalla disposizione dei costumi stessi. Va sempre considerata come pericolosa la situazione dove il loro peso grava su piccole sezioni del tessuto. Particolare attenzione deve essere posta per le pieghe dei panneggi, maniche e altre decorazioni, che andrebbero mantenute in forma. I costumi non devono essere

stipati, devono poter avere uno spazio minimo che impedisca lo sfregamento tra di loro e vanno riparati dalla polvere con tessuti posti al di sopra di essi, sostenuti da barre rigide. Resta il fatto che tessuti pesanti, fragili danneggiati o ragliati di sbieco non dovrebbero essere mai appesi ma collocati in piano

- 4- **tessuti montati su supporto** viene effettuato quando i tessuti sono tanto fragili da non essere più in grado di resistere alle sollecitazioni meccaniche oppure quando sono molto delicati e si vuole evitare di maneggiarli direttamente. Una prima soluzione consiste nell'applicazione di un supporto di tessuto mantenuto teso da un telaio di legno o altro materiale protetto da uno strato inerte. Altro metodo è quello di applicare un supporto rigido di legno, protetto da uno strato che impedisca la diffusione di eventuali vapori acidi e rivestito di tessuto sul quale applicare il manufatto tessile. Nel caso, infine di tessuti estremamente fragili (spesso unica metodologia possibile per reperti archeologici), si può utilizzare la metodologia a pressione, non utilizzabile in ambienti ad alto contenuto di umidità, consistente nel porre il tessuto tra una lastra rigida di vetro o plexiglas e un fondo composto da un sottoprodotto rigido, uno strato debolmente elastico (come la flanella di cotone) e un ulteriore tessuto di foderatura. Il vantaggio di tale soluzione è la possibilità di mantenere il sistema nella posizione corretta senza interventi di cucito che possano seriamente danneggiare un tessuto fragile. Tra gli svantaggi troviamo il rischio di sviluppo di muffe e del possibile schiacciamento del rilievo del tessuto.

2.1.4 Organismi e microrganismi

I materiali tessili sono soggetti ad attacchi di tipo biologico e microbiologico, con danni sia di tipo diretto, dovuto alla loro crescita e sviluppo, ma anche indiretto legato ad esempio alla produzione di acidi organici e/o inorganici, sostanze chelanti, alcali, enzimi, pigmenti, ecc [2]. Questi processi danno luogo a fenomeni di degrado che ne alterano i caratteri estetici e funzionali, che variano a seconda degli agenti biodeteriogeni coinvolti ma anche della natura del substrato e delle condizioni chimico-fisiche e ambientali al contorno. I tessuti di tipo organico ad esempio sono particolarmente sensibili agli organismi eterotrofi, che possono provocare danni meccanici nel caso di roditori o insetti che utilizzano il substrato come fonte di cibo (assimilazione) e danni chimici attraverso l'utilizzo dei manufatti come habitat in cui avvengono fenomeni vitali diversi da quelli nutrizionali (escrezione e secrezione di prodotti di varia natura o crescita) [16].

Per quanto riguarda i fattori edafici¹ la presenza nei tessuti in maniera massiva di carbonio idrogenato e quindi organico e di altri macro e micro nutrienti, che possono essere riscontrati nell'accumulo di sporco dovuto a cause antropiche o naturali sul substrato (S, Ca, K, Mg, Fe, Si, Cu, Zn), può dar luogo a fenomeni biologici o microbiologici. La natura igroscopica dei materiali può ulteriormente favorire o meno l'insediamento di specie biologiche come ulteriori fattori discriminanti sono il pH e la pressione osmotica² [16].

Altri fattori importanti sono la composizione chimica dell'aria, gli inquinanti, la temperatura, e la luce, definita come colore, intensità (lunghezza d'onda delle radiazioni) e durata [16].

Di seguito vengono trattati in breve i tipi più comuni di biodeteriogeni che attaccano i tessuti suddivisi in base alla natura del tessuto stesso.

¹ Fattori che riguardano le condizioni fisiche e chimiche del terreno

² Rappresenta la pressione che si determina quando due soluzioni a diversa concentrazione sono separate da una membrana semipermeabile che permette il passaggio dell'acqua ma non dei soluti e che fa sì che l'acqua tenda a passare dalla soluzione a minor concentrazione a quella a maggior concentrazione. Tale pressione è proporzionale al numero di particelle presenti in soluzione e non alla loro natura.

Microrganismi

Le fibre proteiche come la seta e la lana rappresentano in opportune condizioni fonti di C e N per tutti gli organismi in grado di produrre enzimi proteolitici (proteasi e peptidasi) capaci di catalizzare la reazione di idrolisi del legame peptidico [16] che caratterizza le macromolecole proteiche componenti le fibre animali.

Come nel caso di altri fattori di degrado (temperatura, umidità), i processi di lavorazione della fibra possono influire sulla predisposizione all'attacco da parte di microrganismi. Ad esempio, la seta in particolare quella non sgommata, che presenta ancora la sericina, si rivela più attaccabile della seta sgommata in quanto la sericina, proteina amorfa e perciò è più facilmente attaccabile [16].

In tabella 2.3 vengono riportate le specie biodeteriogene più comuni con attitudine a deteriorare le fibre proteiche (lana e seta) [16]. Nel caso delle fibre proteiche il danno maggiore, più che da parte di microrganismi, è arrecato dagli insetti che si nutrono del tessuto per ricavare i nutrienti e al tempo stesso utilizzano il tessuto come tana e luogo di crescita.

Tabella 2.3 Indicazione delle specie biodeteriogene più comuni per le fibre proteiche (lana e seta)

Biodeteriogeni	Genere
Batteri e attinomiceti	Bacillus-mesentericus
	Bacillus-subtilis
	Proteus-vulgaris
	Streptomyces-albus
	Streptomyces-fradiae
	Pseudomonas-aeruginosa
Microfunghi	Aspergillus
	Fusarium
	Trichoderma

Le conseguenze ad opera dei biodeteriogeni nel caso delle fibre proteiche sono le stesse che si riscontrano per le fibre cellulosiche, ovvero variazione del colore, riduzione della resistenza alla trazione e infragilimento.

Le fibre cellulosiche sono tanto più resistenti agli attacchi microbiologici quanta più cellulosa e lignina contengono. La presenza invece di sostanze estranee come pectine e sali minerali facilitano gli attacchi biologici e microbiologici. Generalmente tra le fibre cellulosiche le più resistenti sono juta e canapa e a seguire cotone e lino. In particolare. Ulteriori fattori che incidono sul degrado da parte di biodeteriogeni su fibre cellulosiche sono il grado di polimerizzazione, la cristallinità, il grado di orientamento delle macromolecole in relazione all'asse della fibra, la presenza di gruppi funzionali e di [16].

Nel caso dei tessuti a base di cellulosa, il danno più consistente viene arrecato da parte di funghi. I diversi generi di funghi che si possono trovare sui tessuti sono legati principalmente alle condizioni al contorno (livelli di umidità e temperatura) e alle caratteristiche del substrato stesso, ossia del tessuto (presenza di residui legati a processi tessili o precedenti restauri, acidità del tessuto stesso, ecc.) [2]. In tabella 2.4 vengono elencati i funghi più comuni riscontrabili su tessuti cellulosolitici [2,16]. Su uno stesso tessuto è possibile riscontrare la presenza di solo alcuni funghi oppure di molteplici generi. La presenza di funghi può inoltre facilitare l'attacco del tessuto da parte di altri biodeteriogeni in quanto i funghi stessi possono fornire un substrato di crescita favorevole ad esempio a organismi eterotrofi o insetti.

Tabella 2.4 Indicazione dei funghi più comuni riscontrabili su tessuti cellulolitici

Funghi	Genere
Deuteromiceti	Alternaria, Aspergillus, Fusarium
	Memnoniella
	Myrothecium, Neurospora, Pennicillium
	Scopulariopsis, Stachbotrys, Stemphylium
Ascomiceti	Chaetomium
Zigomiceti	Mucor, Rhizopus

La crescita di funghi è favorita oltre che da condizioni di elevata umidità relativa da una scarsa ventilazione degli ambienti che favoriscono il deposito di spore fungine, l'accumulo di polvere e terriccio fine che possono fornire una buona base di crescita per i funghi stessi. Alcuni funghi oltre all'attacco diretto dei tessuti attraverso la loro crescita possono arrecare danni a volte irreversibili dei tessuti stessi a causa della loro capacità di produrre sostanze coloranti che possono essere espulse come sottoprodotti o al momento della loro morte o rimozione [16].

Generalmente gli attacchi microbiologici (funghi, batteri, muffe) hanno come siti preferenziali le zone amorfe e quelle a minore cristallinità. Le parti di tessuto caratterizzate da fasi cristalline vengono infatti degradate solo in tempi lunghi e solo nel caso si presentino condizioni di umidità particolarmente elevata (sopra il 65%) e valori di pH e temperatura adeguati ad attivare i processi enzimatici (cellulasi). Questi processi partono dagli strati primari esterni, coinvolgono gli strati secondari e terminano a livello del lumen. L'attacco porta a una perdita nelle caratteristiche meccaniche del tessuto con conseguente diminuzione della resistenza allo sforzo a rottura. La presenza di fili metallici all'interno della trama e ordito del tessuto in genere inibisce la velocità con cui i tessuti vengono degradati (2,16).

Organismi (Insetti)

Le fibre proteiche sono particolarmente sensibili più che agli insetti adulti alle larve. Gli insetti infatti per poter trarre i nutrimenti dal tessuto devono riuscire a rompere i ponti di disolfuro con mercaptani, che sono presenti in grande concentrazione nel tratto digestivo delle larve che possono perciò degradare facilmente le fibre [2]. In tabella 2.5 vengono riportare i quattro gruppi di insetti più comuni che attaccano le fibre proteiche[16].

Tabella 2.5 Gruppi di insetti più comuni che attaccano le fibre proteiche

Ordine	Famiglia e nome comune	Nome Comune
Dermestidae	Anthrenus verbasci	Scarafaggi dei tapperi
	Anthrenus museorum	
	Attagenus pelli	
Oecophoridae	Hotmannophila	Tarme
	Pseudospretella	
Tineidae	Tinea pellionella	
	Tinea bisselliella	
	Dermestidae	
Lepismatidae	Lepisma saccharina	

L'attacco alle fibre cellulosiche invece viene favorito se vi è la presenza di sostanze estranee come colle vegetali, appretti a base di destrine e amido. Come nel caso delle fibre proteiche i danni si presentano in genere come erosioni più o meno superficiali fino alla perdita di porzioni di tessuto con conseguenti danni strutturali [16]. I danni sono come prima legati all'assimilazione delle fibre come fonte di cibo, erosioni meccaniche a seguito della

creazione di canali, tane e alla produzione di acidi, basi o secrezioni. In tabella 2.6 vengono riportate gli insetti più comuni che attaccano le fibre cellulosiche, interessante è notare come spesso il nome comune sia associato al materiale che attaccano preferenzialmente [2,16].

Tabella 2.6 Indicazione degli insetti che comunemente attaccano le fibre cellulosiche

Ordine	Famiglia e nome comune	Nome Comune
Thysanura	Lepismatidae	Pesciolini d'argento
Isoptera	Rhinotermitidae	
	Hodotermitidae	
	Termitidae	
	Calotermitidae	Termiti o formiche bianche
Coleoptera	Anobiidae	
	Lyctidae	Tarli del legno
	Dermestidae	Tarli
Corredentia	Liposcelidae	Pulci dei libri
Blattoidea	Blattidae	
	Blattellidae	Blatte o scarafaggi

2.1.5 Inquinanti gassosi

Gli inquinanti gassosi rappresentano un fattore di degrado importante per i tessuti in quanto oltre ad un' azione diretta possono scatenare delle reazioni complesse in associazione con altri fattori. Bisogna inoltre considerare che gli inquinanti gassosi possono essere composti naturalmente presenti nell'aria. La qualità dell'aria all'interno degli ambienti museali e di stoccaggio va sempre controllata e monitorata nel tempo al fine di evitare il superamento dei valori di soglia di questi inquinanti. La presenza o pericolosità degli inquinanti gassosi sarà legata anche alle condizioni dell'ambiente di conservazione (temperatura, umidità) e dalle caratteristiche stesse delle stanze (ventilazione, sistemi forzati di riscaldamento, etc.) [14]. Di seguito riportiamo una breve descrizione dei principali inquinanti gassosi per i tessuti.

Ossigeno

Tra gli inquinanti gassosi, anche se non è ritenuto tale è stato inserito anche l'ossigeno, in quanto tutti i polimeri organici, che costituiscono le principali fibre naturali di interesse tessile, reagiscono con questo elemento anche se con cinetiche relativamente lente [2].

Le cinetiche di reazione dell'ossigeno possono tuttavia risultare parecchio accelerate quando associato a radicali presenti nella massa polimerica, prodotti per effetto di fenomeni fotodegradativi o termodegradativi. A seconda che i radicali derivino da processi di fotodegradazione o termo degradazione i processi vengono ridefiniti come foto-ossidazione e termo-ossidazione. Questi processi, che dipendono fortemente dalle caratteristiche chimico-strutturali del polimero e dalle condizioni ambientali, possono produrre fenomeni di scissione dei legami covalenti della catena polimerica, di reticolazione, di emissione di sostanze volatili e di formazione di gruppi funzionali contenenti ossigeno [2].

Nel caso di polimeri naturali con strutture fibrose caratterizzate dall'alternanza lungo l'asse della fibra di regioni cristalline (alta densità e bassa permeabilità all'ossigeno) e amorfe (bassa densità e alta permeabilità all'ossigeno), i processi di ossidazione avvengono preferenzialmente nelle zone disordinate della fibra laddove la concentrazione dell'ossigeno è maggiore [2]. Le regioni di materiale polimerico a più alta cristallinità mostrano pertanto una maggiore resistenza all'ossidazione.

Il processo ossidativo che interessa il materiale fibroso è riassumibile in quattro fasi [2,8]:

- Iniziazione che coincide con la formazione di radicali, come già descritto per la fotodegradazione e la termo degradazione.
- Propagazione fase lenta, in cui lo stato determinante per la cinetica della reazione è l'estrazione di idrogeno. Il macroradicale di neo-formazione, derivante dalla fase di iniziazione, reagisce con l'ossigeno dando origine a un perossipolimero che a sua volta reagisce con un'altra macromolecola, estraendo idrogeno e creando lungo la catena polimerica dei gruppi idroperossidici. Gruppi caratterizzati da legami perossidici a bassa energia ($\approx 40\text{Kcal/mole}$) che si dissociano facilmente anche a T ambiente assorbendo energia termica o fotonica.
- Terminazione le reazioni si differenziano in base alla quantità di ossigeno a disposizione, se si è in condizioni di ossigeno normali la reazione di terminazione avverrà attraverso la prima soluzione, con l'unione di radicali perossile, in condizioni di ossigeno scarso sarà invece favorita la seconda

Varie sono le ipotesi su come tali processi si evolvano in quanto diversi sono i fattori che possono accelerare o favorire il fenomeno stesso, alcuni tra questi fattori sono la presenza di ossigeno e umidità, che giocano un ruolo fondamentale, le radiazioni UV, la durata dell'esposizione (dato che l'effetto è di natura cumulativa) e il calore ambientale.

I manufatti tessili possono quindi essere sottoposti alla luce per periodi di tempo relativamente brevi e solo se da questa sono state filtrate le radiazioni della banda UV [14]. Anche in tali condizioni, l'intensità della luce necessaria alla loro fruibilità deve comunque essere ridotta al minimo. Inoltre bisogna assolutamente evitare che nei locali, a basso grado di umidità, siano presenti lampade capaci di generare calore (ad esempio quelle ad incandescenza) [14].

L'ossigeno è responsabile in particolare di due processi di degrado: di foto-ossidazione e di termo-ossidazione.

Foto-ossidazione

La foto-ossidazione è un processo di reazione a catena autocatalitico che avviene per azione combinata di luce ed ossigeno atmosferico. Energia, intensità della luce e durata dell'esposizione giocano un ruolo fondamentale nell'innescare di questo processo che si manifesta essenzialmente attraverso la perdita in massa, l'ingiallimento e la riduzione della resistenza meccanica. Di norma la seta è la fibra naturale che più risente di questo fattore di degrado, a maggior ragione se è stata sottoposta a processi di colorazione con colorati acidi o al tino, a candeggi o a processi di carica, per recuperare la perdita in peso subito durante la sgommatura [17]

I tessuti proteici, ed in particolare la seta, sono particolarmente sensibili alle radiazioni attorno ai 220-370 nm a causa della presenza della tirosina, del triptofano e dei residui amminoacidici della fenilalanina presenti ingenerare nelle regioni amorfe. Questi composti possono subire processi di foto-ossidazione che portano alla formazione di gruppi cromofori come chinoni che causano variazioni di colore del materiale. Oltre a gruppi cromofori, possono formarsi radicali che causano rotture dei legami peptidici nella catena e la formazione di prodotti a basso peso molecolare. Questo processo dipende fortemente dal pH, generalmente la massima resistenza per le fibre di seta corrisponde a pH circa a 10 con valori limite per $\text{pH} > 11$ e < 3 [18].

Gli effetti legati al degrado foto-ossidativo dei tessili sono osservabili al microscopio elettronico e si presentano come segni di frattura perpendicolari all'asse delle fibre (figura 2.7) [15].

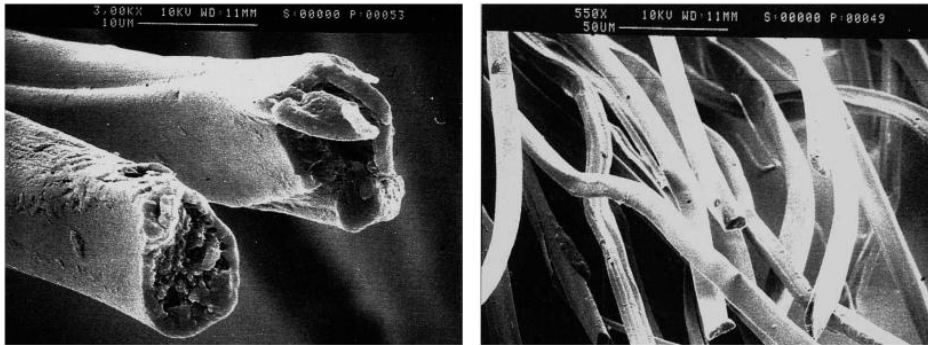


Figura 2.7 Fibre di seta degradate fotochimicamente [15]

Termo-ossidazione

Nel caso delle fibre proteiche, il degrado ad opera della termo-ossidazione provoca modificazioni chimiche in seguito a reazione di idrolisi ed ossidazione. La formazione preferenziale delle une più che le altre sono da imputare principalmente al pH delle fibre, le alte temperature, inoltre mantenute a lungo tempo provocano acceleramento delle cinetiche di reazione. Visivamente questo tipo di degrado provoca ingiallimenti molto rapidi (rispetto a quelli che avvengono per la foto-ossidazione) ma senza lo stesso decremento di resistenza a trazione [2,5]

Nelle caso delle fibre vegetali, il calore può dare origine sia a radicali liberi, responsabili dei processi di foto-ossidazione, che a reazioni di condensazione tra i gruppi ossidrilici che costituiscono catene adiacenti creando reticolazioni intermolecolari.

Il calore può anche portare modificazioni microstrutturali che interessano sia le aree amorfe e in misura minore le aree cristalline [20] A livello morfologico, il degrado legato a variazioni di calore porta le fibre a subire delle deformazioni plastiche che nelle zone di frattura assumono aspetto fungiforme come riportato in figura 2.8[20]. A seguito del degrado dovuto alle alte temperature, i tessuti divengono più rigidi e fragili, variano le loro capacità di assorbimento/desassorbimento d'acqua e subiscono fenomeni di ingiallimento [2].



Figura 2.8: Immagine SEM di un insieme di fibre di seta. L'esposizione al calore produce deformazioni di tipo plastico che, nelle zone di frattura assumono un aspetto fungiforme [15]

Altri inquinanti gassosi

Gli inquinanti gassosi costituiscono la maggior parte dei fattori di degrado ambientale e da soli o sinergicamente con altri danno origine a fenomeni di deterioramento chimico di manufatti tessili. Oltre all'ossigeno che crea, assieme a luce e temperatura processi di foto-ossidazione e di termo-ossidazione, tra gli inquinanti gassosi vi sono numerose sostanze acide, basiche oppure ossidanti come gli ossidi di zolfo, gli ossidi di azoto, ozono, idrocarburi pesanti e leggeri e loro derivati ossigenati, composti di metalli pesanti [14].

Di seguito verranno elencati i principali inquinanti gassosi che si trovano all'interno delle aree espositive e di stoccaggio.

NO_x SO_x acidi organici

Tra gli inquinanti gassosi pericolosi per i tessuti troviamo ossidi di azoto e zolfo e acidi di origine organica. Il contatto tra questi inquinanti e i tessuti può avvenire in tempi diversi e per varie ragioni nel corso della loro storia, dalle fasi di produzione, al periodo della fruizione fino al loro stoccaggio o esposizione [13].

Il primo contatto delle fibre con gli inquinanti avviene in maniera graduale ed è in genere legata a semplici processi di penetrazione o assorbimento dei gas da parte dei tessuti. In seguito avviene la penetrazione dei gas nelle fibre grazie a processi di dissoluzione di questi con l'acqua non legata presente nei tessuti e il successivo adsorbimento dei gas legati nella massa fibrosa. Il risultato finale porta nel tempo a fenomeni di alterazione del colore, di felpatura, sfibratura e snervamento dei tessuti [21]. Nello specifico le reazioni potranno variare non solo a seconda della durata di esposizione e della concentrazione degli inquinanti ma anche in base alla sensibilità relativa delle fibre.

Le fibre proteiche sono in genere sensibili alle sostanze acide, che provocano un meccanismo di idrolisi, random, lungo la catena peptidica. Il processo provocato dall'attacco acido sulle fibre è generalmente più grave di quello causato da sostanze alcaline in quanto attacca la catena polimerica in modo casuale e disordinato mentre quella alcalina coinvolge la parti terminali [22]. Questo processo, che avviene sia sulle fasi amorfe che cristalline, dipende estremamente dal pH. Gli effetti legati al degrado di tipo acido sono variazione cromatica e diminuzione dell'elasticità se il deterioramento interessa le parti amorfe e della tenacità se avviene sulle parti cristalline [2]. L'attacco acido, avviene in due fasi, la prima implica la rapida rottura dei legami peptidici, salini e ad idrogeno nella fase amorfa mentre la seconda fase implica l'attacco alle regioni cristalline che avviene in tempi più lunghi [2].

Anche nel caso delle fibre cellulosiche, gli acidi attaccano in maniera casuale con medesimo meccanismo preferenziale dapprima verso le zone amorfe e poi a proseguire, a seconda della temperatura, della concentrazione della soluzione e dallo stato delle fibre verso le fasi cristalline provocando la riduzione del grado di polimerizzazione [23]. Generalmente i prodotti che si ottengono a seguito del deterioramento delle catene polimeriche cellulosiche mostrano una maggiore cristallinità rispetto al materiale originale. I prodotti di neoformazione sono caratterizzati da un basso peso molecolare (in seguito alla rottura dei legami β 1-4 glicosidici) e tendono a riorganizzarsi per dare origine a domini cristallini più piccoli, e di conseguenza maggiore rigidità, fragilità e resistenza meccanica [23].

Alcali

Le fibre interagiscono con le sostanze alcaline con fenomenologie diverse rispetto a quanto già riportato per le sostanze acide. Generalmente l'attacco da parte degli alcali è ritenuto meno dannoso dell'attacco acido. Le condizioni al contorno quali il grado di umidità, il pH, lo stato di conservazione delle fibre determinano la velocità degli eventi degradativi, insieme alla tipologia del chimismo che li regola come visto anche per gli acidi [1].

Le fibre proteiche vengono degradate sotto l'effetto di alcali diluiti con cinetiche generalmente abbastanza lunghe, che portano tuttavia a rottura dei legami salini e ad idrogeno (figura 2.9) con modificazioni della struttura secondaria e terziaria della fibroina [1]. Questo comporta piccole variazioni nel comportamento viscoelastico (aumento dell'allungamento a rottura e diminuzione della tenacità), variazioni nella capacità di assorbire acqua e diminuzione della capacità di resistere ad altri fenomeni degradativi [24].

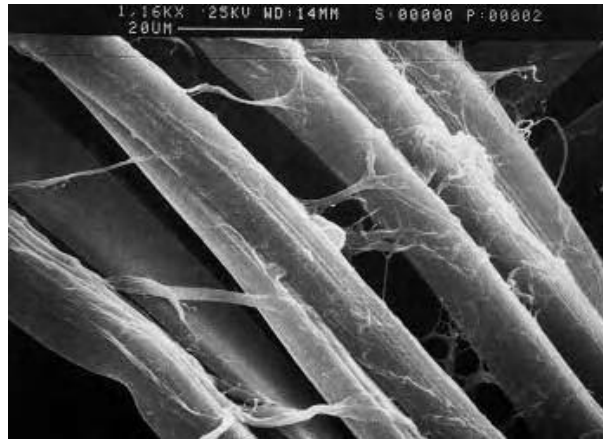


Figura 2.9 Particolare tessuto di seta degradato da agenti chimici a reazione alcalina [24]

La cellulosa e le fibre di tipo cellulositico sono relativamente resistenti agli alcali ma se hanno subito precedenti attacchi di altro tipo (foto-ossidazione o attacchi acidi) risultano in genere più reattive agli alcali a causa dei gruppi carbonilici che si presentano lungo le macromolecole [1].

In relazione al tipo di sostanza alcalina con cui vengono a contatto le fibre cellulosiche si comportano in maniera diversa. In presenza di alcali forti le fibre cellulosiche si degradano attraverso meccanismi di β -eliminazione, e *unzipping* mentre se vengono sottoposte a trattamenti con alcali diluiti, rigonfiano variando leggermente la loro struttura cristallina trasformandosi in cellulosa II, . più tenace ma meno resistente alla degradazione termica [25-27]

2.2 Interazioni particolato atmosferico indoor-fibre

2.2.1 Il problema degli impolveramenti sui tessuti storico artistici

Come già discusso in precedenza, varie sono le misure attuabili in area museale per monitorare o ridurre i comuni fattori di degrado dei beni culturali quali illuminazione, variazioni di temperatura e umidità, ecc.

Un discorso particolare riguarda invece la protezione degli oggetti dagli impoverimenti, problema spesso sottovalutato poiché i processi di deposizione delle polveri o particolato sono visibili solo dopo prolungati tempi di esposizione.

La protezione degli oggetti viene in genere risolta conservando gli oggetti stessi all'interno di teche o utilizzando dei sistemi di filtrazione forzata. Queste soluzioni non sono sempre attuabili a causa: i) di motivi economici; ii) delle grandi dimensioni dei tessuti storico-artistici (arazzi, tappezzerie storiche); iii) delle caratteristiche intrinseche delle aree dove vengono conservati i manufatti (chiese, palazzi storici o abitazioni private).

Non essendo perciò sempre possibile intervenire in maniera attiva sul particolato presente nelle aree espositive si dovrà puntare ad una conservazione preventiva (monitoraggio nel tempo) e sostenibile basata sulla caratterizzazione delle polveri (natura chimica, pericolosità, interazione con il tessuto ecc..) e sulla identificazione dei rischi ad esse legate [28] anche in relazione alle condizioni ambientali (temperatura, umidità, vicinanza a luoghi fortemente industrializzati, ecc.)

Di seguito si andranno ad analizzare le varie classi di sporco e deposizioni riscontrabili su tessuti di interesse storico-artistico, i danni che possono provocare e le problematiche di conservazione che si creano in relazione anche ai metodi di pulitura o agli interventi scelti [29]

Classificazione delle deposizioni presenti sui tessuti

Nei tessuti di importanza storico-artistica sono riscontrabili diverse tipologie di sporcizia presente sottoforma di polveri e deposizioni. Questa sporcizia non deve essere sempre rimossa in quanto molto spesso è legata alla storia del manufatto stesso ed è una fonte importante per la sua caratterizzazione. Tenendo conto di come si sono formate le deposizioni e delle informazioni ad esse legate, è possibile individuare diverse tipologie di sporco [30-32]:

- Sporco di consunzione - legato all'utilizzo e all'usura del tessuto (residui di cibo)
- Sporco legato al contesto storico – che dimostra l'evidenza del momento storico in cui sono stati utilizzati (provenienza, epoca, ecc.)
- Sporco legato a processi storico/tecnologici – da informazioni utili per comprendere come i tessuti sono stati prodotti
- Sporco derivante da accumulo - deposizioni che si sono accumulate nel tempo durante il periodo di conservazione o di esposizione in museo

Il particolato presente normalmente in atmosfera museale è originato da numerose fonti sia interne che esterne ed è caratterizzato da una composizione variabile legata in particolare all'ambiente circostante ed alla stagionalità [33-35]. Per quanto riguarda la composizione delle polveri interne, le ricerche dimostrano che la parte preponderante delle polveri depositata sugli oggetti è costituita da particelle fibrose che possono essere originate in particolar modo dai vestiti dei visitatori, tuttavia non è da escludere l'ipotesi, se all'interno delle aree espositive vi è una grande quantità di tessuti storici, tappezzerie, tappeti e tendaggi che la parte fibrosa delle polveri derivi parzialmente da questo genere di manufatti [36]

Le interazioni che si formano tra deposizioni e tessuti sono identificabili come attive, quando vi è una interazione diretta con il substrato, o passive quando la loro semplice presenza

provoca fenomeni di peeling o irrigidimento dei manufatti tessili [2,14]. A seconda inoltre della natura chimico fisica del particolato diverse potranno essere le interazioni e i processi di degrado che si potranno creare sui tessuti. I danni arrecati potranno essere puramente estetici, frequentemente sottovalutati in quanto spesso non incidono sullo stato di conservazione del manufatto, o di tipo chimico-fisico, che comportano sempre un degrado (vedi capitolo 3.1.1).

Considerando poi la natura particolarmente fragile dei tessuti storico-artistici, particolare attenzione dovrà essere posta nella scelta delle misure utilizzate per la loro pulitura al fine di non pregiudicare la durabilità nel tempo dei manufatti stessi. L'intervento di pulitura genera inoltre problemi di tipo etico in relazione alla reversibilità e alla preservazione delle informazioni storiche legate allo sporco, malgrado quest'ultimo possa avere effetti dannosi sul manufatto [37]. Nei casi dove la pulitura non è possibile o debba essere attentamente valutata comprendono la presenza di materiali solubili in acqua o in solventi, o di tessuti molto deboli e troppo vulnerabili all'azione/aspirazione meccanica implicata in alcune tecniche di pulitura [38]

2.2.2 I depositi in ambiente museale

Ai fini di uno studio completo sulle deposizioni di particolato e sporcizia in ambiente museale su tessuti di interesse storico-artistico risulta fondamentale l'analisi della qualità dell'aria delle aree espositive o di stoccaggio per prevedere le interazioni con l'ambiente in cui si trovano i manufatti.

L'accumulo delle deposizioni sulle superfici è regolato da processi di deposizione che vengono classificati come deposizione gravitazionale, inerziale, foretica, di Stevan e sono più o meno efficienti in funzione del diametro delle particelle sospese e dalle condizioni microclimatiche che possono favorirli o inibirli [39]. Alcuni meccanismi di deposizione possono inoltre agire simultaneamente in sinergia o in opposizione. È importante notare che le particelle depositate, in particolare quelle a diametro più esiguo, tendono ad essere risollevate ad ogni passaggio dei visitatori, mentre quelle di dimensioni maggiori depositano più velocemente [39,40]

Nella tabella 2.7 sono riportati le classi di inquinanti generalmente presenti negli ambienti espositivi indoor e la loro origine. In assenza di sistemi di filtrazione dell'aria, il particolato è originato sia da fonti interne che esterne e presenta una composizione variabile che non permette una generalizzazione e una previsione esatta della sua composizione [41]

Tabella 2.7 Parametri ambientali museali da considerare e loro derivazione

PARAMETRI	INQUINANTI	ORIGINE
Climatici	T, RH, SH, luce	--
Inquinanti esterni	SO ₂ CO/CO ₂ NO _x Particolato O ₃	Ambiente esterno
Inquinanti interni	Formaldeide acidi organici composti solforosi VOC	Emissione da opere d'arte
	Particolato biocidi VOC	Mobilio materiale da costruzione

Gli inquinanti particellari possono avere natura antropica o naturale. Vengono generalmente suddivisi in relazione al loro diametro aerodinamico, e al fatto che si trovino sospesi o sottoforma di deposizioni. Il particolato solido totale sospeso (TSP) si divide a seconda della granulometria in aerosol* e particolato (PM10 e PM 2.5). Le deposizioni invece suddivise in due frazioni rappresentative: frazione fine (< 2.0µm) e frazione grezza (>2.0µm). In tabella 2.8 vengono riportate le varie tipologie di inquinanti particellari come TSP e deposizioni [5,42-45]

Tipologia	Dimensione particolato		Composizione
TSP	Aerosol	<1 µm	Può contenere sali aggressivi e sostanze acide Na Cl, Al Si c-rich, ossidi di metallo
	Particolato	PM10 PM2.5	Le più pesanti provengono da combustione incompleta, contengono fuliggine, materiale catramoso, tracce di metalli pesanti hanno origini esterne al museo ricche in Ca, alluminio silicati, Ca-Si c-rich ossidi di metallo
Deposizioni	Frazione grezza >2 µm Frazione fine <2 µm		Contengono fibre, terreno e polvere minerale (quarzi, calcite, argille, Sali, gesso. Variano da 1 a 300 µm) , prodotti di combustione come fuliggine e particelle carboniose, insetti, frammenti di piante, capelli, pelle. Inoltre possono contenere ioni aggressivi (H ⁺ , NH ₄ ⁺ , SO ₄ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ che degradano diversi tipi di materiali. ma possono anche contenere

Tabella 2.8. Tipologia di inquinanti particellari in ambiente museale

* sistema colloidale in cui la frazione solida ha diametro aerodinamico inferiore al micron

I flussi di turisti incidono notevolmente sulla composizione del particolato presente nelle aree espositive indoor. I turisti possono infatti essere responsabili di sostanziali cambiamenti nella composizione chimica del particolato sospeso. In inverno ad esempio, in presenza di alti tassi di umidità il materiale organico introdotto dai turisti (residui di pelle, spore trasportate sui tessuti, ecc.) e in può unirsi e venire assorbito da parte di particelle di fuliggine (prodotte dai sistemi di riscaldamento) originando agglomerati di particelle di natura chimica diversa rispetto ai semplici depositi particellari. Questi agglomerati risultano infatti particolarmente dannosi perché hanno caratteristiche adesive e non possono essere rimossi dalle opere d'arte con la spazzolatura ordinaria. Per questo il particolato trasportato durante il periodo invernale è potenzialmente più dannoso rispetto a quello estivo anche se la polverosità è generalmente maggiore nei mesi estivi [46,47] La polvere diffusa dai visitatori tende inoltre ad essere più marcata in zone in cui i flussi d'aria sono turbolenti, come le zone d'ingresso e nelle vicinanze di tendaggi, mentre saranno minori nelle aree centrali delle aree espositive e in prossimità della fine dei percorsi espositivi [48] Le deposizioni si concentrano in genere fino ad 1.5m di altezza e la loro frazione fibrosa, dovuta principalmente alla frizione dei vestiti, sarà riscontrabile tra gli 80 e i 150 cm.

La distanza ottimale per la collocazione di tessuti fragili o non collocati in teche sarà perciò a circa 2m di distanza rispetto al percorso di fruizione in quanto la concentrazione di polveri decade del 50% ogni metro e a 30cm da terra, per limitare l'apporto di sporco e deposito portato dalle scarpe dei visitatori [49]

È comunque difficile stabilire un link diretto tra il deposito di polvere e l'afflusso di turisti. La media della quantità di particolato per settimana non è infatti proporzionale al numero di visitatori [50]

2.3.3 Interazioni superficiali tra particelle e fibre

Il particolato presente nelle aree espositive, come già descritto precedentemente, sia sotto forma di particolato di particolato sospeso (TSP) che come deposizioni, interagisce facilmente con i tessuti storico-artistici a causa della loro irregolarità superficiale e della buona permeabilità che li rende 'filtri' per le polveri sottili. Data la loro natura, i tessuti rappresentano perciò dei veri e propri collettori di sporcizia e ricettacoli di deposizioni [18,51]. La natura chimica e la forma stessa delle particelle può dare origine a interazioni differenti con le fibre dei tessuti. La ritenzione del particolato genera diversi effetti superficiali sui tessuti che possono essere sia di tipo chimico (ad es. fenomeni di foto-ossidazione) che fisico esplicitati attraverso la creazione di micro e macro-occlusioni e conseguente riduzione della mobilità stessa delle fibre che compongono il tessuto. La presenza, ad esempio, di polvere con spigoli molto aguzzi, di microrganismi e tracce di catalizzatori, insieme ad un elevato contenuto di acqua, possono provocare un sensibile aumento della velocità delle reazioni di foto deterioramento dei tessuti. Gli inquinanti di natura particellare insolubili (polveri, carbonio organico, nero fumo) sono invece causa di incrostazioni meccaniche sulla superficie dell'oggetto spesso difficilmente rimuovibili [52].

Interazione di tipo fisico - Creazione di occlusioni e diminuzione della mobilità

Osservando i tessuti che hanno subito marcati fenomeni di deposizione è possibile individuare zone di accumulo del particolato dette occlusioni. In relazione alle aree di tessuto in cui sono avvenute queste occlusioni, si possono distinguere due tipologie: le micro-occlusioni e le macro-occlusioni. Se i fenomeni di deposito sono avvenuti principalmente tra le piccole fessure delle fibre si definiscono micro-occlusioni, se invece le particelle di polveri restano intrappolate tra le fibre dei fili e tra i fili del tessuto vengono dette macro-occlusioni. Le micro-occlusioni sono tipiche dei tessuti naturali (cotone, seta, lana) [53-55]. Lo sporco, depositandosi sulle fibre e tra le fibre, determina in alcune circostanze la diminuzione della loro mobilità reciproca [56].

Interazione di tipo fisico-chimico - Creazione di link tra particelle e fibre

Alcuni studi, hanno evidenziato come la presenza di depositi incoerenti, in particolare le frazioni di polvere grezza, possano legarsi intimamente alle fibre naturali (cotone e seta) creando delle strutture che possono modificare le caratteristiche fisico meccaniche delle fibre stesse [14].

La natura igroscopica delle fibre e dei depositi possono favorire il processo di adesione delle polveri ai supporti tessili. È stato infatti documentato che le particelle di polvere o particolato possono in alcuni casi legarsi alle fibre attraverso la creazione di ponti rigidi come si può vedere in figura 2.10 [57]. Tali strutture sono inoltre particolarmente sensibili a variazioni dimensionali legate a cicli di deliquescenza e solidificazioni in seguito a variazioni stagionali o giornaliere di umidità e temperatura. Valori di umidità relativa al di sotto del 20-30% hanno effetti cementanti minimi mentre al di sopra dell'80% gli effetti sono più evidenti con la formazione di una sorta di legante detto appunto 'cemento' tra le fibre e le particelle. Queste strutture che uniscono il particolato al tessuto possono formarsi anche in brevi periodi di tempo (meno di un giorno) se le condizioni sono favorevoli [57].

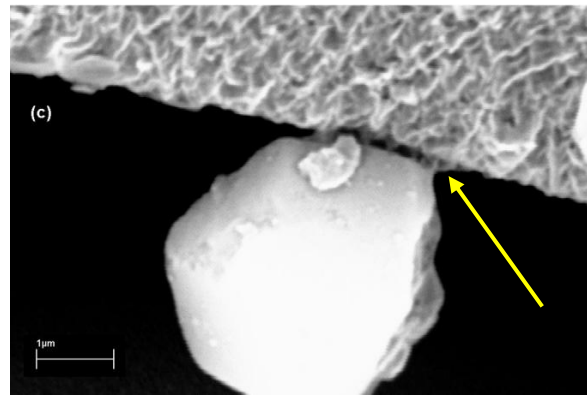


Figura 2.10 formazione link tra una particella di sporcizia e una fibra [57]

Interazione di tipo chimico

Le interazioni di tipo chimico tra particolato e manufatti sono in genere legate alla creazione di nuovi legami o composti chimici. In particolare, per quanto riguarda specificatamente i legami tra sporco e tessuto, le interazioni di tipo chimico possono essere ricondotti a quattro tipi di legami diversi [14].:

- forze di Van der Waals, che favoriscono l'adesione dei depositi pulverulenti anche in assenza di cariche elettriche stabili a livello molecolare;
- legami che si stabiliscono a mezzo di uno strato idrorepellente (sostanze oleose o grasse) intermedio;
- ioni metallici polivalenti, caricati positivamente, uniscono sporco e tessuto entrambi caricati negativamente l'uno all'altro;
- gruppi ossidrilici di una fibra tessile (lino e cotone) si legano ad una particella di sporco dotate anch'esse di gruppi ossidrilici in superficie grazie all'attività di ioni idrogeno che agiscono da ponte.

In più va aggiunta la possibilità di adesione dovuta all'inclusione meccanica e provocata dall'irregolarità della superficie stessa dei tessuti [14,58]. In seguito alla formazione di questi legami, il particolato depositato sui tessuti può formare legami irreversibili con la superficie delle fibre difficilmente rimovibili se non con lavaggi o utilizzando prodotti aggressivi [1]

2.3 Le normative vigenti in materia di conservazione dei tessuti

I tessuti naturali sono materiali organici molto sensibili alle condizioni di conservazione, e che possono degradarsi attraverso molteplici meccanismi (biodeterioramento, processi foto-ossidativi, termo-ossidativi ecc.). Fondamentale è perciò avere delle linee guida sulle condizioni ottimali di conservazione per la salvaguardia di tessuti storico-artistici nel tempo. In base ai decreti ministeriali (D.M. 10 maggio 2000 e il D.M. 27 luglio 2001) [59,60] si possono ricavare i parametri per la corretta conservazione di varie tipologie di manufatti come tele dipinte, opere lignee, materiali fotografici ecc. tra cui anche i tessuti di interesse storico-artistico. Di seguito riportiamo le indicazioni ministeriali relative alla conservazione dei tessuti storico-artistici e di altri oggetti conservati all'interno di Palazzo Fortuny (manoscritti tele, oggetti in legno, ecc.). Bisogna infatti considerare che spesso all'interno di musei coesistono opere diverse tra di loro per materiali e con esigenze conservative differenti, sarà perciò necessario molte volte mediare le condizioni al fine di trovare un compromesso.

Fonti luminose

I tessuti sono tra i materiali maggiormente sensibili alla luce. L'eccessiva esposizione può causare perdita di caratteristiche meccaniche ed estetiche (come lo sbiadimento dei tessuti tinti). C'è da considerare inoltre che la luce può essere assorbita dalla tintura e la sua energia trasmessa alle fibre innescando ulteriori processi di degrado e viceversa.

L'illuminamento che colpisce i manufatti può essere di natura artificiale o naturale. Le frequenze più dannose sono quelle relative all'ultravioletto e quelle nello spettro del visibile verso il blu, provocano danni più o meno intensi, mentre le radiazioni con frequenza verso l'infrarosso sono invece trascurabili. Per questi motivi bisogna considerare la luce naturale più pericolosa rispetto a quella artificiale, perché più difficile da schermare e perché rappresenta la principale fonte di UV [18]. Nella tabella 2.9 vengono riportate come da normativa le raccomandazioni internazionali che classificano i beni culturali in quattro categorie in base alla loro fotosensibilità e ne stabiliscono i corrispettivi livelli massimi di illuminamento [59,60]. Nel caso di più materiali e/o tecniche deve esser posto il limite corrispondente alla classe più protetta.

Categoria di fotosensibilità	Tipologia di reperti	Illuminamento massimo (lux)
1 Molto bassa	Reperti e manufatti relativamente insensibili alla luce: metalli, materiali lapidei e stucchi senza strato di finitura, ceramiche, gioielleria, smalti, vetri, vetrate policrome, reperti fossili	>300
2 Media	Reperti e manufatti moderatamente sensibili alla luce: pitture ad olio ed a tempera verniciate, affreschi, materiali organici non compresi nei gruppi 3 e 4 quali quelli in cono, osso, avorio, legno	150
3 Alta	Reperti e manufatti altamente sensibili alla luce: tessuti, costumi arazzi, tappeti, tappezzeria, acquerelli, pastelli, stampe, libri, cuoio tinto, pitture e tempere non verniciate, pittura a guazzo, pitture realizzate con tecniche miste o 'moderne' con materiali instabili, disegni a pennarello, piume, pelli e reperti botanici, materiali etnografici e di storia naturale di origine organica o tinti con prodotti vegetali, acarta pergamena, legni bagnati	50
4 Molto alta	Reperti e manufatti estremamente sensibili alla luce: mummie, sete, inchiostri, coloranti e pigmenti a maggior rischio di scoloritura come lacche ecc..	50

Tabella 2.9 Categorie fotosensibilità di manufatti artistici e rispettivi parametri di illuminamento massimo

A livello ministeriale oltre a classificare i reperti in quattro categorie di fotosensibilità in relazione ai livelli massimi di illuminamento che possono subire vengono anche specificati i parametri di illuminamento massimi annui. Per la prima categoria (fotosensibilità molto bassa) non vengono espressi valori mentre per le altre tre, vale a dire fotosensibilità media, alta e molto alta vengono stabiliti valori di 500.000, 150.000 e 50.000 Lux ora/anno (LO) [59,60].

Parametri climatici

L'umidità e la temperatura hanno effetti sia sui tessuti che sulle tinture. Una variazione forzata dell'umidità relativa può provocare sensibili sbiadimenti di tessuti, mentre valori elevati influenzano anche la formazioni di muffe. La temperatura invece, come pure gli sbalzi di temperatura, possono innescare sbiadimenti di particolari tinture e, in sinergia con altri la luce e ossigeno, innescare un degrado di natura chimica (processi di termo-ossidazione) [1,14].

Da normativa sono descritti i parametri microclimatici, riportati in tabella 2.10 entro i quali sarebbe opportuno conservare le diverse categorie di materiali per prevenire danni di tipo fisico-chimico o microbiologico [59,60].

Come è possibile vedere mentre vi è una certa uniformità per quanto riguarda la temperatura di conservazione, variabili sono gli intervalli indicati per l'umidità relativa. Questi sono in genere strettamente legati alle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali che costituiscono il bene. Nel caso dei tessuti, non considerando gli attacchi microbiologici, non vengono espresse in normativa temperature precise alle quali conservarli ma i tassi di umidità relativa devono rimanere tra il 50 e il 60% per la seta e tra il 40 e il 60% per tappeti ed arazzi in genere [59,60].

Manufatti	U.R. (%)	Temperatura (°C)
Seta	50-60	
Tessuti tappeti, arazzi, tappezzeria in stoffa	40-60	
Materiale organico in genere	50-65	19-24
Carta cartapesta	50-60	19-24
Libri e manoscritti	50-60	19-24
Pastelli,acquerelli, disegni e stampe	50-60	19-24
Pitture su tela	35-50	19-24

Tabella 2.10 Parametri microclimatici ottimali per diverse categorie di manufatti

Per quanto riguarda gli attacchi microbiologici sui materiali organici i parametri sono riportati in tabella 2.11:

Manufatti organici	Note	Umidità relativa (%)	Max escursione giornaliera UR	Temperatura °C	Max escursione giornaliera T
Tessuti	Di natura cellulosica	30-50	6	19-24	1,5
	Di natura proteica	>50-55		19-24	1,5
Dipinti	Su tela	40-55	6	19-24	1,5
	Su tavola	50-60	2	19-24	1,5
Carta		40-55	6	18-22	1,5
	Pastelli, acquerelli	<65		<10	
	Libri e manoscritti	45-55	5	<21	3
	Materiale grafico	45-55	5	<21	3

Tabella 2.11 Parametri microclimatici di conservazione di manufatti artistici per la prevenzione di danni microbiologici

Inquinanti

L'aria è considerato il veicolo di trasporto degli inquinanti gassosi e particellari che maggiormente possono creare danno ai manufatti tessili e che possono creare situazioni di innesco di degrado con cinetiche veloci. I tessuti vista la loro irregolarità superficiale e la loro natura igroscopica possono diventare dei grandi 'bacini' di raccolta del particolato sospeso e di altri inquinanti [14]. Tra gli inquinanti presenti in atmosfera i più pericolosi per i tessuti sono: gli ossidi di zolfo e di azoto, che creano variazioni di pH sulle superfici dei manufatto, scatenando reazioni di idrolisi acida, e il particolato, che provoca reazioni di degradazione chimica [1]. Vengono riportati in tabella 1.22 i valori limite raccomandati di inquinanti aerodispersi (da non superare). Il valore limite di particolato sembrerebbe essere intorno ai 20/30 µg/m³ sulla base dei dati sperimentali disponibili.

INQUINANTE	ARCHIVI	MUSEO	UNI 10586/97
Biossido di zolfo	5-10 ppb (vol)	< 0,4 ppb (vol)	≤10 µg/m ³
Biossido di azoto	5-10 ppb (vol)	<2,5 ppb (vol)	≤2 µg/m ³ (NO _x)
Ozono	5-10 ppb (vol)	1 ppb (vol)	≤ 2 µg/m ³
PS (fine)*	Rimoz >95%	Rimoz >95% (>2µm)	≤ 50 µg/m ³

*per il particolato si intende la frazione fine (PM 10)

Tabella 1.22 Categorie fotosensibilità di manufatti artistici e rispettivi parametri di illuminamento massimo

La normativa prevede inoltre che ogni qualvolta si cominci a progettare un nuovo impianto di condizionamento fisico ambientale deve sempre prevedere un sistema di filtraggio degli inquinanti aerodispersi gassosi e particellari, sia dell'aria esterna immessa all'interno, sia dell'aria interna riciclata, per evitare il possibile e conseguente incremento della concentrazione degli inquinanti indoor [59,60].

Microrganismi

Il biodeterioramento di materiali tessili può essere causato come discusso in precedenza da organismi o microrganismi che nella maggior parte dei casi vedono il substrato come fonte di nutrimento. Generalmente la sensibilità delle fibre cellulosiche è maggiore nei confronti dei microrganismi mentre le fibre proteiche sono più facilmente attaccate da insetti. È utile quindi, per quanto riguarda in particolar modo ambienti che accolgono manufatti di natura organica, la determinazione della concentrazione degli inquinanti biologici. Questa prova viene condotta attraverso analisi aerobiologiche, che consentono di individuare i microrganismi presenti nell'aria e di definire i livelli di rischio di biodeterioramento per i manufatti e di rischio igienico sanitario per i visitatori [59,60]. Valori stabiliti da documento Normal 39/93 (1994) viene espressa in UFC/m³ unità formanti colonie per metro cubo d'aria [59,60]. La colonizzazione dei materiali ed il loro conseguente danneggiamento si realizza inoltre solo se ad elevate concentrazioni di inquinanti biologici si affiancano condizioni microclimatiche favorevoli al loro sviluppo UR > 65% e T > 20°C. Organizzazioni americane considerano valori limite per la carica batterica 750 UFC/ m³ e per la carica fungina 150 UFC/ m³ [59,60].

Bibliografia

- [1] Timar-Balazsy, J. and Eastop, D., *Chemical Principles of Textile Conservation*, Butterworth-Heinemann, London, 1998
- [2] Ezio Martuscelli, *Degradazione delle fibre naturali e dei tessuti antichi. Aspetti chimici, molecolari, strutturali e fenomenologici*, Firenze 2006
- [3] F. Pertegato, *Restauro dei materiali tessili I-Controllo delle condizioni ambientali*
- [4] Walter J. Moore, *Chimica Fisica*, Padova 1967
- [5] Ottorino De Lucchi, *Appunti di lezione chimica dei pigmenti e dei coloranti*, Scienze Chimiche per la Conservazione ed il Restauro A.A. 2011/2012
- [6] R. Feller, *Accelerated Aging – photochemical and thermal aspects* -, USA 1994
disponibile su www.getty.edu
- [7] Salvatore Lorusso, Bruno Shippa, *Le Metodologie Scientifiche per lo Studio dei Beni Culturali: diagnosi e valutazione dei beni culturali*, Roma 1992
- [8] Zendri, appunti di lezione, Scienze Chimiche per la Conservazione ed il Restauro A.A. 2011/2012
- [9] G. Levita, *Invecchiamento Fisico dei Polimeri*, in 'Macromolecole, Scienza e Tecnologia', Vol I, V-7, pp 412-421 Pisa 1986
- [10] A. Dăscălescu, *Le séchage et ses applications industrielles* , Paris 1969
- [11] Giua Michele, *Trattato di Chimica Industriale Vol. VI Tomo 2*, Torino 1957-1963
- [12] Paolo Calivini, dispense di lezione, Scienze Chimiche per la Conservazione ed il Restauro A.A. 2011/2012
- [13] Gian Maria Colonna, *Metodi per la valutazione dello stato di conservazione di manufatti in seta, AA.VV. Dipinti su tela e metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- [14] Francesco Pertegato, *I tessuti, degrado e restauro*, Firenze 2004
- [15] M. Romanò, G. Freddi, *Seta e microscopia a scansione*, in «Dipinti su tela», a cura di G. C. Scicolone, Nardini Editore, pp. 61-76, Firenze (1993).
- [16] G. Caneva, M.P. Nugari, O. Salvadori, *La Biologia nel restauro*, Nardini Editore, Firenze 1997

- [17] J. S. Crighton, *Textiles Conservation*, in «Polymers in Conservation», pp. 82-107, Edited by N. S. Allen, M. Edge, C. V. Horie, Royal Society of Chemistry, Bath (UK) (1992).
- [18] R. Massafra, G. M. Colonna, A. Bianchi Svilokos, *La Seta*, **2**, 5 (1990).[[E. Martuscelli, «Le fibre di polimeri naturali nell'evoluzione della civiltà. Le fibre di seta», Monografie Scientifiche, Serie Scienze Chimiche, CNR, Roma (1999).
- [19] M. Tsukada, G. Freddi, N. Minoura *J. of Appl. Polym. Sci.*, **51**, 823 (1994).
- [20] Randall R. Bresee, *General Effects of Ageing on Textiles*, JAIC 1986, Volume 25, Number 1, Article 4 (pp. 39 to 48) disponibile su http://cool.conservation-us.org/jaic/articles/jaic25-01-004_2.html
- [21] S. Lo Russo, B. Schippa, «Le Metodologie Scientifiche per lo Studio dei Beni Culturali», Bulzoni Editore, Roma (1992)].
- [22] S. Landi, *The Textiles Conservator's Manual*, Butterworth Oxford (1999)].
- [23] V. Riganti, E. Galloti, S. Lorusso, L. Gallotti, M. Marabelli, *Science and Technology for Cultural Heritage*, **4(1)**, 51 (1995)].
- [24] G. Freddi et Al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **55**, 481 (1995).].
- [25] J. R. Daniels, *Cellulose, Structure and properties*, in «Encyclopedia of Polymer Science and Engineering», pp. 90-123, Vol. 3, Edited by H.F. Mark et Al., J. Wiley&Sons, New York (1985).
- [26] M. H. El-Rafie et Al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 311(1983).][
- [27] T. Haga et Al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **78**, 364 (2000).
- [28] Catherine Nightingale 'Designing an Exhibition to minimise risks to costume on open display' *The Conservator* n. 29 2005/6 35-49]
- [29] [libro sulle tappezzerie delle dimore storiche]
- [30] Eastop. Brooks, Preprints icom triennial meeting Edinburgh, Scotland 1996, Working group B9 textiles. 'To Clean or Not to Clean: The Value of Soils and Creases'
- [31] Dunan-Rees, 'The cleaning of historic textiles -methodological and scientific aspects' in Pertegato, F., ed., *Conservation and Restoration of Textiles Proceedings of the International Conference, Como 1980*, CISST-I.ombardy Section, 1982, pp. 191-6.

- [32] F. Eastop, D. and Brooks, M., 'Difficult decisions in cleaning: the **evidential** value of soils and creases' in 2. *Ehemaligentreffen der Ahegg-Stiftung, Referate der Tagung, November 1996*, Abegg-Stiftung, 1996, pp. 10-19.
- [33] Barbara Krupinska, Anna Worobiec, Giuliana Gatto Rotondo, Assessment of the air quality, Assessment of the air quality (NO₂, SO₂, O₃ and particulate matter) in the Plantin-Moretus Museum/ Print Room in Antwerp, Belgium, in different season of the year, *Microchemical Journal* 102 (2012) 49-53
- [34] Dario Camuffo, 1999. *Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy*. *The Science of the Total Environment* 236 (1999) 135-152
- [35] Kristin Gysels, 2004. *Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp, Belgium*. *Journal of Cultural Heritage* 5 (2004) 221–230
- [36] Y H Yoon, P Brimblecombe 2000b 'Dust at Felbrigg Hall, Views 32 National Trust pp 31-32] [H Lloyd, C M Grossi, P Brimblecombe 'Low-technology dust monitoring for historic collection' *Journal of the Institute of Conservation* vol 34 n 1 2011 pp 104-114]
- [37] M. Brooks, A. Lister, D. Eastop, T. Bennet, 'Artifact or information? Articulating the conflicts in conserving archeological textiles ICC Congress, Copenhagen, 1996
- [38] Preprints icom triennial meeting Edinburgh, Scotland 1996, Working group B9 textiles. Eastop. Brooks, 'To Clean or Not to Clean: The Value of Soils and Creases'].
- [39] Watt J. , Hamilton R., *The effects of air pollution on Cultural Heritage*, 2009
- [40] F Monforti, R Bellasio, R Bianconi, An evaluation of particle deposition fluxes to cultural heritage sites in Florence, Italy]
- [41] A. Schieweck 2005, Organic and inorganic pollutants in storage rooms of the Lower Saxony State Museum Hanover, Germany. *Atmospheric Environment* 39 6098-6108].
- [42] Garry Thompson, *The museum environment*, London 1978]
- [43] [Adriana Bernardi, *Conservare opere d'arte. Il microclima negli ambienti museali*,]
- [44] [Kristin Gysels, Felix Deutsch, René Van Grieken Characterisation of particulate matter in the royal museum of fine arts, Antwerp, Belgium]

- [45] [Barbara krupinska, Anna Worobiec, Giuliana Gatto Rotondo, Assestmenti of the air quality ,Assestement of the air quality (NO₂, SO₂, O₃ and particulate matter) in the Plantin-Moretus Museum/ Print Room in Antwerp, Belgium, in different season of the year, Microchemical Journal 102 (2012) 49-53]
- [46]]. [H Lloyd, K Lithgow, P Brimblecombe, Y H Yoon K Frame B Knight 2002 'The effects of visitor activity on dust in historic collection' The Conservator 26 pp 72-82]
- [47] [Anna Worobiec Microchemical Journal 90 (2008) 99-106 *A seasonal study of atmospheric conditions influenced by the intensive tourist flow in the Royal Museum of Wawel Castle in Cracow, Poland*].
- [48] Y H Yoon, P. Brimblecombe 2000 'Contribution of dust at floor level to particle deposit within the Sainsbury centre for visual arts' Studies in Conservation 45 pp 127-137].
- [49] A Phenix, a Burnstock 1990 'The Deposition of dirt: a review of the literature with scanning electron microscope studies of dirt on selected paintings. Eds Dirt and pictures separated. London UKIC pp 11-18].
- [50] Stuart J. Adams, D. Ford Monitoring of deposited particles in cultural properties: the influence of visitors, Atmospheric Environment 35 (2001) 4073-4080]
- [51] C H Masland 'soil retentions of various fibers' Rayon textile monthly 20 573-574, 654-656 1939
- [52] P B Hatchfield 'Pollutants in the museum environment, practical strategies for problem solving in design exhibition and storage' London: Archetype Publications 2002 LIBRO. J. Tetreault 'Airbone pollutants in museums, galleries and archives: risk assessment, control strategies and preservation management'. Ottawa CCI
- [53] J Compton, W J Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers' textile research journal 23, 1953, 418-423.
- [54] Compton Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers: the effect of yarn and fabric structure in soil retention' t.r.j. 23 pp 418-423 1953.
- [55] Compton Hart 'The theory of soil-fiber complex formation and stability' t.r.j. 24 pp 263-264 1954]

- [56] S. Adams 'Dust deposition and measurement – a modified approach' Environmental Technology 1997 n. 18 pp 345-50.
- [57] Brimblecombe et al., The Cementation of coarse dust to indoor surfaces, Journal of cultural Heritage 10, 2009, pp 410-414]
- [58] Erik Kissa, Kinetics and mechanism of detergency Part III: Effect of soiling condition an particulate soil detergency, Textile Research Journal 1979 384-389]
- [59] D.M. 10 maggio 2000 *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei,*
- [60] D.M. 27 luglio 2001 *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei,*

·3·

PARTE SPERIMENTALE

In questa sezione saranno descritte le tecniche di indagine utilizzate nel corso dello studio e le metodologie adottate per effettuare talune analisi. Saranno inoltre esposte le condizioni sperimentali utilizzate per le due parti di studio: la prima riguardante le condizioni e i tempi di permanenza dei campioni a Palazzo Fortuny e la seconda che riguarda la deposizione forzata di polveri in laboratorio.

3.1 Tecniche analitiche e metodi

3.1.1 Microscopia

Le tecniche microscopiche sono fondamentali per quanto riguarda lo studio di manufatti tessili e dei depositi polverulenti in quanto permettono di caratterizzare il tessuto, definire la morfologia dei depositi, discernere i vari tipi di fibre, nonché di osservare e aiutare a comprendere le cause di eventuali processi di degrado. L'osservazione dei tessuti è stata effettuata sia presso Innovhub SSI - Divisione Stazione Sperimentale per la Seta di Milano che presso l'Università Ca' Foscari mentre l'analisi e la caratterizzazione dei depositi è stata effettuata in esclusiva dall'Università.

3.1.1.1 Stereomicroscopia e microscopio polarizzato

Le osservazioni della superficie dei tessuti in tutte le parti dello studio e la prima caratterizzazione dei depositi di polvere raccolti a Palazzo Fortuny sono state eseguite mediante stereomicroscopio OLYMPUS SZ-61 (Innovhub SSI) e OLYMPUS SZX16 (Università Ca' Foscari). Per caratterizzare al meglio le fibre sono state inoltre acquisite delle immagini con dei microscopi in luce polarizzata OLYMPUS BX-51 (Innovhub SSI) e OLYMPUS BX-41 (Università Ca' Foscari) di singole fibre ricavate dai tessuti. Per quest'ultime osservazioni, singoli filati di trama e di ordito sono stati prelevati dal tessuto, sminuzzati con le forbici fino ad ottenere un groviglio fibroso, posto poi su un vetrino portaoggetti. A questo punto le fibre vengono aperte le fibre con due aghi da microscopio, si aggiungono delle gocce di acqua e glicerina, ricoprendo infine con un vetrino da microscopio in modo da favorire la planarità del tutto [...]

3.1.1.2 Microscopio elettronico a scansione (SEM)

Il microscopio elettronico permette un potere di ingrandimento maggiore rispetto al microscopio ottico poiché utilizza un fascio di elettroni anziché di fotoni. Il potere di risoluzione di un microscopio è infatti inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda della radiazione che utilizza. Usando quindi elettroni, caratterizzati da una lunghezza d'onda minore rispetto ai fotoni, per illuminare un campione si raggiunge una risoluzione di parecchi ordini di grandezza superiore rispetto ad un apparecchio ottico a fotoni.

Metodo di funzionamento

Una "sonda" molto sottile di elettroni con energia fino a 30 keV viene focalizzata sulla superficie del campione all'interno del microscopio e viene indotta a esercitare una scansione in forma di una successione di linee parallele. Sulla superficie del campione sottoposta all'impatto degli elettroni si verificano alcuni fenomeni. I più importanti per la microscopia elettronica sono l'emissione di elettroni secondari con energie di qualche decina di elettronvolt (eV) e la riemissione o riflessione di elettroni ad alta energia o retrodiffusi appartenenti al raggio primario. La configurazione e la disposizione dei rivelatori dei due tipi di elettroni emessi è tale che vengono sfruttate al meglio le peculiarità del meccanismo di emissione. In particolare gli elettroni secondari, che provengono dagli strati più superficiali del campione, vengono utilizzati

per la costruzione di immagini ingrandite fino a 200.000x e risolte fino a 5nm, mentre gli elettroni primari servono all'identificazione degli elementi componenti il campione. L'intensità di ogni singolo elemento (eV) è una funzione diretta del numero atomico medio della sostanza investita dal raggio primario e perciò caratteristica.

I componenti principali del SEM sono:

- la fonte di elettroni (filamento di tungsteno);
- la colonna dove viaggiano gli elettroni emessi, che contiene un numero di lenti per la focalizzazione del fascio;
- una camera contenente i campioni da analizzare

Gli elettroni sono prodotti in cima alla colonna, sono accelerati verso il basso e passano attraverso una combinazione di lenti e aperture che producono un raggio sottile (probe) di elettroni che colpisce la superficie del campione. Nei microscopi elettronici ci sono due lenti elettromagnetiche: il condensatore e l'obiettivo. Il condensatore controlla il numero di elettroni nel fascio (la corrente) per una data dimensione dell'apertura, e la lente obiettivo è responsabile della focalizzare degli elettroni sul campione. Il campione è montato su uno stage contenuto nella camera e, sia la colonna che la camera sono sottovuoto (figura 3.1).

La corrente elettronica emessa è raccolta dai rivelatori e amplificata contemporaneamente alla scansione del fascio elettronico sul campione. Le variazioni nella forza del segnale risultante sono usate per variare la brillantezza della traccia del raggio elettronico che fa una scansione su uno schermo fluorescente sincronica con il raggio elettronico sul campione.

L'ingrandimento prodotto dal microscopio elettronico a scansione è il rapporto tra le dimensioni tra l'immagine finale prodotta ed il campo esplorato dal fascio elettronico sul campione. Normalmente l'ingrandimento può andare da 10 a 200.000x ed il potere risolutivo può spingersi fino a 4nm (40 Ångstrom). [1,2]

La microanalisi

L'analisi chimica (microanalisi) nel SEM viene realizzata misurando l'energia e la distribuzione delle intensità dei raggi X generati dal fascio elettronico sul campione utilizzando un rivelatore a dispersione di energia EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy). L'analisi che viene prodotta può essere sia dell'area che in quel momento viene ingrandita, oppure, fermando la scansione del fascio elettronico, di un punto di interesse sulla superficie del campione (microanalisi). Dato che la porzione di spazio eccitata dal fascio elettronico, che produce lo spettro X, è un intorno del punto di pochi micron, il SEM+EDS è un potente mezzo di indagine su solidi chimicamente disomogenei a scala microscopica. Il fascio elettronico ad alta energia (20 eV) che interagisce con la superficie del campione genera una serie di segnali che sono rilevati dall'apposito detector. In particolare, per ogni punto scandito si producono:

- **elettroni secondari (SE)**, sono gli elettroni in origine legati ai livelli atomici più esterni, che ricevono dal fascio incidente un'energia addizionale sufficiente ad allontanarli. Hanno un'energia compresa tra 0 e 50 eV e sono emessi da spessori superficiali del campione (~10nm). Sono frequentemente utilizzati per lo studio della morfologia superficiale;
- **elettroni retrodiffusi (BSE)**, rappresentano quella porzione di elettroni del fascio che viene riflessa con energia che va da 50 eV fino a quella di incidenza. Sono portatori di

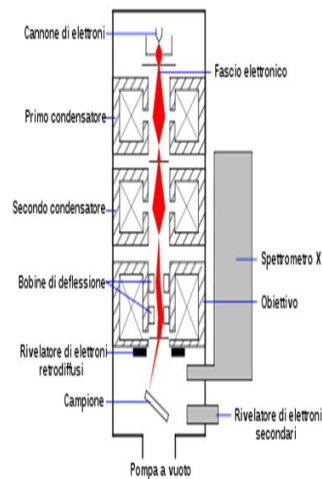


Figura 3.1 Schema SEM

segnali principalmente compositivi e morfologici (topografici) e provengono da profondità massime di alcuni μm . La quantità di BSE dipende oltre che dalla morfologia della superficie anche dal numero atomico medio del materiale presente nel piccolo volume irradiato dal fascio. L'immagine BSE rispecchia la variazione del numero atomico medio all'interno del campione e permette quindi di individuare i minerali che costituiscono le diverse parti del campione;

- **Raggi X**, caratteristici degli elementi che compongono il campione in esame, possono essere registrati e discriminati sulla base della lunghezza d'onda (WDS) o dell'energia (EDS). L'intensità di queste radiazioni caratteristiche è proporzionale alla concentrazione dell'elemento nel campione. La microanalisi ai raggi X dà informazioni specifiche circa la composizione degli elementi del campione, in termini di quantità e distribuzione.

Attraverso la microscopia elettronica a scansione è possibile ottenere maggiori informazioni superficiali dai campioni, in primo luogo per quel che riguarda i depositi: Considerata la granulometria molto fine che li distingueva è stato possibile caratterizzarli in maniera più precisa, dato che l'osservazione al microscopio ottico non risultava essere sufficiente. Con questa tecnica è stato possibile inoltre fornire un'analisi elementare del particolato, riuscire a documentare lo stato delle fibre e, ove fossero presenti, verificare la presenza di interazioni o legami che si sono venuti a creare tra il particolato e le fibre dei tessuti.

Preparazione dei campioni per osservazioni SEM-EDS

La preparazione di campioni di tessuto per l'osservazione al microscopio elettronico prevede di norma l'eliminazione di polvere, sporcizia e sostanze estranee che possono essere presenti sul supporto tessile attraverso due estrazioni successive in acqua e in etere [3]. Dal tessuto così trattato si ottengono dei pezzetti di filato sia in direzione della trama che in ordito che vengono disposti su dei supporti adesivi con caratteristiche di conducibilità. Questi sostegni adesivi vengono fatti aderire a dei cilindri portacampioni in alluminio adatti ad essere collocati all'interno della camera di osservazione del SEM. Prima della collocazione nel SEM nel caso dei tessuti si procede in genere alla metallizzazione dei campioni al fine di migliorare la conducibilità e di conseguenza la qualità delle immagini è [3].

In questo studio, i campioni non sono stati preparati con l'estrazione in acqua e in etere, in quanto lo scopo dell'osservazione al SEM era di caratterizzare la presenza di materiali estranei e le interazioni tra particelle polverulente e le fibre del tessuto. I campioni di tessuto sono perciò stati presi tal quali e metallizzati per favorire la conducibilità elettrica e termica.

Le immagini e analisi SEM ottenute al DAIS (Ca' Foscari) sono state realizzate utilizzando un microscopio Jeol (Tokyo, Giappone) JSM 5600 LV equipaggiato con un detector per microanalisi 6587 EDS (Energy Dispersive X-ray Spectrometry) con un sistema per microanalisi LINK ISIS. È stato utilizzato un voltaggio di accelerazione di 20 kV per l'osservazione dei depositi di polvere e per effettuare le analisi EDS mentre per l'osservazione dei tessuti e per acquisire così maggiori informazioni superficiali lo strumento è stato settato a 15 kV. Il campione è stato depositato su un porta-campione con foglio adesivo in grafite e poi dorato mediante sputtering come già precedentemente descritto per un tempo di 30 secondi per le polveri mentre per i tessuti circa 150 secondi. Sono stati sfruttati ingrandimenti variabili da 100X a 10000X.

Le osservazioni fatte da Innovhub SSI sono state ottenute con un FEG??

3.1.2 Viscosimetria

Un parametro molto importante per valutare lo stato di conservazione delle fibre tessili di interesse è la loro tenacità. La tenacità di una fibra tessile dipende dalla sua morfologia, dalla struttura supermolecolare e dalla lunghezza della macromolecole che sono la base costituente delle fibre naturali. La valutazione della tenacità delle fibre non viene sempre fatta perché distruttiva e presuppone un certo quantitativo minimo di campione per poter effettuare l'analisi secondo norma [4].

Le tecniche che si utilizzano principalmente per valutare la lunghezza delle macromolecole sono essenzialmente due: la *Gel Permeation Chromatography* (GPC) detta anche *Size-Exclusion Chromatography* (SEC) e le tecniche viscosimetriche. La GPC permette la valutazione del grado di polimerizzazione medio numerico (DP_n), del grado di polimerizzazione medio ponderale (DP_w) e la caratterizzazione completa della distribuzione dei pesi molecolari delle fibre costituenti i tessuti. Le tecniche viscosimetriche forniscono invece la misura del grado di polimerizzazione medio viscosimetrico (DP_v) per i supporti cellulosici e della viscosità intrinseca per quelli serici. Le tecniche viscosimetriche sono largamente utilizzate per analisi di routine in quanto richiedono attrezzature molto semplici come un cronometro e un viscosimetro ma una cura particolare per la loro effettuazione [3,6]. Le tecniche viscosimetriche sono in grado di dare dei valori molto chiari sulla lunghezza delle macromolecole che costituiscono il manufatto tessile ma non forniscono una chiara lettura dello stato di conservazione del tessile. Le misure risultano spesso diverse da punto a punto e non è possibile ricavare un valore medio dai vari punti indagati del manufatto [7]. I dati ottenuti da questo tipo di analisi vanno quindi accompagnati da analisi visive, microscopiche e da prove fisico-meccaniche.

La lunghezza delle catene delle macromolecole delle fibre tessili sono ovviamente variabili in relazione ai vari prodotti presenti in commercio e in relazione al processo di crescita e ai trattamenti che hanno subito i tessuti in fase di lavorazione nonché in relazione ai fenomeni di degrado dovuti a fattori fotochimici, biologici o prettamente chimici [6,7].

In questo studio sono state utilizzate le tecniche viscosimetriche allo scopo di valutare possibili variazioni legate alle deposizioni. Le specifiche relative al cotone e seta vengono spiegate di seguito.

3.1.2.1 Determinazione grado di polimerizzazione del cotone

Per la misura del grado di polimerizzazione del cotone si è seguita la norma UNI 8282 che fornisce un metodo per la determinazione dell'indice della viscosità limite della cellulosa in una soluzione diluita di cuprietilendiammina (CED). Il metodo è applicabile ai campioni di cellulosa solubile nella CED, come per esempio le paste per carta e per i tessuti [8,9]. Di seguito viene riportata la strumentazione utilizzata e il procedimento che è stato adottato per eseguire le misure.

Strumentazione

- Beute da circa 20 ml
- Pipette da 10 ml
- Viscosimetro di Ostwald 100/200
- Termostato ad acqua con agitatore, regolabile a $25 \pm 0.1^\circ\text{C}$
- Cronometro
- Cuproetilendiammina (CED) 0,5M

Preparazione del campione

- 1- Eliminazione delle impurità

Al fine di eliminare impurità che possono essere presenti nei provini di tessuto, vengono effettuate due estrazioni in sequenza (in acqua e poi in etere di petrolio) affinché le misure del grado di polimerizzazione non siano inficiate. In seguito il provino deve essere sfilacciato nel senso di ordito e trama e ridotto a pezzetti fini.

2- *Determinazione del peso dei campioni*

Dopo la fase l'eliminazione delle impurità, i campioni devono essere condizionati a 25°C con il 50% di umidità, successivamente pesati e posti in camera climatica alle stesse condizioni fino al momento dell'analisi.

Procedimento

1- *Solubilizzazione del cotone*

Il campione viene prelevato dalla camera climatica, pesato e circa 5mg di campione vengono posizionati in una beuta in vetro e portati in soluzione con 10 ml di soluzione acquosa di CED. Per ottenere la completa solubilizzazione il campione viene lasciato in agitazione per mezz'ora e successivamente posto in camera climatica a 25°C fino al momento dell'analisi.

2- *Misurazione della viscosità*

La misura viene effettuata a $25^{\circ}\text{C} \pm 0,1$ in un bagno termostato nel quale è immersa anche la soluzione di CED che verrà condizionata prima dell'analisi per immersione all'interno del bagno. Il viscosimetro viene immerso nel bagno termostato e fissato attraverso delle pinze ad un apposito sostegno in modo tale da risultare perfettamente perpendicolare rispetto al piano su cui poggia il bagno. Attraverso una pipetta vengono prelevati 7ml di soluzione contenente il campione da esaminare e fatti fluire all'interno del viscosimetro. Per determinare il tempo di efflusso il liquido viene dapprima aspirato fino alla bolla superiore mediante un tubo di raccordo collegato ad una pompa da vuoto posizionata all'altra estremità del viscosimetro. Non appena oltrepassato il segno di demarcazione superiore, il liquido contenente il campione viene lasciato defluire misurando con un contasecondi il tempo impiegato dallo stesso per scorrere dal segno superiore a quello inferiore.

Per primo viene determinato il tempo di efflusso del solvente puro t_0 , poi il tempo di efflusso della soluzione cellulosica t .

3- *Pulizia del viscosimetro*

Dopo ogni analisi, il viscosimetro deve subire un'accurata pulizia per eliminare ogni eventuale residuo di soluzione cellulosica all'interno delle bolle, dei vasi ed in particolare del capillare, che potrebbero andare ad inficiare le misure successive. Per fare ciò al termine di ciascuna misura il viscosimetro deve subire in sequenza una serie di lavaggi:

- n. 3 lavaggi con acqua distillata
- n. 1 lavaggio con HCl 2M, per neutralizzare l'alcalinità della cuproetilendiammina e nello stesso tempo eliminare gli eventuali residui di campione
- n. 1 lavaggio con acqua distillata

Al termine di questi lavaggi si procede con l'asciugatura mediante l'immissione di acetone nel viscosimetro e successivo soffiaggio con aria compressa. Per velocizzare i tempi di lavaggio ci si avvale di una pompa da vuoto. Al termine della pulizia ci si deve accertare che il viscosimetro sia perfettamente asciutto e che non compaiano nelle pareti interne residui, opacità o aloni.

Calcolo

Di seguito vengono illustrati i calcoli e le relazioni utilizzate [9].

Il punto di partenza per la determinazione del grado di polimerizzazione del cotone è il tempo di scorrimento della soluzione del polimero fatta passare attraverso il capillare del viscosimetro.

La velocità di scorrimento attraverso il capillare è funzione della viscosità della soluzione η , a sua volta funzione del peso molecolare, delle interazioni polimero-solvente e della temperatura. Il rapporto tra la viscosità della soluzione e la viscosità del solvente puro viene definito come *viscosità relativa* ($\eta_{rel} = \eta/\eta_0$).

$$\eta_{rel} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{k \rho t}{k_0 \rho_0 t_0}$$

L'incremento di viscosità dovuto alla presenza del soluto viene chiamato *viscosità specifica* ($n_{sp} = \eta_{rel} - 1$). Indicando con d la densità della soluzione e con d_0 quella del solvente possiamo valutare la viscosità specifica misurando i rispettivi tempi di scorrimento attraverso il capillare (t e t_0 rispettivamente) di una quantità nota di soluzione (e di solvente rispettivamente)

$$n_{sp} = \frac{n}{n_0} - 1 = \left(\frac{d \cdot t}{d_0 \cdot t_0} \right) - 1 = \frac{(t - t_0)}{t_0}$$

Infine, misurando la viscosità specifica n_{sp} di soluzioni a diversa concentrazione C otteniamo la *viscosità intrinseca*

$$[\eta] = \lim_{C \rightarrow 0} \left(\frac{n_{sp}}{C} \right)$$

La viscosità intrinseca $[\eta]$ non risente delle interazioni intermolecolari ed è pertanto la grandezza che più si correla direttamente alla natura delle singole molecole del soluto. L'equazione base per la determinazione del grado di polimerizzazione è l'equazione di Staudinger-Mark-Houwink:

$$[\eta] = K DP_v^\alpha$$

Dove K e α devono essere determinate sperimentalmente, in quanto le relazioni tra la viscosità delle soluzioni e le proprietà molecolari non sono stabilite quantitativamente. Le molecole più lunghe contribuiscono alla viscosità della soluzione più di quanto non facciano le molecole più corte, cosicché il DP_v misura una grandezza intermedia tra il DP_n ed il DP_w . Poiché il DP_w è anch'esso sensibile alle molecole più lunghe, avremo in generale che $DP_v \approx DP_w$ [4].

Il calcolo per il calcolo del grado di polimerizzazione è stato effettuato con l'ausilio di un foglio di calcolo.*

* Il foglio di calcolo è stato sviluppato dal Prof. Paolo Calvini (Università Ca' Foscari, Venezia)

3.1.2.2 Determinazione viscosità intrinseca della seta

Per la determinazione della viscosità intrinseca della seta naturale viene utilizzata la norma del Servizio Nazionale di Valutazione SNV 195 595 [11]. Le fibre di seta sgommate sono costituite da fibroina e generalmente orientate lungo l'asse fibroso, unite tramite legami idrogeno intermolecolari. Il solvente che viene utilizzato deve essere in grado di rigonfiare le fibre, riuscendo a rompere i legami idrogeno che le tengono unite, mantenendo il più possibile intatte le molecole. Il solvente richiesto dalla norma è una soluzione satura di litio bromuro (LiBr) [10,11] ed è valido per la seta greggia o sgommata in qualsiasi stadio di lavorazione. La seta caricata può essere sottoposta a controllo solo nei casi in cui la carica possa essere rimossa senza provocare un danneggiamento rilevante o una perdita di solubilità della seta.

Per poter utilizzare il viscosimetro generalmente in uso, con capillare di 0,7 mm, anche per la seta, è necessario aumentare la viscosità propria del solvente aggiungendo glicerina e ottenendo valori di viscosità intrinseca incrementati rispetto ai precedenti del fattore 1.15. È importante che la viscosità della soluzione venga determinata nell'arco di 24 ore dalla preparazione del campione altrimenti si degrada e che, come nel caso del cotone, la misura venga fatta in bagno termostatico ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) [11].

Di seguito viene riportata la strumentazione utilizzata e il procedimento che è stato adottato per eseguire le misure.

Strumentazione

- Beute da circa 20 ml con tappo a chiusura ermetica
- Pipette da 5 ml
- Viscosimetro di Ostwald
- Termostato ad acqua con agitatore, regolabile a $20 \pm 0.1^\circ\text{C}$
- Cronometro
- Soluzione 0.05M di bicarbonato di sodio contenente 1 g/l di prodotto imbibente neutro anionattivo (sodio succinato)
- Soluzione 0.01M di acido acetico
- Soluzione 0.01M di acetato sodico
- Litio bromuro, soluzione satura. Prima dell'utilizzo tale soluzione deve essere lasciata per almeno 15 ore ad una temperatura di $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e mantenuta costante per tutto il tempo
- Miscela di glicerina purissima e acqua distillata in parti uguali

Preparazione del campione

1- Sgommatatura della seta greggia

Un campione del materiale da esaminare (possibilmente non meno di un grammo) non sminuzzato viene trattato con una soluzione bollente di sapone 10 g/l e mantenuta costantemente in leggera ebollizione per un'ora. Segue un risciacquo per sei volte con acqua distillata fredda.

2- Neutralizzazione della seta

Il campione di seta trattato come indicato al punto precedente o un campione di seta sgommato (non meno di 1g) non sminuzzato viene sottoposto ai seguenti trattamenti:

- 30 min in soluzione di bicarbonato di sodio, strizzare delicatamente senza risciacquare;
- 30 min in soluzione di acido acetico e acetato sodico, strizzare delicatamente senza risciacquare;
- ripetere il secondo trattamento con soluzione fresca lasciando il materiale in ammollo per almeno 14 ore ;
- 30 min in acqua distillata, agitando di tanto in tanto;
- essiccazione all'aria avente temperatura non superiore a 40°C .

3- *Trattamento del campione dopo neutralizzazione*

Dopo neutralizzazione della seta il campione verrà trattato in maniera diversa a seconda che si tratti di filati singoli o di pezzi di tessuti. I filati vengono tagliati in tratti di circa 3mm, mentre i tessuti devono essere prima ridotti in filati.

4- *Determinazione del peso del campione*

Nel caso il materiale sia caricato o apprettato per poter procedere con la pesata dei campioni deve precedentemente essere lasciato per almeno 14 ore in camera condizionata a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e umidità relativa pari a $65 \pm 2\%$. In queste condizioni vengono pesati due campioni in due pesa filtri dove il peso di ciascun campione deve corrispondere 0.100 g di materiale secco (peso secco assoluto). A questo scopo è necessario determinare su un campione separato il contenuto di umidità pesando circa 1 g di materiale condizionato con la precisione di 0,0001g, sottoponendo tale campione ad essiccazione in stufa a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ e quindi ripesandolo. Questa operazione non richiede in genere più di tre ore.

Nel caso invece in cui la seta non sia caricata o apprettata, si può procedere con la pesata senza determinazione dell'umidità e calcolare nella pesata un contenuto di umidità costante del 10%. In tal caso si peseranno 0,110 g di seta condizionata come indicato precedentemente. Non si può prescindere da una determinazione del contenuto di umidità effettivo in casi limite e quando si riscontrano piccole ma ciò nonostante significative differenze tra diversi campioni di materiale in esame.

Procedimento

1- *Solubilizzazione della seta*

Il campione di seta viene posto in una beuta di circa 20ml a chiusura ermetica. Si aggiungono con una pipetta 5ml di una soluzione di litio bromuro e si scuote bene a mano per impedire l'agglomeramento delle fibre. La beuta viene poi lasciata per 3 ore a $60 \pm 2^\circ\text{C}$ (agitando di tanto in tanto). La soluzione viene subito dopo diluita alla concentrazione di 1 g/dl di fibra aggiungendo 5 ml di miscela di glicerina e acqua distillata in parti uguali con l'ausilio di una pipetta. La soluzione così ottenuta viene filtrata, possibilmente attraverso un filtro a vetro 1 G 2. Se rimane un piccolo residuo questo va lavato con acqua distillata fredda, essiccato per 2 ore a $105 \pm 2^\circ\text{C}$ e pesato. Da questo valore si calcola la concentrazione effettiva c (in g/dl) da utilizzare nella formula per il calcolo della viscosità intrinseca.

2- *Misurazione della viscosità*

Il viscosimetro deve essere mantenuto in posizione quanto più possibile perpendicolare nel bagno termostato ($20 \pm 0.1^\circ\text{C}$), agitato al meglio da un dispositivo meccanico.

A mezzo di una pipetta si immette la soluzione da esaminare nel condotto che porta alla bolla inferiore. La quantità di liquido deve essere sempre uguale e la determinazione va condotta in modo tale che il livello del liquido non scenda mai al di sotto della bolla inferiore (ad esempio 2-2.5-3ml) fino al termine del processo di efflusso. La misurazione deve essere effettuata dopo 15 min di permanenza della soluzione alla temperatura stabilita. Per determinare il tempo di efflusso il liquido viene dapprima aspirato fino alla bolla superiore mediante un tubo di raccordo apposto all'altra estremità del viscosimetro quindi, non appena oltrepassato il segno di demarcazione superiore, lasciato defluire misurando con un contasecondi il tempo impiegato dal menisco per scorrere dal segno superiore a quello inferiore. Per primo viene determinato il tempo di efflusso del solvente puro t_0 , poi il tempo di efflusso della soluzione serica t . Per solvente puro si intende una miscela in volumi uguali di soluzione satura di litio bromuro da una parte e glicerina/acqua dall'altra.

Pulizia del viscosimetro

La pulizia del viscosimetro prevede il lavaggio per tre volte con acqua distillata forzando il suo passaggio all'interno del viscosimetro con l'ausilio di una pompa ad acqua. Successivamente si effettua un risciacquo finale in sequenza con alcool etilico distillato e acetone. L'asciugatura del viscosimetro deve essere effettuata in stufa a vuoto oppure in un essiccatore a vuoto sopra sostanza essiccative per circa 30 min, altrimenti in stufa a 110-130°C per circa 30 min assicurandosi a fine trattamento che il viscosimetro si sia effettivamente asciugato.

Referto d'analisi

Il referto deve contenere:

- Indicazione di qualsiasi scostamento dalle disposizioni di norma
- La quantità di un eventuale residuo insolubile in % sul peso secco
- La concentrazione della soluzione serica in g/dl dopo aver dedotto l'eventuale residuo come indicato al punto precedente
- La viscosità specifica n_{sp}
- La viscosità intrinseca $[\eta]$ in dl/g

Calcolo

Di seguito vengono illustrati i calcoli e le relazioni utilizzate [11].

Nel caso della seta dalla prova viscosimetrica si ricava la viscosità specifica che permette poi di calcolare la viscosità specifica, utilizzata di norma per caratterizzare lo stato di conservazione della fibra.

La viscosità specifica viene determinata a mezzo di un viscosimetro a capillare in cui viene misurato prima il tempo di efflusso del solvente puro t_0 e successivamente quello della soluzione serica in litio bromuro t . La viscosità specifica è ricavata attraverso la seguente formula:

$$n_{sp} = \frac{t - t_0}{t_0}$$

Dalla viscosità specifica, attraverso l'equazione di Schulz/Blaschke (valida per concentrazioni di seta c 1.0 g/dl) sotto riportata, viene ricavata la viscosità intrinseca $[\eta]$:

$$\frac{[\eta]}{k} = \frac{n_{sp}}{c}$$

Dove k rappresenta una costante legata al viscosimetro e alle concentrazioni delle soluzioni impiegate e viene in genere data tabulata (prove EMPA). Nel nostro caso tale valore corrisponde a $\approx 0,5$ [11].

3.1.3 Colorimetria

La colorimetria è stata utilizzata perché è una tecnica non distruttiva, impiegata nel campo del monitoraggio del degrado e dell'efficacia della pulitura di manufatti d'interesse storico-artistico. In questo studio la colorimetria si è dimostrata utile per il controllo, delle alterazioni naturali o indotte, dei campioni di tessuto in analisi [12,13].

Le caratteristiche attraverso le quali viene definito un colore sono tre: tinta, saturazione e brillantezza o luminosità. Per meglio comprendere queste tre caratteristiche del colore viene utilizzato un solido detto spazio di Munsell (figura 3.2), dal suo creatore, che le rappresenta come tre coordinate spaziali [14,15] :

- **Tinta**, definita attraverso la lunghezza d'onda dominante, è la caratteristica attraverso la quale l'oggetto in esame è definito rosso, giallo, verde, blu ecc.. Nel solido dei colori è l'espressione in gradi rispetto alla circonferenza di un cerchio nella cui area sono riportati tutti i colori ottenibili dalla combinazione in trivarianza.
- **Saturazione** è data dal rapporto tra il flusso luminoso monocromatico dominante e il flusso luminoso totale (emesso, riflesso o trasmesso) dall'oggetto in esame. La saturazione è al 100% se il flusso è monocromatico, 0% se è totalmente acromatico (bianco). Nel solido dei colori questa grandezza è espressa dal raggio, il bianco è il centro del cerchio.
- **Brillantezza o luminosità** è l'attributo secondo il quale una sorgente appare più o meno luminosa. Per oggetti non luminosi viene espresso come chiarezza e dipende dalle condizioni di illuminamento e dalla capacità del corpo stesso di riflettere radiazioni. Va dal nero 0 (minima riflettanza) al massimo 10 che è il bianco.

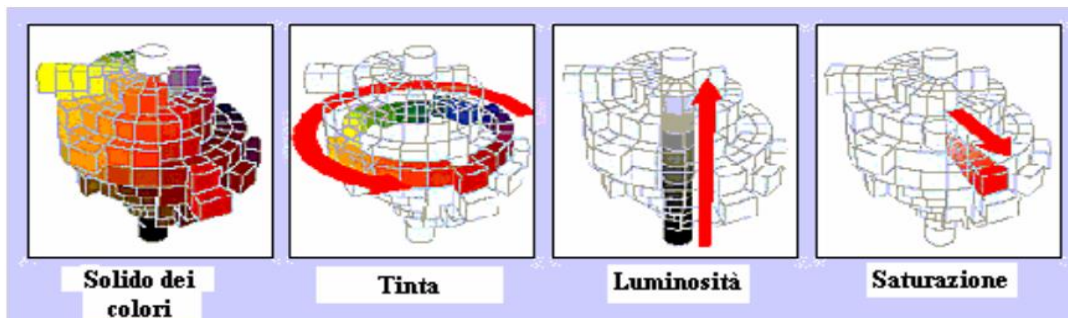


Figura 3.2 Spazio di Munsell

Basandosi su questo concetto è stato possibile sviluppare metodologie matematiche per esprimere i colori in modo obiettivo e indipendente dall'occhio dell'osservatore umano. Uno tra i primi sistemi matematici che prevedeva l'utilizzo di funzioni colorimetriche che consentivano di convertire una curva spettrale in tre numeri chiamati valori tristimolari X, Y e Z fu il CIE proposto nel 1931 [14].

Un'evoluzione matematica di questo metodo è il sistema CIEL*a*b*. Quest'ultimo parte dalla definizione di uno stimolo bianco nominale corrispondente alla luce D 65 e riportando le componenti tricromatiche X_n Y_n Z_n dell'illuminante con X Y Z del colore in esame stabilisce delle relazioni sulla base della teoria delle tre coppie antagoniste bianco-nero, rosso-verde, giallo-blu della visione dei colori. Il risultato è che le tre grandezze calcolate sono disposte su un diagramma cartesiano in cui L^* è il chiarore, a^* la componente cromatica rosso-verde e b^* quella giallo-blu. Uno spazio molto simile a quello CIEL*a*b* ma che utilizza coordinate cilindriche al posto di coordinate cartesiane è lo spazio L*C*h* in cui L^* rappresenta il chiarore, C^* il croma (saturazione) e h^* l'angolo di tinta come mostrato in figura 3.3 [15,17].

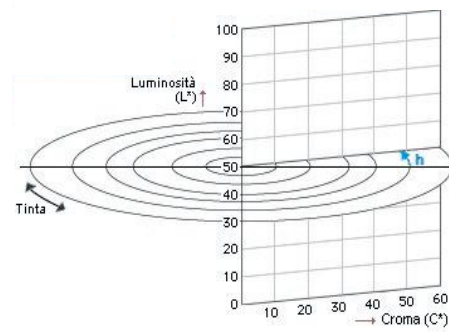


Figura 3.3 Spazio colore CIE L*C*h* [4.17]

Le misurazioni colorimetriche sono state effettuate con uno spettrofotometro a doppio raggio Konica Minolta CM– 2600d, illuminante standard D65, 100% UV ed angolo di osservazione a 10° con area di misura pari a 11 mm. Considerando l'irregolarità della superficie e il fatto che le deposizioni sono generalmente disomogenee, si è deciso di utilizzare la mascherina più grande possibile in dotazione dello spettrofotometro. I dati sono stati poi elaborati tramite software Spectra Magic NX. La differenza tra due punti qualsiasi rappresentati dalle terne L^* , a^* , b^* si può ricavare trovando prima [16]:

$$\Delta L^* = L^*_c - L^*_b$$

$$\Delta a^* = a^*_c - a^*_b$$

$$\Delta b^* = b^*_c - b^*_b$$

E da questi valori si può quindi determinare la distanza tra due punti:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

Per valutare, in particolare la differenza tra i campioni di tessuto è stato utilizzato lo spazio colorimetrico $L^*C^*h^*$ in cui il parametro L^* resta invariato rispetto a quello già ricavato per lo spazio colore CIE $L^*a^*b^*$ e gli altri due parametri vengono ricavati come dimostrato sotto [17]:

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h^0 = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

La differenza di tinta è definita dal parametro ΔH^* :

$$\Delta H^* = \sqrt{(\Delta E^*)^2 - (\Delta a^*)^2 - (\Delta b^*)^2}$$

Attraverso questa tecnica sono stati caratterizzati sia i campioni lasciati al museo sia quelli trattati in laboratorio effettuando le misure prima e dopo qualsiasi trattamento per poter apprezzare eventuali variazioni di colore dei tessuti. Ogni valore finale è il risultato di una media di dieci misurazioni.

3.1.4 Tecniche spettroscopiche

In questo studio è stata utilizzata la spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FTIR) per caratterizzare i depositi raccolti nel salone al piano nobile di Palazzo Fortuny e la spettroscopia infrarossa in riflettanza totale attenuata (ATR-IR) per caratterizzare la parte fibrosa dei depositi polverulenti.

Le tecniche spettroscopiche sono delle tecniche di indagine molto versatili e molto utilizzate per la caratterizzazione di composti di natura organica e inorganica anche nel campo dei Beni Culturali [18] grazie alla risposta dei vari gruppi funzionali presenti nei materiali alla radiazione infrarossa. Molecole complesse oppure miscele di più sostanze portano spesso ad un'impronta digitale confusa e di difficile interpretazione. Tuttavia alcune parti delle molecole (i cosiddetti gruppi funzionali) hanno un assorbimento IR a frequenze ben precise, scarsamente influenzate dal resto della molecola.

Nella maggior parte dei casi, i supporti tessili sono composti quasi esclusivamente da sostanze organiche con i loro gruppi chimici caratteristici che, degradandosi, provocano la formazione di altri gruppi chimici altrettanto caratteristici [18]. Per questo tipo di sostanze l'analisi tramite Spettroscopia Infrarossa (IR) è particolarmente adatta, stante l'alta sensibilità ai gruppi chimici organici.

La radiazione infrarossa si riferisce, in generale, a quella parte dello spettro elettromagnetico che si trova tra le regioni del visibile e delle microonde. In particolare dividiamo questa zona in:

- IR vicino (NIR) → $13.000 - 4.000 \text{ cm}^{-1}$
- IR medio (MIR) → $4.000 - 200 \text{ cm}^{-1}$
- IR lontano (FIR) → $200 - 10 \text{ cm}^{-1}$

L'intervallo maggiormente interessante dal punto di vista analitico e per il settore dei Beni Culturali è sicuramente quello compreso fra 4.000 e 400 cm^{-1} . La spettroscopia IR è una tecnica analitica che si basa sull'interazione fra radiazione elettromagnetica e materia e per definirla più precisamente, è una spettroscopia di vibrazione. Infatti nel momento in cui una molecola organica viene investita da una radiazione infrarossa la cui frequenza (espressa in termini di numeri d'onda, inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda) sia compresa fra 10.000 e 100 cm^{-1} , l'energia ceduta dalla radiazione stessa viene convertita in energia vibrazionale e quindi la molecola passa dal suo stato vibrazionale fondamentale ad uno stato vibrazionale eccitato. Sono due i modi fondamentali in cui la molecola può vibrare:

- vibrazione di stretching (stiramento) dovuta a stiramento ritmico lungo l'asse di legame con conseguente aumento e diminuzione della distanza interatomica;
- vibrazione di bending (piegamento) dovuto a variazione dell'angolo di legame sul piano o fuori dal piano.

Lo spettro infrarosso risultante si presenta come una sequenza di bande di assorbimento registrate in funzione della lunghezza d'onda (o del numero d'onda) e sebbene sia riferito alla molecola nella sua interezza, è caratterizzato da dei picchi riferibili a gruppi funzionali specifici, facenti parte della sua struttura. È proprio grazie alla riproducibilità di questi picchi, e soprattutto ai valori caratteristici di assorbimento, che analizzandoli è possibile risalire alla struttura della molecola in esame.

Spettroscopia infrarossa in trasformata di Fourier (FT-IR)

Per le analisi è stato adottato uno spettrofotometro Nicolet Nexus 670 (Thermo Scientific). Il suo principio di base è rappresentato dalla possibilità di cogliere contemporaneamente tutte le frequenze dello spettro IR nel rilevatore, il che rende superflua la scansione della lunghezza d'onda. Questo è possibile trasformando, per mezzo di un *interferometro*, la radiazione IR

policromatica emessa dalla sorgente (istante per istante con la medesima intensità) in un interferogramma, dove l'assorbimento non è più funzione della frequenza, ma del tempo. Dopo il passaggio della radiazione così "trattata" attraverso il campione, l'interferogramma viene trasformato dal calcolatore collegato allo strumento in un tradizionale spettro infrarosso mediante un'operazione matematica, la cosiddetta *trasformata di Fourier*. In questa maniera si passa perciò dall'interferogramma, un grafico dello spazio o del tempo, a uno spettro comune, che rappresenta però la variazione dell'intensità del segnale in funzione del numero d'onda (o della lunghezza d'onda) della radiazione [18].

Preparazione del campione

In questo studio i campioni sono stati analizzati sotto forma di dispersioni in fase solida attraverso la creazione di pastiglie in KBr. Al campione di polveri è stato aggiunto del KBr anidro, da 10 a 100 volte il suo peso in un mortaio di agata, ed infine compresso sottovuoto con una pressa idraulica fino ad ottenere una pastiglia omogenea. Gli spettri sono stati registrati tra 4000 e 400 cm^{-1} effettuando 64 scansioni, con una risoluzione di 4 cm^{-1} . L'elaborazione degli spettri è stata effettuata attraverso software OMNIC 6.0 della Thermo Nicolet.

Spettroscopia infrarossa in riflettanza totale attenuata (ATR-IR)

La spettroscopia IR in modalità ATR è utilizzata per l'analisi delle superfici dei materiali e permette una analisi diretta del campione in quanto non è richiesta alcuna preparazione del campione, per tale motivo la si può considerare come una tecnica non distruttiva.

L'analisi FTIR-ATR si basa sul contatto fisico tra il campione ed un cristallo attraversato dalla radiazione infrarossa. Il campione viene infatti posto a contatto con le facce di un cristallo ottico prismatico piatto, costituito da un materiale ad elevato indice di rifrazione per tutte le radiazioni IR: queste riflettono sulla superficie interna del cristallo creando un'onda evanescente che si proietta ortogonalmente sul campione posto in stretto contatto con il cristallo. Ad ogni riflessione il raggio penetra per qualche micron nella sostanza e una piccola parte di radiazione viene assorbita (attenuata) (figura 3.4). Dopo alcune riflessioni, la diminuzione del raggio è sufficiente per essere rilevata dallo spettrofotometro dando uno spettro di riflettanza [19].

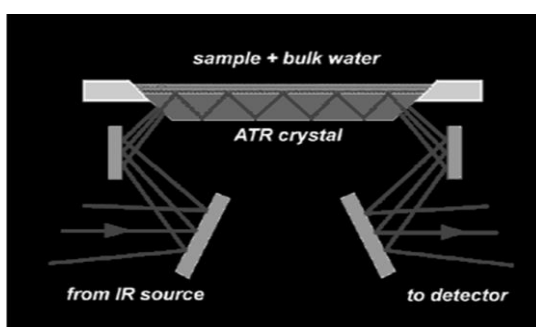


Figura 3.4 Schema funzionamento ATR-IR, particolare della zona del cristallo

Con questa tecnica si ottengono spettri che sono simili ma non identici ai normali spettri di assorbimento in FTIR ed è necessario osservare che, anche se individuano le stesse bande, le loro intensità relative possono essere diverse.

Preparazione del campione

La caratterizzazione dei tessuti nuovi e dei depositi polverulenti è stata effettuata nei laboratori di Ca' Foscari utilizzando lo spettrofotometro Nicolet Nexus 670 in modalità ATR dotato di cella di compressione in ZnSe (Smart Orbit Nex Diamond Crystal W/Spa – 2 Tower) in grado di indagare un'area del campione di 0,75 mm^2 a una profondità di circa 1 μm .

La caratterizzazione dei campioni di tessuto dopo le fasi di sperimentazione sono state eseguite presso la Stazione Sperimentale della seta di Milano: spettrofotometro Nicolet Nexus 670 in modalità ATR dotato di cella di compressione in ZnSe SMART ITR- In entrambi i casi l'elaborazione degli spettri è stata eseguita con il software OMNIC 6.0 Thermo Nicolet.

3.1.5 Determinazione della tenacità e dell'allungamento a rottura

La tenacità di una fibra, o carico di rottura, indica la maggiore o minore attitudine della fibra a resistere alla trazione; l'allungamento a rottura indica invece la sua capacità di allungarsi in presenza di una sollecitazione a trazione, fino a rottura. Entrambe queste caratteristiche dipendono in primis dal grado di cristallinità della fibra e dall'orientamento delle catene polimeriche lungo l'asse della fibra stessa. Inoltre dipendono dalla natura del filato, ovvero dal titolo e dal grado di torsione. La tenacità è massima nel lino e nel *ramiè*, minore nel cotone, intermedia nella seta e minore nella lana. L'elasticità che è invece massima per le fibre della lana e minima per il lino [20]. La determinazione dei valori di tenacità e di allungamento delle fibre rientrano tra le prove meccaniche di caratterizzazione dei tessuti e son in genere eseguiti con dinamometri elettronici.

Per questo studio è stato utilizzato un dinamometro elettronico Instron 4501, a incremento costante di allungamento (CRE) [21] e le prove sono state condotte in ambiente condizionato alla Temperatura di 20 ± 2 C° e ad una umidità del $65 \pm 4\%$. La normativa a cui si fa riferimento per queste prove è UNI EN ISO 13934-1 adattata però alle piccole dimensioni sia dei campioni di cotone che di seta [20]. I parametri di riferimento modificati sono:

- Distanza iniziale 10 mm
- Larghezza striscia 10 mm
- Precarico 0,1 N

3.2 Esposizione dei tessuti

3.2.1 Scelta del numero di campioni

Per questo studio sono stati il cotone e la seta perché rappresentano i materiali maggiormente presenti all'interno delle aree di Palazzo Fortuny.

I campioni per entrambe le tipologie di tessuti hanno dimensioni diverse in relazione alle esigenze specifiche delle singole analisi alle quali sono stati sottoposti e sono indicati in tabella 3.1. Le dimensioni si rifanno ovviamente alle indicazioni relative alle norme utilizzate per le singole analisi [19,11,21].

PROVA	DIMENSIONE PROVINO (cm)
Microscopia	5 x 5
Spettroscopia	5 x 5
Colorimetria	3 x 3
Valutazione della resistenza e dell'allungamento	3 x 3
Viscosimetria	200 mg

Tabella 3.1 Dimensioni provini per le diverse prove

Nelle tabelle 3.2 e 3.3 viene indicato il numero di campioni utilizzati per ciascuna prova nelle due diverse parti di studio.

Provini in seta

TECNICHE ANALITICHE	PRIMA PARTE DI STUDIO IN MUSEO				SECONDA PARTE DI STUDIO IN LABORATORIO				SEDE ANALISI	
	Bianco	Mese 1	Mese 2	Mese 3	Bianco ciclo UR 60% (estivo)	Ciclo UR 60% (estivo)	Bianco ciclo UR 90% (estremo)	Ciclo UR 90% (estremo)	UNIVE	Innovhub SSI
Osservazione MO ;SEM; ATR	1	1	1	1	1	1	1	1		8
Indagini colorimetriche	10	10	10	10	10	10	10	10	80	
Valutazione della resistenza e dell'allungamento	10	-	-	10	10	10	10	10		60
DP	1	-	-	1	1	1	1	1	6	
TOTALE CAMPIONI									86	68

Tabella 3.2 Riepilogo provini in seta

Provini in cotone

TECNICHE ANALITICHE	PRIMA PARTE DI STUDIO IN MUSEO				SECONDA PARTE DI STUDIO IN LABORATORIO				SEDE ANALISI	
	Bianco	Mese 1	Mese 2	Mese 3	Bianco ciclo UR 60% (estivo)	Ciclo UR 60% (estivo)	Bianco ciclo UR 90% (estremo)	Ciclo UR 90% (estremo)	UNIVE	Innovh ub SSI
Osservazione MO ;SEM; FTIR-ATR	1	1	1	1	1	1	1	1		8
Indagini colorimetriche	10	10	10	10	10	10	10	10	80	
valutazione della resistenza e dell'allungamento	10	-	-	10	10	10	10	10		60
DP	1	-	-	1	1	1	1	1	6	
TOTALE CAMPIONI									86	68

Tabella 3.3 Riepilogo provini in cotone

3.2.2 Condizioni museali Palazzo Fortuny

I campioni di cotone e seta sono stati esposti per una durata di tre mesi a Palazzo Fortuny all'interno del salone principale del primo piano nobile. Al fine di limitare possibili contaminazioni, i campioni di tessuto sono stati appoggiati su dei cartoncini per acquerello Fabriano® Artistico, senza cloro e privi di acidi e candeggianti ottici, e fissati al supporto attraverso nastro adesivo a pH controllato. I campioni così disposti sono stati collocati al di sopra degli armadi del salone principale al fine di limitare il possibile contatto con il pubblico (figura 3.5).



Figura 3.5 : Foto del primo piano nobile di Palazzo Fortuny; i campioni sono stati collocati sopra gli armadi

Palazzo Fortuny, detto anche Palazzo Pesaro Orfei, è un palazzo imponente caratteristico della tradizione veneziana, con una facciata che dà in rio di Ca' Michiel ed un'altra, caratterizzata da una complessa struttura gotico-veneziana (figura 3.6), sul campo di San Benedetto. È sorto alla metà del quattrocento come fondaco commerciale ed è stato poi ampliato e trasformato nel corso dei secoli.

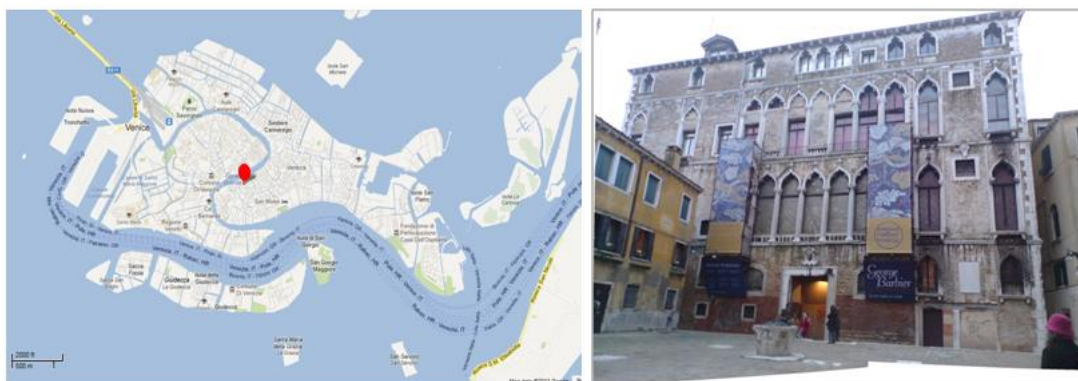


Figura 3.6 Localizzazione a Venezia di Palazzo Fortuny e immagine della facciata gotico-veneziana

Nella seconda metà dell'Ottocento l'edificio viene frazionato in numerosi appartamenti e subisce un notevole degrado ma, fortunatamente, verso la fine dello stesso secolo viene acquistato dapprima il sottotetto e poi un po' per volta l'intero edificio, da Mariano Fortuny Madrazo che lo fa diventare prima il suo studio e laboratorio e successivamente anche dimora che diventerà con la sua compagna e musa ispiratrice Henriette Nigrin. Il suo lavoro all'interno dello studio che

diviene con il tempo atelier consiste nella creazione e nella stampa di straordinari abiti e tessuti in seta, cotone. Dopo la morte di Fortuny, nel 1949, il palazzo viene donato dalla moglie Henriette nel 1956 al Comune di Venezia per essere *“utilizzato perpetuamente come centro di cultura in rapporto con l’arte”*. La casa-museo, che conserva intatte, al piano nobile, le caratteristiche dello studio preferito da Mariano Fortuny e la sua biblioteca, è attivo come centro di attività espositive dedicate alle arti visive.

Il primo piano nobile di Palazzo Fortuny, come si può vedere dalla figura ?? a pagina seguente, è un grande ambiente che presenta un’illuminazione naturale quasi del tutto assente. Le vetrate e tutte le aperture esterne sono infatti oscurate da lunghe tende o tessuti d’arredo Fortuny che impediscono l’ingresso di gran parte della luce esterna. L’illuminamento quindi è quasi totalmente ad opera di lampade puntate selettivamente sulle opere che tendono a lasciare il resto dell’ambiente in penombra. Le lampade utilizzate sono di due tipi a led e ad incandescenza.

Lungo tutta la lunghezza del salone sono fissati a soffitto due binari nei quali sono montati corpi lampada iGuzzini Tecnica con lampade a led MASTER LED AR111 da 75W. Queste lampade sono orientate specificatamente sulle opere. Sono inoltre presenti pezzi storici di illuminazione pensata da Mariano Fortuny stesso come le lampade a luce riflessa e diffusa e i lampadari (figura 3.7).

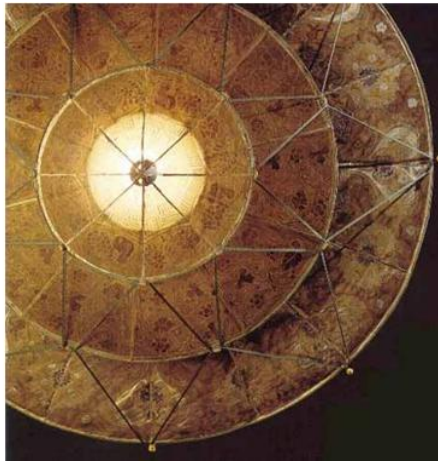


Figura 3.7 Illuminazione interna palazzo Fortuny. A sinistra lampada Fortuny a luce riflessa e diffusa, a destra lampadario Fortuny

Tabella 1 <http://fortuny.visitmuve.it/>



Figura 3.8 : Piantina del salone principale al piano nobile di Palazzo Fortuny con due particolari della sala che mettono in risalto l'illuminazione adottata all'interno dello spazio espositivo. <http://blog.slow-venice.com/mariano-fortuny-a-wagner-maniac/sony-dsc-3/>

3.2.2.1 Rilevamento parametri termoigrometrici

La registrazione dei dati è avvenuta attraverso un dispositivo in grado di misurare e registrare nella propria memoria a frequenze stabilite i valori di temperatura e umidità ambientale detto *datalogger*. I dati raccolti possono essere scaricati dallo strumento attraverso un software su di un computer e successivamente elaborati. Tutti i dati sono stati raccolti durante i mesi invernali da novembre a febbraio. Il monitoraggio ha avuto inizio con la deposizione dei campioni il giorno 13/11/2012, data che è stata presa come riferimento per l'inizio dello studio e da essa sono stati calcolati di volta in volta gli intervalli di 30 giorni delle deposizioni terminate il 13/3/2013. Il datalogger utilizzato per il monitoraggio è un Gemini Dataloggers Tinytag Ultra 2 TGU4500 come mostrato in figura 3.9.

In tabella 3.4 vengono riportati i dati tecnici relativi allo strumento.



Figura 3.9 Datalogger Tinytag Ultra 2 TGU4500 utilizzato per il monitoraggio a Palazzo Fortuny

CARATTERISTICHE		DESCRIZIONE
Capacità di lettura totale		32.000 valori
Intervalli di lettura		Da 1 sec a 10 giorni
T	Range	-25°C a +85°C
	Tipo di sensore	Montato internamente 10KNTC Thermistor
	Risoluzione	0.01°C
	Accuratezza	
UR	Range	0% a 95%
	Tipo di sensore	Montato esternamente Capacitive
	Risoluzione	Migliore dello 0.3%
	Accuratezza	±3.0% a 25°C

Tabella 3.4 Caratteristiche tecniche Tinytag Ultra2 TGU4500

Per il monitoraggio del salone principale del primo piano nobile di Palazzo Fortuny si è potuto collocare un solo *datalogger* in corrispondenza di uno dei due punti in cui sono stati posizionati i campioni, come si nota in figura 3.10. Per lo studio sono state effettuate le rilevazioni dei parametri termoigrometrici ogni 15 minuti.

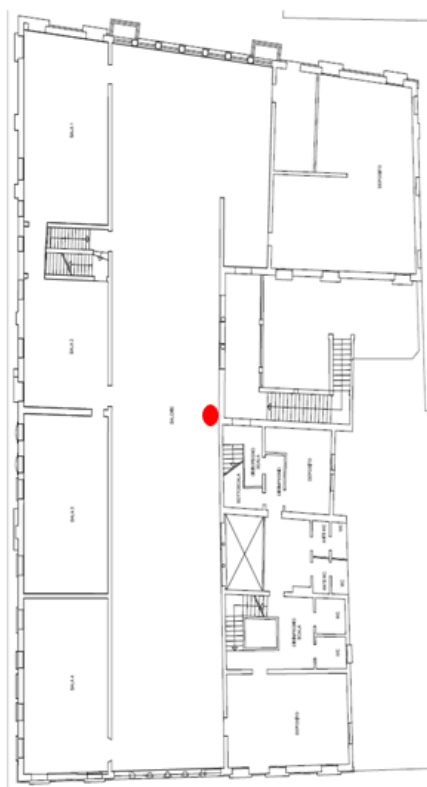


Figura 3.10 Collocazione del datalogger all'interno del salone principale del primo piano nobile di Palazzo Fortuny

3.2.2.2 Rilevamento parametri d'illuminamento

L'illuminamento è il rapporto tra il flusso luminoso che incide su un elemento di superficie e l'area dell'elemento stesso; il flusso luminoso è composto sia dall'illuminazione diretta che da quella indiretta dovuta a riflessione o diffusione di superfici circostanti. L'illuminamento si stima in lux^* .

Per la misurazione dell'illuminamento, è stato utilizzato un luxmetro digitale portatile della Eldes Instrumets modello ELD9010 come si può vedere in figura 3.11. Le caratteristiche tecniche di tale strumento sono riportate in tabella 3.5.



Figura 3.11 luxmetro utilizzato per le misurazioni d'illuminamento

CARATTERISTICHE	DESCRIZIONE
Sensore	Fotodiodo al silicio con correzione della risposta spettrale e del coseno
Campo di misura	0.01÷20/200/2000/20000 Lux
Precisione	$\pm 3\% \text{ rdg} \pm 5\% \text{ f.s.} (<10000 \text{ Lux})$ $\pm 4\% \text{ rdg} \pm 10 \text{ dgts} (<10000 \text{ Lux})$

Tabella 3.5 Caratteristiche tecniche del luxmetro utilizzato per le misure d'illuminamento

Nel salone del primo piano nobile di Palazzo Fortuny le aperture con l'esterno, finestre e vetrate sono state totalmente oscurate da lunghe tende e tessuti d'arredo. Si considera quindi come principale fonte di illuminazione della sala quella artificiale. I rilevamenti dei valori d'illuminamento sono stati fatti nei punti più luminosi del salone, che corrispondono il più delle volte questi corrispondono al punto in cui è esposta un'opera in quanto le lampade sono direzionate per illuminare ad hoc le superfici delle opere lasciando il resto dell'ambiente in penombra). Nella figura 3.12 vengono riportati i punti in cui sono stati rilevati i valori di illuminamento.

* È definito come l'illuminamento prodotto da una sorgente luminosa puntiforme avente l'intensità di una candela su una superficie sferica posta ad un metro posta ad un metro di distanza perpendicolarmente ai raggi.

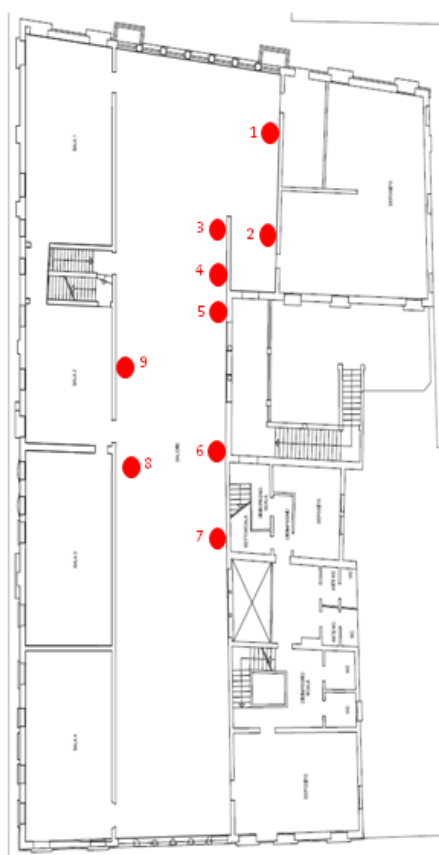


Figura 3.12 Punti di registrazione dell'illuminamento

3.2.3 Condizioni di laboratorio

Gli studi di monitoraggio degli ambienti museali prevedono in genere dei tempi di raccolta dei dati piuttosto prolungati che possono estendersi anche per due anni. Nel nostro caso questo non è stato possibile anche a causa di problemi di gestione degli spazi espositivi stessi del museo.

In forza di ciò e constatando che i risultati erano piuttosto limitati dopo soli tre mesi di esposizione all'interno del museo, si è deciso di effettuare in laboratorio una deposizione forzata delle polveri. I provini così ottenuti sono poi stati esposti a dei cicli di temperatura e umidità controllati che potessero emulare il periodo estivo che non è stato monitorato in questo studio. I cicli termo igrometrici sono stati effettuati a due differenti tassi di umidità per poter apprezzare eventuali differenze di comportamento dei tessuti e il legame tra le deposizioni e le fibre.

3.2.3.1 Metodologia di deposizione forzata delle polveri

Al fine di simulare uno sporco simile a quello dei campioni lasciati all'interno di Palazzo Fortuny, si è raccolto il deposito di polvere e fibre depositatosi nelle arre limitrofe a dove sono stati collocati i tessuti. Questo deposito è poi stato utilizzato per sporcare i tessuti per creare i campioni artificiali da trattare in laboratorio. I campioni di cotone e seta sono stati sporcati spolverando il deposito attraverso un setaccio Endecotts a maglia d'acciaio con aperture 125 μm secondo norma ISO 565 su un'area pari a 0,5 m^2 totali di tessuto [22]. Si è deciso di utilizzare il setaccio per trattenere gran parte della parte fibrosa del deposito, ed è stata fatta aderire con l'ausilio di una spatola d'acciaio. Il quantitativo di polvere depositato sui campioni è stato di circa 1,4 g/m^2 .

Dopo la fase di deposizione forzata i provini sono stati infilati con del filo di nylon e disposti su di una struttura su file parallele le une alle altre come si può notare in figura 3.13. Si è posta particolare attenzione al fatto che i campioni non si toccassero gli uni contro gli altri e non toccassero neppure le pareti o il fondo in cui era presente la soluzione satura di sale, per evitare fenomeni di condensa. Il peso dei singoli campioni è stato rilevato prima e alla fine della sperimentazione.

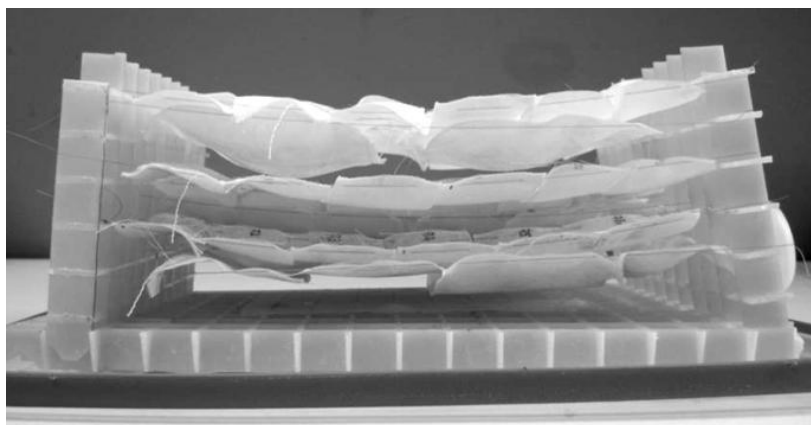


Figura 3.13 Struttura a sostegno dei provini di tessuto sporcati artificialmente che devono subire un ciclo termo igrometrico stabilito

3.2.3.2 Pianificazione cicli termoigrometrici

Per effettuare cicli a temperatura variabile ed umidità fissa, sono stati costruiti dei sistemi di scatole a tenuta da mettere in stufa all'interno delle quali si trovavano i campioni. Nelle scatole sono state poste sul fondo delle soluzioni sature di sali come da figura 3.14 e un termoigrometro per monitorare temperatura e umidità relativa del sistema. Le condizioni

sperimentali sono state definite in base alla normativa (EN ISO 12571 2000) relativa all'utilizzo di soluzioni saline per ottenere condizioni definite di umidità in relazione alla temperatura [23]. Per assicurarci che le variazioni chimico o fisiche del tessuto fossero imputabili con buona probabilità solamente alla triade temperatura-umidità-deposizioni, i contenitori sono stati lasciati al buio e sono stati acquistati di proposito il più piccoli possibili, così da limitare il volume di aria e di conseguenza anche di gas presenti all'interno. Le variazioni di temperatura sono state ottenute ponendo i contenitori in forni termostatici. Ogni ciclo è stato della durata di 12 ore per un totale di 240 ore (10 giorni).

Lo scopo della simulazione è stata di valutare l'interazione tra i depositi e i tessuti al variare della temperatura tenendo l'umidità relativa pressoché costante a valori definiti. Nella tabella 3.6 vengono riportati i cicli effettuati con i relativi valori di T e UR. I valori scelti considerano le variazioni medie rivelate in base ai dati forniti dall'Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale (ISPRA) per Venezia (Bollettino n.8 Agosto 2009) per quanto riguarda il ciclo estivo [24], mentre per il ciclo estremo sono stati presi dei valori di UR considerando ambienti non condizionati.

Ciclo	Temperatura	Umidità Relativa	Sale utilizzato
Estivo	25°C	68,86 ± 0.24	KI
	50°C	64.49 ± 0.26	KI
Estremo	25°C	93,58 ± 0.55	KNO ₃
	50°C	84.78 ± 2.50	KNO ₃

Tabella 3.6 Cicli termoigrometrici



Figura 3.14 Contenitore per cicli termo igrometrici con termo igrometro e soluzione satura sul fondo

Bibliografia

- [1] A. Armigliato, U. Valdrè, *Microscopia elettronica a scansione e microanalisi*, Bologna 1980
- [2] <http://www.minerva.unito.it/chimica&industria/Dizionario/Supplementi01/LabSEM.htm>
- [3] Veronica Richter, *Indagine condotta con microscopia elettronica a scansione su materiali fibrosi cellulosici* in AA.VV. *Dipinti su tela, metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- [4] E. Rossi, *Misure del grado di polimerizzazione per la valutazione dello stato di deterioramento di un materiale fibroso cellulosico* AA.VV. *Dipinti su tela Metodologie d'indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- [5] Paolo Calvini, *Dispense corso di laurea in Scienze e tecnologie chimiche per la conservazione ed il restauro*, A.A. 2006-2007
- [6] A. Seves, G. Testa, C. Bozzi, A. Sardella, *Degradazione dei supporti cellulosici di dipinti, Dipinti su tela, metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- [7] L. E. Hessler, G. V. Merola, E. E. Berkley, *Degree of polymerization of cellulose in cotton fibers*, Textile Research Journal, 1948 vol 18 n.10 pp 628-634
- [8] Giovanna C. Scicolone, *Alcune considerazioni preliminari*, in AA.VV. *Dipinti su tela, metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- [9] UNI 8282
- [10] Giuliano Freddi, *Membrane di fibroina (bombyx mori): preparazione, caratterizzazione e applicazioni* (mail)
- [11] SNV 195 595 del 1968
- [12] R. Bellucci, A. Tozzi, B. Radicati, *Le tecniche di indagine colorimetriche: un'applicazione e una prospettiva di ricerca*, Colorimetria e beni culturali, Atti dei convegni di Firenze 1999 e Venezia 2000
- [13] E. Heila, *The Chevreul color system*, Color Research and Application, 1991, 16, 3, pp 198-201
- [14] Gabriele Rosso, *Colorimetria Tristimolo e misurazione strumentale del colore della carta*, 8° Corso di Tecnologia per tecnici cartari 2000/2001 pdf
- [15] Piero Fiorenzani, *Ricerca Il Colore Gennaio*, 2005 pdf

- [16] S. Palazzi, *Colorimetria. La scienza del colore nell'arte e nella tecnica*, Firenze 1995
- [17] Minolta, *La comunicazione precisa del colore. Il controllo del colore: dalla sensazione alla strumentazione*, 1994 Milano
- [18] www.uniroma2.it/didattica/MA2/deposito/spettroscopia_infrarossa.pdf
- [19] <http://www.nuance.northwestern.edu/KeckII/Instruments/FT-IR/>
- [20] Camillo Pertusi, *Trattato di Merceologia*, Torino 1949
- [21] UNI 1932
- [22] Norma ISO 565
- [23] EN ISO 12571 2000
- [24] Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale (ISPRA) per Venezia (Bollettino n.8 Agosto 2009)

·4·

RISULTATI E DISCUSSIONI

In questa sezione saranno esposti e discussi i risultati delle parti sperimentali dello studio. La prima parte riguarderà la caratterizzazione dei campioni di tessuti nuovi utilizzati per le indagini e dei depositi di particolato raccolti a Palazzo Fortuny mentre la seconda parte riporterà i risultati delle due differenti parti di studio.

4.1 Scelta e caratterizzazione dei provini di tessuto

Al fine di comprendere a pieno gli effetti che le condizioni ambientali come temperatura, umidità illuminazione ed in particolar modo polverosità hanno avuto sui tessuti, prima dell'inizio della sperimentazione sono stati caratterizzati i provini di cotone e seta. Lo studio dei tessuti è stato effettuato attraverso varie tecniche analitiche per delineare in maniera precisa la loro morfologia superficiale e le loro caratteristiche chimiche e fisiche. I campioni sono stati osservati al microscopio ottico ed elettronico e caratterizzati chimicamente attraverso spettroscopia IR in modalità ATR e determinazione del grado di polimerizzazione per il cotone e della viscosità intrinseca per la seta. Sono state inoltre effettuate delle prove fisico-meccaniche per la valutazione della forza a rottura e dell'allungamento a rottura di ciascun tessuto.

4.1.1 Osservazione in microscopia ottica ed elettronica

Microscopia ottica

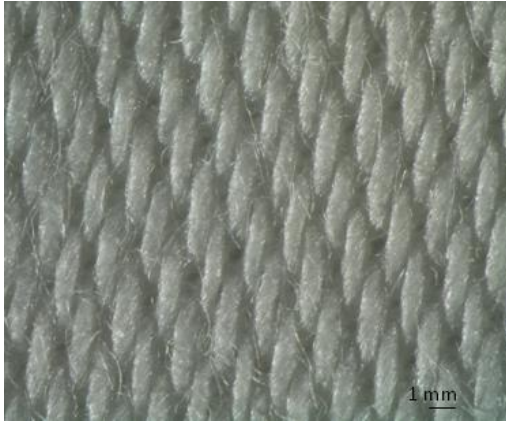
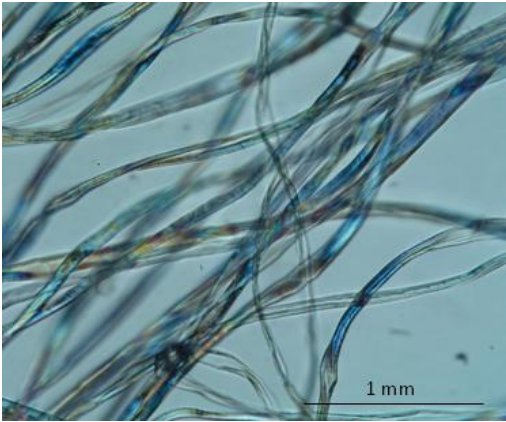
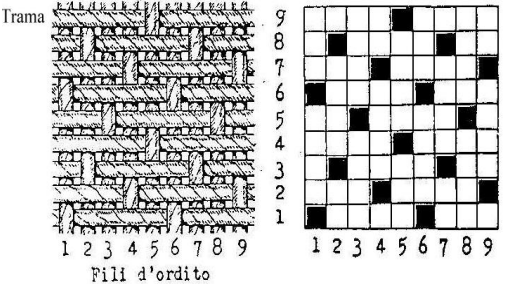
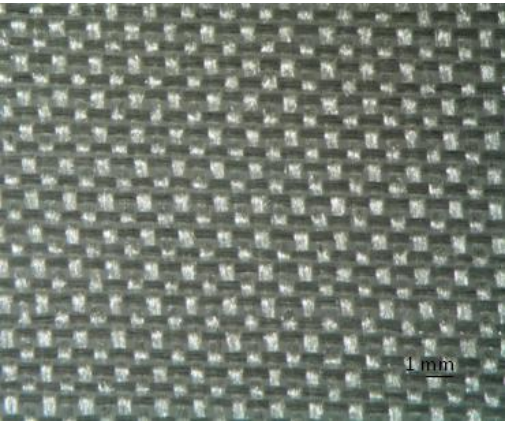
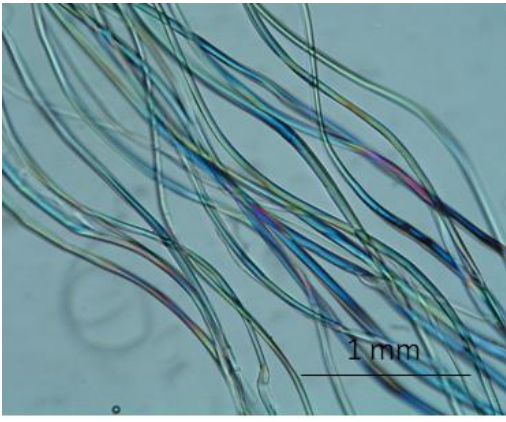
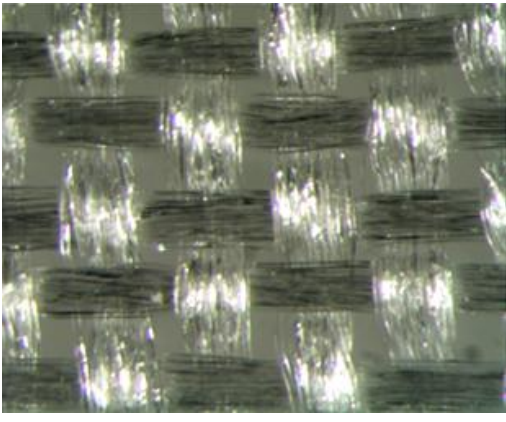
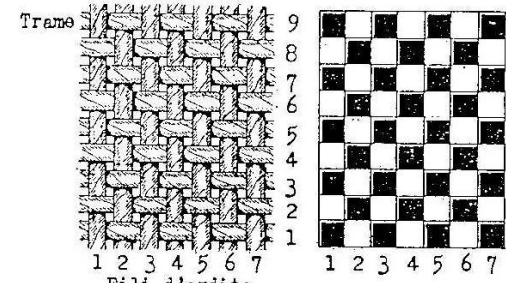
L'osservazione allo stereomicroscopio è servita per osservare il tessuto in maniera completa e dettagliata. È stato possibile definirne la sua omogeneità ed in particolar modo escludere la presenza di accumuli di particolato o altro materiale estraneo sulla superficie dei tessuti nuovi. Il microscopio a luce polarizzata ha permesso di osservare le fibre dei due diversi tessuti al fine di valutarne i processi tecnologici subiti. La microscopia elettronica infine ha consentito di osservare più approfonditamente le fibre che costituiscono i tessuti per valutarne le superfici e gli eventuali fenomeni di degrado o le anomalie presenti.

I provini di cotone sono stati osservati allo stereomicroscopio per verificarne l'omogeneità e per identificarne l'armatura. Il tessuto di cotone è costituito da un filato ritorto che costituisce un tessuto la cui armatura presenta lo schema tipico delle armature raso o satin, ha slegature di trama lunghe come si può notare dallo schema in tabella, a evidente effetto di ordito sul dritto e di trama sul rovescio, il filo della trama passa sotto quattro o più fili dell'ordito in modo sfalsato, lasciando slegati i fili dell'ordito. Al microscopio a luce polarizzata sono state osservate le fibre: il tessuto è costituito da un filato mercerizzato, di cotone makò. Il cotone makò deriva da produzioni di cotone dell'alto Egitto ed ha generalmente lunghezza della fibra tra i 30 e i 34 mm [1,2].

I provini di seta si presentano allo stereomicroscopio come un tessuto omogeneo che presenta lo schema tipico delle armature a tela in cui il rapporto tra i fili di trama e ordito è 1:1 e il tessuto appare uguale sul dritto e sul rovescio. È costituito da un filato semplice. Dall'osservazione effettuata attraverso il microscopio in luce polarizzata si può affermare che le fibre di seta sono sgommate [1,2].

Nella tabella 4.1 sono state riportate alcune immagini rappresentative del tessuto osservato allo stereomicroscopio, delle fibre analizzate attraverso il microscopio in luce polarizzata e dello studio dell'armatura.

Tabella 4.2 Osservazione del tessuto e delle fibre allo stereo microscopio e al microscopio in luce polarizzata

COTONE			
Stereomicroscopio (20X)	Microscopio polarizzato (20X)	Osservazione armatura	Schema armatura
			
SETA			
Stereomicroscopio (20X)	Microscopio polarizzato (20X)	Osservazione armatura	Schema armatura
			

Microscopia elettronica

Attraverso la microscopia elettronica a scansione sono state indagate le fibre dei tessuti in maniera più approfondita rispetto a quanto già fatto con le altre tecniche microscopiche, per comprenderne meglio la morfologia superficiale, la presenza di eventuali deposizioni e sporcizia e anomalie presenti.

Nelle tabelle 4.2 e 4.3 sono state riportate alcune immagini delle fibre di cotone e seta acquisite durante le osservazioni preliminari. I provini di cotone mostrano fibre con la classica struttura simile a quella di un nastro avvolto a spirale, lungo il suo asse longitudinale, con andamento largo o stretto, è ipotizzabile pertanto che questo cotone non abbia subito il processo di mercerizzazione. Le superfici delle fibre non appaiono in alcuni punti perfettamente integre ma si notano spesso fenomeni di sfibrillamento superficiale, probabilmente dovute a danni di origine meccanica e delle striature trasversali alla fibra che non sono generalmente caratteri tipici del cotone. Inoltre, come si può vedere dal resto delle immagini, le fibre di cotone non sono lisce ma presentano notevoli irregolarità superficiali. Quelle disomogeneità infatti potrebbero creare difficoltà nel momento in cui si andrà a valutare le interazioni tra particolato e fibre dopo i vari cicli di studio. C'è da notare infine che il tessuto non è perfettamente pulito in quanto presenta, seppur in lieve entità, qualche particella di sporco ancora prima dell'esposizione è quindi necessario valutare che non tutti i depositi presenti nei campioni dei vari mesi saranno riconducibili a Palazzo Fortuny in quanto i provini presentano già del particolato.

Le fibre di seta si presentano con la classica forma di filamenti aventi l'aspetto di un cilindri sottili perfettamente lisci che non presentano struttura. Non sono presenti infatti canali e neppure strie longitudinali o trasversali. Hanno diametro costante lungo tutto il decorso della fibra e presentano ogni tanto dei leggeri rigonfiamenti. Appaiono come fibre pulite totalmente libere dalla sericina. É osservabile, su alcuni campioni, qualche sporadico fenomeno di sfibrillamento come si può notare dalle immagini in tabella. Anche in questo tessuto, come nel cotone seta sono presenti piccole particelle di deposizioni, di cui considerare la presenza per le osservazioni future. È da considerare come tra i depositi presenti nel cotone e quelli presenti nella seta appaiano più intimamente legati i campioni appoggiati nel cotone, in quanto la superficie irregolare facilita l'aggregazione rispetto alle pareti lisce della seta.

COTONE
Irregolarità superficiali

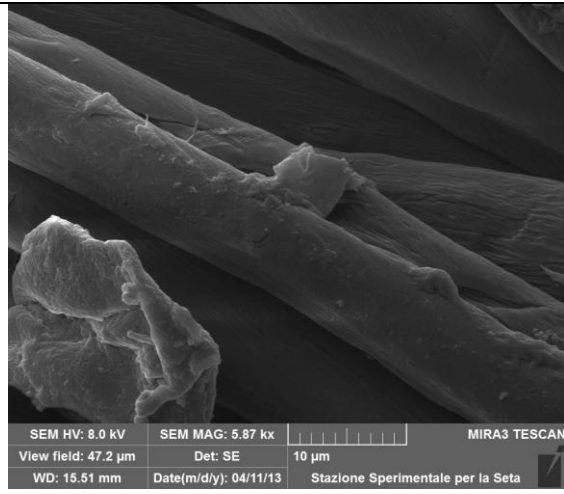
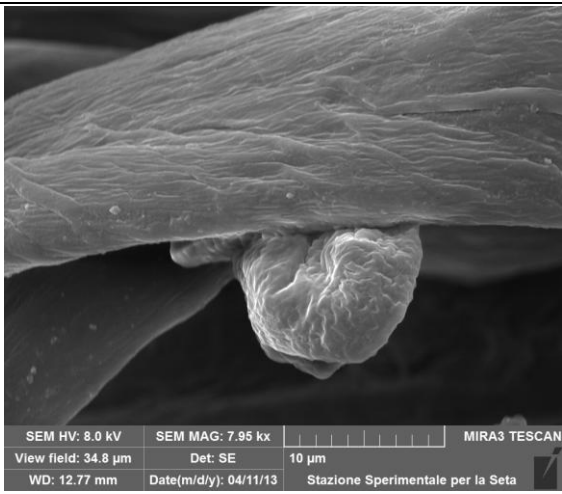
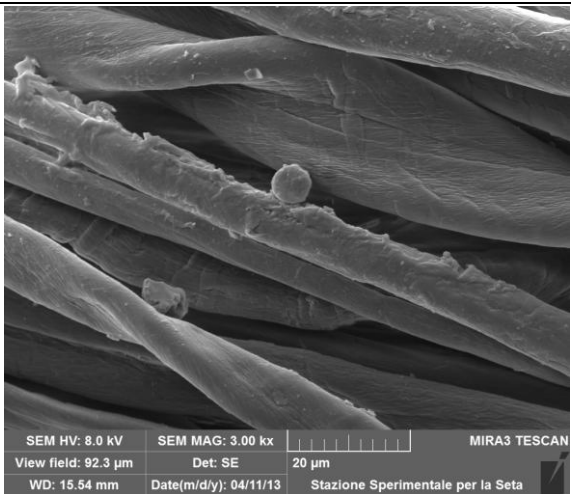
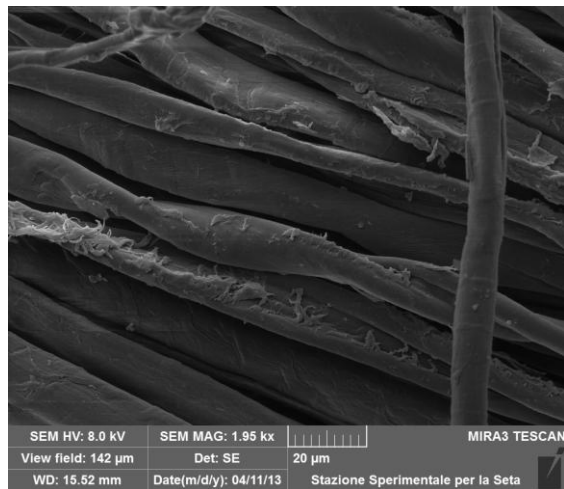
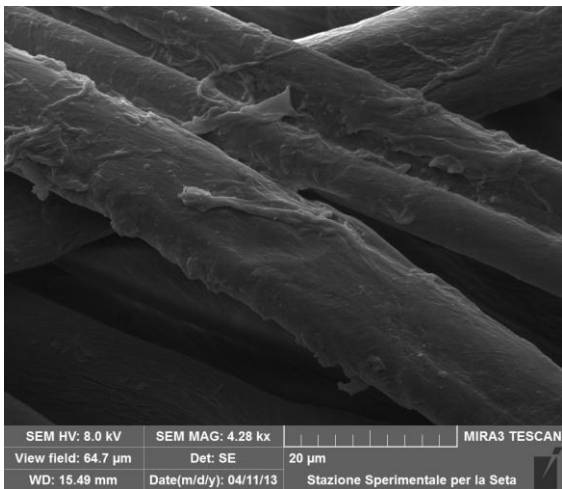
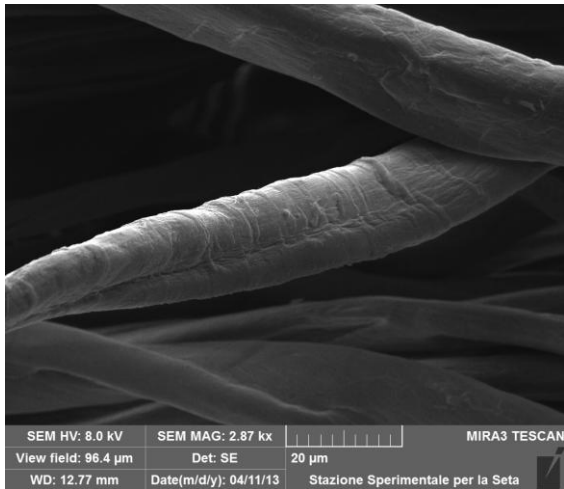
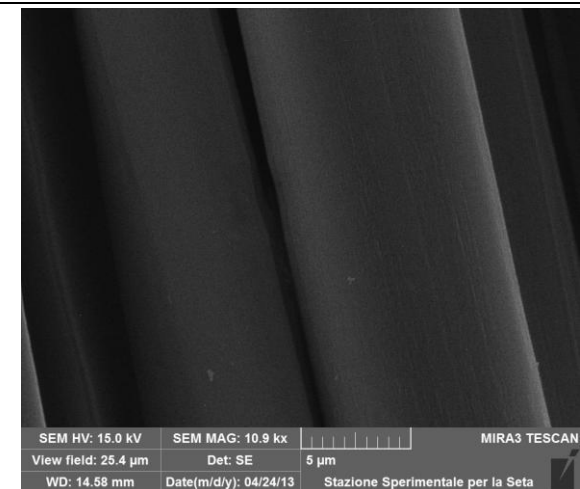
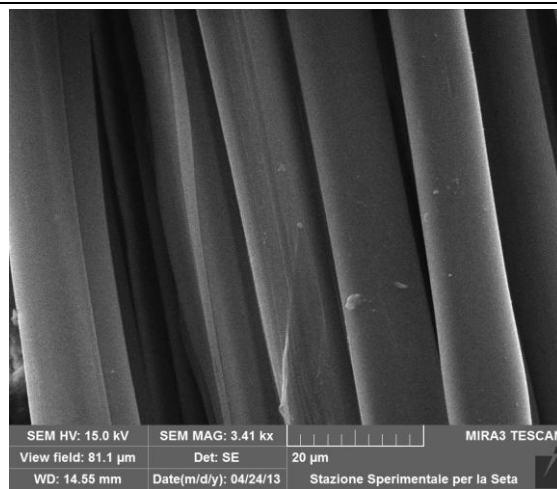
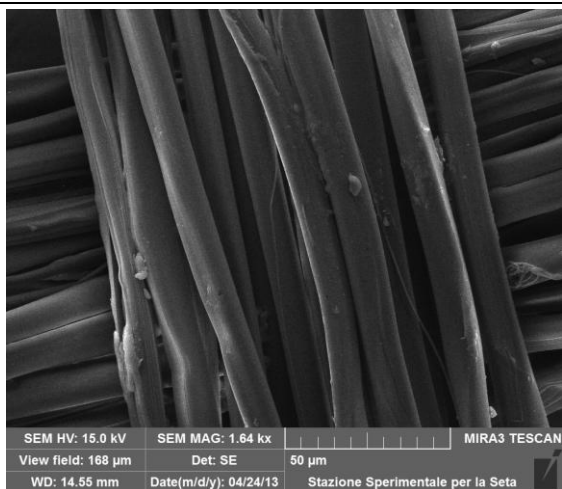


Tabella 4.2 Osservazione dei tessuti di cotone

SETA

Immagini superficiali



Fenomeni di sfibrillamento

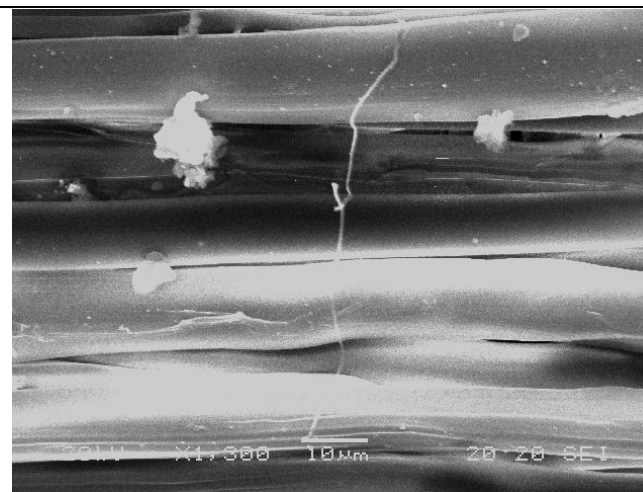
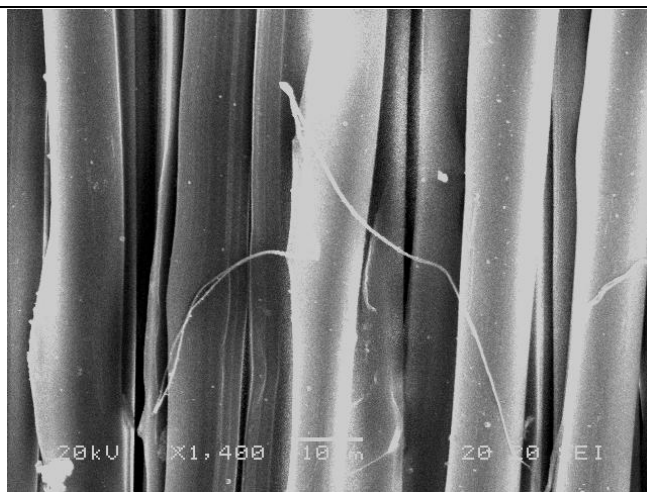


Tabella 4.3 Osservazione dei tessuti di seta

4.1.2 Prove fisico-meccaniche

Le prove fisico-meccaniche sono state effettuate con lo scopo di valutare eventuali variazioni nel comportamento dei provini di cotone e seta durante i vari cicli dello studio. In particolare si è voluto prendere in considerazione la forza di rottura e l'allungamento a rottura per esaminare la variazione di resistenza del tessuto in seguito al particolato depositatosi naturalmente o artificialmente. Le proprietà fisiche sono state determinate su striscia con dinamometro Instron secondo la norma UNI 1932. I dati relativi alle prove di trazione sono stati acquisiti effettuando le prove di trazione in entrambe le direzioni del tessuto (trama e ordito definite per convenzione direzione A e direzione B); i risultati sono riportati nelle tabelle 4.4 e 4.5 rispettivamente per il cotone e per la seta con le proprie deviazioni standard relative percentuali (RSD%)²² [1,2]

Tabella 4.4 Caratteristiche meccaniche provini di cotone

Caratteristica	Direzione A	RSD (%)	Direzione B	RSD (%)
Forza di rottura media (N)	161	8,6	93	13,3
Allungamento medio alla forza massima (%)	33	9,3	14,3	10,0

I valori di forza di rottura media e allungamento medio alla forza massima del cotone denotano che questa fibra è molto tenace ma che nello stesso tempo risulta rigida e difficilmente estensibile. Le due direzioni del tessuto risultano notevolmente differenti in quanto a carico a rottura medio e allungamento medio alla forza massima, probabilmente perché trama e ordito presentano due titoli differenti. I valori della seta per le due direzioni del tessuto risultano invece molto più omogenee, questo denota che in numero di capi per filo di trama e ordito è simile.

Tabella 4.5 Caratteristiche meccaniche provini di seta

Caratteristica	Direzione A	RSD (%)	Direzione B	RSD (%)
Forza di rottura media (N)	45	6,3	35,5	2,7
Allungamento medio alla forza massima (%)	25,2	7,3	21,3	5,7

²² La deviazione standard relativa percentuale, indicata con RSD%, è un [indice di dispersione](#) che permette di confrontare misure di fenomeni riferite a [unità di misura](#) differenti, in quanto si tratta di un numero puro (ovvero non riferito ad alcuna unità di misura). È un indice della [precisione](#) di una misura. Viene definito, per un dato campione, come il rapporto tra la sua [deviazione standard](#) (σ) e il valore assoluto della sua [media](#) aritmetica (μ):

$$RSD\% = \frac{\sigma}{|\mu|} \cdot 100$$

4.1.3 Caratterizzazione FTIR-ATR

I campioni di tessuto di cotone e seta sono stati caratterizzati attraverso spettrofotometria IR in modalità ATR. Lo spettro del provino di cotone, riportato in figura 4.1, presenta il profilo tipico delle fibre di cotone. La banda larga attorno 3284 cm^{-1} corrisponde agli stretching dei legami O-H, il picco a 2896 cm^{-1} che è da imputarsi agli stretching dei legami C-H e il picco a 1649 cm^{-1} è dovuto anch'esso all'assorbimento di molecole d'acqua. [3]. Picchi molto intensi attorno a 1920 e 1850 cm^{-1} potrebbero far pesare alla presenza di gruppi metilene ($-\text{CH}_2-$) e al loro segnale di stretching simmetrico e asimmetrico, questi picchi provverebbero la presenza di cere presenti come impurità nelle fibre di cellulosa. Altre impurità, come pectine o proteine non hanno gruppi metilene alle frequenze indicate. Nel qual caso fossero presenti, si potrebbe pensare a cere messe in fabbrica.[4]

L'assenza di picchi nella regione attorno ai 1750 cm^{-1} fa dedurre che non ci siano processi ossidativi in atto delle fibre cellulosiche: picchi in questa zona infatti sono tipici delle cellulose ossidate in cui i gruppi alcolici presenti nella molecola si sono ossidati ad aldeidi, chetoni e carbossili attraverso i meccanismi già descritti nel capitolo 2. [5] [4]

Il provino di tessuto in esame può essere caratterizzato come un normale cotone mercerizzato privo di tinture.

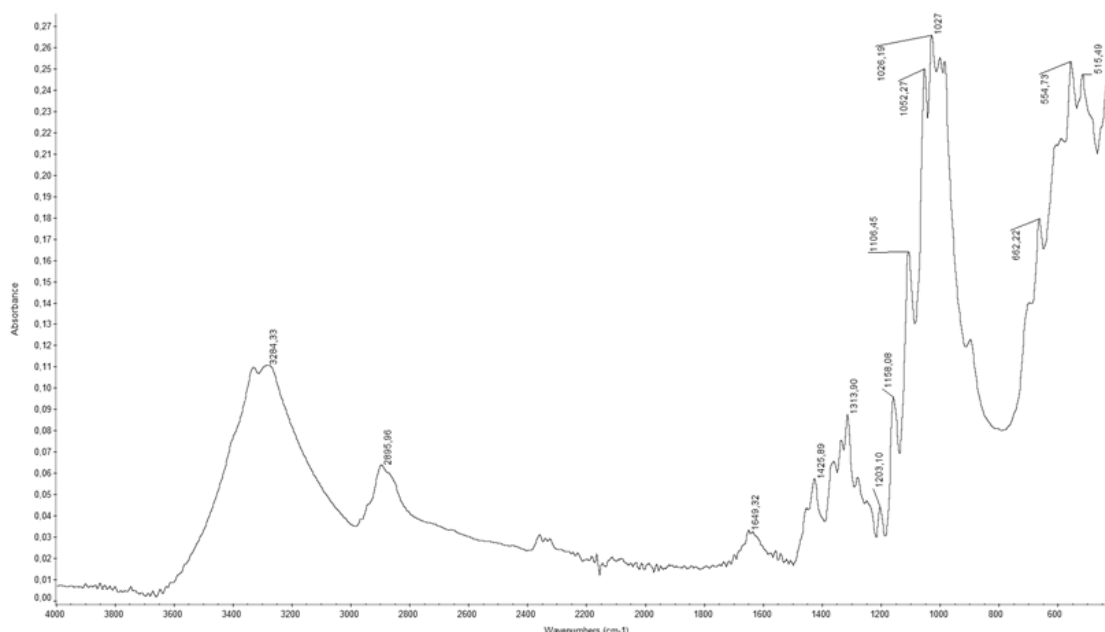


Figura 4.1 spettro ATR-IR del campione di cotone

Il provino di seta, presenta lo spettro riportato in figura 4.2. L'analisi delle proteine attraverso spettroscopia IR generalmente rivela la presenza di nove bande di assorbimento principali che vengono denominate come ammidine A, B, I, II, III, IV, V, VI e VII. Le più importanti ai fini del riconoscimento della seta sono l'ammidine I e l'ammidine II. La banda di assorbimento a 1616 cm^{-1} è relativa all'ammidine I ed è determinata dallo stretching del gruppo carbonilico ($\text{C}=\text{O}$), questo è l'assorbimento di maggior rilievo e che è meno condizionato dalle influenze esterne. L'assorbimento è molto elevato nella zona tra i 1600 e i 1650 in quanto la fibroina presenta zone a maggior cristallinità in cui prevale la conformazione a β -sheet che assorbe intorno ai 1620 cm^{-1} e zone a minore cristallinità in cui prevalgono le strutture α -elica, β -turn e random coil che danno assorbimenti intorno a 1644 cm^{-1} [6]. L'ammidine II invece è caratterizzata dalla banda di assorbimento a 1513 cm^{-1} è dovuta al bending in piano del gruppo N-H e allo stretching del gruppo C-N. [7] [8]

La seta in esame, non presentando tracce di assorbimenti relativi alla sericina che darebbe assorbimenti intorno 1637 cm^{-1} . [9]

È possibile affermare che si tratta di seta sgommata, non tinta e non caricata.

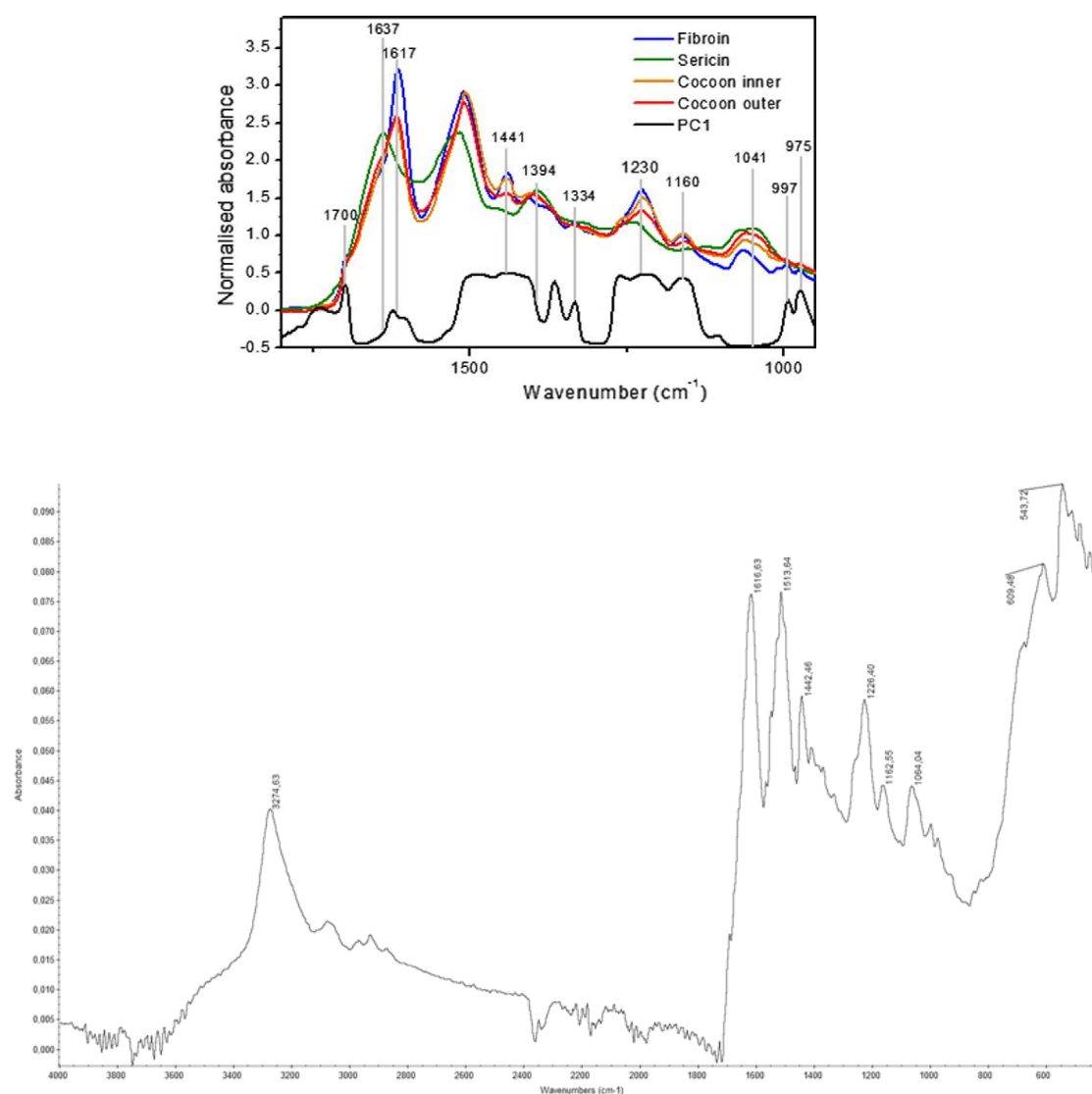


Figura 4.2 spettro ATR-IR del campione di seta

4.1.4 Determinazione grado di polimerizzazione e viscosità intrinseca

Le prove per la determinazione del grado di polimerizzazione dei campioni di cotone e della viscosità intrinseca della seta sono state condotte in laboratorio

Caratteristica	Direzione A	C.V. (%)	Direzione B	C.V. (%)
60% U.R. bianco				
Forza di rottura media (N)	146	6.8	104	7.8
Allungamento medio alla forza massima (%)	32.2	4.5	14.5	7.1
60% U.R. sporco				
Forza di rottura media (N)	136	4.9	88	6.2
Allungamento medio alla forza massima (%)	42.4	3.5	19.5	5.5
90% U.R. bianco				
Forza di rottura media (N)	158	5.8	73.7	10.8
Allungamento medio alla forza massima (%)	36.7	4.4	16.1	6.8
90% U.R. sporco				
Forza di rottura media (N)	120	2.7	44.6	5.7
Allungamento medio alla forza massima (%)	74.8	6.3	17.9	9.3

Tabella 4.6 Dati grado di polimerizzazione museo

4.2 Valutazione ambientale museale di Palazzo Fortuny

4.2.1 Monitoraggio microclimatico

Il monitoraggio microclimatico è stato effettuato registrando attraverso un datalogger le variazioni termoisometriche all'interno del salone principale di Palazzo Fortuny durante i mesi invernali di permanenza dei campioni al museo. L'osservazione delle variazioni di umidità e temperatura sono state realizzate per comprendere se i valori rilevati potessero incidere nei processi di interazione tra deposizioni di particolato e tessuti. Nelle immagini sottostanti sono riportati i rilevamenti del datalogger posizionato in corrispondenza dei campioni appoggiati a Palazzo Fortuny. I dati sono stati suddivisi in base alle scadenze mensili con cui venivano recuperati i campioni.

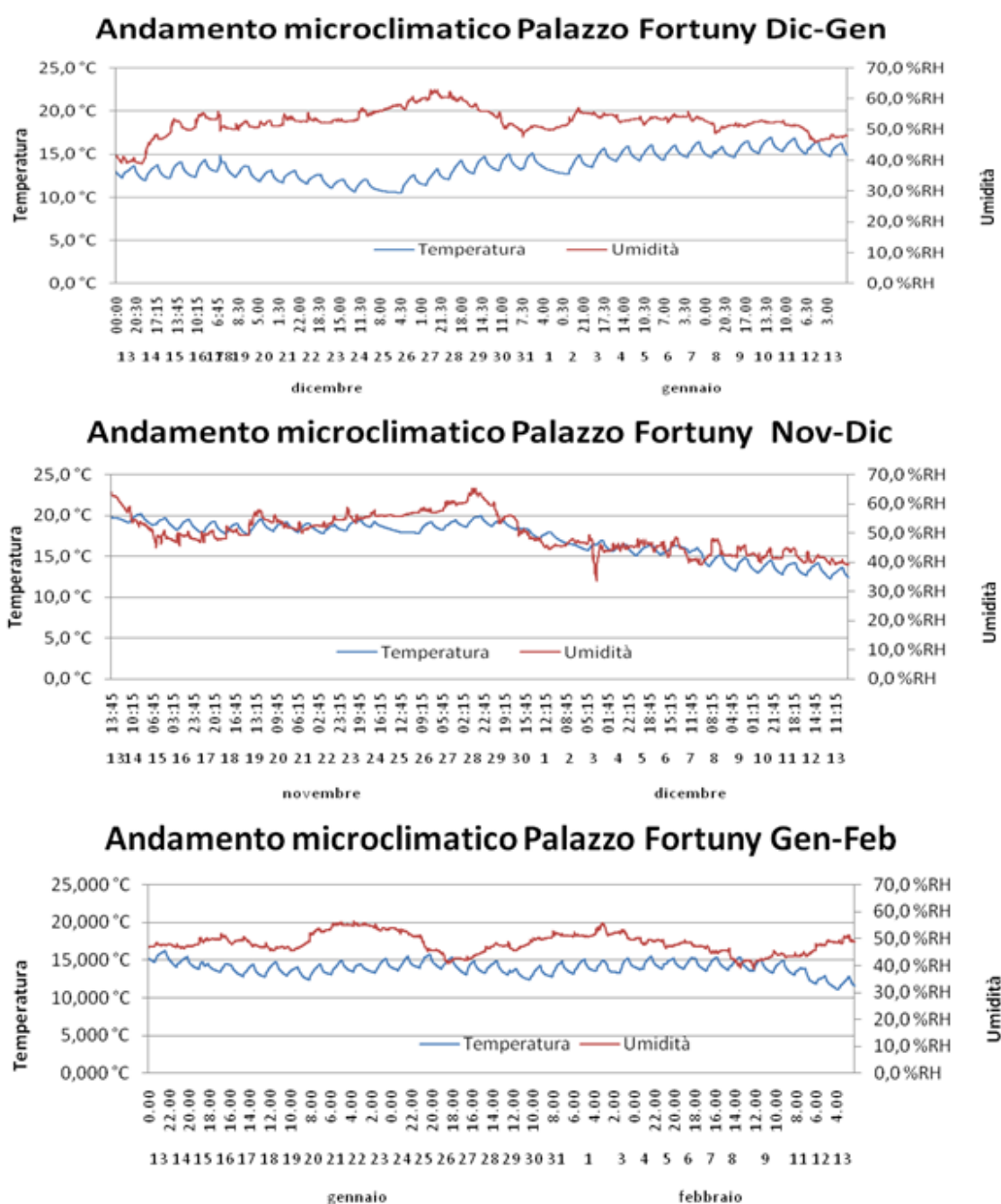


Figura 4.3 Andamento microclimatico salone al piano nobile di palazzo Fortuny

In tabella sono stati riportati i valori di temperatura ed umidità minima, massima e media per ciascun mese di esposizione dei campioni al museo. Si può notare come le temperature di conservazione dei manufatti all'interno del museo vari dai 17.2°C che si riscontrano in novembre ai 14°C di gennaio con valori minimi che toccano i 10°C a dicembre e massimi attorno ai 20°C in novembre. Per quanto riguarda l'umidità relativa i valori medi restano sufficientemente stabili intorno al 50% tuttavia vengono toccati valori minimi di 33.7% e massimi di 65%. Come si può vedere i parametri ambientali considerati discostano lievemente dai valori ottimali di conservazione di manufatti tessili nelle aree espositive (D.M. 10 maggio 2000 e il D.M. 27 luglio 2001) che determinano la temperatura entro il range 19-24°C e l'umidità relativa tra il 40-60%.

Tabella 4.7: Valori di temperatura e umidità riferiti alla sala principale al primo piano di Palazzo Fortuny

		T°C	UR%
Nov-Dic	Min	12.2	33.7
	Max	20.2	65.2
	Media	17.2	49.8
Dic-Gen	Min	10.5	38.7
	Max	16.9	62.9
	Media	13.7	52.5
Gen-Feb	Min	11.1	38.7
	Max	16.3	56.4
	Media	14.0	48.4

Considerando inoltre il fatto che Palazzo Fortuny non ha alcun tipo di condizionamento interno si sono volute osservare le differenze tra l'interno e l'esterno del Palazzo. I dati sono stati presi dai dati SCIA dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e fanno riferimento alla stazione meteorologica di monitoraggio climatico di Venezia situato all'Istituto Cavanis. L'istituto dista dal museo all'incirca 800 metri. Si può notare che l'andamento delle temperature interne al museo, sebbene notevolmente superiori rispetto a quelle interne siano da esse influenzate. Il medesimo ragionamento si può fare anche per l'andamento dell'umidità relativa.

Andamento temperatura interna/esterna a Palazzo Fortuny a sinistra mentre l'umidità è mostrata nell'immagine a destra. Con gli indicatori rossi viene indicato l'interno del palazzo mentre con quelli blu l'esterno.

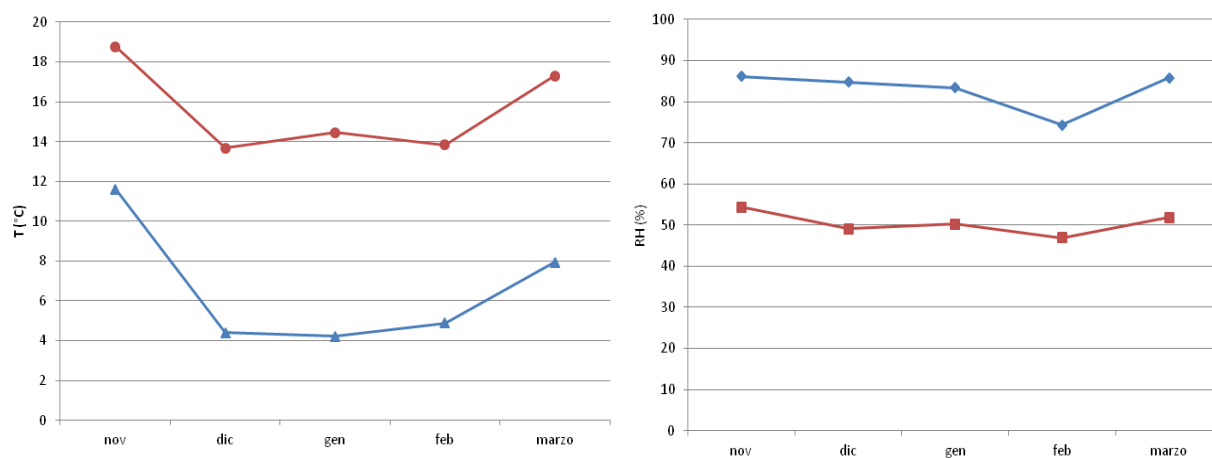


Figura 4.4 Andamento temperatura interna/esterna a Palazzo Fortuny a sinistra mentre l'umidità è mostrata nell'immagine a destra

4.2.2 Illuminamento

In tabella 4.8 vengono riportati i valori delle misurazione dei lux effettuate nei punti più luminosi della sala nelle zone attigue agli armadi in cui sono stati alloggiati i campioni. Come si può notare i valori dei lux sono compatibili con i valori dettati dal decreto ministeriale (D.M. 10 maggio 2000 e il D.M. 27 luglio 2001). Tali valori di illuminamento possono far escludere questo parametro quale fattore di rischio di degrado di manufatti tessili all'interno del museo.

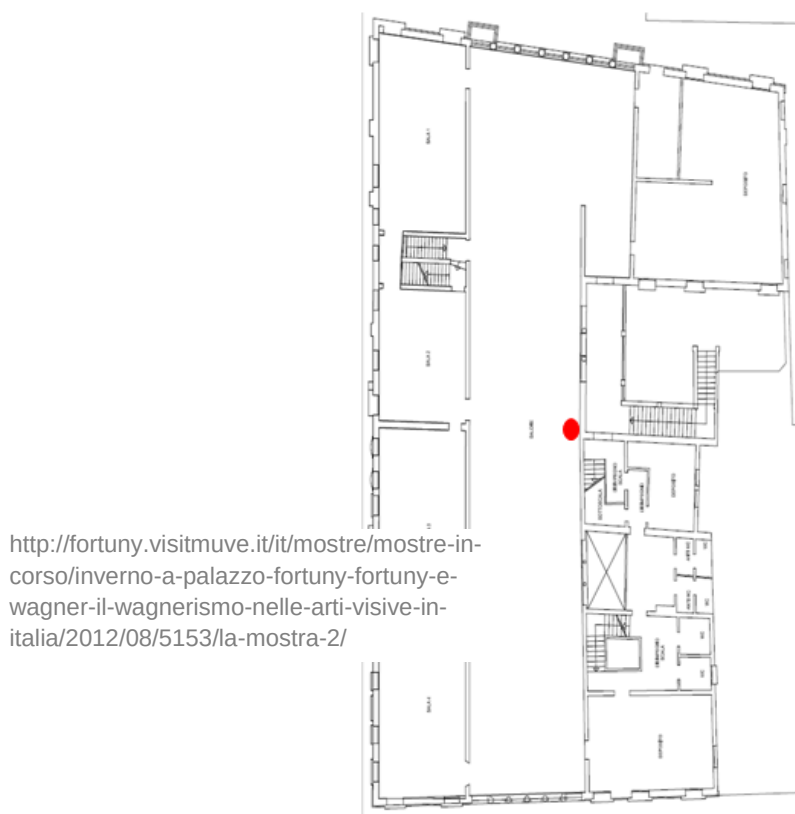


Figura 4.5 Collocazione del datalogger all'interno del salone principale del primo piano nobile di Palazzo Fortuny

RILEVAMENTO	ILLUMINAMENTO (Lux)
1	28
2	70
3	70
4	31
5	12
6	16
7	35
8	55
9	50

Tabella 4.8. valori d'illuminamento rilevati nel salone principale di Palazzo Fortuny

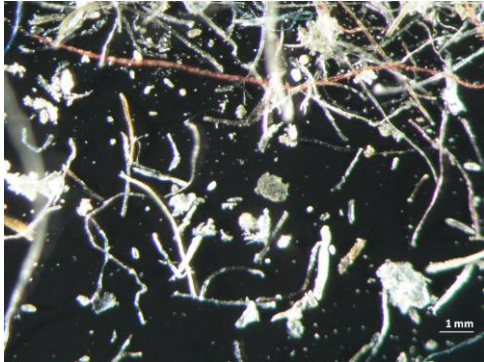
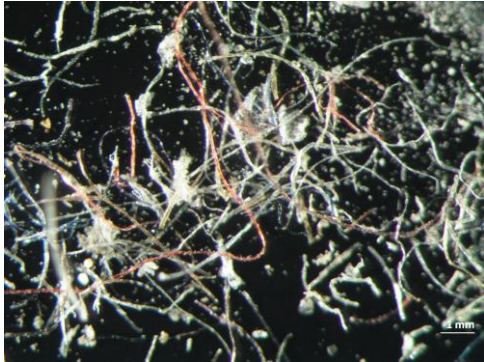
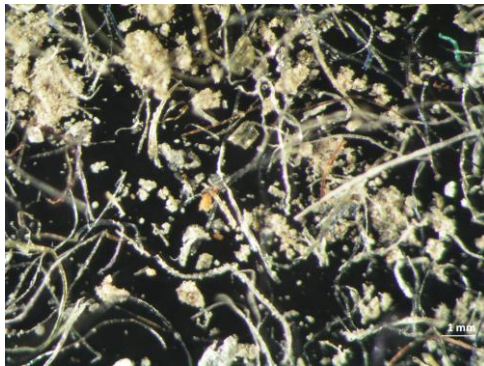
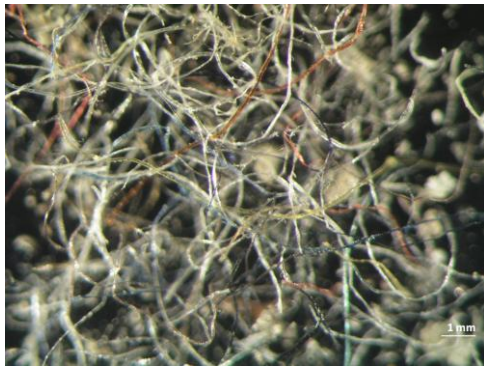
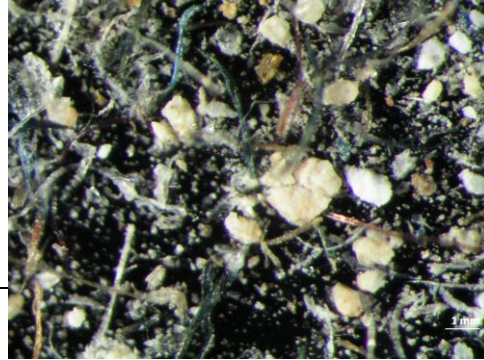
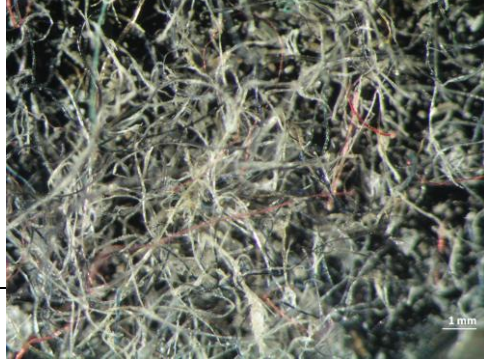
4.2.3 Caratterizzazione depositi polverulenti

Osservazioni al microscopio ottico

Dall'osservazione al microscopio ottico si nota come nei depositi polverulenti di Palazzo Fortuny gran parte del particolato è costituita da materiale fibroso di varia natura. La maggior parte del particolato, non è ben caratterizzabile dall'osservazione al microscopio ottico, per la granulometria fine e per il fatto che le particelle chiare tendono a dare fenomeni di riflessione accentuati. Per questo un'osservazione più dettagliata è stata effettuata attraverso la microscopia elettronica a scansione.

Le deposizioni dei primi due mesi appaiono simili tra loro, mentre quelle del terzo mese dimostrano di avere una granulometria più elevata. Il colore delle particelle è molto variabile dal bianco-giallognolo al rosso-aranciato fino ad alcune che sembrano essere traslucide. Sono identificabili diverse forme di particolato, alcune si mostrano più arrotondate, altre più spigolose. C'è da sottolineare anche che alcune sono degli agglomerati di particolato molto sottile ed altre si presentano singole, ben distaccate le une dalle altre. In tabella 4.9 sono riportati le immagini dei supporti adesivi in cui sono state collocate le polveri per le analisi microscopiche, si è cercato di separare inoltre, per un'osservazione più accurata le deposizioni di particolato dalle deposizioni fibrose che con la loro mole tendevano ad occultare le deposizioni di particolato.

Tabella 4.9 Immagini effettuate allo stereo microscopio dei depositi polverulenti

Mese	10X	Depositi 50X	Fibre 50X
1			
2			
3			

Osservazioni al microscopio elettronico

Attraverso l'osservazione al microscopio elettrico del particolato è stato possibile differenziare in maniera più accurata le diverse tipologie di depositi in base alla loro morfologia per comprendere se alcune classi di particelle creano più facilmente interazioni di altre. Inoltre, grazie alla microanalisi è stato possibile definire la composizione elementare delle diverse tipologie morfologiche di particelle. Le deposizioni dei tre mesi di monitoraggio, sono risultate del tutto identiche in quanto a composizione e morfologia. Per l'osservazione sono state separate le parti fibrose dalle parti non fibrose al fine di assicurare un'osservazione più precisa. Il particolato analizzato può essere suddiviso in diverse classi: vi sono infatti agglomerati di particelle molto sottili, particelle tonde, particelle spigolose, particelle contenenti metalli, materiale organico ed elementi microbiologici??(spore) come si può notare dall'immagine 4.6

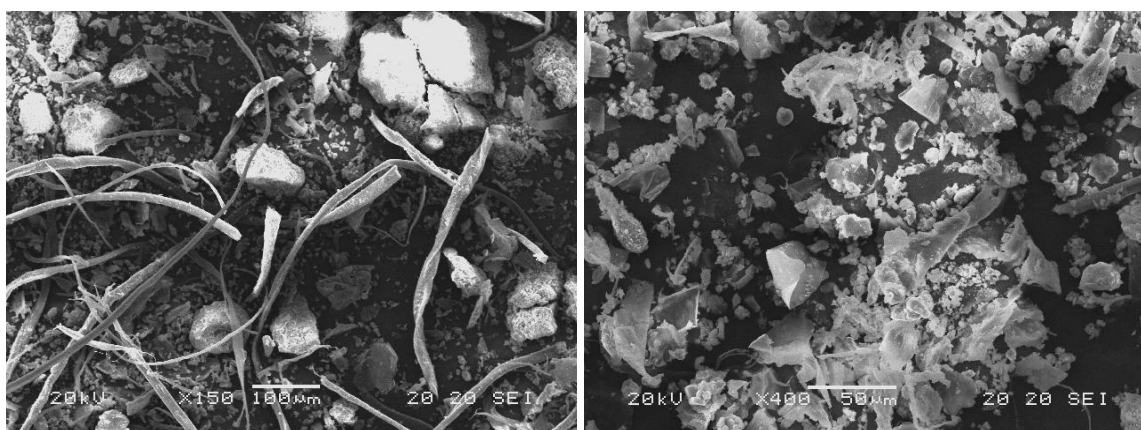


Figura 4.6 deposizioni Palazzo Fortuny

Nelle pagine seguenti il particolato è stato suddiviso in sei tipologie commentate una ad una. In tabella 4.10 sono riportate delle immagini rappresentative delle varie tipologie con i rispettivi spettri EDS che denotano la composizione elementare di ciascuna classe.

Prima tipologia: Agglomerati di natura organica

Questa tipologia comprende tutti gli agglomerati di particelle molto sottili (figura 4.11). La loro formazione probabilmente è dovuta a fenomeni di condensa che favoriscono il processo di coesione tra diverse tipologie di particelle. La composizione è variabile in quanto la microanalisi mette in luce una natura eterogea: vi è sia una parte organica che inorganica. Gli elementi riscontrati al loro interno sono C, Si, Al, Na, Ca, K, Mg, S, e delle piccole percentuali di Fe.

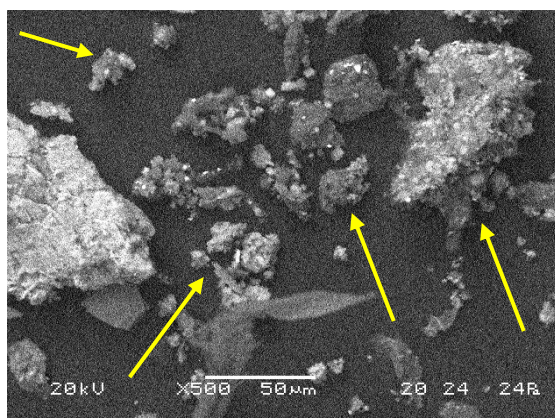


Figura 4.7 Agglomerati di natura organica

Seconda tipologia: particelle tonde

In questa tipologia rientra tutto il particolato avente forma tondeggiante (figura..). Hanno generalmente una granulometria variabile dai 10 ai 5 μm . All'interno di questa classe vi sono particelle che presentano elevate quantità di Ca e altre che contengono in misura maggiore Si e Al.

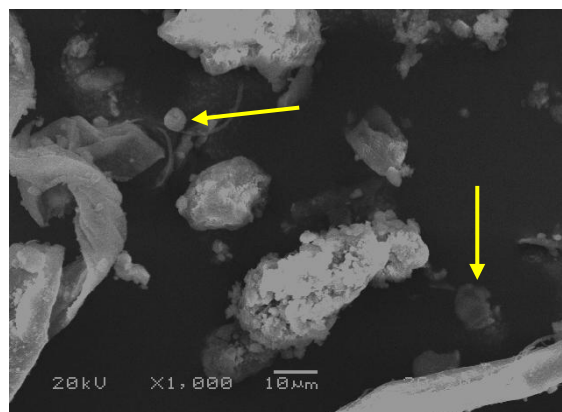


Figura 4.8 Particelle tonde

Terza tipologia: particelle contenenti sali

la terza tipologia comprende particelle che hanno una elevata percentuale di Sali come Na, Mg, K, Cl come si può vedere in figura...; considerando che le deposizioni derivano una città marittima questo rientra nella normalità.

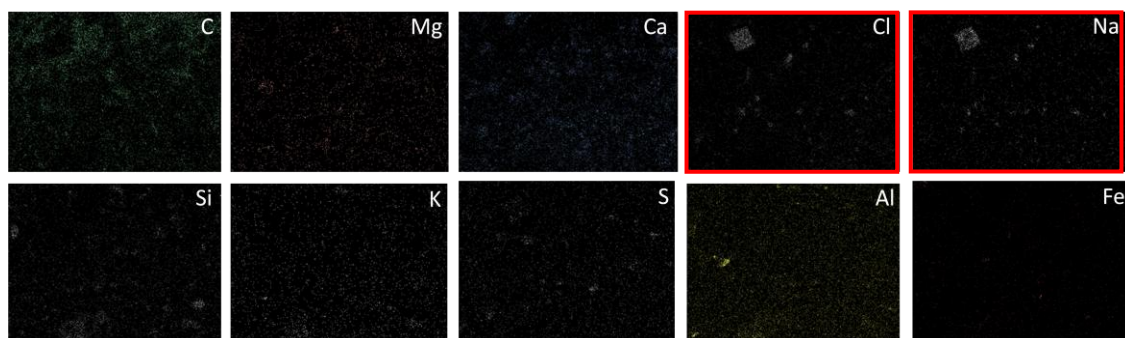


Figura 4.9 particelle contenenti sali

Quinta tipologia: particelle organiche

Una parte del particolato presente a Palazzo Fortuny è costituito da materiale organico, come si può vedere dagli spettri riportati in figura .1.. è stata anche riscontrata la presenza di spore. Il materiale organico può causare gli agglomerati visti nella tipologia 1 nel momento in cui vi sia la compresenza di particelle spugnose e di elevati tassi di umidità. Gli agglomerati che si vengono a formare hanno capacità adesive maggiori rispetto alle altre tipologie di particolato e possono risultare talvolta più difficili da rimuovere sui supporti tessili.

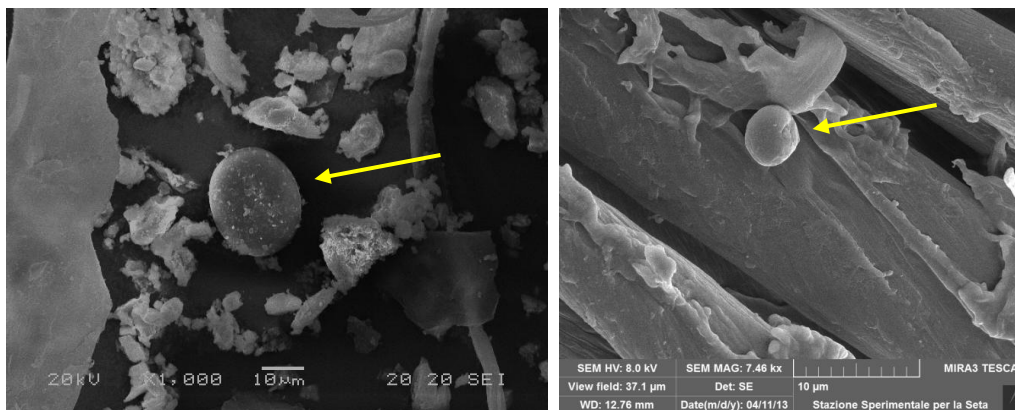


Figura 4.10 particelle organiche

Quinta tipologia: particelle contenenti silico-alluminati

In questa classe si riscontrano tutte le particelle aventi forma leggermente spigolosa come si nota in figura ... che presentano una elevata percentuale di composti organici e di Al e Si.

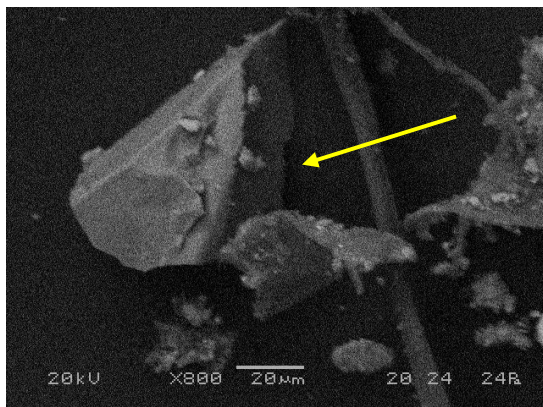


Figura 4.11 particelle contenenti silico-alluminati

Sesta tipologia: particelle contenenti metalli

In questa categoria rientrano tutte quelle particelle avente forma leggermente spigolosa dal cui spettro EDS emerge che contengono metalli. Dalla figura ... che riporta gli spettri EDS di alcune di queste particelle si può notare come siano spesso presenti Fe, Zn e Cu.

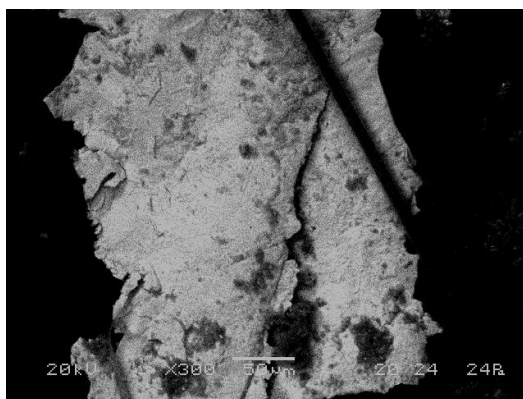
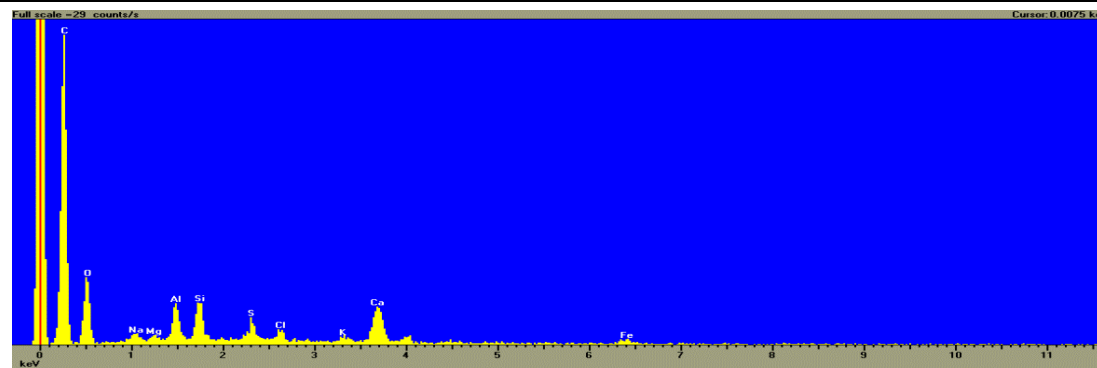
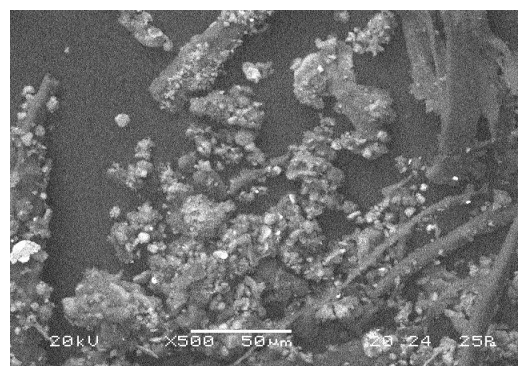
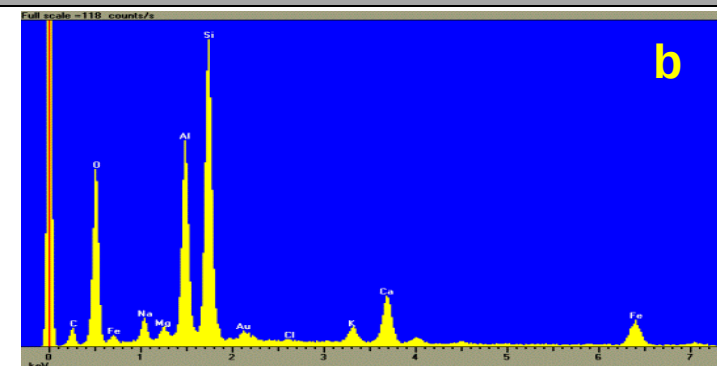
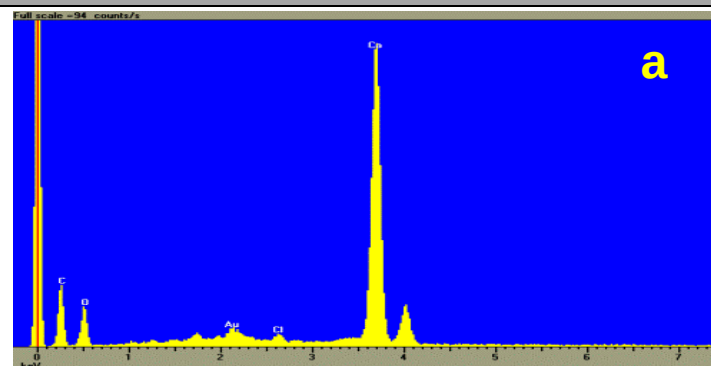
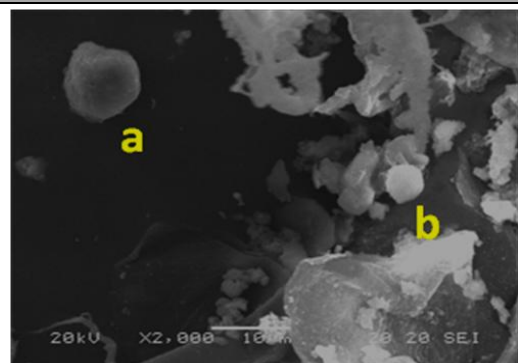
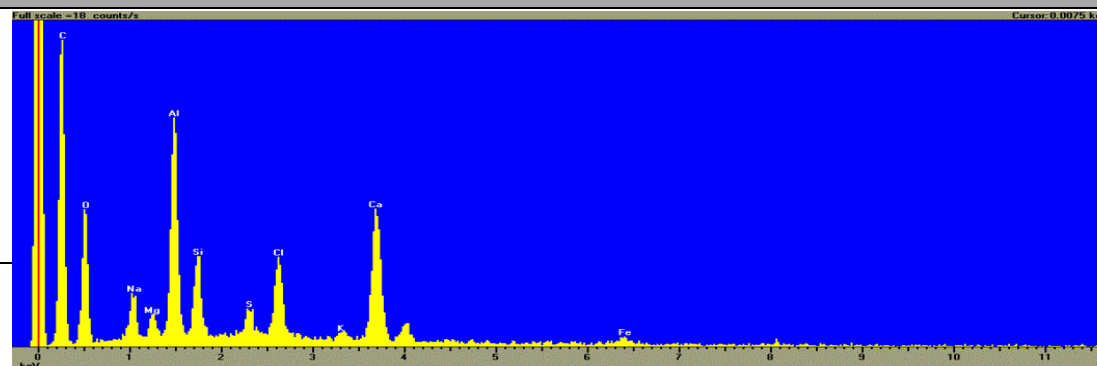
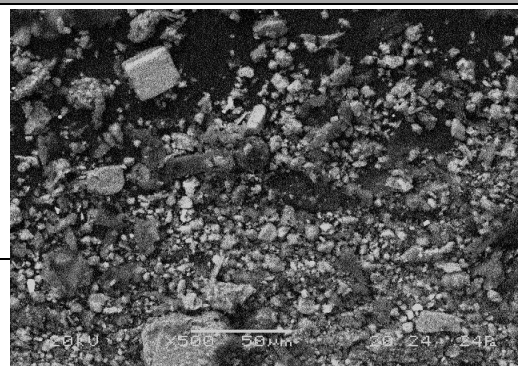
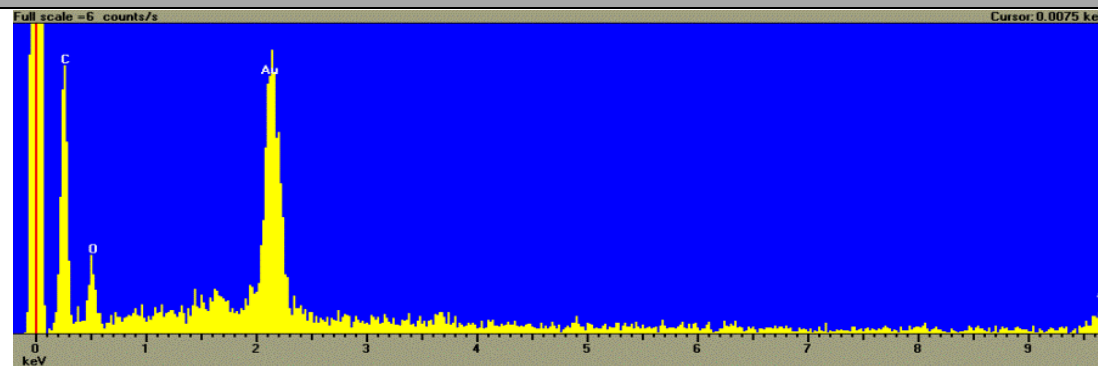
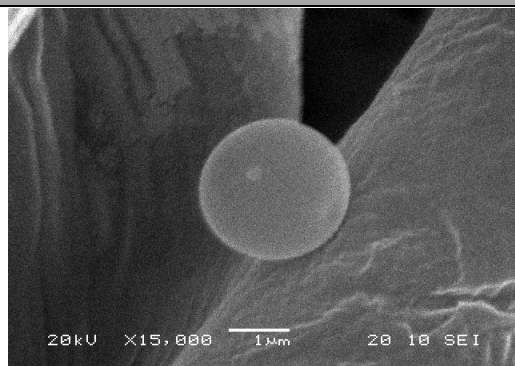
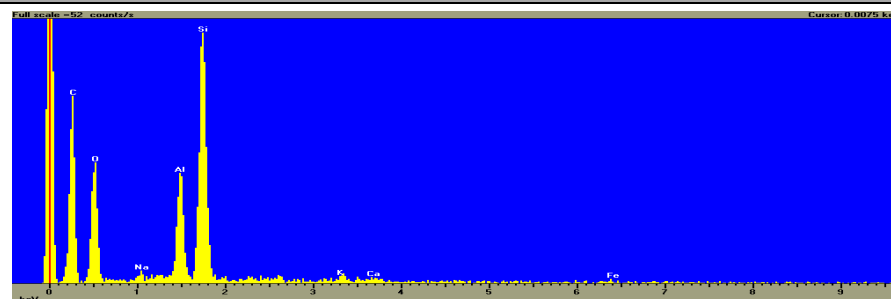
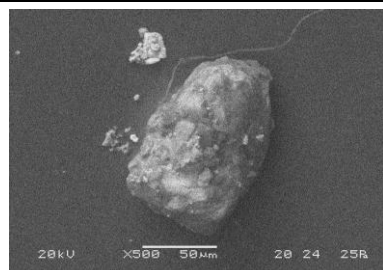
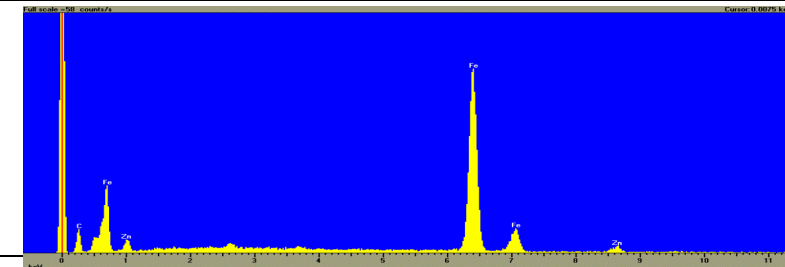
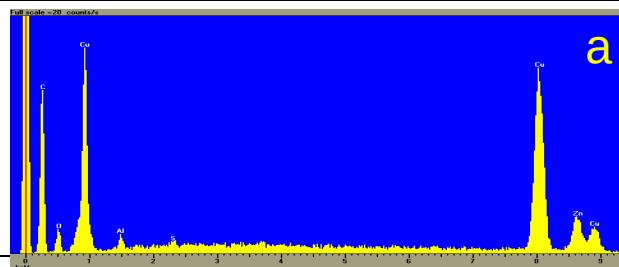
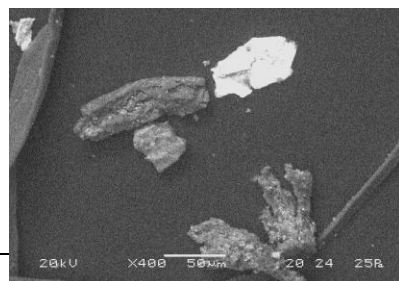


Figura 4.12 particelle contenenti metalli

Tabella 4.10 Tipologie di particolato

Prima tipologia – Agglomerati organici-**Seconda tipologia – Particelle tonde -****Terza tipologia – Particelle contenenti sali -**

Quarta tipologia -- Particelle organiche -**Quinta tipologia -- Particelle contenenti alluminio-silicati -****Sesta tipologia - Particelle contenenti metalli -**

Caratterizzazione dei depositi attraverso spettroscopia IR

Attraverso la spettroscopia IR è stato possibile analizzare dei campioni di deposito dei tre mesi in cui sono rimasti esposti i campioni, la composizione delle polveri è risultata identica per il periodo monitorato probabilmente perché sono stati valutati solamente mesi invernali che di per sé non comportano sostanziali variazioni di composizione di particolato. Le polveri sono state analizzate attraverso FTIR utilizzando pastiglie di KBr.

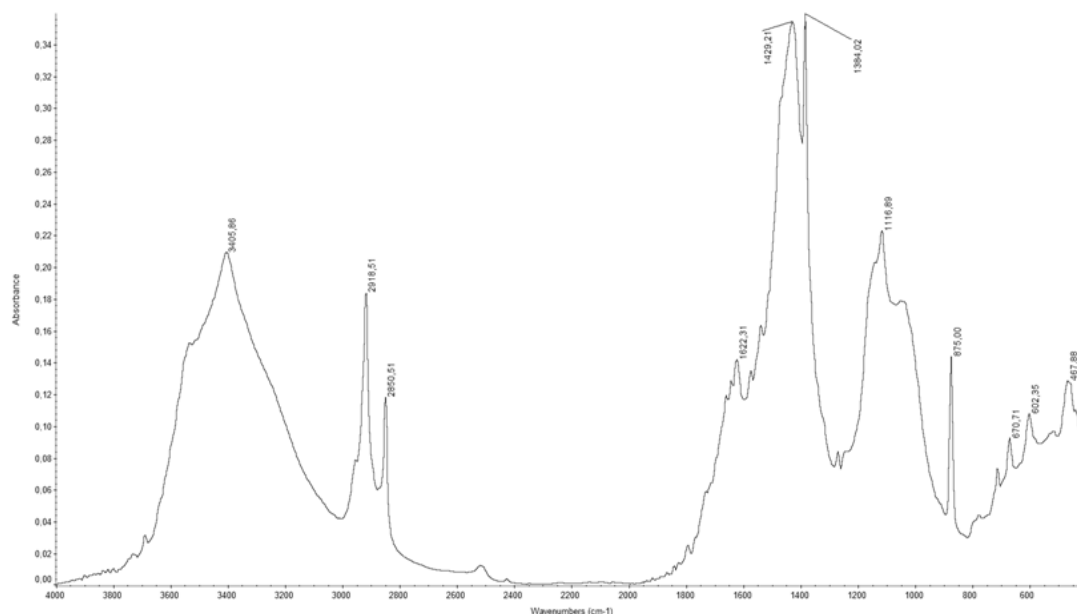


Figura 4.13 Spettro IR delle polveri raccolte a palazzo Fortuny

Dallo spettro IR delle polveri depositate nel salone principale di Palazzo Fortuny (figura 4.13) emerge la presenza di una componente importante organica dimostrata dai picchi a circa 3000 cm^{-1} . Vi è inoltre la presenza di carbonati identificabili attraverso le bande di assorbimento a 1429 cm^{-1} , 875 cm^{-1} 714 cm^{-1} e di gesso che presenta assorbimenti a 3550 cm^{-1} , 3405 cm^{-1} , 1622 cm^{-1} 1116 cm^{-1} con bending a 670 e 602. Composti di natura silicatica sono identificabili attraverso le bande di assorbimento a 1038 cm^{-1} e 467 cm^{-1} , è ipotizzabile inoltre la presenza di una piccola parte di allumino-silicati grazie ai piccoli segnali a 3689 cm^{-1} e 525 cm^{-1} . La banda di assorbimento a 1384 cm^{-1} indica la presenza di nitrati. [E. Morabitoa, E. Zendrib, R. Piazzaa,b, R. Ganzerlac, S. Montalbanid, E. Marcoleonie, F. Bonettoc, A. Scandellab, C. Barbantea,b, A. Gambaroa,b, Deposition in St. Mark's Basilica of Venice, Environment Science and pollution research][Richard A. Nyquist, Ronald O. Kagel Infrared Spectra of inorganic compounds (3800-45 cm^{-1}) London, 1987]

Dall'analisi dello spettro è inoltre ipotizzabile la presenza di un composto di natura cerosa nelle polveri come dimostrato in figura..., considerando la corrispondenza tra i rapporti parziali delle singole bande dei C-H a 2950 cm^{-1} , 2920 cm^{-1} 2850 cm^{-1} , la spalla a 1740 cm^{-1} e il segnale a 740 cm^{-1} .

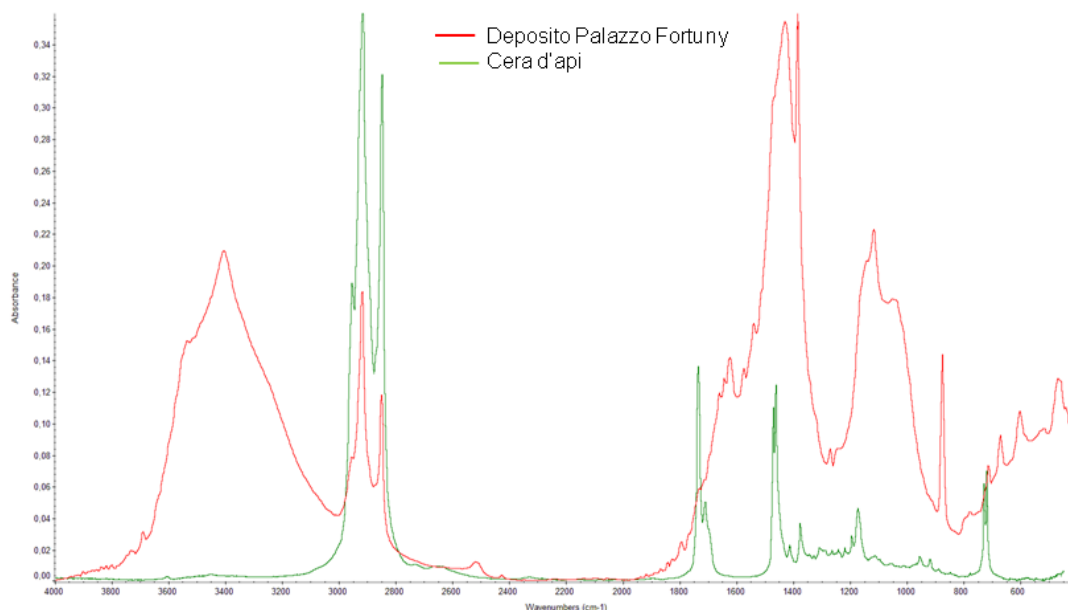


Figura 4.14 Spettro IR delle polveri con cera d'api

Fibre

Lo spettro della parte fibrosa (figura 4.15) delle polveri è stato acquisito in modalità ATR, presenta bande di assorbimento tipiche delle fibre del cotone in particolar modo per i 6 picchi presenti tra i 900 e i 1200 cm^{-1} come dimostrato in figura 4.15. Vi sono inoltre picchi caratteristici non imputabili a sostanze di natura fibrosa come i segnali di assorbimento di composti carbonatici a 1425 cm^{-1} , 873 cm^{-1} , 711 cm^{-1} e gli assorbimenti a 2917 cm^{-1} , 2850 cm^{-1} e 1727 cm^{-1} che denotano la presenza di sostanze di natura cerosa.

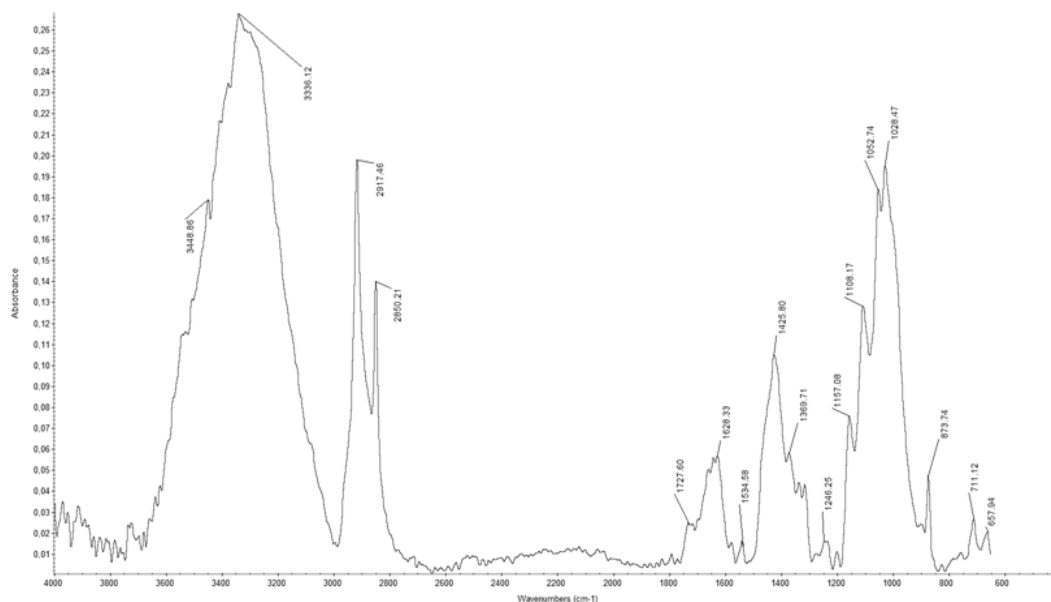


Figura 4.15 Spettro IR della parte fibrosa delle polveri

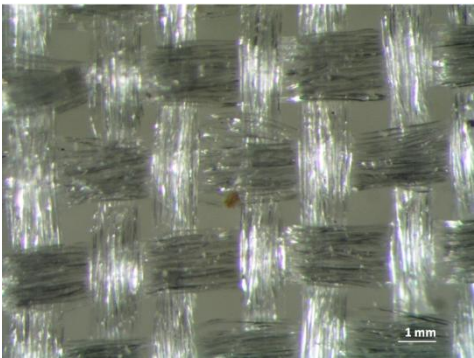
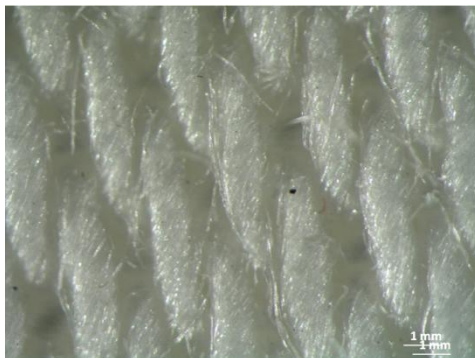
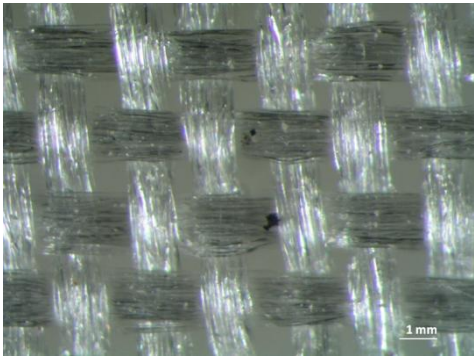
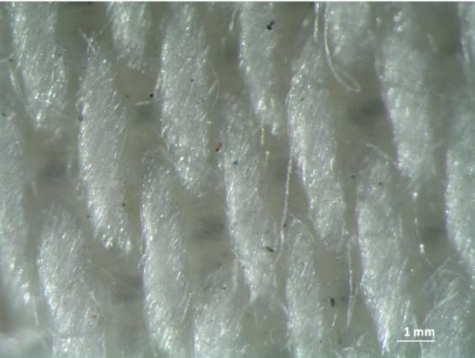
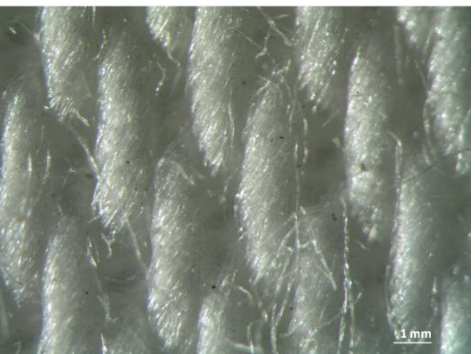
4.3 STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEI TESSUTI ESPOSTI A PALAZZO FORTUNY

4.3.1 Osservazioni in microscopia ottica ed elettronica a scansione (SEM) e microanalisi (EDS)

Microscopia ottica

I campioni di tessuto, in seguito ad ogni mese di stazionamento in museo, sono stati ritirati ed osservati con diverse tecniche microscopiche. In tabella 4.11 sono state riportate alcune immagini, ricavate allo stereomicroscopio, rappresentative dei campioni di seta e di cotone ottenuti a seguito di ciascun mese di deposizioni. Dall'osservazione è emerso che, dopo tre mesi di permanenza al museo non vi sono stati notevoli fenomeni di accumulo di deposizioni. Sporadicamente si notano delle particelle di colore nero aventi granulometria molto variabile con bordi irregolari, particelle bianche molto sottili aventi aspetto traslucido e particelle di colore marrone. Dalla sola osservazione delle dimensioni e forme non è possibile comprendere la loro natura chimica (organica o inorganica), non presentano infatti caratteristiche e forme particolari riconducibili ad esempio a pollini o fibre.

Tabella 4.11 immagini dei tessuti allo stereomicroscopio per ciascun mese di deposizione

Mese	Seta 20X	Cotone 20X
1		
2		
3		

Microscopia elettronica (SEM)

Dopo la preliminare osservazione al microscopio ottico e polarizzato, i campioni di cotone e seta sono stati osservati anche al microscopio elettronico, che permette grazie al maggiore potere di risoluzione la possibilità di caratterizzare ed osservare la morfologia del particolato presente, permettendo inoltre di osservare le interazioni a livello strutturale create tra le fibre dei tessuti e il particolato stesso. Grazie all'accoppiamento con la microsonda EDS si è inoltre cercato di caratterizzare la composizione elementare del particolato stesso.

Nella tabella 4.12 sono state riportate le immagini più significative utili al fine del nostro studio; le immagini verranno di seguito discusse in modo separato per il cotone e la seta in quanto da studi riportati la natura stessa del tessuto (animale o vegetale) può dare delle interazioni diverse con il particolato (BIBLIO). Bisogna inoltre considerare che nel caso dei tessuti le naturali disomogeneità legate alle fibre e ai processi di produzione creano delle difficoltà al momento della loro osservazione.

Il tessuto di cotone rispetto a quello in seta risulta più difficile da osservare in quanto, come detto in precedenza, presentava irregolarità superficiali e fenomeni di sfibrillamento da presumere di natura meccanica legati probabilmente alla sua fase di produzione. Dall'osservazione dei campioni in seguito al primo mese di esposizione si nota come il processo di deposizione sia piuttosto esiguo, con la presenza di singole particelle depositate in modo sporadico senza evidenti fenomeni di deposizione preferenziale. Le immagini dei tessuti ricavate dopo il secondo mese di esposizione mostrano un aumento della quantità di particolato presente sulla loro superficie, che tendono a creare delle zone di accumulo preferenziale. Rispetto al primo mese, le particelle si presentano infatti dislocate in maniera più ordinata che dovrebbe essere delle aree precursori dei successivi fenomeni di impolveramento (BIBLIO)

Al termine dei tre mesi di esposizione, i tessuti presentano degli accumuli di particolato piuttosto cospicui osservabili anche ad occhio nudo e in genere individuabili come delle aree leggermente più scure e disomogenee.

Sebbene il periodo di deposizione preso in considerazione sia stato piuttosto breve è comunque evidente che la deposizione del particolato avviene in maniera progressiva anche in tempi brevi anche all'interno di aree museali. Dalla osservazione delle immagini ricavate per i vari mesi si riscontrano delle analogie con la letteratura (BIBLIO). Le deposizioni del particolato sui tessuti presenta infatti due modalità diverse di accumulo che riguardano in maniera distinta le singole fibre (microocclusioni) e il tessuto (macroocclusioni). Le due modalità possono coesistere in maniera maggiore o minore l'una rispetto l'altra. Le micro-occlusioni corrispondono a piccole fessure e irregolarità delle fibre e andranno perciò a interessare un accumulo delle parti più fine costituenti il particolato. Le macro occlusioni interessano invece il tessuto nella sua interezza e portano all'accumulo di particolato tra le fibre nei fili e tra i fili nel tessuto e [9]

Le micro-occlusioni risultano in generale la modalità preferenziale di accumulo della polvere nelle fibre naturali per quel che riguarda tessuti con elevate aree superficiali come sono quelli derivanti da tessitura di fibre naturali (cotone, seta e lana) (BIBLIO). Osservando entrambe le tipologie di tessuto si nota come il particolato sia presente tra le fibre nel tessuto che tra le irregolarità delle fibre, andando quindi a costituire sia micro che macro-occlusioni come si può vedere dalle figure 4.16, 4.17 e 4.18. Le macro-occlusioni sono riscontrabili in entrambe le tipologie di tessuto, provocando talvolta anche accumuli notevoli attorno alle fibre (figura 1)

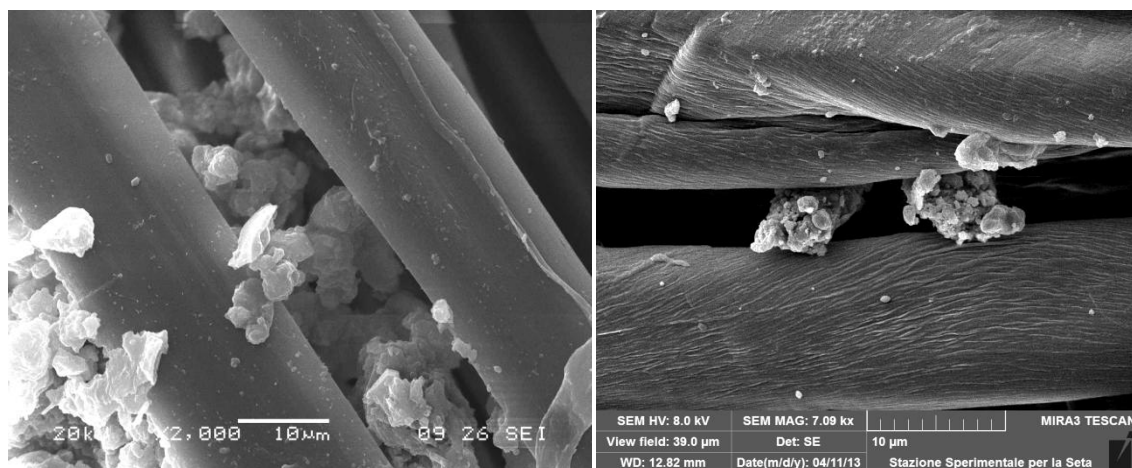


Figura 4.16 a sinistra mostra macro-occlusione formatesi tra le fibre di seta, figura 4.17 a destra mostra macro-occlusioni tra le fibre di cotone

Le micro-occlusioni invece sono state riscontrate principalmente sui provini di cotone, probabilmente perché il cotone, presenta naturalmente molte più irregolarità superficiali della seta che ha generalmente un'area superficiale minore; inoltre è già stato appurato che il cotone preso come oggetto di studio presentava una superficie discontinua. È possibile affermare che, anche se le micro-occlusioni sono il più importante meccanismo processo di accumulo di polvere, probabilmente non si è accumulata una grande quantità di particolato a livello micro-occlusivo in quanto, data un'incompatibilità di relazione tra la grandezza delle particelle del particolato a Palazzo Fortuny e la dimensione delle irregolarità superficiali.

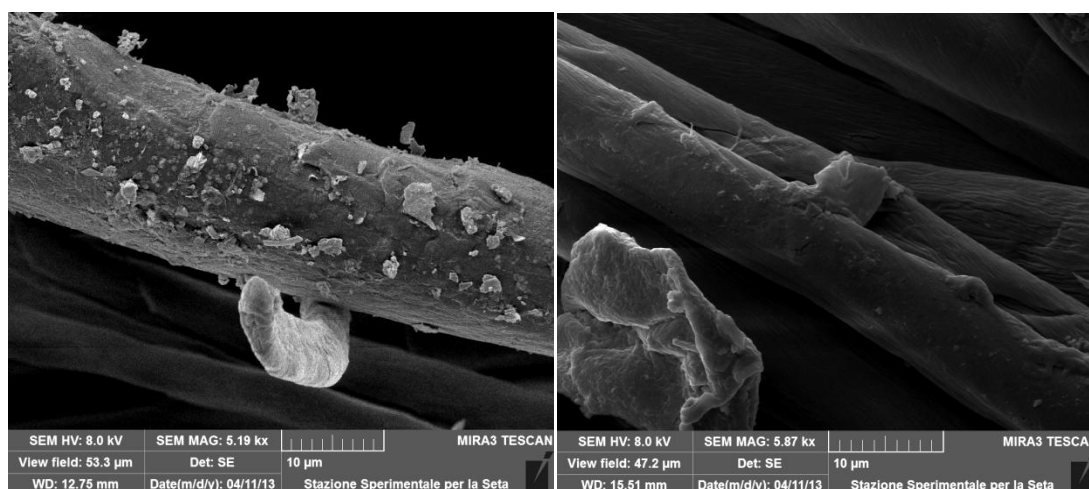


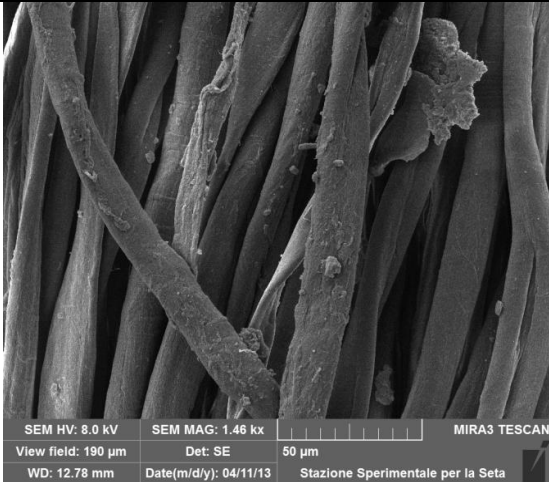
Figura 4.18 mostrano micro-occlusioni che si formano a causa del deposito di particolato tra le irregolarità delle fibre di cotone.

Alcune fibre dei campioni di cotone osservati, in seguito ai mesi di stazionamento in museo, presentano irregolarità superficiali più accentuate rispetto a quelle evidenziate nel cotone tale, come si può notare in figura..

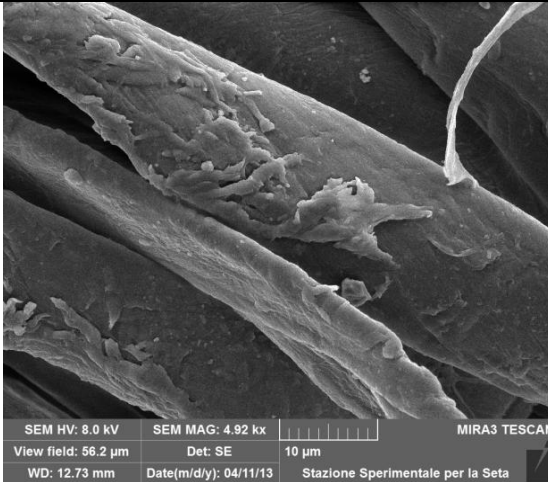
Tabella 4.12 immagini del tessuto di seta e cotone a seguito dei tre mesi di stazionamento in museo

COTONE

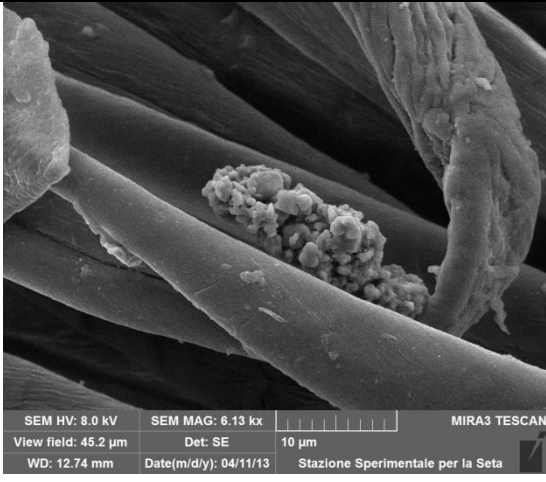
1



SEM HV: 8.0 kV	SEM MAG: 1.46 kx	MIRA3 TESCAN
View field: 190 µm	Det: SE	50 µm
WD: 12.78 mm	Date(m/d/y): 04/11/13	Stazione Sperimentale per la Seta

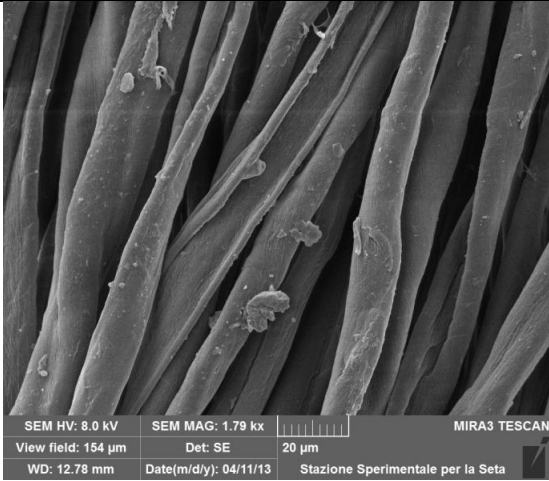


SEM HV: 8.0 kV	SEM MAG: 4.92 kx	MIRA3 TESCAN
View field: 56.2 µm	Det: SE	10 µm
WD: 12.73 mm	Date(m/d/y): 04/11/13	Stazione Sperimentale per la Seta

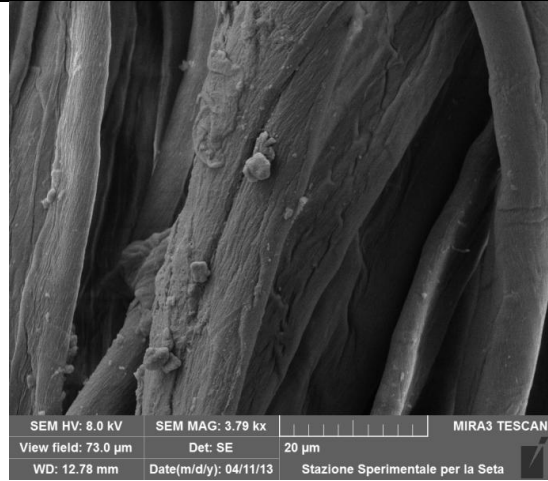


SEM HV: 8.0 kV	SEM MAG: 6.13 kx	MIRA3 TESCAN
View field: 45.2 µm	Det: SE	10 µm
WD: 12.74 mm	Date(m/d/y): 04/11/13	Stazione Sperimentale per la Seta

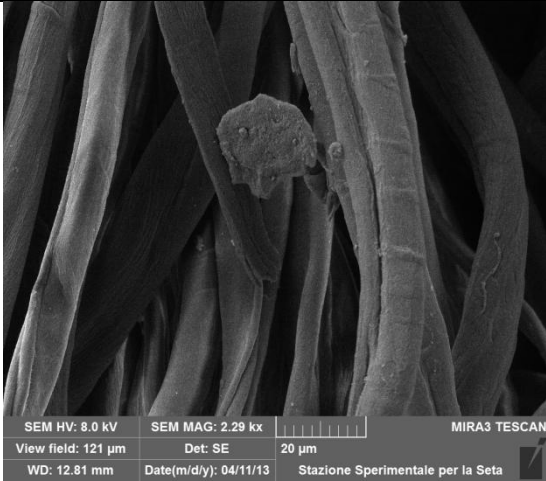
2



SEM HV: 8.0 kV	SEM MAG: 1.79 kx	MIRA3 TESCAN
View field: 154 µm	Det: SE	20 µm
WD: 12.78 mm	Date(m/d/y): 04/11/13	Stazione Sperimentale per la Seta

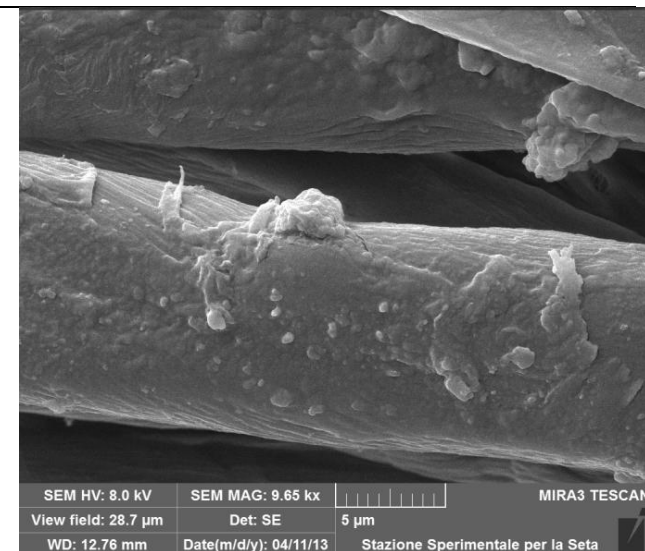
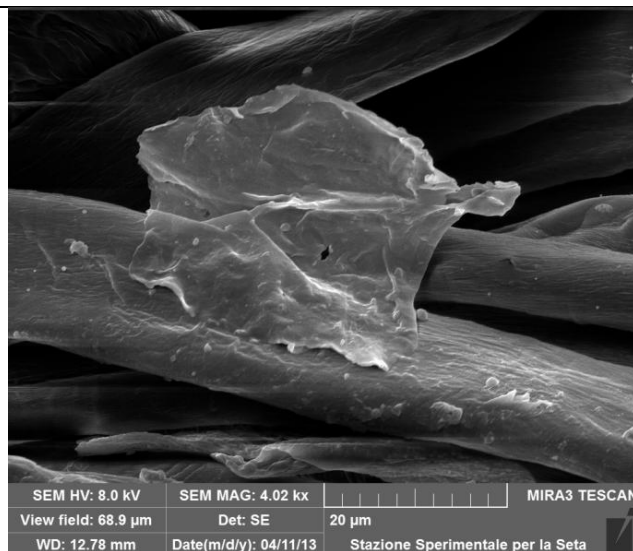
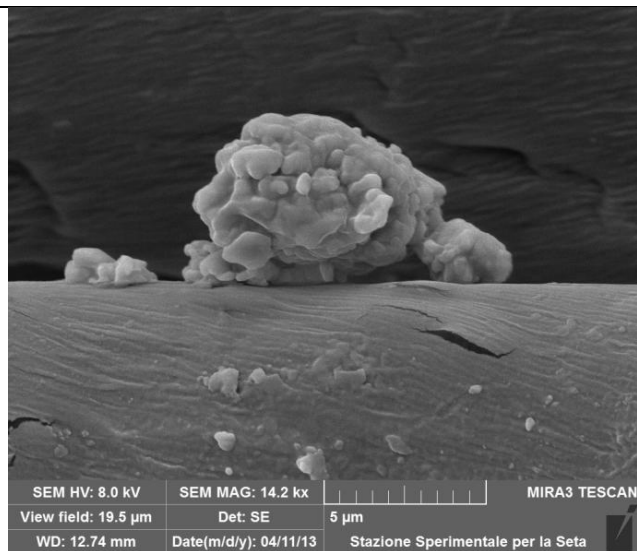


SEM HV: 8.0 kV	SEM MAG: 3.79 kx	MIRA3 TESCAN
View field: 73.0 µm	Det: SE	20 µm
WD: 12.78 mm	Date(m/d/y): 04/11/13	Stazione Sperimentale per la Seta



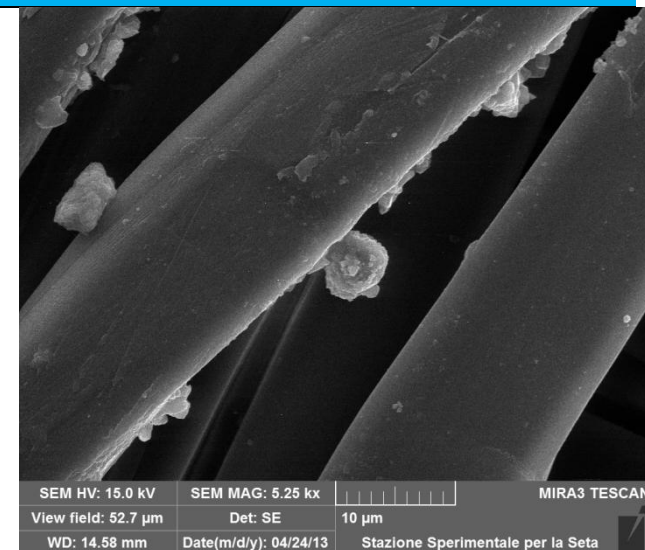
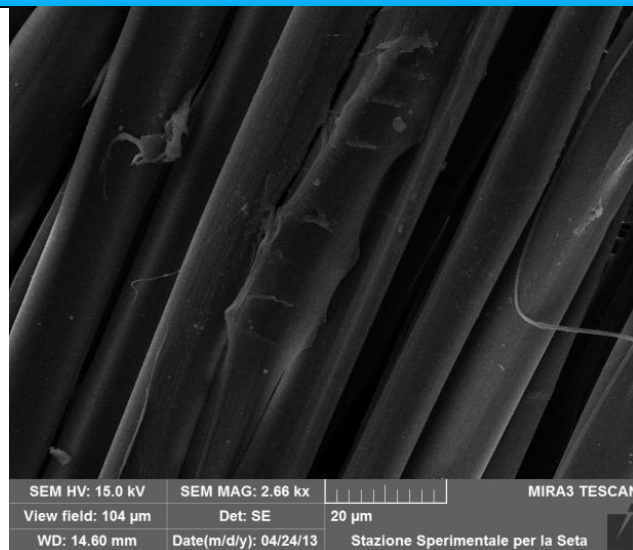
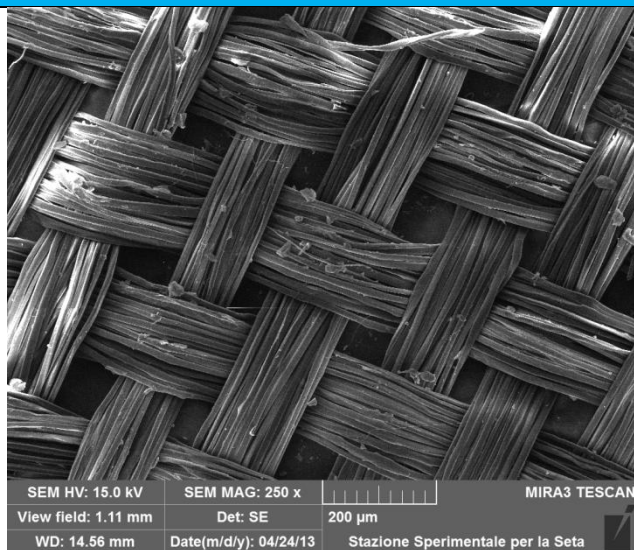
SEM HV: 8.0 kV	SEM MAG: 2.29 kx	MIRA3 TESCAN
View field: 121 µm	Det: SE	20 µm
WD: 12.81 mm	Date(m/d/y): 04/11/13	Stazione Sperimentale per la Seta

3

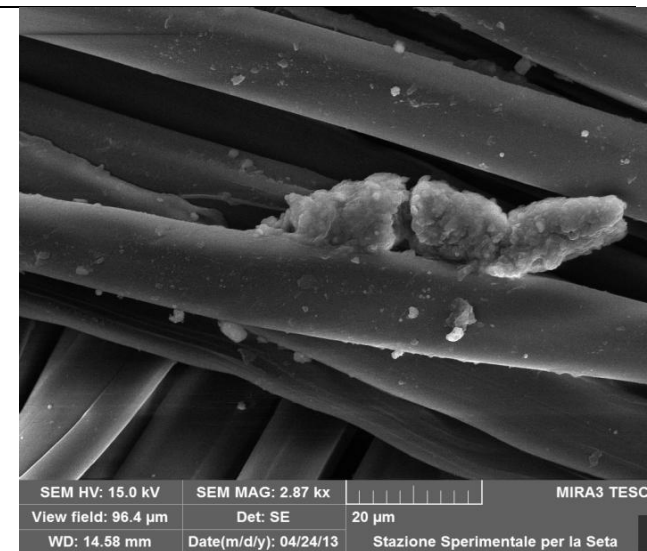
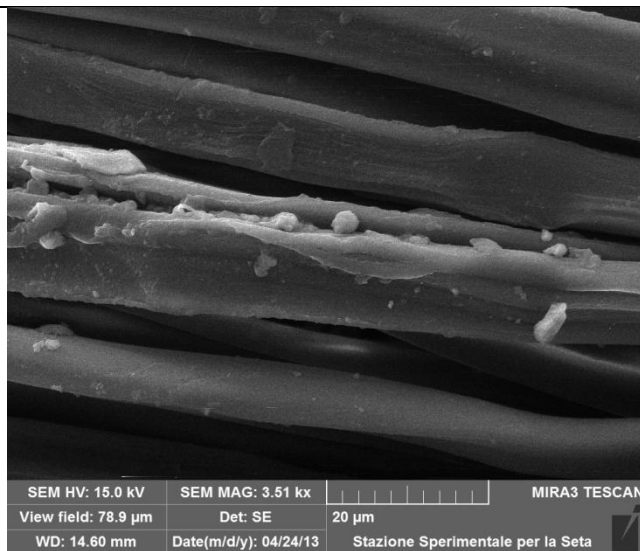
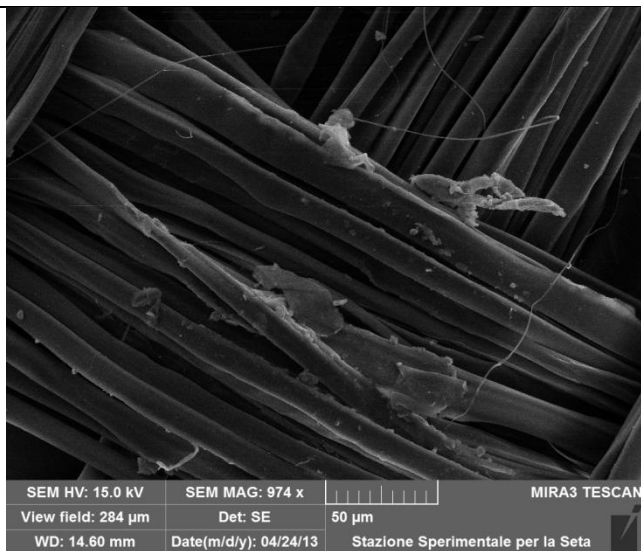


SETA

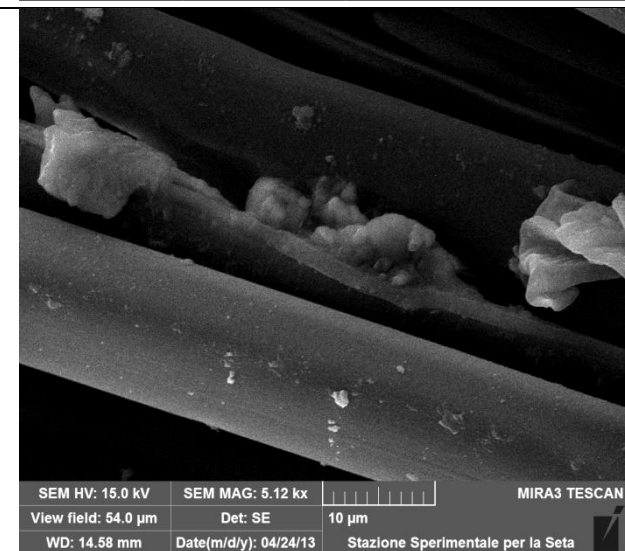
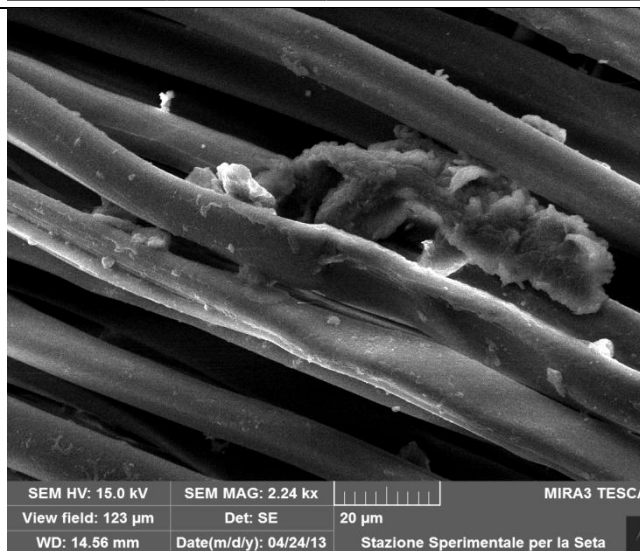
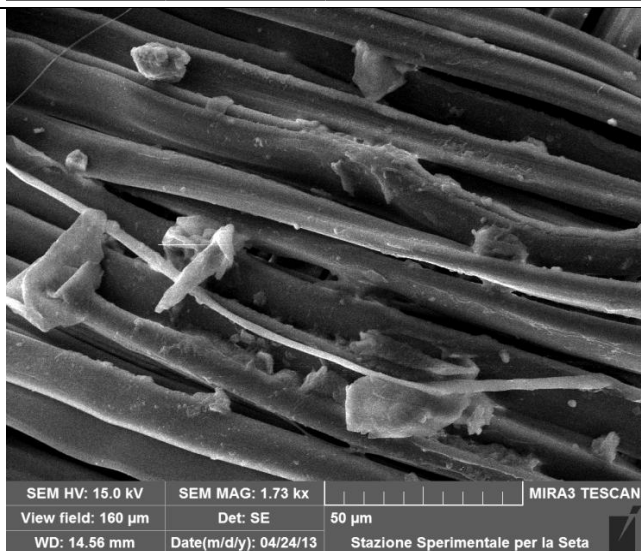
1



2



3



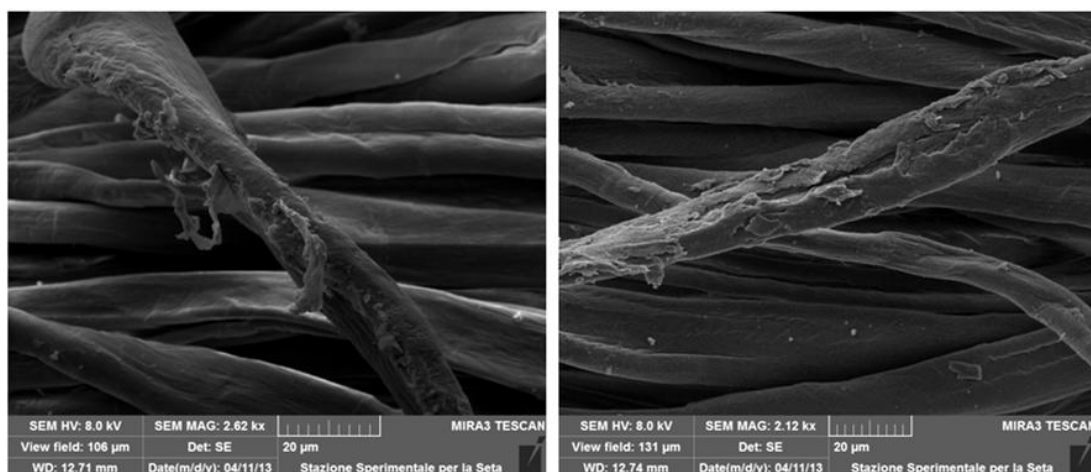


Figura 4.19 Particolare di alcune fibre di cotone a seguito di tre mesi di esposizione in museo

La tipologia di particolato che maggiormente è rimasto depositato alle fibre sono gli aggregati di materiale organico, già caratterizzati all'inizio di questo capitolo (4.1...) i quali sono costituiti essenzialmente da agglomerati di particelle molto sottili. La loro formazione probabilmente è dovuta a fenomeni di condensa che favoriscono il processo di coesione tra diverse tipologie di particelle. La composizione è variabile in quanto la microanalisi mette in luce una natura eterogenea: vi è sia una parte organica che inorganica. Gli elementi riscontrati al loro interno sono C, Si, Al, Na, Ca, K, Mg, S, e delle piccole percentuali di Fe. Considerando i parametri ambientali a cui questi tessuti sono stati soggetti si può notare che l'umidità ambientale ha toccato anche punte maggiori al 60% con temperature attorno ai 29°C. In relazione a questi parametri ambientali i tessuti di seta presentano all'incirca il 10,5% di umidità al loro interno e quelli di cotone circa l'8%, è possibile quindi che, il particolato di natura organica, sensibile alla presenza di umidità nell'ambiente e nel supporto nel quale si è depositato vari la sua capacità di coesione in relazione a quest'ultimo creando dei fenomeni di cementazione nei confronti delle fibre come si può notare dalle immagini in tabella in particolar modo riferite al terzo mese. È stato osservato che questo fenomeno, malgrado la superficie delle fibre di cotone presenti più disomogeneità e quindi idealmente si prestino meglio a fenomeni di cementazione, le fibre di seta evidenziano fenomeni di cementazione delle particelle più evidente, probabilmente in relazione al tasso di ripresa maggiore (figura 4.20).

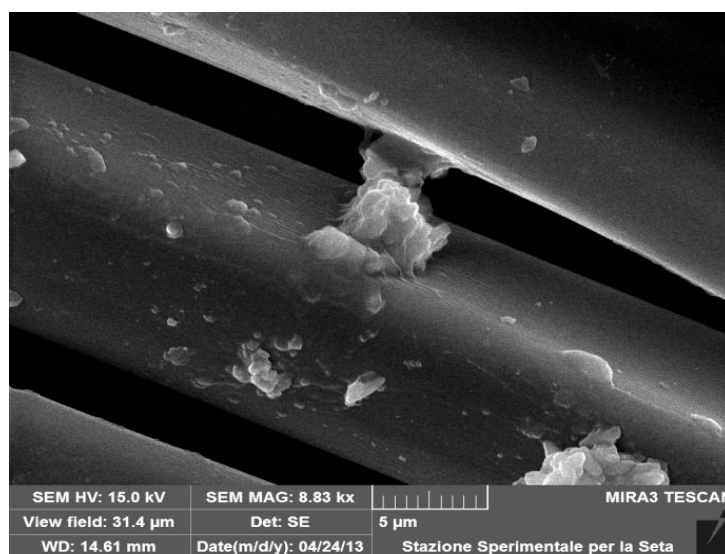


Figura 4.20 fenomeno di cementazione tra particolato e fibre di seta

4.3.2 Indagini colorimetriche

Le indagini colorimetriche sono state effettuate valutando lo spazio colore CIE $L^*a^*b^*$ includendo la luce speculare (SCI) per avere una valutazione del colore a prescindere dalle condizioni di superficie i tessuti infatti a causa delle direzioni preferenziali di realizzazione, trama e ordito, presentano sfumature di colore molto variabili secondo l'angolo di illuminazione e di osservazione [KONICA MINOLTA., F. Billmeyer, M. Saltzman, *Principals of color technology*, NY, 2000, R. Hunter, *The measurement of appearance*, NY 1975, J. Rodgers, D. Thibodeaux, X- Cui, V. Martini, M. Watson, J. Knowlton, *Instrumental and operational impacts on spectrophotometer color measurements*, J. Cotton Sci. 12 2008 pp 287-297]. Attraverso le indagini colorimetriche sono state prese in considerazione tre serie di campioni ciascuna rappresentante di un mese di deposizioni in area museale. Al fine di calcolare l'eventuale variazione colorimetrica (ΔE^*), sono state effettuate le misurazioni sui campioni prima e dopo l'esposizione, ogni misurazione è il risultato di una media di dieci campioni. In tabella a pagina seguente vengono riportati le coordinate L^* a^* b^* C^* medie trovate per ciascun mese e le rispettive variazioni colorimetriche ΔE^* e ΔH^* . I risultati delle variazioni dei principali parametri colorimetrici dei campioni di tessuto rimasti tre mesi in museo sono riportati in tabella 4.13.

Tabella 4.13 variazioni dei principali parametri cromatici nei campioni stazionati a Palazzo Fortuny

Campione	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	ΔC^*	ΔH^*
Seta						
1	-0,15	-0,57	7,26	7,26	6,59	3,11
2	-0,59	-0,66	7,72	7,77	6,52	4,18
3	-0,86	-0,60	7,78	7,85	6,66	4,13
Cotone						
1	0,01	0,15	3,31	3,31	3,30	0,27
2	-0,14	0,20	3,36	3,37	3,35	0,31
3	0,05	0,13	3,44	3,45	3,44	0,27

Osservando le immagini 4.21 e 4.22 in cui sono riportati gli andamenti dei parametri L^* e C^* nel tempo si può vedere come subiscano degli incrementi positivi nel tempo. Il parametro L^* , che determina la luminosità, diminuisce in maniera più marcata nel tempo nel tessuto in seta mentre in quello in cotone resta simile durante tutto il periodo di esposizione. La diminuzione del parametro L^* nel tempo determina una diminuzione della luminosità. L'andamento del parametro C^* invece è simile per entrambe le tipologie di tessuti in quanto, sia nei provini di cotone che in quelli di seta è stato riscontrato un rapido aumento dei valori medi in seguito al primo mese di esposizione e successivamente una stabilizzazione nell'intorno dei livelli raggiunti.

Queste variazioni colorimetriche così importanti e che discostano molto dai monitoraggi successivi, potrebbero essere riconducibili al fatto che durante il periodo del primo monitoraggio (13 novembre-13 dicembre) vi è stata, all'interno del museo, la dismissione di una mostra e l'allestimento della successiva. Questo avvenimento può aver portato alla movimentazione straordinaria di opere, mobili e quant'altro presente all'interno della sala che potrebbe aver provocato il sollevamento di una quantità anomala di polveri che si sono andate a depositare nel tempo sulle superfici e sui campioni esposti. Inoltre, il vernissage di apertura della mostra a critici e giornalisti ha accolto un numero elevato di persone all'interno del museo che ben si discosta dal numero di visitatori che accoglie di norma il museo giornalmente.

COTONE

Campione	BIANCO				MESE 1				MESE 2				MESE 3			
	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*
1.1 cot	94,45	-0,24	4,33	4,34	94,49	-0,08	7,73	7,73	94,16	-0,05	7,85	7,85	94,51	-0,15	7,86	7,86
1.2 cot	94,39	-0,25	4,46	4,47	94,44	-0,12	7,67	7,67	94,27	-0,06	7,84	7,84	94,27	-0,13	7,94	7,94
1.3 cot	94,34	-0,28	4,48	4,49	94,23	-0,14	7,87	7,87	94,05	-0,03	7,83	7,83	94,37	-0,16	7,88	7,88
1.4 cot	94,43	-0,26	4,43	4,44	94,47	-0,13	7,76	7,76	94,23	-0,09	7,8	7,80	94,47	-0,15	8,06	8,06
1.5 cot	94,34	-0,32	4,46	4,47	94,29	-0,12	7,69	7,69	93,97	-0,1	7,75	7,75	94,59	-0,14	7,98	7,98
1.6 cot	94,28	-0,32	4,34	4,35	94,21	-0,14	7,63	7,63	94,29	-0,08	7,73	7,73	94,36	-0,19	7,67	7,67
1.7 cot	94,28	-0,33	4,66	4,67	94,31	-0,16	7,78	7,78	94,22	-0,08	7,69	7,69	94,43	-0,12	7,76	7,76
1.8 cot	94,05	-0,31	4,63	4,64	94,42	-0,14	7,69	7,69	94,22	-0,1	7,71	7,71	94,33	-0,18	8,02	8,02
1.9 cot	94,19	-0,3	4,48	4,49	94,16	-0,13	7,85	7,85	94,22	-0,14	7,76	7,76	94,32	-0,13	7,86	7,86
1.10 cot	94,28	-0,18	4,29	4,29	94,13	-0,11	7,95	7,95	94,34	-0,08	7,67	7,67	94,46	-0,17	7,72	7,72
MEDIA SCI	94,30	-0,28	4,46	4,46	94,32	-0,13	7,76	7,76	94,197	-0,081	7,76	7,76	94,41	-0,15	7,88	7,88

SETA

Campione	BIANCO				MESE 1				MESE 2				MESE 3			
	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*
1.1 seta	95,85	0,51	-0,6	0,79	95,83	-0,13	6,94	6,94	94,94	-0,16	7,24	7,24	95,03	-0,12	7,35	7,35
1.2 seta	95,82	0,5	-0,46	0,68	95,78	-0,14	6,91	6,91	94,93	-0,13	7,21	7,21	94,38	-0,05	7,32	7,32
1.3 seta	95,75	0,51	0,26	0,57	95,62	-0,05	7,48	7,48	95,03	-0,13	7,26	7,26	94,69	-0,11	7,28	7,28
1.4 seta	95,84	0,51	-0,51	0,72	95,71	-0,11	6,91	6,91	95,17	-0,14	7,17	7,17	94,83	-0,08	7,15	7,15
1.5 seta	95,28	0,49	1,25	1,34	95,1	0,05	8,13	8,13	95,15	-0,17	7,16	7,16	94,19	-0,11	7,44	7,44
1.6 seta	95,64	0,51	0,5	0,71	95,44	-0,03	7,69	7,69	95,19	-0,13	7,16	7,16	94,81	-0,08	7,22	7,22
1.7 seta	95,91	0,52	-0,09	0,53	95,3	-0,09	7,31	7,31	95,15	-0,13	7,26	7,26	94,87	-0,12	7,18	7,18
1.8 seta	95,91	0,53	-0,52	0,74	95,87	-0,09	6,91	6,91	95,02	-0,12	7,27	7,27	94,82	-0,06	7,35	7,35
1.9 seta	95,62	0,52	0,21	0,56	95,49	-0,04	7,36	7,36	95,11	-0,12	7,21	7,21	94,73	0,09	8,33	8,33
1.10 seta	95,46	0,5	0,68	0,84	95,46	0,01	7,72	7,72	94,9	-0,09	7,43	7,43	95,04	-0,03	7,57	7,57
MEDIA SCI	95,708	0,51	0,072	0,75	95,56	-0,06	7,34	7,34	95,06	-0,13	7,24	7,24	94,739	-0,067	7,42	7,42

Tabella 4.14

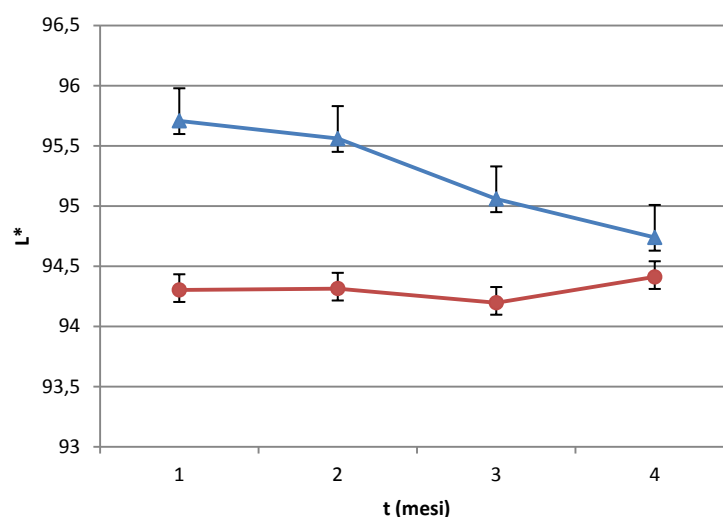


Figura 4.21 Variazione L^* durante i mesi di monitoraggio in museo. Con l'indicatore ● viene rappresentato il tessuto in cotone e con indicatore ▲ il tessuto in seta

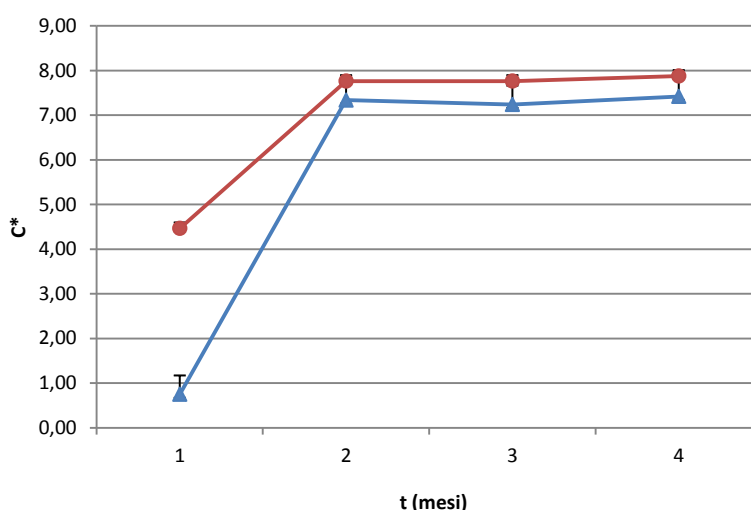


Figura 4.22 Variazione C^* durante i mesi di monitoraggio in museo. Con l'indicatore ● viene rappresentato il tessuto in cotone e con indicatore ▲ il tessuto in seta

In seguito all'aumento del parametro C^* viene determinata una maggiore vividezza del colore del supporto. Il risultato, sinergico, della diminuzione del parametro L^* assieme all'aumento di C^* è l'incipimento visivo del colore del tessuto. L'incipimento visivo può trarre origine sia da particelle di polvere depositata nel tempo sia da una aumentata pelosità superficiale, dovuta nel caso della seta a perdita di coesione tra le micro fibrille della struttura fibrillare. Gian Maria Colonna, *Metodi per la valutazione dello stato di conservazione di manufatti in seta*, AA.VV. *Dipinti su tela metodologie di indagine per i supporti cellulosici* 1993 Firenze

Dalla valutazione dei valori dei parametri a^* b^* del diagramma di cromaticità, riportati in tabella 1 si può notare come non vi siano rilevanti spostamenti lungo l'asse a^* non si possono quindi considerare delle mutamenti di colore dei supporti tessili verso il rosso o verso il verde. Variazioni più rilevanti invece sono identificabili lungo l'asse b^* in quanto sia per la seta che per il cotone i valori sono incrementati positivamente. Questo determina uno spostamento di colori verso il giallo.

Come si può osservare dai valori di ΔE^* presenti in tabella ... e riportati in figura 4 si nota come vi sia una notevole differenza, sebbene si tratti di variazioni minime, tra il comportamento del cotone e quello della seta. La variazione di tinta dei provini di seta, registrata nell'arco dei tre mesi, è maggiore rispetto a quella riscontrata per i provini di cotone in quanto quest'ultimi registrano variazioni di tinta ΔE^* da 3,31 a 3,45 mentre i provini di seta hanno scostamenti variabili da 7,26 a 7,85. Questo indica che a seguito dei tre mesi di esposizione vi sono delle variazioni cromatiche evidenti per quanto riguarda i tessuti in seta mentre per i tessuti in cotone vi sono solo variazioni cromatiche minori ma sempre percepibili visivamente anche per campioni non accostati.

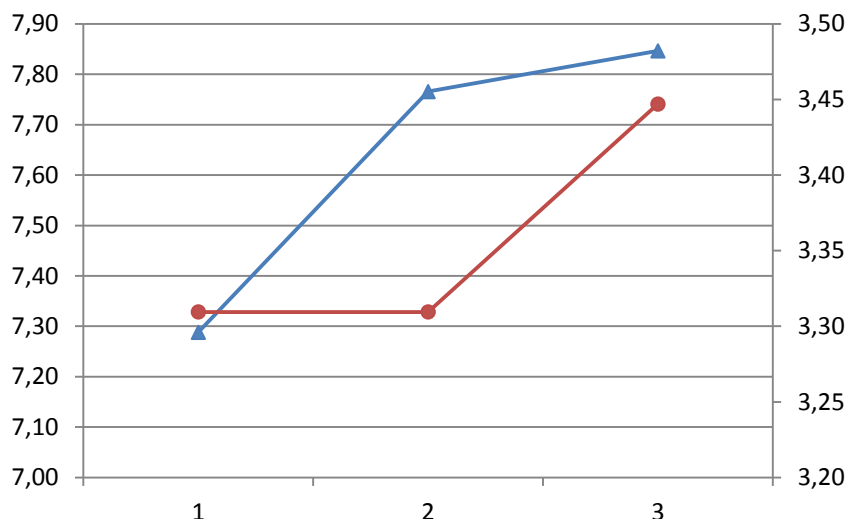


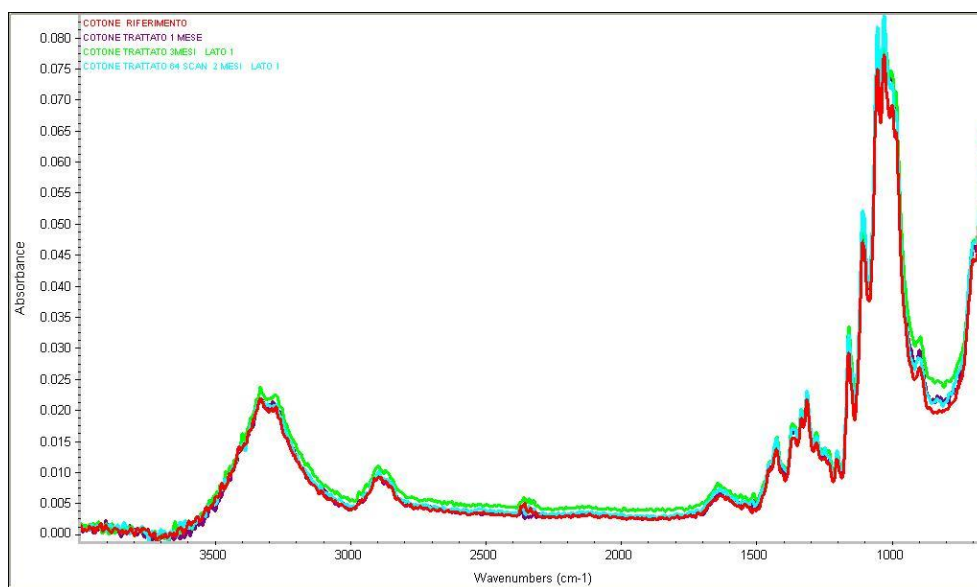
Figura 4 Variazione ΔE^* durante i mesi di monitoraggio in museo. Con l'indicatore ● viene rappresentato il tessuto in cotone e con indicatore ▲ il tessuto in seta

Concludendo è bene sottolineare che, sebbene non siano eccessive, le variazioni colorimetriche registrate sono trimestrali e in seguito a deposizioni naturali avvenute all'interno del museo. Considerando quindi il fatto che gli oggetti all'interno del museo aspirano ad una conservazione molto lunga stimata in anni o in decenni queste variazioni che sono state riscontrate, sommandosi, potrebbero dare origine a scostamenti cromatici importanti.

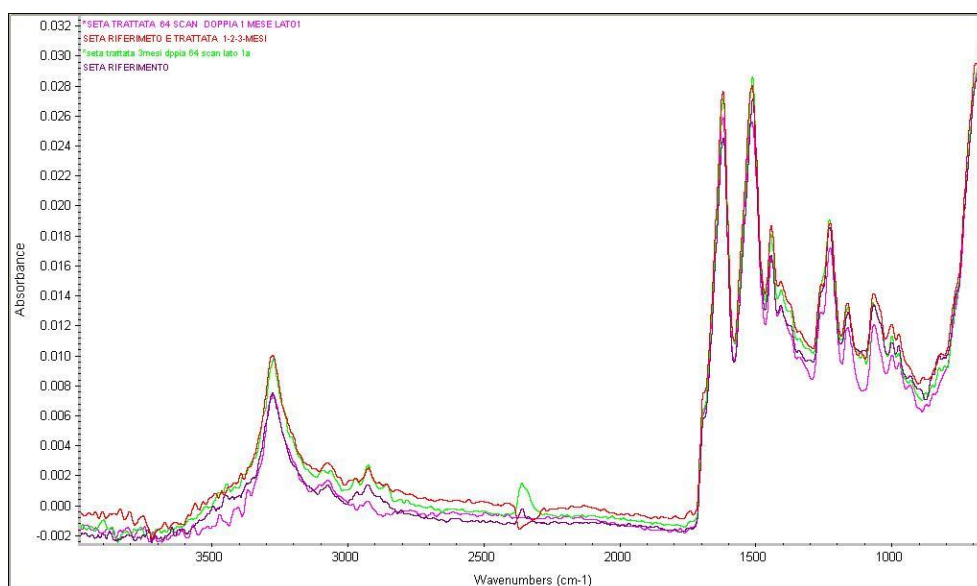
4.3.3 Indagini spettrofotometriche FTIR in riflettenza totale attenuata ATR

In seguito allo stazionamento dei campioni in museo sono state effettuate delle analisi in spettrofotometria FTIR-ATR per valutare eventuali variazioni chimiche dei campioni. Per garantire la riproducibilità delle prove sono state condotte in doppio.

Lo spettro del campione di “Cotone Riferimento” presenta il profilo tipico delle fibre di cotone. Anche in questi campioni non si evidenziano variazioni significativi negli assorbimenti dei campioni sottoposti a trattamenti per 1-2-3- mesi, come si può osservare dallo spettro in figura 4.23



Lo spettro del campione di “Seta Riferimento” presenta il profilo tipico della fibroina da seta da Bombyx Mori. Non sono riscontrabili variazioni spettrali significative nei campioni di seta sottoposti a trattamenti per 1-2-3 mesi, come si può osservare dallo spettro in figura 4.24



4.3.4 Valutazione variazione del grado di polimerizzazione (DP)

La valutazione del grado di polimerizzazione del cotone e della viscosità intrinseca è stata effettuata attraverso tecniche viscosimetriche. Per quanto riguarda i mesi di stazionamento in museo si è ritenuto inutile, dato i lunghi tempi dei processi di deposizione, effettuare le prove viscosimetriche a seguito di ciascun mese. Sono stati quindi analizzati con questa tecnica i campioni nuovi e quelli che hanno subito l'intero ciclo di tre mesi a I museo. Per quanto riguarda il cotone è stato ricavato attraverso un foglio di calcolo il grado di polimerizzazione e il numero di scissioni per catena

Caratteristica	Direzione A	C.V. (%)	Direzione B	C.V. (%)
60% U.R. bianco				
Forza di rottura media (N)	146	6.8	104	7.8
Allungamento medio alla forza massima (%)	32.2	4.5	14.5	7.1
60% U.R. sporco				
Forza di rottura media (N)	136	4.9	88	6.2
Allungamento medio alla forza massima (%)	42.4	3.5	19.5	5.5
90% U.R. bianco				
Forza di rottura media (N)	158	5.8	73.7	10.8
Allungamento medio alla forza massima (%)	36.7	4.4	16.1	6.8
90% U.R. sporco				
Forza di rottura media (N)	120	2.7	44.6	5.7
Allungamento medio alla forza massima (%)	74.8	6.3	17.9	9.3

Tabella 4.15

4.3.5 Valutazione variazioni della resistenza e dell'allungamento a rottura

La valutazione della resistenza a trazione e dell'allungamento sono state valutate nei tessuti tal quali e a seguito di ciascun mese di permanenza dei provini in museo e di ciascun ciclo termo igrometrico. Le analisi sono state effettuate su striscia in entrambe le direzioni dei tessuti (direzione A e direzione B). I risultati delle analisi riportati sono frutto di dieci replicazioni per ciascun dato. È stato utilizzato un dinamometro elettronico Instron 4501, a incremento costante di allungamento (CRE) e le prove sono state condotte in ambiente condizionato alla Temperatura di 20 ± 2 C° e ad una umidità del $65 \pm 4\%$. I risultati delle diverse prove verranno trattati separatamente per le due tipologie di tessuti: cotone e seta.

In tabella 4.16 vengono riportati i dati relativi alle misure della tenacità e dell'allungamento a rottura dei provini di cotone con i rispettivi coefficienti di variazione percentuale e la variazione percentuale²³ di ciascun dato.

Tabella 4.16 Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di cotone

forza di rottura media (N)						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	161	8,6	0	93	13,3	0
1c	164	7	1,86	108	5,2	16,13
2c	169	6,2	4,97	110	8,7	18,28
3c	170	5,8	5,59	105	8,6	12,90
Allungamento medio alla forza massima %						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	33	9,3	0	14,3	10	0
1c	33	4,6	0	14,1	7,8	-1,40
2c	33,5	3,9	1,52	14,6	2	2,10
3c	32,9	2,7	-0,30	15	7,4	4,90

In figura 1 viene riportata la variazione di tenacità percentuale subita dai provini di cotone a seguito sia dello stazionamento al museo che dei cicli termo igrometrici. Si può notare come, per la maggior parte dei casi, entrambe le direzioni del tessuto presentino andamenti simili dimostrando un incremento della tenacità anche con valori attorno al 18% dei campioni che sono stazionati in museo.

C'è da specificare inoltre che, sebbene le due direzioni del tessuto dimostrino andamento simile, la direzione B si è dimostrata più sensibile ai tre mesi di esposizione museale mentre la direzione A ha subito variazioni più importanti a seguito dei cicli termo igrometrici. Questi dati, potrebbero essere messi in relazione con le caratteristiche intrinseche del tessuto di cotone utilizzato per lo studio in quanto trama e ordito non presentavano non lo stesso numero di fili per capo, caratterizzando così il tessuto da due titoli differenti.

Le variazioni percentuali dell'allungamento alla forza massima dei campioni di cotone sono riportate nella figura 4.25. I dati acquisiti a seguito dei mesi di stazionamento in museo determinano variazioni molto piccole, non considerabili in quanto all'interno dell'intervallo di confidenza del dato stesso.

²³ Le variazioni percentuali della tenacità e dell'allungamento a rottura sono state calcolate attraverso la seguente formula:

Figura 1Variazione percentuale della tenacità dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro

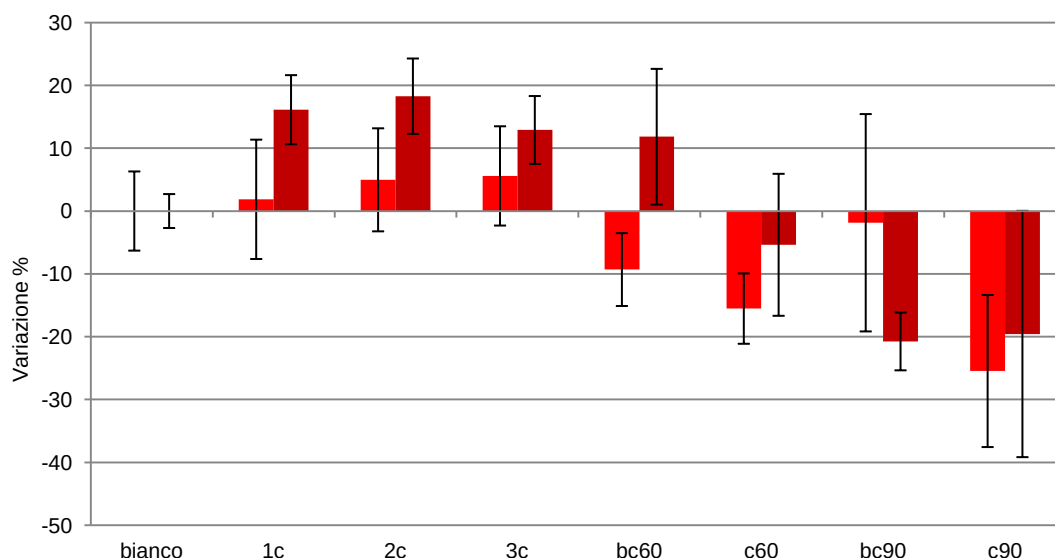
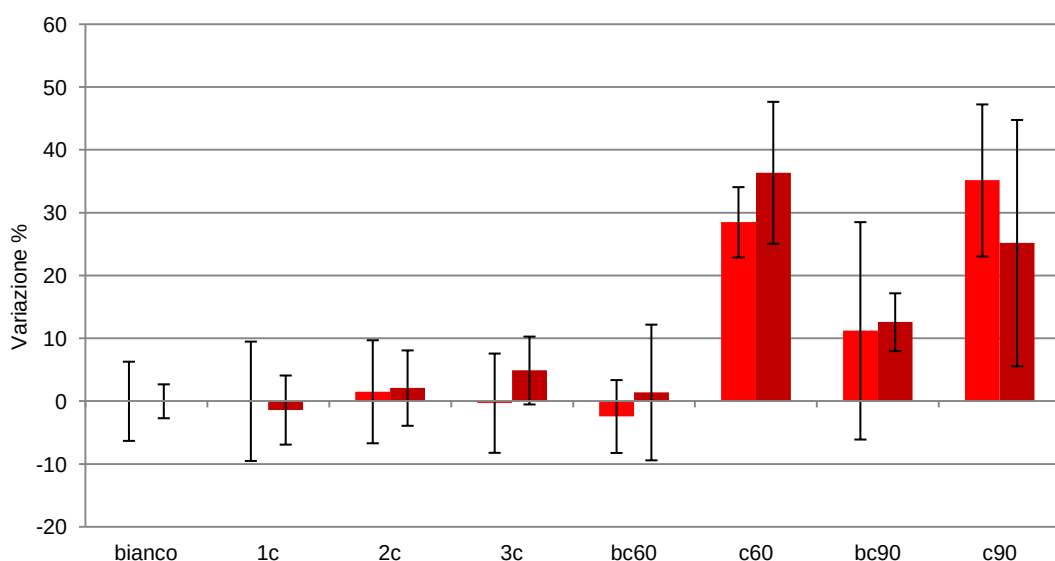


Figura 4.25 Variazione percentuale dell'allungamento alla forza massima dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro

Figura 4.26



Il tessuto di cotone quindi ha subito a seguito dell'esposizione al museo un aumento della tenacità e una variazione irrilevante dell'allungamento a rottura percentuale. È ipotizzabile, in relazione a quanto osservato al microscopio elettronico che il particolato che si è cementato con le fibre abbia creato questo irrigidimento, è anche vero comunque che sono molteplici i fattori che possono aver interagito in atmosfera museale.

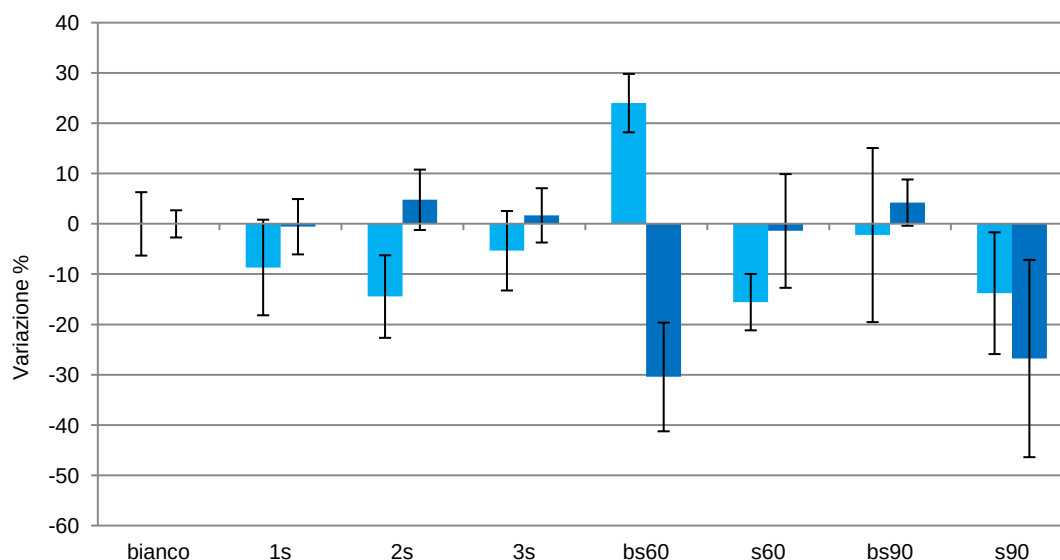
Tabella 4.17 Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di seta

Forza di rottura media (N)						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	45	6,3	0	35,5	2,7	0

1s	41,1	9,5	-8,67	35,3	5,5	-0,56
2s	38,5	8,2	-14,44	37,2	6	4,79
3s	42,6	7,9	-5,33	36,1	5,4	1,69
Allungamento medio alla forza massima %						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	25,2	7,3	0	21,3	5,7	0
1s	24,6	6,9	-2,38	19,5	13,1	-8,45
2s	24,2	7	-3,97	20,2	8,4	-5,16
3s	24,6	3,7	-2,38	18,9	11,6	-11,27

In figura 4.27 vengono riportate le variazioni percentuali della tenacità dei tessuti di seta che sono stati utilizzati per questo studio. Dall'analisi dei dati riportati in figura 4.28 si può notare come i valori delle variazioni delle tenacità riportati in seguito allo stazionamento in museo abbiano andamenti simili solo per quanto riguarda una direzione del tessuto. I valori acquisiti non sono in tutti i casi utilizzabili in quanto presentano barre d'errore per la maggior parte dei casi maggiori al valore di variazione percentuale della tenacità.

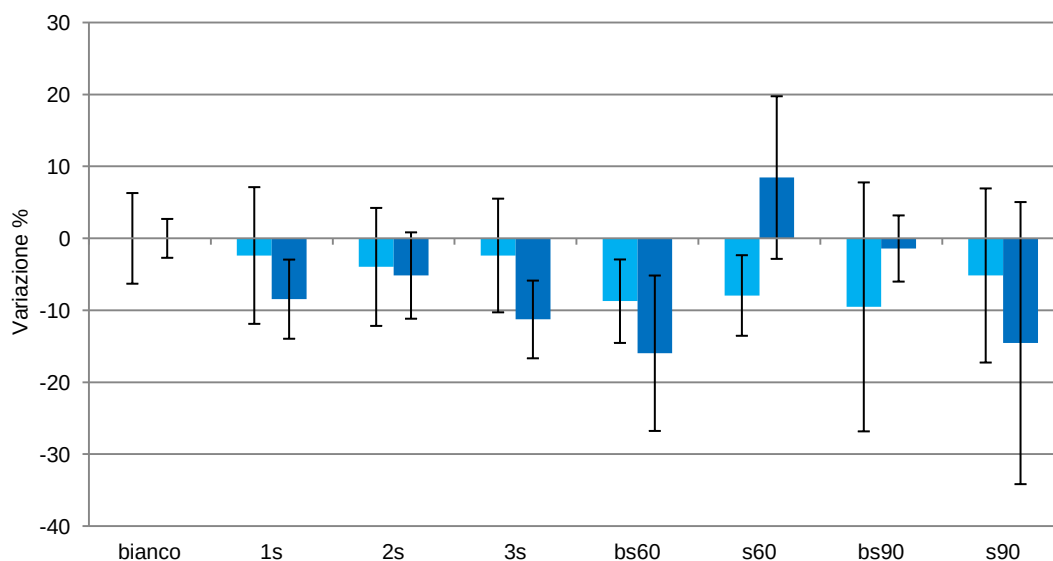
Figura 4.27 Variazione percentuale della tenacità dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro



I valori acquisiti della variazione percentuale di allungamento mostrano andamenti simili di allungamento verso valori negativi, ne risulta quindi una leggera aumento della rigidità, di entrambe le direzioni del tessuto. Questi dati non sono considerabili in quanto presentano, come i precedenti delle prove di tenacità, delle barre d'errore maggiori rispetto al valore del dato stesso.

I dati acquisiti quindi per quanto riguarda le variazioni delle caratteristiche fisico-meccaniche dei tessuti di seta stazionati al museo presentano variazioni molto piccole che rientrano nell'intervallo di affidabilità dei dati, tutto ciò può essere dovuto al fatto che la seta è generalmente più resistente rispetto alle altre fibre nel momento in cui si trovi in condizioni sufficientemente adatte di Temperatura, umidità relativa e illuminamento.

Figura 4.28 Variazione percentuale di allungamento a rottura dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro



4.4 STUDIO DEL COMPORTAMENTO DEI TESSUTI ESPOSTI A CONDIZIONI TERMOIGROMETRI DIVERSE

4.4.1 Osservazioni in microscopia ottica ed elettronica a scansione (SEM) e microanalisi (EDS)

Microscopia ottica

I campioni di ciascun mese sono stati osservati al microscopio ottico. In tabella sono state riportate alcune immagini rappresentative riferite ai campioni di seta e di cotone. Dall'osservazione è emerso che, anche dopo tre mesi di stazionamento al museo non vi sono stati a livello macroscopico fenomeni di accumulo. Si notano delle particelle di colore nero di granulometria molto variabile e con bordi irregolari.

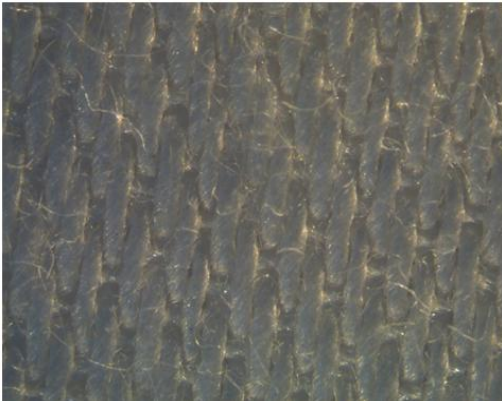
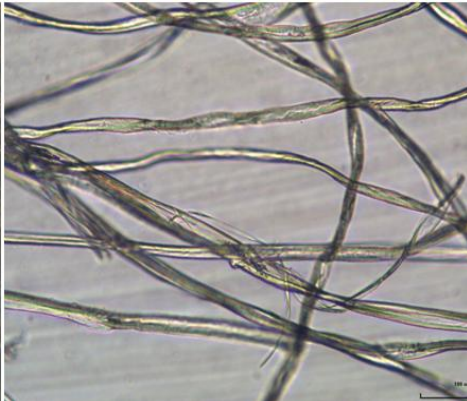
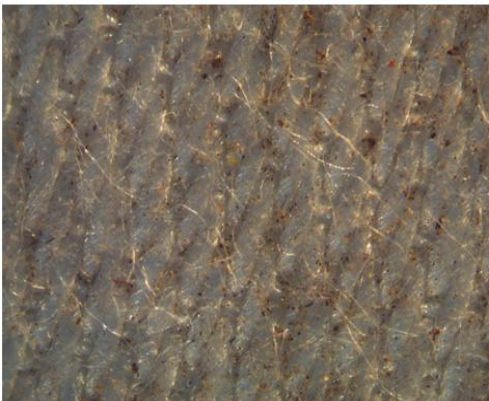
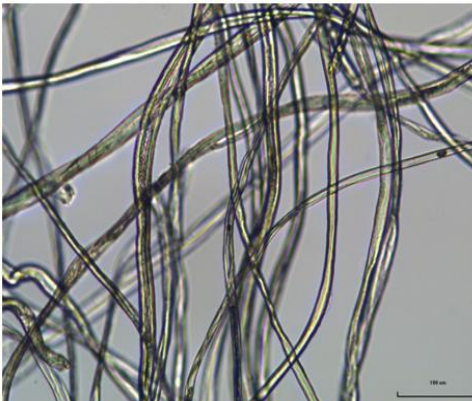
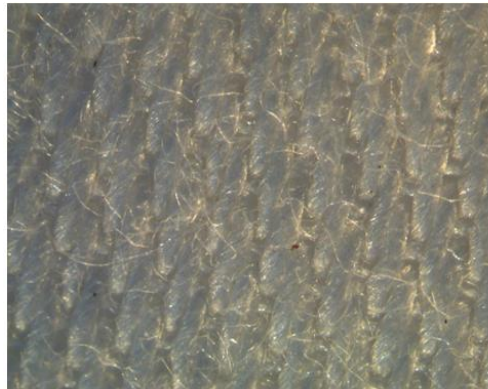
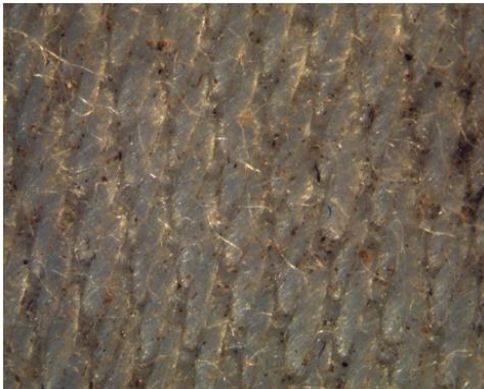
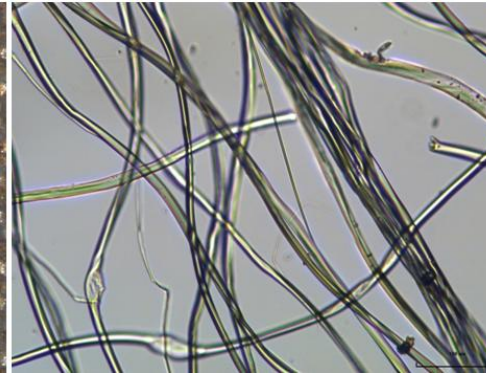
COTONE				
UR%	Bianco		Trattato	
60				
				

Tabella 4.18

SETA			
UR%	Bianca	Trattata	
60	 	 	
90	 	 	

Microscopia elettronica (SEM)

Attraverso la microscopia elettronica a scansione sono stati osservati i campioni a seguito di due cicli termoigrometrici a temperatura variabile da 25 a 50°C ed umidità fissa, per il primo il tasso di umidità relativa è stato fissato al 60% mentre per il secondo a 90%. Nelle tabelle ... sono stati messi in relazione i provini di tessuto sottoposti a deposizioni con i rispettivi bianchi, provini di tessuto che hanno subito lo stesso iter termoigrometrico senza essere stati sporcati con le polveri raccolte a Palazzo Fortuny.

Dai tessuti bianchi sia di cotone che di seta si può notare come i cicli termo igrometrici non abbiano comportato alcuna variazione morfologica o superficiale delle fibre di cotone e seta. Si notano delle deposizioni superficiali di particolato compatto e omogeneo avente forma spigolosa che è riconducibile alla classe di deposizioni contenenti sali dato che per mantenere i campioni ad un tasso di umidità fissa sono stati posti all'interno di contenitori stagni contenenti soluzioni saline sature.

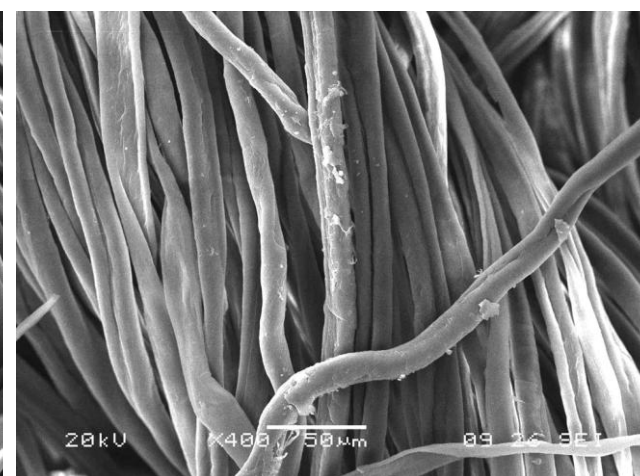
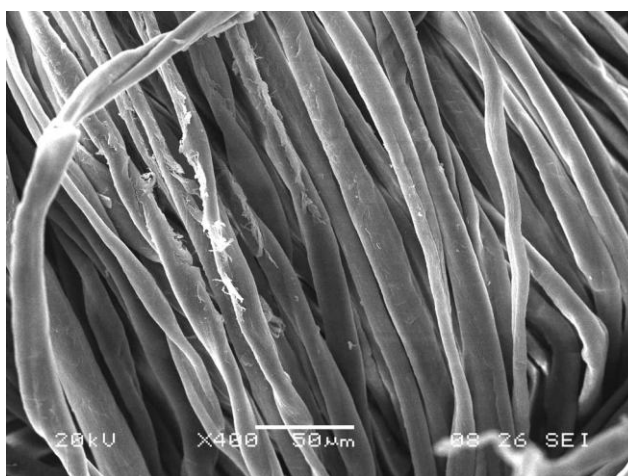
Osservando i tessuti a seguito dei cicli si nota come le deposizioni siano rimaste generalmente più superficiali nei tessuti di cotone in relazioni alle deposizioni di particolato posto nei campioni di seta. In questi ultimi infatti si nota come il particolato non sia rimasto in superficie ma si sia spostato verso l'interno del filato. Il fatto che le deposizioni siano rimaste più superficiali nei tessuti di cotone è imputabile probabilmente al maggior volume del filato di cotone rispetto a quello di seta e alla morfologia delle sue fibre, queste infatti essendo meno ordinate nel filato rispetto alle fibre di seta e orientandosi nello spazio spesso trasversalmente al tessuto, danno origine ad un ingombro che fa penetrare con minore facilità la polvere in profondità al filato.

Per quanto riguarda i processi di interazione tra particolato e fibre si notano fenomeni di macro-occlusioni in entrambe le tipologie di tessuto in maniera più accentuata però nei tessuti sericei. Il processo di linkaggio tra particolato e fibre non è riscontrabile nei provini di cotone esposti al 60% di umidità relativa, mentre è osservabile anche se in maniera esigua nei provini di seta in linea con quanto già valutato per i campioni esposti in atmosfera museale, anche se le temperature di esposizione erano superiori. C'è inoltre da valutare il fatto che i processi avvenuti ai tessuti in questa fase di studio sono imputabili direttamente alla polverosità, alla temperatura e all'umidità in quanto sono state prese delle precauzioni per ridurre al minimo le altre interazioni ambientali. Nei campioni esposti al ciclo termo igrometrico più estremo, che sono stati quindi posti ad un'umidità relativa del 90%, si notano in misura maggiore le interazioni tra particolato e fibre. Il particolato soggetto a questi fenomeni risulta essere il medesimo che aveva dato cementazione anche nei tessuti esposti al museo costituito da particelle a componente organica ed inorganica molto sottili e aggregate tra loro. Queste infatti risultano avere la maggiore capacità adesiva nei confronti delle fibre. C'è da considerare inoltre che questo particolato, che già di per sé presenta proprietà adesive, sottoposto ad un'atmosfera che presenta un'umidità relativa molto elevata e a contatto con le fibre tessili anch'esse igroscopiche può dare origine a fenomeni di cementazione molto evidenti. Bisogna quindi ricordare che al 90% di umidità relativa i tessuti di seta contengono circa il 25% di umidità mentre quelli di cotone attorno al 30%.

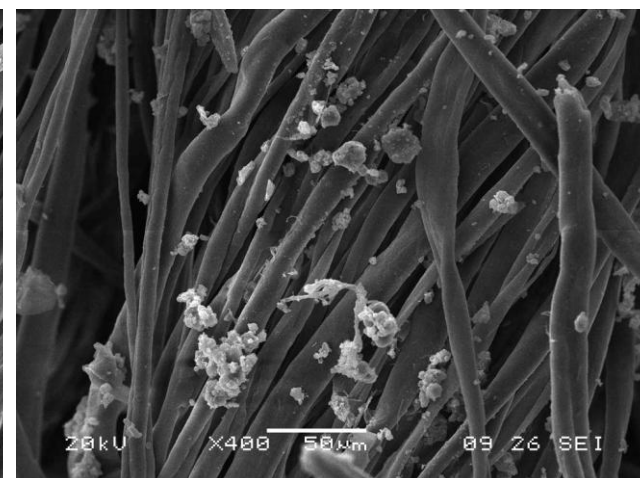
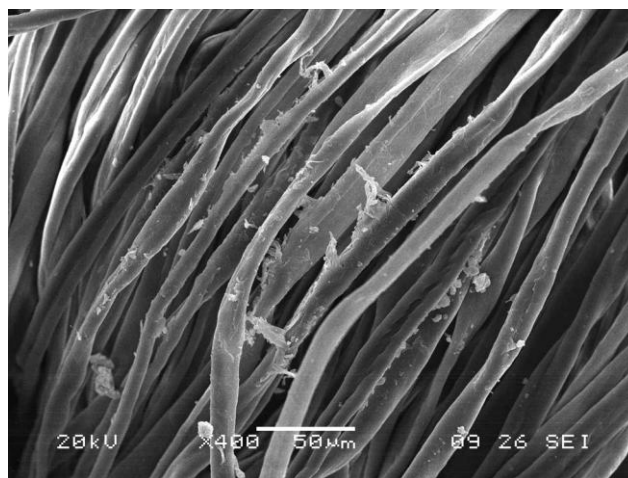
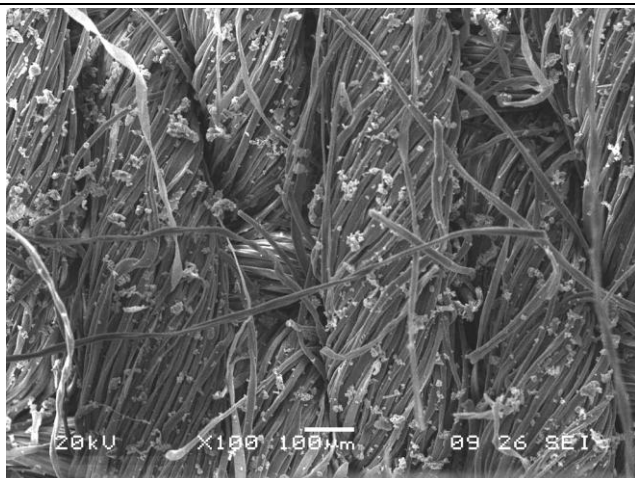
COTONE

U.R. 60%

Bianco



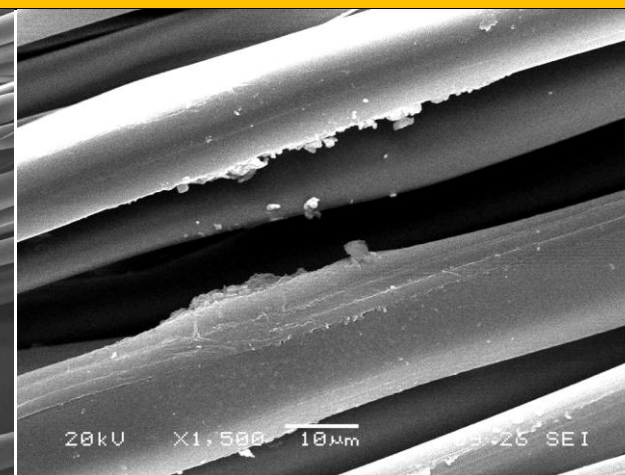
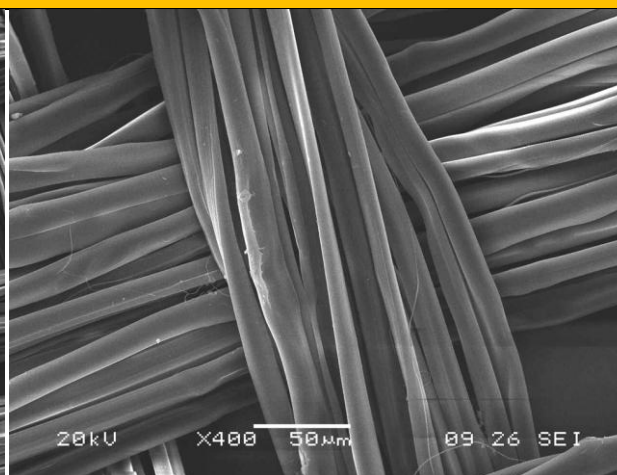
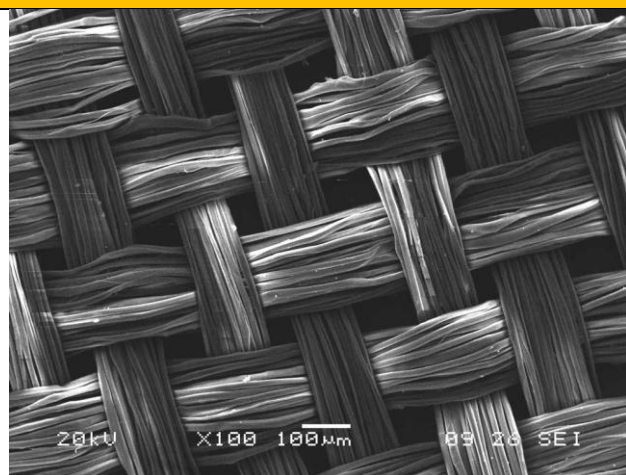
Sporco



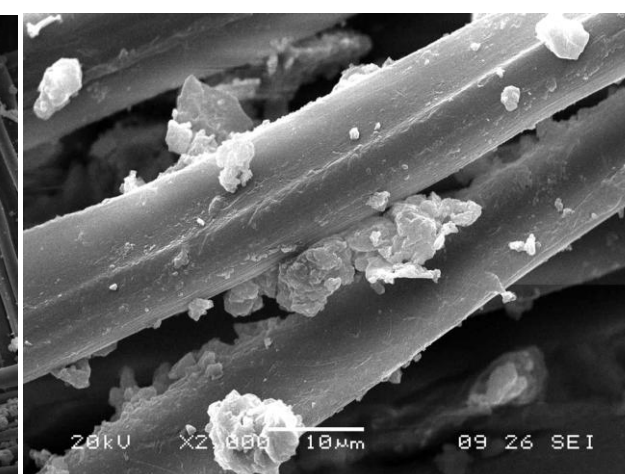
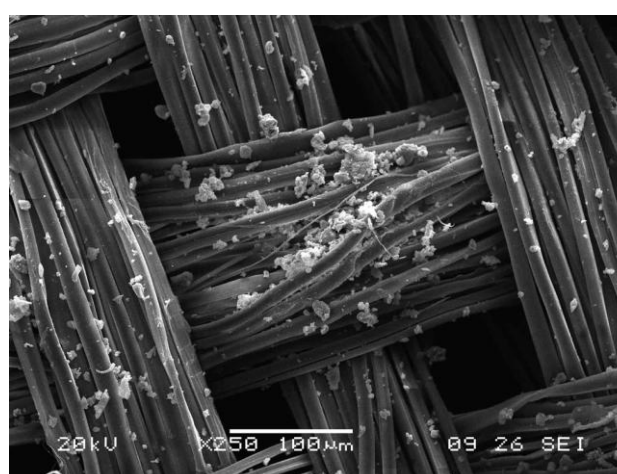
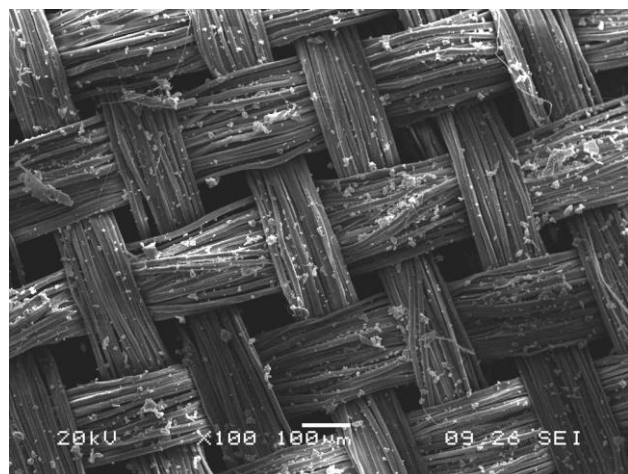
SETA

U.R. 60%

Bianca



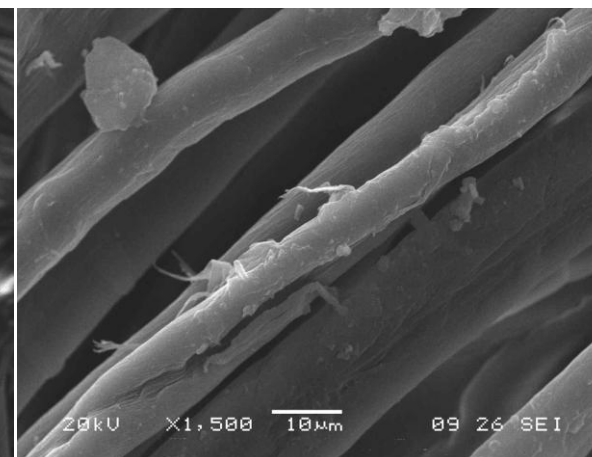
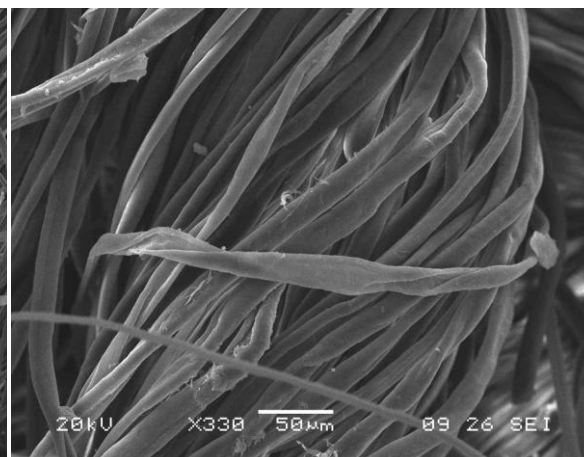
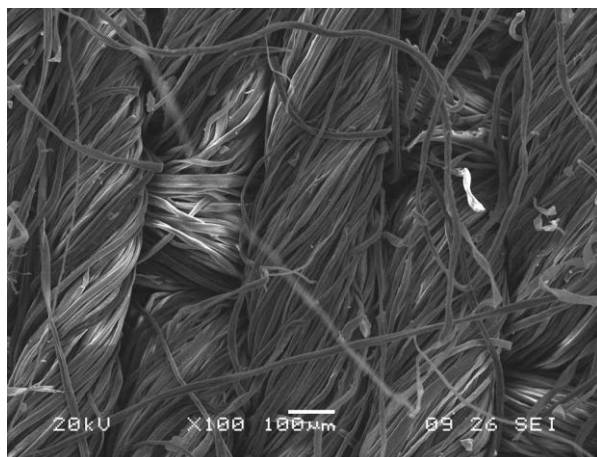
Sporca



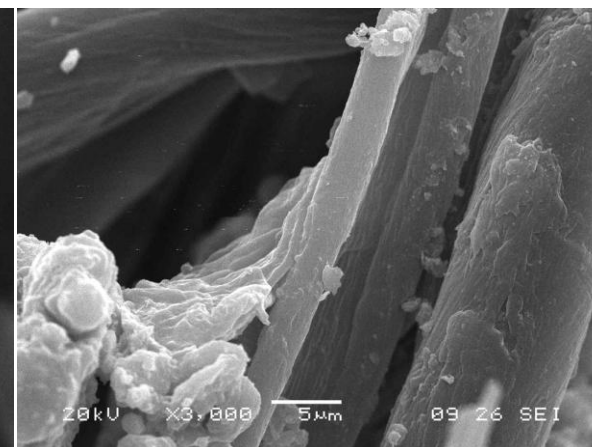
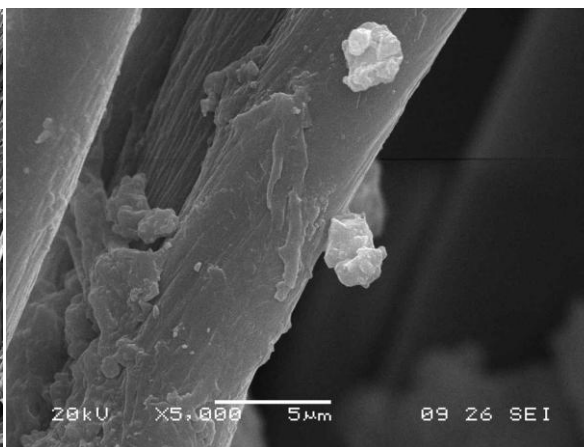
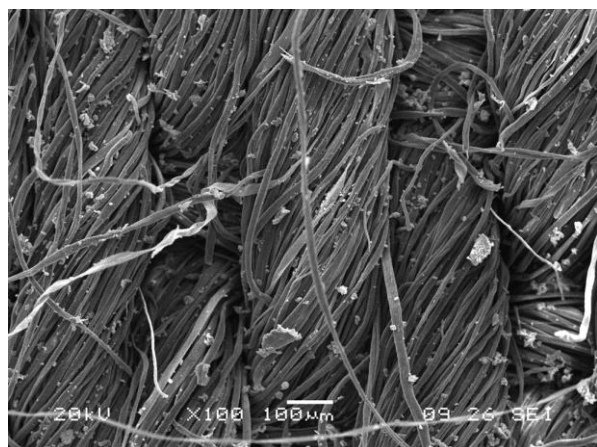
COTONE

U.R. 90%

Bianca



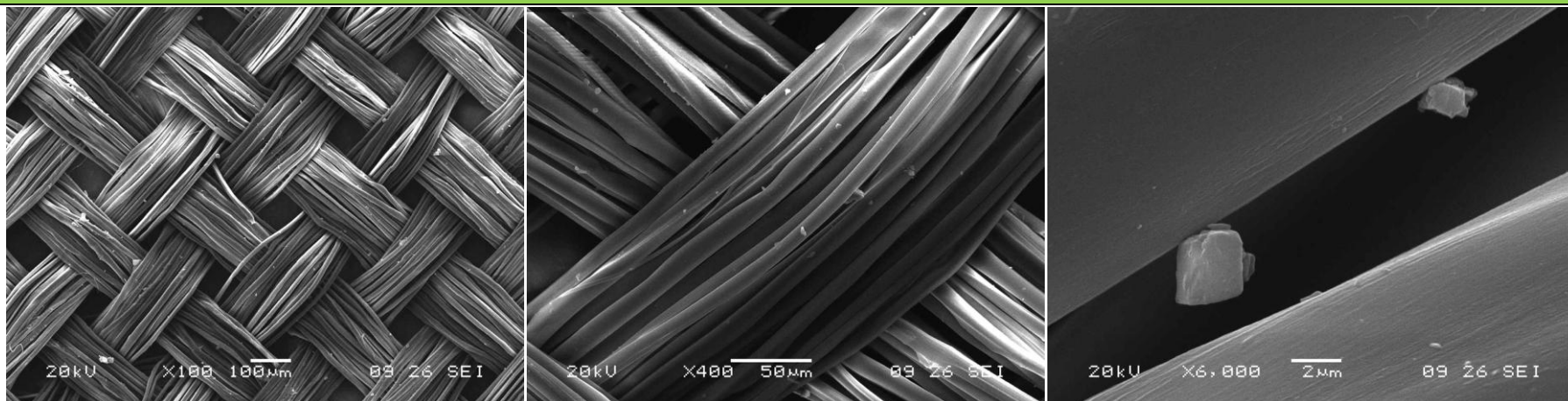
Sporca



SETA

U.R. 90%

Bianca



Sporca

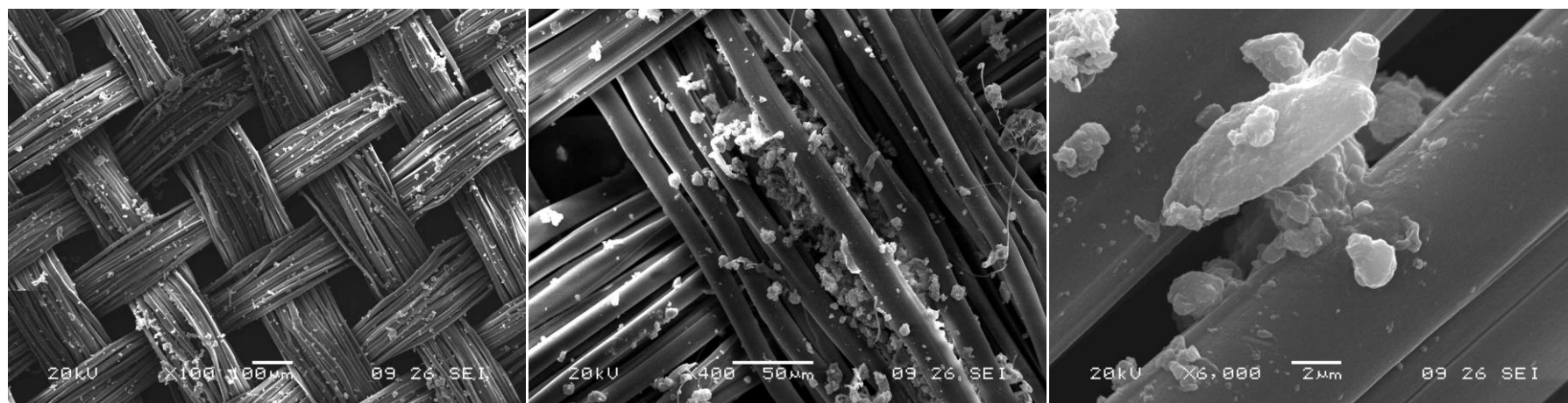


Tabella 4.19

4.4.2 Indagini colorimetriche

Le serie di campioni che sono state sottoposte a cicli termo igrometrici rispettivamente al 60% di U.R. e al 90% sono state analizzate attraverso indagini colorimetriche prima di essere sottoposte alle deposizioni, a seguito della deposizione forzata di polveri e infine a cicli termo igrometrici conclusi al fine di valutare le variazioni colorimetriche a seguito di ciascun trattamento [Harby E. Ahmeda,* ,b, Fragiskos N. Kollis a An investigation into the removal of starch paste adhesives from historical textiles by using the enzyme α -amylase, Journal of Cultural Heritage 12 (2011) 169–179].

I risultati delle variazioni colorimetriche sono stati riportati in tabella 4.20. Si può osservare come la variazione di luminosità (ΔL^*) sia generalmente meno rilevante nella seta che nel cotone nel quale, in entrambi i cicli effettuati si è osservata una notevole diminuzione di questo parametro, con maggiore diminuzione del ciclo al 60% di umidità relativa. Il parametro riferito al croma –saturazione - (ΔC^*) ha dimostrato in tutti i cicli una tendenza verso valori negativi ed in particolare, nel cotone sia all'esposizione al 90% di umidità relativa che al 60% ha subito variazioni di 3 punti mentre la seta ha dimostrato una variazione importante di 6,80 a seguito del ciclo al 60% di umidità relativa. In generale, quindi la diminuzione del parametro L^* in associazione all'andamento negativo del parametro C^* dimostra un inscurimento di tutti i campioni trattati. Le variazioni di cromaticità dei diagrammi a^* , b^* dimostrano delle esigue variazioni di a^* nella seta per entrambi i trattamenti e delle modeste variazioni tendenti al rosso, poco superiori all'unità, dello stesso parametro nel cotone. Le variazioni del parametro b^* sono tutte con andamento positivo, tendenti al giallo con un marcato aumento in seguito ai cicli al 60% di umidità di relativa nei campioni di seta.

La differenza cromatica ΔE^* ha dimostrato delle variazioni importanti a seguito dei cicli termo igrometrici in quanto vengono registrate tutte variazioni cromatiche evidenti. I cicli al 90% di umidità relativa hanno comportato variazioni inferiori in quanto per la seta si registra un ΔE^* pari a 5,18 mentre per il cotone 8,89. A seguito del ciclo al 60% di umidità relativa sono state registrate variazioni leggermente superiori con massimo di 10,10 dato dai provini di cotone.

È quindi interessante notare come ci siano state delle variazioni colorimetriche importanti, che hanno seguito andamenti simili nella seta e nel cotone e che i parametri che maggiormente hanno comportato queste variazioni sono la luminosità per il cotone, la saturazione per la seta e in entrambe, nel diagramma di cromaticità a^* , b^* sono state preponderanti le variazioni verso il giallo.

Tabella 4.20 variazioni dei principali parametri cromatici nei campioni sottoposti a trattamenti

Campione	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE^*	ΔC^*	ΔH^*
Seta						
R.U. 60%	-0,60	-0,62	7,70	7,75	-6,80	0,60
R.U. 90%	-4,79	0,63	1,87	5,18	-1,89	4,79
Cotone						
R.U. 60%	-9,49	1,49	3,13	10,10	-3,21	9,49
R.U. 90%	-8,29	1,25	2,94	8,89	-3,00	8,29

COTONE 90%

Campione PRE DEPOSIZIONE						Campione POST DEPOSIZIONE						Campione POST TRATTAMENTO					
Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°
4.1 set	94,26	-0,3	4,52	4,53	-1,50	4.1 seta	93,81	-0,11	7,84	7,84	-1,56	4.1 seta	78,78	1,96	12,23	12,39	1,41
4.2 set	94,13	-0,32	4,58	4,59	-1,50	4.2 seta	94,12	-0,11	7,84	7,84	-1,56	4.2 seta	88,98	0,68	9,89	9,91	1,50
4.3 set	94,27	-0,29	4,42	4,43	-1,51	4.3 seta	93,93	-0,11	7,87	7,87	-1,56	4.3 seta	85,63	1,18	10,84	10,90	1,46
4.4 set	94,45	-0,27	4,36	4,37	-1,51	4.4 seta	94,16	-0,13	7,8	7,80	-1,55	4.4 seta	89,26	0,65	10,22	10,24	1,51
4.5 set	94,44	-0,3	4,54	4,55	-1,50	4.5 seta	94,02	-0,1	7,67	7,67	-1,56	4.5 seta	88,62	0,73	10,57	10,60	1,50
4.6 set	94,44	-0,31	4,46	4,47	-1,50	4.6 seta	94,15	-0,15	7,91	7,91	-1,55	4.6 seta	86,61	0,99	11,00	11,04	1,48
4.7 set	94,38	-0,26	4,38	4,39	-1,51	4.7 seta	93,92	-0,15	7,87	7,87	-1,55	4.7 seta	85,82	1,1	10,56	10,62	1,47
4.8 set	94,38	-0,28	4,61	4,62	-1,51	4.8 seta	94,2	-0,12	7,83	7,83	-1,56	4.8 seta	82,48	1,58	11,73	11,84	1,44
4.9 set	94,32	-0,32	4,52	4,53	-1,50	4.9 seta	94,13	-0,1	7,84	7,84	-1,56	4.9 seta	85,71	1,18	10,46	10,53	1,46
4.10 set	94,38	-0,29	4,44	4,45	-1,51	4.10 seta	93,83	-0,12	7,96	7,96	-1,56	4.10 seta	85,43	1,2	10,28	10,35	1,45
MEDIA SCI	94,345	-0,294	4,483	4,49	-1,51	MEDIA SCI	94,027	-0,12	7,843	7,84	-1,56	MEDIA SCI	85,732	1,125	10,778	10,84	1,47

SETA 90%

Campione PRE DEPOSIZIONE						Campione POST DEPOSIZIONE						Campione POST TRATTAMENTO					
Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°
4.1 seta	95,32	0,52	-0,51	0,73	-0,78	4.1 seta	95,36	-0,15	7,14	7,14	-1,55	4.1 seta	89,69	0,59	9,34	9,36	1,51
4.2 seta	95,24	0,57	-0,53	0,78	-0,75	4.2 seta	95,16	-0,1	7,28	7,28	-1,56	4.2 seta	90,64	0,5	8,87	8,88	1,51
4.3 seta	94,87	0,54	0,5	0,74	0,75	4.3 seta	94,78	-0,02	7,85	7,85	-1,57	4.3 seta	89,28	0,73	9,97	10,00	1,50
4.4 seta	95,15	0,55	-0,31	0,63	-0,51	4.4 seta	95,33	-0,12	7,33	7,33	-1,55	4.4 seta	91,97	0,33	8,8	8,81	1,53
4.5 seta	95,01	0,56	0,08	0,57	0,14	4.5 seta	95,33	-0,08	7,45	7,45	-1,56	4.5 seta	91,00	0,44	9,21	9,22	1,52
4.6 seta	95,17	0,52	-0,42	0,67	-0,68	4.6 seta	95,03	-0,05	7,31	7,31	-1,56	4.6 seta	92,56	0,17	8,55	8,55	1,55
4.7 seta	95,3	0,56	-0,58	0,81	-0,80	4.7 seta	95,05	-0,13	7,18	7,18	-1,55	4.7 seta	86,72	1,02	10,14	10,19	1,47
4.8 seta	95,35	0,54	-0,5	0,74	-0,75	4.8 seta	95,18	-0,12	7,17	7,17	-1,55	4.8 seta	92,52	0,22	8,52	8,52	1,54
4.9 seta	95,67	0,55	-0,6	0,81	-0,83	4.9 seta	95,02	-0,12	7,36	7,36	-1,55	4.9 seta	89,73	0,61	9,3	9,32	1,51
4.10 seta	95,87	0,55	-0,65	0,85	-0,87	4.10 seta	95,02	-0,15	7,37	7,37	-1,55	4.10 seta	89,27	0,69	9,47	9,50	1,50
MEDIA SCI	95,295	0,546	-0,352	0,73	-0,51	MEDIA SCI	95,13	-0,10	7,34	7,34	-1,56	MEDIA SCI	90,338	0,53	9,217	9,23	1,51

COTONE 60%

Campione PRE DEPOSIZIONE						Campione POST DEPOSIZIONE						Campione POST TRATTAMENTO					
Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°
4.1 set	94,40	-0,33	4,44	4,45	-1,50	4.1 seta	93,86	-0,14	7,93	7,93	-1,55	4.1 seta	85,92	1,16	10,92	10,98	1,46
4.2 set	94,46	-0,24	4,39	4,40	-1,52	4.2 seta	93,99	-0,12	7,95	7,95	-1,56	4.2 seta	80,52	1,81	12,53	12,66	1,43
4.3 set	94,36	-0,30	4,54	4,55	-1,50	4.3 seta	93,76	-0,13	7,95	7,95	-1,55	4.3 seta	82,00	1,68	11,15	11,28	1,42
4.4 set	94,47	-0,28	4,32	4,33	-1,51	4.4 seta	94,09	-0,13	7,90	7,90	-1,55	4.4 seta	89,67	0,59	9,67	9,69	1,51
4.5 set	94,38	-0,32	4,46	4,47	-1,50	4.5 seta	93,83	-0,20	7,87	7,87	-1,55	4.5 seta	83,27	1,47	11,05	11,15	1,44
4.6 set	94,46	-0,33	4,53	4,54	-1,50	4.6 seta	94,01	-0,14	8,01	8,01	-1,55	4.6 seta	89,68	0,59	10,08	10,10	1,51
4.7 set	94,56	-0,27	4,36	4,37	-1,51	4.7 seta	93,66	-0,27	7,90	7,90	-1,54	4.7 seta	82,56	1,59	11,23	11,34	1,43
4.8 set	94,54	-0,29	4,44	4,45	-1,51	4.8 seta	93,82	-0,17	7,96	7,96	-1,55	4.8 seta	80,74	1,85	11,55	11,70	1,41
4.9 set	94,41	-0,29	4,30	4,31	-1,50	4.9 seta	93,95	-0,14	7,98	7,98	-1,55	4.9 seta	85,61	1,18	11,14	11,20	1,47
4.10 set	94,31	-0,28	4,43	4,44	-1,51	4.10 seta	94,10	-0,10	7,84	7,84	-1,56	4.10 seta	84,19	1,39	11,23	11,32	1,45
MEDIA SCI	94,44	-0,29	4,42	4,43	-1,50	MEDIA SCI	93,91	-0,15	7,93	7,93	-1,55	MEDIA SCI	84,42	1,33	11,06	11,14	1,45

SETA 60%

Campione PRE DEPOSIZIONE						Campione POST DEPOSIZIONE						Campione POST TRATTAMENTO					
Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°	Nome Dati	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	C*	h°
4.1 seta	95,76	0,57	-0,70	0,90	-0,89	4.1 seta	95,01	-0,14	7,35	7,35	-1,55	4.1 seta	92,36	0,26	8,60	8,60	1,54
4.2 seta	95,69	0,54	-0,59	0,80	-0,83	4.2 seta	95,10	-0,13	7,27	7,27	-1,55	4.2 seta	88,35	0,89	10,33	10,37	1,48
4.3 seta	95,81	0,54	-0,51	0,74	-0,76	4.3 seta	94,75	-0,15	7,28	7,28	-1,55	4.3 seta	85,52	1,17	11,07	11,13	1,47
4.4 seta	95,77	0,56	-0,36	0,67	-0,57	4.4 seta	94,83	-0,10	7,41	7,41	-1,56	4.4 seta	92,33	0,22	8,81	8,81	1,55
4.5 seta	95,68	0,57	-0,18	0,60	-0,31	4.5 seta	94,86	-0,10	7,52	7,52	-1,56	4.5 seta	85,55	1,23	11,37	11,44	1,46
4.6 seta	95,78	0,57	-0,62	0,84	-0,83	4.6 seta	94,71	-0,10	7,38	7,38	-1,56	4.6 seta	81,94	1,66	11,84	11,96	1,43
4.7 seta	95,39	0,52	0,94	1,07	1,07	4.7 seta	93,97	0,06	8,66	8,66	1,56	4.7 seta	91,90	0,25	9,65	9,65	1,54
4.8 seta	94,69	0,54	1,17	1,29	1,14	4.8 seta	94,93	0,03	8,28	8,28	1,57	4.8 seta	93,49	0,08	9,10	9,10	1,56
4.9 seta	94,80	0,52	0,51	0,73	0,78	4.9 seta	95,02	0,01	7,79	7,79	1,57	4.9 seta	89,20	0,70	10,42	10,44	1,50
4.10 seta	95,11	0,57	-0,39	0,69	-0,60	4.10 seta	95,32	-0,08	7,34	7,34	-1,56	4.10 seta	91,12	0,40	9,19	9,20	1,53
MEDIA SCI	95,45	0,55	-0,07	0,83	-0,18	MEDIA SCI	94,85	-0,07	7,63	7,63	-0,62	MEDIA SCI	89,18	0,69	10,04	10,07	1,51

Tabella 4.21 Dati colorimetrici acquisiti

L'andamento delle curve del fattore di riflessione percentuale, in figura 1, 2, 3, 4 mostra come in tutti i casi si sia modificata notevolmente la riflettanza della superficie a seguito sia ovviamente delle deposizioni forzate che dei cicli termogravimetrici. Le variazioni consistono per quanto riguarda la curva post-deposizione una variazione evidente nella seta e minore nel cotone tra 360nm e 420nm rispetto alla curva generata dai campioni di tessuto prima della deposizione delle polveri. Queste variazioni rilevate sono molto simili per i campioni di cotone e di seta, questo sta ad indicare che le deposizioni di polvere sono state eseguite correttamente ed hanno coperto omogeneamente nella stessa maniera tutti i provini di tessuto utilizzati nello studio. In seguito ai trattamenti termogravimetrici il fattore di riflessione percentuale è diminuito notevolmente in entrambe le tipologie di tessuti sia nel ciclo termogravimetrico al 60% di umidità relativa che in quello al 60% di circa il 10% per tutte le curve considerate, senza che vi sia stato una variazione di andamento delle stesse.

Questa variazione importante del fattore di riflessione è probabilmente da imputare oltre che alla deposizione di polveri anche ai depositi salini che erano presenti all'interno dei contenitori stagni che sono stati utilizzati per ricreare i valori di umidità relativa desiderati, questi depositandosi per fenomeni di condensa possono avere ulteriormente modificato la riflettanza dei campioni.

Figura 4.29 curve di riflettanza R.U. 60% COTONE A SINISTRA SETA A DESTRA blu pre-deposizione, rosso post-deposizione, verde post-trattamento

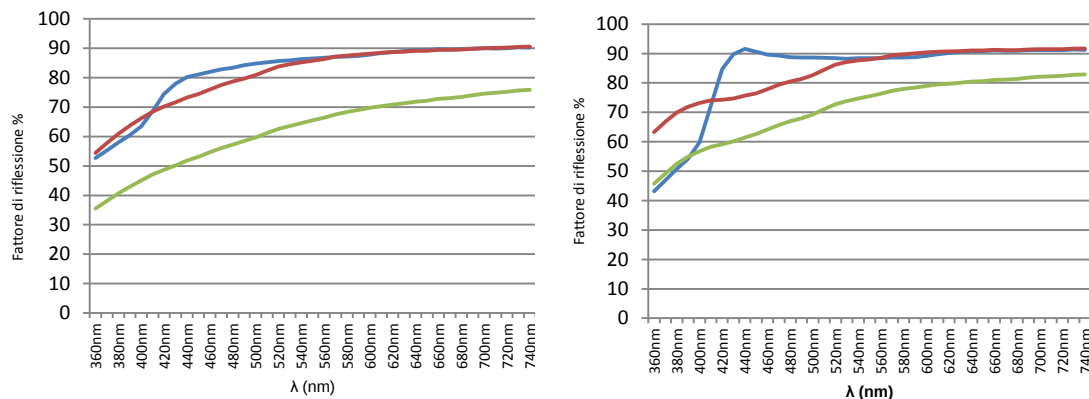
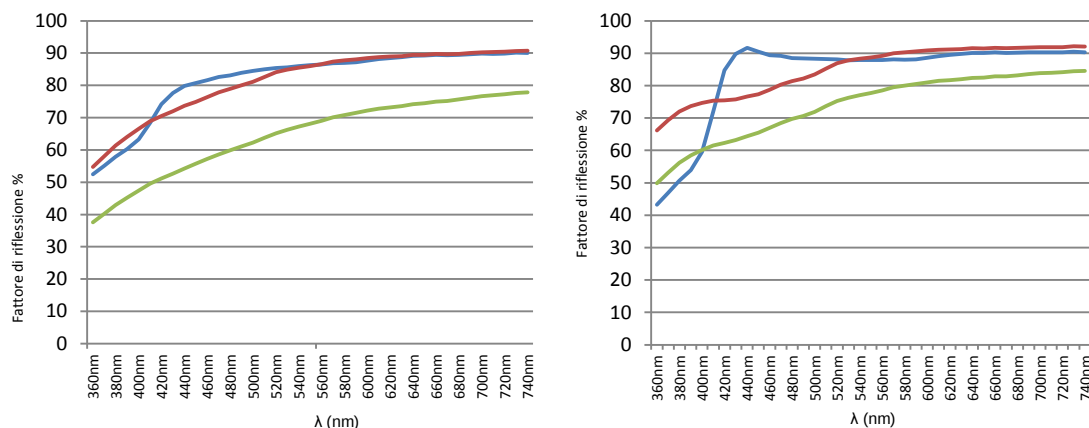


Figura 4.30 curve di riflettanza R.U. 90% COTONE A SINISTRA SETA A DESTRA blu pre-deposizione, rosso post-deposizione, verde post-trattamento



4.4.3 Indagini spettrofotometriche FTIR in riflettanza totale attenuata ATR

In seguito al trattamento dei tessuti alle due diverse tipologie di cicli termo igrometrici al 60% e al 90% di umidità relativa della durata di 100 ore non sono stati rilevati dei cambiamenti significativi negli spettri FTIR-ATR. Le indagini sono state condotte in FT-ATR sulla parte superficiale dei campioni e per garantire la riproducibilità dei risultati le prove sono state condotte in doppio. Per valutare l'impatto del solo impolveramento sui campioni di tessuto si è deciso di mettere in relazione lo spettro di dei campioni bianchi che hanno subito identici cicli termo igrometrici dei campioni sporcati anziché mettere in relazione i campioni prima e dopo i trattamenti. Non si notano variazioni rilevanti né sui campioni al 60% di umidità relativa neppure sui campioni al 90% .

Di seguito vengono riportati gli spettri dei campioni trattati e non trattati di cotone e di seta che hanno subito cicli termoigrometrici.

Figura 4.31 Spettri del tessuto di cotone trattato con polveri e del tessuto di cotone non trattato a seguito del ciclo al 60% di umidità relativa

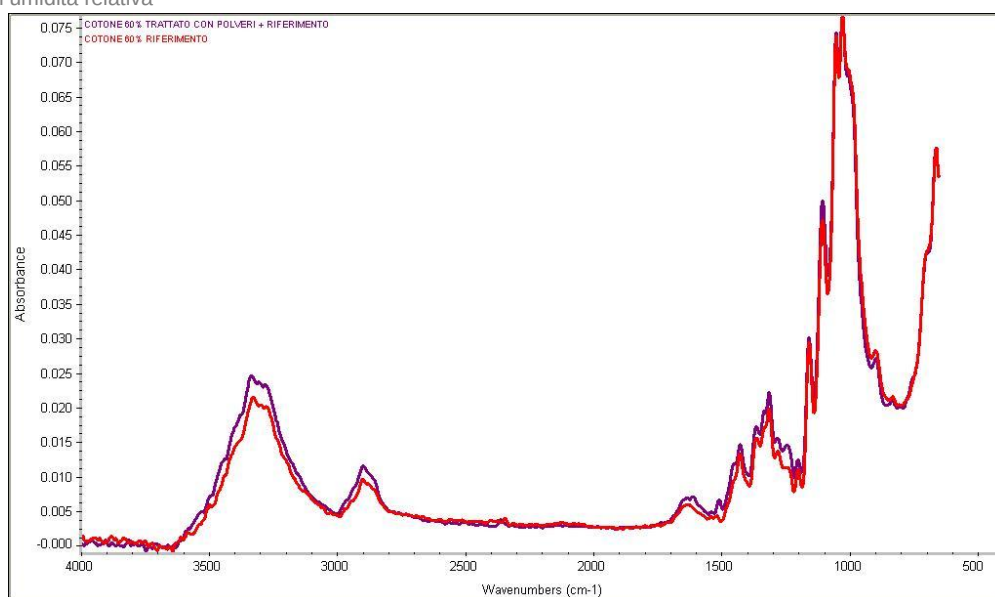


Figura 4.32 Spettri del tessuto di seta trattato con polveri e del tessuto di cotone non trattato a seguito del ciclo al 60% di umidità relativa

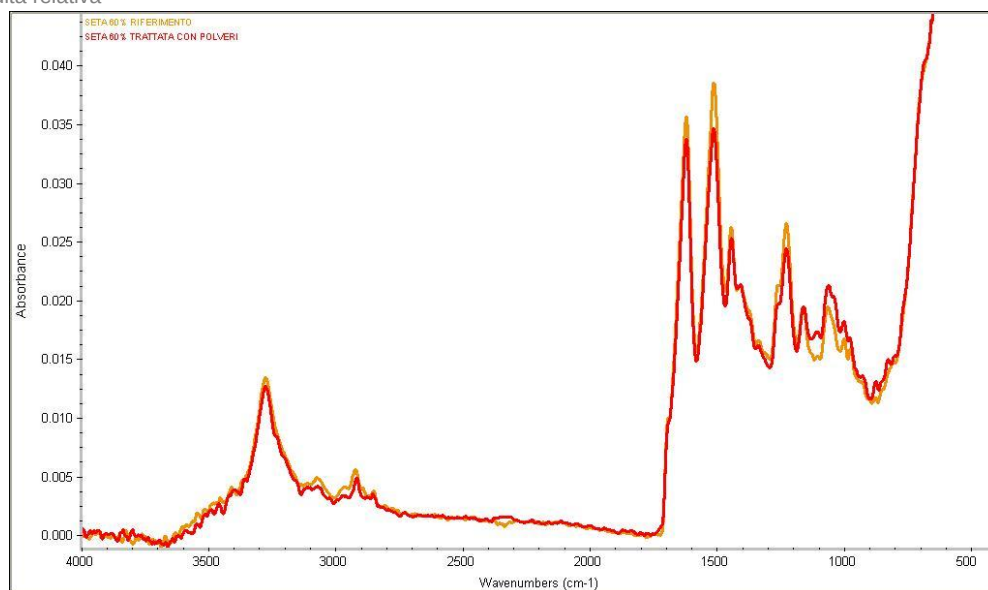


Figura 4.33 Spettri del tessuto di cotone con e senza deposizioni a seguito del ciclo al 90% di umidità relativa

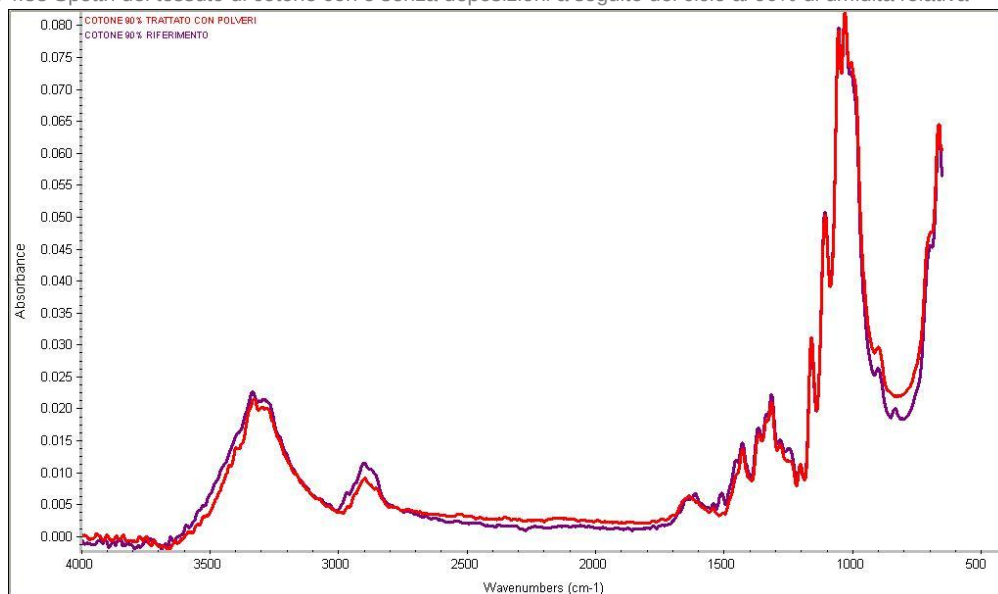
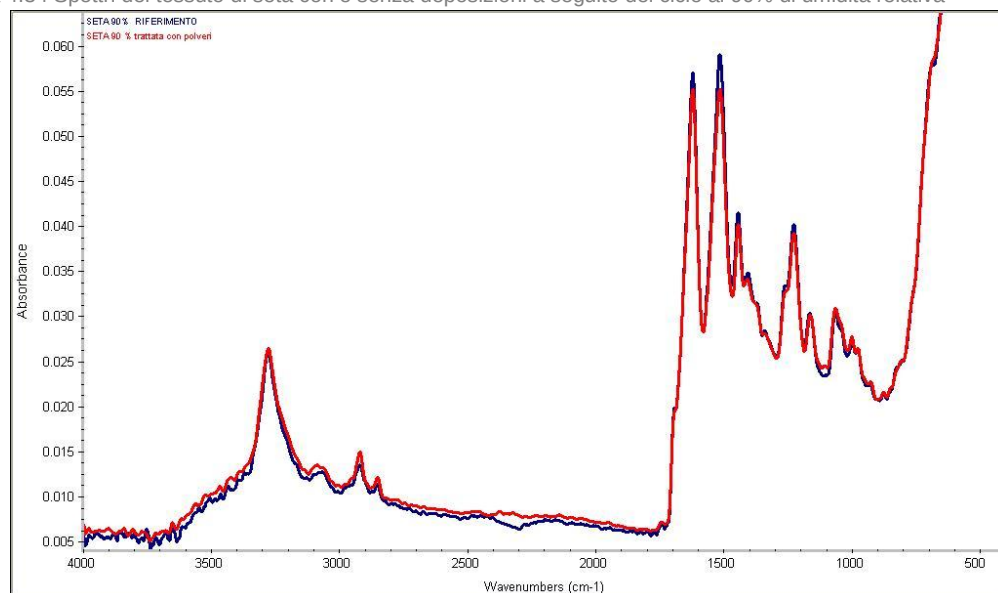


Figura 4.34 Spettri del tessuto di seta con e senza deposizioni a seguito del ciclo al 90% di umidità relativa



4.4.4 Valutazione variazione del grado di polimerizzazione (DP)

Tabella 4.22

Caratteristica	Direzione A	C.V. (%)	Direzione B	C.V. (%)
60% U.R. bianco				
Forza di rottura media (N)	146	6.8	104	7.8
Allungamento medio alla forza massima (%)	32.2	4.5	14.5	7.1
60% U.R. sporco				
Forza di rottura media (N)	136	4.9	88	6.2
Allungamento medio alla forza massima (%)	42.4	3.5	19.5	5.5
90% U.R. bianco				
Forza di rottura media (N)	158	5.8	73.7	10.8
Allungamento medio alla forza massima (%)	36.7	4.4	16.1	6.8
90% U.R. sporco				
Forza di rottura media (N)	120	2.7	44.6	5.7
Allungamento medio alla forza massima (%)	74.8	6.3	17.9	9.3

4.4.5 Valutazione variazioni della resistenza e dell'allungamento a rottura

La valutazione della tenacità e dell'allungamento sono state valutate nei tessuti di cotone e seta a seguito di ciascun ciclo termo igrometrico. Sono stati analizzati per ciascun ciclo di umidità sia campioni sui quali è stata eseguita la deposizione forzata sia campioni bianchi che hanno semplicemente subito il ciclo di umidità e temperatura, al fine di valutare le eventuali differenze di comportamento. Le analisi sono state effettuate su striscia in entrambe le direzioni dei tessuti (direzione A e direzione B). I risultati delle analisi riportati sono frutto di dieci replicazioni per ciascun dato. È stato utilizzato un dinamometro elettronico Instron 4501, a incremento costante di allungamento (CRE) e le prove sono state condotte in ambiente condizionato alla Temperatura di 20 ± 2 C° e ad una umidità del $65 \pm 4\%$. I risultati delle diverse prove verranno trattati separatamente per le due tipologie di tessuti: cotone e seta.

In tabella 4.23 vengono riportati i dati relativi alle misure della tenacità e dell'allungamento a rottura dei provini di cotone con i rispettivi coefficienti di variazione percentuale e la variazione percentuale di ciascun dato.

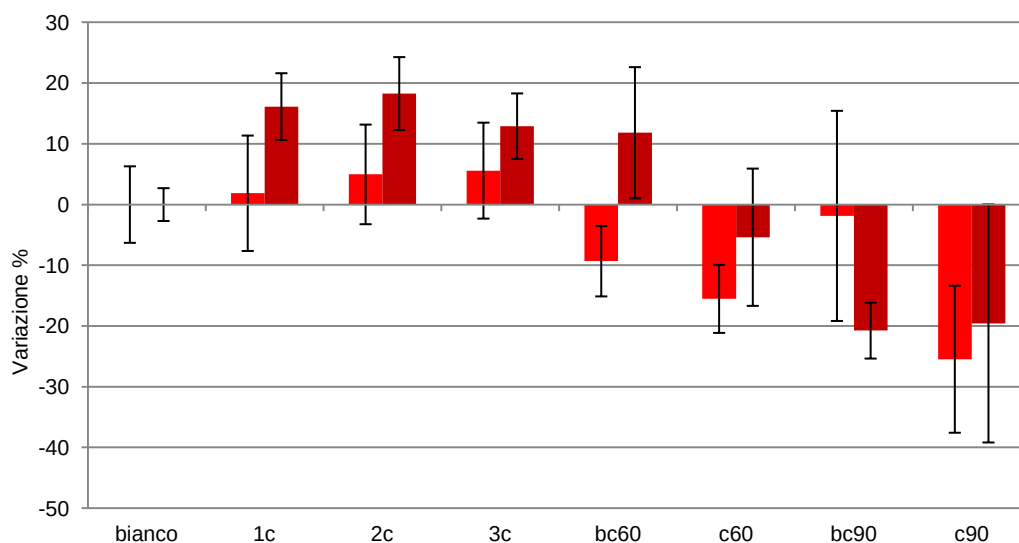
Tabella 4.23 Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di cotone

forza di rottura media (N)						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	161	8,6	0	93	13,3	0
bc60	146	6,8	-9,32	104	7,8	11,83
c60	136	4,9	-15,53	88	6,2	-5,38
bc90	158	5,8	-1,86	73,7	10,8	-20,75
c90	120	2,7	-25,47	74,8	6,3	-19,57
Allungamento medio alla forza massima %						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	33	9,3	0	14,3	10	0
bc60	32,2	4,5	-2,42	14,5	7,1	1,40
c60	42,4	3,5	28,48	19,5	5,5	36,36
bc90	36,7	4,4	11,21	16,1	6,8	12,59
c90	44,6	5,7	35,15	17,9	9,3	25,17

Le serie di campioni che hanno subito i cicli termo igrometrici presentano invece un andamento contrario a quanto si è verificato per i campioni raccolti al museo in quanto dimostrano diminuzione di tenacità minore nei cicli al 60 % di umidità e massime/maggiori nel ciclo al 90% di umidità relativa. Perché?? La tenacità del cotone risulta quindi essere aumentata a seguito delle esposizioni in museo e diminuita in seguito ai cicli termoigrometrici.

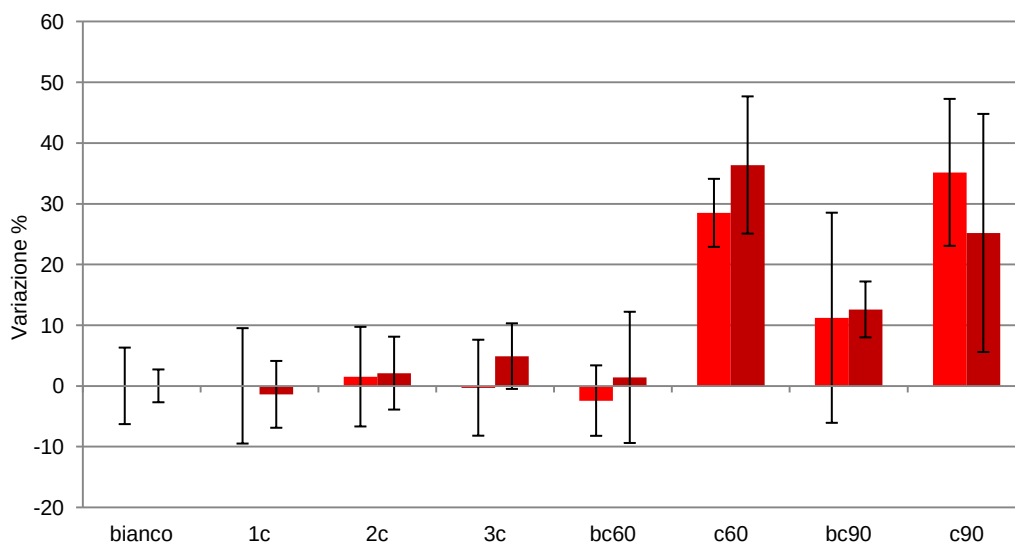
C'è da specificare inoltre che, sebbene le due direzioni del tessuto dimostrino andamento simile, la direzione B si è dimostrata più sensibile ai tre mesi di esposizione museale mentre la direzione A ha subito variazioni più importanti a seguito dei cicli termo igrometrici. Questi dati, potrebbero essere messi in relazione con le caratteristiche intrinseche del tessuto di cotone utilizzato per lo studio in quanto trama e ordito non presentavano non lo stesso numero di fili per capo, caratterizzando così il tessuto da due titoli differenti.

Figura 4.35 Variazione percentuale della tenacità dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro



Maggiori sono invece le variazioni registrate in seguito ai cicli termo igrometrici in quanto si è riscontrato un aumento importante dei valori di allungamento a rottura come mostrato in figura 2: i campioni in cui si sono manifestate le variazioni maggiori sono risultati essere quelli che hanno subito la deposizione forzata di polveri. In essi non si sono evidenziali andamenti notevolmente diversi per le due direzioni del tessuto.

Figura 4.36 Variazione percentuale dell'allungamento alla forza massima dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro



A seguito invece dei cicli termoigrometrici si è riscontrata una diminuzione della tenacità ed un aumento dell'allungamento a rottura. L'aumento della caratteristica dell'allungamento a rottura potrebbe essere imputabile al fatto che per quanto già dimostrato l'umidità favorisce l'estensione delle fibre tessili [Calvini], le prove sono state fatte in ambiente controllato, è possibile che lo strato di deposizione diminuisca la traspirabilità del tessuto provocando un

‘effetto serra’ tra il substrato e il tessuto impedendo a quest’ultimo di condizionarsi e lasciando umidità in eccesso tra il deposito e il tessuto stesso.

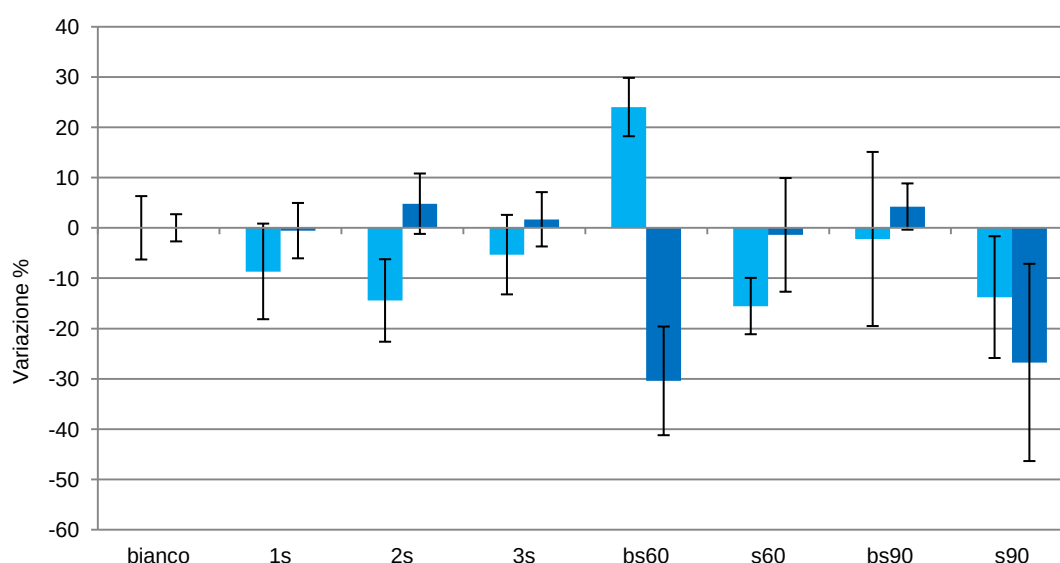
In tabella 2 vengono riportati i valori acquisiti dalle analisi della tenacità e dell’allungamento a rottura dei provini di cotone con i rispettivi coefficienti di variazione percentuale e gli intervalli di affidabilità per ciascun dato.

Tabella 4.24 Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di cotone

Forza di rottura media (N)						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	45	6,3	0	35,5	2,7	0
bs60	55,8	5,8	24,00	24,7	10,8	-30,42
s60	38	5,6	-15,56	35	11,3	-1,41
bs90	44	17,3	-2,22	37	4,6	4,23
s90	38,8	12,1	-13,78	26	19,6	-26,76
Allungamento medio alla forza massima %						
Campioni	Direzione A	C.V.%	variazione %	Direzione B	C.V.%	variazione %
bianco	25,2	7,3	0	21,3	5,7	0
bs60	23	3,5	-8,73	17,9	16,1	-15,96
s60	23,2	11,6	-7,94	23,1	5,9	8,45
bs90	22,8	7,4	-9,52	21	5,7	-1,41
s90	23,9	5,1	-5,16	18,2	12,2	-14,55

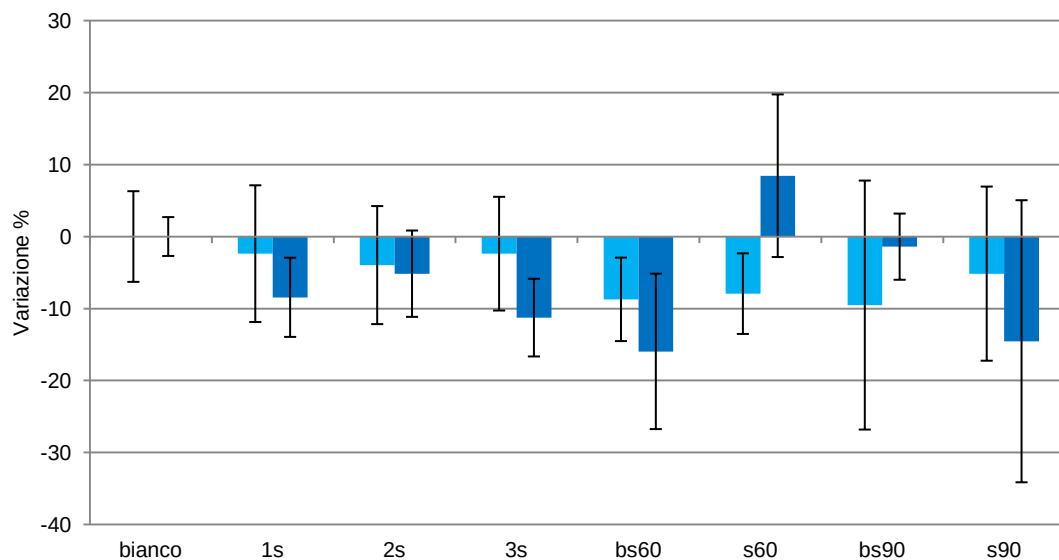
In figura 4.37 sono riportati i valori di variazione di tenacità percentuale riferiti ai cicli termoigrometrici effettuati. Si può notare come non ci sia un andamento preferenziale per le varie tipologie di provini che talvolta mostrano per le due diverse direzioni del tessuto valori contrastanti. Interessante notare come i provini con le deposizioni al 90% di umidità relativa dimostrino una diminuzione della tenacità in entrambe le direzioni del tessuto. È probabile, come nel caso dei provini di cotone che dimostravano andamenti molto simili che il processo di cementazione delle polveri sia stato più spinto a quei determinati tenori di umidità relativa.

Figura 4.37 Variazione percentuale della tenacità dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro



La variazione dell'allungamento a rottura dei provini di seta non è stato possibile considerarlo in quanto le barre di errore sono di gran lunga maggiori rispetto al dato acquisito.

Figura 4.38 Variazione percentuale di allungamento a rottura dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro



Bibliografia

- [1] Giua Michele, *Trattato di Chimica Industriale Vol. VI Tomo 2*, Torino 1957-1963
- [2] Quaglierini Carlo, *Chimica delle fibre tessili*, Bologna 2012
- [3] Chinkap Chung, Myunghee Lee, Eun Kyung Choe, *Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy*, Carbohydrate Polymers 2004, 58 pp 417–420
- [4] Paolo Calvini, *Dispense corso di laurea in Scienze e tecnologie chimiche per la conservazione ed il restauro*, A.A. 2006-2007
- [5] Um IC, Kweon HY, Park YH, Hudson S. Structural characteristics and properties of the regenerated silk fibroin prepared from formic acid. *International Journal of Biological Macromolecules* 2001, 29 pp 91-97.
- [6] Fujia Chem, David Porter, Fritz Vollrath, *Silk cocoon (Bombyx mori): Multi-layer structure and mechanical proprieties*, Acta Biomaterialia 2012, 8 pp 2620–2627
- [7] Vasconcelos A, Freddi G, Cavaco-Paulo A. Biodegradable materials based on silk fibroin and keratin. *Biomacromolecules* 2008, 9 pp 1299-1305.
- [8] Hu X, Kaplan DL, Cebe P. Determining β -sheet crystallinity in fibrous proteins by thermal analysis and infrared spectroscopy. *Macromolecules* 2006, 39 pp 6161-6170.
- [9] J Compton, W J Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers' textile research journal 23, 1953, 418-423. Compton Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers: the effect of yarn and fabric structure in soil retention' T.R.J 23 pp 418-423 1953. Compton Hart 'The theory of soil-fiber complex formation and stability' T.R.J. 24 pp 263-264 1954.

CONCLUSIONI

Lo scopo del seguente lavoro di tesi nasce dall'interesse di studiare le interazioni tra tessuti di interesse storico-artistico e le polveri presenti all'interno degli ambienti museali in relazione alla consapevolezza cresciuta negli ultimi anni legata alle deposizioni di particolato *indoor* sui manufatti musealizzati. Le deposizioni, accumulandosi alterano l'aspetto superficiale dei manufatti determinandone talvolta la necessaria pulitura per ristabilire la buona leggibilità dell'opera. Queste operazioni non sono sempre compatibili con manufatti a volte molto fragili come i tessuti. Per questo oltre allo studio dei materiali costituenti i manufatti tessili di interesse artistico e del loro comportamento in relazione ai diversi fattori di degrado è bene approfondire le conoscenze sulle condizioni ambientali e microclimatiche degli spazi espositivi dove esse vengono conservate e depositate. Mentre infatti numerosa è la letteratura sui più comuni processi di degrado dei tessuti come fenomeni di foto/termo-ossidazione, depolimerizzazione dovuta ad agenti inquinanti gassosi e biodeterioramento, non molti sono al momento gli studi sugli effetti che le deposizioni particellari hanno sui tessuti, in relazione alle diverse condizioni di ambientali (temperatura e umidità relativa) e le ripercussioni che essi hanno sulle caratteristiche chimico-fisiche dei tessuti stessi.

Per questo motivo sono state scelte due tipologie di tessuti, una di origine vegetale, il cotone, ed una animale, la seta, al fine valutare le interazioni tra tessuti e particolato in seguito a deposizioni naturali ed artificiali di polveri, stazionate per determinati periodi di tempo sui tessuti esposti a diverse condizioni ambientali. Nella prima fase di studio si è proceduto alla caratterizzazione chimico-morfologica del particolato con cui i tessuti sono venuti a contatto e successivamente è stata effettuata una valutazione delle caratteristiche fisico-meccaniche e chimiche dei tessuti con prove analitiche eseguite prima dell'esposizione e a seguito di ciascun ciclo di studio.

Dalle osservazioni in microscopia ottica dei depositi polverulenti raccolti in ambiente *indoor* a Palazzo Fortuny a Venezia, si è osservato che indipendentemente dalla tipologia di tessuto esposto, alla natura chimica, al tipo di armatura e ai diversi mesi in cui è avvenuto il monitoraggio, risultavano essere molto simili. Le deposizioni si sono dimostrate come un insieme eterogeneo di particelle con granulometria molto sottile, dall'osservazione al microscopio elettronico (SEM) è stato possibile fare ulteriori considerazioni sulla loro morfologia e composizione chimica grazie all'utilizzo della microanalisi (EDS). Le polveri raccolte al museo si sono potute quindi suddividere in sei tipologie principali: agglomerati organici, particelle tonde caratterizzate da alte percentuali di Si e Al o da Ca, particelle contenenti Sali come Na, Cl, Mg, particelle di natura organica e spore, particelle contenenti Al e Si e infine particelle contenenti metalli come Zn, Fe e Cu. La composizione eterogenea delle polveri è stata confermata anche dalle indagini in spettroscopia FTIR.

La variazione del comportamento dei tessuti è stata indagata attraverso analisi microscopiche, spettroscopiche, colorimetriche, dinamometriche e viscosimetriche.

Le indagini colorimetriche a seguito di deposizioni naturali ed artificiali, hanno mostrato delle variazioni abbastanza importanti per entrambe le tipologie di tessuto, più marcate in seguito all'esposizione dei campioni a tenori di umidità pari al 60%, che hanno comportato un ingiallimento ed incupimento visivo del colore del tessuto. Le indagini microscopiche hanno messo in luce come il particolato maggiormente attivo nei confronti delle fibre del tessuto sia stato quello costituito da agglomerati sottili di particelle organiche in quanto, a tenori superiori al 60% di umidità relativa si lega alle fibre costituenti il tessuto dando origine a dei link tra particelle e fibre che generano fenomeni di cementazione. La valutazione del grado di

polimerizzazione, ha rilevato variazioni sensibili tra i campioni tal quali e quelli ritirati a seguito dei cicli termoigrometrici, in quanto è ipotizzabile che ad elevate condizione di umidità, il particolato di natura deliquescente si sia disciolto andando ad intaccare chimicamente il tessuto sul quale è stato depositato.

I tessuti di seta si sono dimostrati più stabili a seguito delle deposizioni di particolato dal punto di vista fisico-meccanico in quanto non hanno subito variazioni rilevanti, il tessuto di cotone invece a seguito al periodo di stazionamento in museo ha dimostrato un irrigidimento generale, al contrario, in seguito di una deposizione massiccia di particolato e dell'esposizione a livelli elevati di umidità relativa ha dimostrato una diminuzione della tenacità e un aumento dell'allungamento a rottura, è plausibile che, a seguito di deposizioni cospicue sui tessuti si creino delle zone differenziali tra le polveri e il tessuto che ne pregiudichi la normale traspirabilità andando a creare una zona in cui l'umidità resta più elevata, questo spiegherebbe il comportamento differenziale dei tessuti di cotone trattati in laboratorio che hanno subito una notevole deposizione di particolato e quelli esposti al museo.

Lo studio dei tessuti ha quindi permesso di comprendere che le interazioni tra particolato e fibre sono caratterizzabili attraverso le tecniche in microscopia elettronica, colorimetria viscosimetria e prove fisico-meccaniche, per quanto riguarda invece le tecniche spettroscopiche non sono stati rilevati dati significativi. Il fatto che siano stati riscontrate delle variazioni colorimetriche e fisico-meccaniche osservabili a seguito di un periodo, lo svolgimento di questa tesi, esiguo in relazione all'aspettativa di vita media di un manufatto tessile è da prendere in considerazione per una eventuale pianificazione di un progetto di controllo, in maniera tale da ridurre gli effetti che l'impolveramento ha sui tessuti storico-artistici.

Inoltre il monitoraggio eseguito a Palazzo Fortuny ha permesso di ottenere informazioni utili riguardanti le condizioni microclimatiche all'interno del salone principale del primo piano nobile. Grazie a queste informazioni è possibile trarre spunti sulla scelta di eventuali interventi che possano mirare alla migliore conservazione dei tessuti contenuti nel Palazzo in primo luogo per quelli che foderano completamente le pareti del salone che al contrario di altre opere esposte per determinati periodi, sono esposte continuamente a quelle determinate condizioni.

BIBLIOGRAFIA GENERALE

A Phenix, a Burnstock 1990 'The Deposition of dirt: a review of the literature with scanning electron microscope studies of dirt on selected paintings. Eds Dirt and pictures separated. London UKIC pp 11-18].

A. Armigliato, U. Valdrè, *Microscopia elettronica a scansione e microanalisi*, Bologna 1980

A. Dăscălescu, *Le séchage et ses applications industrielles*, Paris 1969

A. Schieweck 2005, Organic and inorganic pollutants in storage rooms of the Lower Saxony State Museum Hanover, Germany. *Atmospheric Environment* 39 6098-6108].

A. Seves, G. Testa, C. Bozzi, A. Sardella, *Degradazione dei supporti cellulosici di dipinti, Dipinti su tela, metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993

Barbara Krupinska, Anna Worobiec, Giuliana Gatto Rotondo, Assessment of the air quality, Assessment of the air quality (NO₂, SO₂, O₃ and particulate matter) in the Plantin-Moretus Museum/ Print Room in Antwerp, Belgium, in different season of the year, *Microchemical Journal* 102 (2012) 49-53

Brimblecombe et al., The Cementation of coarse dust to indoor surfaces, *Journal of cultural Heritage* 10, 2009, pp 410-414]

C H Masland 'soil retentions of various fibers' *Rayon textile monthly* 20 573-574, 654-656 1939

Camillo Pertusi, *Trattato di Merceologia*, Torino 1949

Campanella L. e altri, *Chimica per l'arte*, Bologna 2011

Chinkap Chung, Myunghee Lee, Eun Kyung Choe, *Characterization of cotton fabric scouring by FT-IR ATR spectroscopy*, *Carbohydrate Polymers* 2004, 58 pp 417-420

Compton Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers: the effect of yarn and fabric structure in soil retention' *t.r.j.* 23 pp 418-423 1953.

Compton Hart 'The theory of soil-fiber complex formation and stability' *t.r.j.* 24 pp 263-264 1954]

D. M. Oosterhuis, J. Jernstedt, *Morphology and Anatomy of the Cotton Plant*, in «Cotton», New York 1999

D.M. 10 maggio 2000 *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*,

D.M. 27 luglio 2001 *Atto di indirizzo sui criteri tecnico-scientifici e sugli standard di funzionamento e sviluppo dei musei*,

Dario Camuffo, 1999. *Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy*. The Science of the Total Environment 236 (1999) 135-152

Dunan-Rees, 'The cleaning of historic textiles -methodological and scientific aspects' in Pertegato, F., ed., *Conservation and Restoration of Textiles Proceedings of the International Conference, Como 1980*, CISST-I.ombardy Section, 1982, pp. 191-6.

E. Heila, *The Chevreul color system*, Color Research and Application, 1991, 16, 3, pp 198-201

E. Rossi, *Misure del grado di polimerizzazione per la valutazione dello stato di deterioramento di un materiale fibroso cellulosico* AA.VV. *Dipinti su tela Metodologie d'indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993

Eastop. Brooks, Preprints icom triennial meeting Edinburgh, Scotland 1996, Working group B9 textiles. 'To Clean or Not to Clean: The Value of Soils and Creases'

EN ISO 12571 2000

Enciclopedia of Textiles, Fibres, and Nonwoven Fabrics, Editore M.Grayson, John Wiley and Sons, New York, pag. 525 (1984)

Erik Kissa, Kinetics and mechanism of detergency Part III: Effect of soiling condition an particulate soil detergency, Textile Research Journal 1979 384-389]

Ezio Martuscelli, *Degradazione delle fibre naturali e dei tessuti antichi. Aspetti chimici, molecolari, strutturali e fenomenologici*, Firenze 2006

F Monforti, R Bellasio, R Bianconi, An evaluation of particle deposition fluxes to cultural heritage sites in Florence, Italy]

F. astop, D. and Brooks, M., 'Difficult decisions in cleaning: the **evidential** value of soils and creases' in 2. *Ehemaligentreffen der Ahegg-Stiftitng, Referate der Tagung, November 1996*, Abegg-Stiftung, 1996, pp. 10-19.

F. Pertegato, *Restauro dei materiali tessili I-Controllo delle condizioni ambientali*

Francesco Pertegato, *I tessuti, degrado e restauro*, Firenze 2004

- Fujia Chem, David Porter, Fritz Vollrath, *Silk cocoon (Bombyx mori): Multi-layer structure and mechanical proprieties*, Acta Biomaterialia 2012, 8 pp 2620–2627
- G. Caneva, M.P. Nugari, O. Salvadori, *La Biologia nel restauro*, Nardini Editore, Firenze 1997
- G. Freddi et Al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **55**, 481 (1995).].
- G. Levita, *Invecchiamento Fisico dei Polimeri*, in 'Macromolecole, Scienza e Tecnologia', Vol I, V-7, pp 412-421 Pisa 1986
- Gabriele Rosso, *Colorimetria Tristimolo e misurazione strumentale del colore della carta*, 8° Corso di Tecnologia per tecnici cartari 2000/2001 pdf
- Garry Thompson, *The museum environment*, London 1978]
- Gian Maria Colonna, *Metodi per la valutazione dello stato di conservazione di manufatti in seta*, AA.VV. *Dipinti su tela e metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- Gian Maria Colonna, *Metodi per la valutazione dello stato di conservazione di manufatti in seta*, AA.VV. *Dipinti su tela e metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- Giovanna C. Scicolone, *Alcune considerazioni preliminari*, in AA.VV. *Dipinti su tela, metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- Giua Michele, *Trattato di Chimica Industriale Vol. VI Tomo 2*, Torino 1957-1963
- Giua Michele, *Trattato di Chimica Industriale Vol. VI Tomo 2*, Torino 1957-1963
- Giua Michele, *Trattato di Chimica Industriale Vol. VI Tomo 2*, Torino 1957-1963
- Giuliano Freddi, *Membrane di fibroina (bombyx mori): preparazione, caratterizzazione e applicazioni* (mail)
- <http://www.minerva.unito.it/chimica&industria/Dizionario/Supplementi01/LabSEM.htm>
- <http://www.nuance.northwestern.edu/KeckII/Instruments/FT-IR/>
- Hu X, Kaplan DL, Cebe P. Determining β -sheet crystallinity in fibrous proteins by thermal analysis and infrared spectroscopy. *Macromolecules* 2006, 39 pp 6161-6170.
- Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale (ISPRA) per Venezia (Bollettino n.8 Agosto 2009)
- J Compton, W J Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers' textile research journal 23, 1953, 418-423.

- J Compton, W J Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers' textile research journal 23, 1953, 418-423. Compton Hart 'A study of soiling and soil retention in textile fibers: the effect of yarn and fabric structure in soil retention' T.R.J 23 pp 418-423 1953. Compton Hart 'The theory of soil-fiber complex formation and stability' T.R.J. 24 pp 263-264 1954.
- J. E. McIntyre, M. J. Denton, *Fibers*, in «Encyclopedia of Polymer Science and Engineering», vol. 6, pp 647-839, John Wiley and Sons, New York (1986)
- J. R. Daniels, *Cellulose, Structure and properties*, in «Encyclopedia of Polymer Science and Engineering», pp. 90-123, Vol. 3, Edited by H.F. Mark et Al., J. Wiley&Sons, New York (1985).
- J. S. Crighton, *Textiles Conservation*, in «Polymers in Conservation», pp. 82-107, Edited by N. S. Allen, M. Edge, C. V. Horie, Royal Society of Chemistry, Bath (UK) (1992).
- Kristin Gysels, 2004. *Indoor environment and conservation in the Royal Museum of Fine Arts, Antwerp*, Belgium. Journal of Cultural Heritage 5 (2004) 221–230
- L. E. Hessler, G. V. Merola, E. E. Berkley, *Degree of polymerization of cellulose in cotton fibers*, Textile Research Journal, 1948 vol 18 n.10 pp 628-634
- M. Brooks, A. Lister, D. Eastop, T. Bennet, 'Artifact or information? Articulating the conflicts in conserving archeological textiles ICC Congress, Copenhagen, 1996
- M. H. El-Rafie et Al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **28**, 311(1983).]
- M. Romanò, G. Freddi, *Seta e microscopia a scansione*, in «Dipinti su tela», a cura di G. C. Scicolone, Nardini Editore, pp. 61-76, Firenze (1993).
- M. Romanò, G. Freddi, *Seta e microscopia a scansione*, in «Dipinti su tela», a cura di G. C. Scicolone, Nardini Editore, pp. 61-76, Firenze (1993).
- M. Tsukada, G. freddi, N. Minoura *J. of Appl. Polym. Sci.*, **51**, 823 (1994).
- Minolta, *La comunicazione precisa del colore. Il controllo del colore: dalla sensazione alla strumentazione*, 1994 Milano
- Norma ISO 565
- Ottorino De Lucchi, *Appunti di lezione chimica dei pigmenti e dei coloranti*, Scienze Chimiche per la Conservazione ed il Restauro A.A. 2011/2012

- P B Hatchfield 'Pollutants in the museum environment, practical strategies for problem solving in design exhibition and storage' London: Archetype Publications 2002 LIBRO. J. Tetreault 'Airborne pollutants in museums, galleries and archives: risk assessment, control strategies and preservation management'. Ottawa CCI
- Paolo Calivini, dispense di lezione, Scienze Chimiche per la Conservazione ed il Restauro A.A. 2011/2012
- Paolo Calvini, *Dispense corso di laurea in Scienze e tecnologie chimiche per la conservazione ed il restauro*, A.A. 2006-2007
- Paolo Calvini, *Dispense corso di laurea in Scienze e tecnologie chimiche per la conservazione ed il restauro*, A.A. 2006-2007
- Pedemonte E., Princi E., Vicini S., *Fibre Tessuti e Moda*, Venezia 2012
- Piero Fiorenzani, *Ricerca Il Colore Gennaio*, 2005 pdf
- Preprints icom triennial meeting Edinburgh, Scotland 1996, Working group B9 textiles. Eastop. Brooks, 'To Clean or Not to Clean: The Value of Soils and Creases'].
- Quaglierini Carlo, *Chimica delle fibre tessili*, Bologna 2012
- Quaglierini Carlo, *Chimica delle fibre tessili*, Bologna 2012
- Quaglierini Carlo, *Manuale di Merceologia Tessile*, Bologna 2007
- R. Bellucci, A. Tozzi, B. Radicati, *Le tecniche di indagine colorimetriche: un'applicazione e una prospettiva di ricerca*, Colorimetria e beni culturali, Atti dei convegni di Firenze 1999 e Venezia 2000
- R. Feller, *Accelerated Aging – photochemical and thermal aspects* -, USA 1994 disponibile su www.getty.edu
- Randall R. Bresee, *General Effects of Ageing on Textiles*, JAIC 1986, Volume 25, Number 1, Article 4 (pp. 39 to 48) disponibile su http://cool.conservation-us.org/jaic/articles/jaic25-01-004_2.html
- S. Adams 'Dust deposition and measurement – a modified approach' Environmental Technology 1997 n. 18 pp 345-50.
- S. Landi, *The Textiles Conservator's Manual*», Butterworth Oxford (1999)].
- S. Lo Russo, B. Schippa, «Le Metodologie Scientifiche per lo Studio dei Beni Culturali», Bulzoni Editore, Roma (1992)].

- S. Palazzi, *Colorimetria. La scienza del colore nell'arte e nella tecnica*, Firenze 1995
- Salvatore Lorusso, Bruno Shippa, *Le Metodologie Scientifiche per lo Studio dei Beni Culturali: diagnosi e valutazione dei beni culturali*, Roma 1992
- SNV 195 595 del 1968
- Stuart J. Adams, D. Ford Monitoring of deposited particles in cultural properties: the influence of visitors, *Atmospheric Environment* 35 (2001) 4073-4080]
- T. Haga et Al., *J. Appl. Polym. Sci.*, **78**, 364 (2000).
- Timar-Balazsy, j. and Eastop, D., *Chemical Principles of Textile Conservation*, Butterworth-Heinemann, London, 1998
- Um IC, Kweon HY, Park YH, Hudson S. Structural characteristics and properties of the regenerated silk fibroin prepared from formic acid. *International Journal of Biological Macromolecules* 2001, 29 pp 91-97.
- UNI 1932
- UNI 8282
- V.G. Colombo, *Appunti di Tecnologia e Merceologia Serica*, Milano 1945
- Vasconcelos A, Freddi G, Cavaco-Paulo A. Biodegradable materials based on silk fibroin and keratin. *Biomacromolecules* 2008, 9 pp 1299-1305.
- Veronica Richter, *Indagine condotta con microscopia elettronica a scansione su materiali fibrosi cellulosici in AA.VV. Dipinti su tela, metodologie di indagine per i supporti cellulosici*, Firenze 1993
- Villavecchia G. V., *Trattato di Chimica Analitica*, Milano 1967
- W. J. Roberts, *Cotton*, in «Encyclopedia of Textiles, Fibers, and Nonwoven Fabrics», New York 1984
- Walter J. Moore, *Chimica Fisica*, Padova 1967
- Watt J. , Hamilton R., *The effects of air pollution on Cultural Heritage*, 2009
- www.uniroma2.it/didattica/MA2/deposito/spettroscopia_infrarossa.pdf
- Y H Yoon, P Brimblecombe 2000b 'Dust at Felbrigg Hall, Views 32 National Trust pp 31-32]
- [H Lloyd, C M Grossi, P Brimblecombe 'Low-technology dust monitoring for historic collection' *Journal of the Institute of Conservation* vol 34 n 1 2011 pp 104-114]

- Y H Yoon, P. Brimblecombe 2000 'Contribution of dust at floor level to particle deposit within the Sainsbury centre for visual arts' *Studies in Conservation* 45 pp 127-137].
- Zendri, appunti di lezione, Scienze Chimiche per la Conservazione ed il Restauro A.A. 2011/2012
- V. Riganti, E. Galloti, S. Lorusso, L. Gallotti, M. Marabelli, *Science and Technology for Cultural Heritage*, **4(1)**, 51 (1995)].
- R. Massafra, G. M. Colonna, A. Bianchi Svilokos, *La Seta*, **2**, 5 (1990).][E. Martuscelli, «Le fibre di polimeri naturali nell'evoluzione della civiltà. Le fibre di seta», Monografie Scientifiche, Serie Scienze Chimiche, CNR, Roma (1999).
- Adriana Bernardi, *Conservare opere d'arte. Il microclima negli ambienti museali*,]
- Anna Worobiec *Microchemical Journal* 90 (2008) 99-106 *A seasonal study of atmospheric conditions influenced by the intensive tourist flow in the Royal Museum of Wawel Castle in Cracow, Poland*].
- Barbara krupinska, Anna Worobiec, Giuliana Gatto Rotondo, Assestmenti of the air quality ,Assestement of the air quality (NO₂, SO₂, O₃ and particulate matter) in the Plantin-Moretus Museum/ Print Room in Antwerp, Belgium, in different season of the year, *Microchemical Journal* 102 (2012) 49-53]
- Catherine Nightingale 'Designing an Exhibition to minimise risks to costume on open display' *The Conservator* n. 29 2005/6 35-49]
- Kristin Gysels, Felix Deutsch, René Van Grieken Characterisation of parti culate matter in the royal museum of fine arts, Antwerp, Belgium
- H Lloyd, K Lithgow, P Brimblecombe, Y H Yoon K Frame B Knight 2002 'The effects of visitor activity on dust in historic collection' *The Conservator* 26 pp 72-82]

INDICE DELLE TABELLE E DELLE FIGURE DIVISE PER CAPITOLI

1. Classificazione delle fibre tessili

Figure

- [1.1] Classificazione fibre tessili
- [1.2] Immagini relative alla fase di maturazione della pianta di cotone
 - a) Frutto a capsula
 - b) Deiscenza della capsula di fibre –bambagia
 - c) Capsula matura aperta costituita da quattro logge
- [1.3] Immagini SEM delle varie fasi di sviluppo delle fibre di cotone:
 - a) ovulo di cotone il giorno della fioritura;
 - b) fibre iniziali (primordia), il giorno della fioritura;
 - c) fibre di cotone all'inizio del giorno dopo quello della fioritura;
 - d) fibre di cotone alla fine del giorno dopo quello della fioritura;
 - e) fibre di cotone tre giorni dopo quello della fioritura;
 - f) fibre di cotone mature (circa 48 giorni dal giorno della fioritura);

Scala delle barre: 200 μm in (a), 30 μm in (b-f)
- [1.4] Struttura fibra di cotone
- [1.5] Micrografia elettronica fibra di cotone disidratata
- [1.6] Micrografia elettronica sezione trasversale fibra di cotone disidratata
- [1.7] manca
- [1.8] Manca
- [1.9] Struttura della cellulosa reale forma lineare
- [1.10] Legami intermolecolari cellulosa
- [1.11] Parte amorfa e cristallina in una micro fibrilla* e corrispondente cella elementare a simmetria monoclinica avente le dimensioni $a = 8,35 \text{ \AA}$, $b = 10,3 \text{ \AA}$, $c = 7,9 \text{ \AA}$ e $\beta = 84^\circ$.
- [2.12] [2.11]
- [1.12] Ciclo di vita del Filugello
- [1.13] Distribuzione schematica delle anse di bava del bozzolo
- [1.14] Particolare bavelle di fibroina ancora attorniate dal loro involucri di sericina
- [1.15] Micrografia elettronica di una sezione trasversale di fibra di seta
- [1.16] Micrografia elettronica di una fibra di seta sgommata
- [1.17] Sezione trasversale di fibre di seta sgommata
- [1.18] Struttura primaria fibroina
- [1.19] Struttura spaziale fibroina

Tabelle

- [1.1] Visione al microscopio cotone
- [1.2] Proprietà chimico-fisiche del cotone
- [1.3] Caratteristiche microscopiche seta e seta sgommata
- [1.4] Composizione chimica della seta
- [1.5] Composizione amminoacidica fibroina e sericina
- [1.6] Proprietà chimico fisiche della seta

2. Conservazione dei tessuti di cotone e seta in ambiente museale

Figure

- [2.1] a) Diagramma che evidenzia l'energia di dissociazione di alcuni legami correlata alla lunghezza d'onda delle radiazioni incidenti [1.22].; b) Curve di assorbanza in funzione della lunghezza d'onda della luce incidente (dal visibile al lontano ultra-violetto): a) legno; b) lignina; c) cellulosa
- [2.2] Curva di equilibrio umidità specifica, umidità relativa. Curva A-assorbimento, Curva B-Desorbimento, Curva C –Intermedio
- [2.3] Curve sforzo-deformazione per diverse fibre naturali in relazione a vari tassi di umidità relativa
- [2.4] Modificazione della curva di cedevolezza a seguito del processo di invecchiamento fisico durante una prova di sollecitazione
- [2.5] Micrografie elettroniche a scansione di: un tessuto in seta con evidenti fenomeni di sfibrillazione delle fibre derivanti da processi di abrasione meccanica
- [2.6] Estremità fibra di cotone conoidale dovuta a deterioramento meccanico
- [2.7] Fibre di seta degradate fotochimicamente
- [2.8] Immagine SEM di un insieme di fibre di seta. L'esposizione al calore produce deformazioni di tipo plastico che, nelle zone di frattura assumono un aspetto fungiforme
- [2.9] Particolare tessuto di seta degradato da agenti chimici a reazione alcalina
- [2.10] Formazione link tra una particella di sporcizia e una fibra

Tabelle

- [2.1] Temperatura di transizione vetrosa di fibre naturali allo stato secco
- [2.2] Tenori di umidità di seta in percentuale e cotone al variare dell'umidità relativa ambientale
- [2.3] Specie biodeteriogene delle fibre proteiche
- [2.4] Funghi più comuni per tessuti cellulosici
- [2.5] Gruppi di insetti più comuni nei confronti delle fibre proteiche
- [2.6] Indicazione degli insetti che comunemente attaccano le fibre cellulosiche
- [2.7] Parametri ambientali museali da considerare e loro derivazione
- [2.8] Tipologia di inquinanti particellari in ambiente museale
- [2.9] Categorie fotosensibilità di manufatti artistici e rispettivi parametri di illuminamento massimo
- [2.10] Parametri microclimatici ottimali per diverse categorie di manufatti
- [2.11] Parametri microclimatici ottimali per la prevenzione di attacchi microbiologici
- [2.12] Valori limite raccomandati di inquinanti aerodispersi

3. Parte sperimentale

Figure

- [3.1] Schema SEM
- [3.2] Spazio di Munsell
- [3.3] Spazio colore CIE L*C*h*
- [3.4] Schema funzionamento ATR-IR, particolare della zona del cristallo
- [3.5] Foto del primo piano nobile di Palazzo Fortuny; i campioni sono stati collocati sopra gli armadi
- [3.6] Localizzazione a Venezia di Palazzo Fortuny e immagine della facciata gotico-veneziana
- [3.7] Illuminazione interna palazzo Fortuny. A sinistra lampada Fortuny a luce riflessa e diffusa, a destra lampadario Fortuny

- [3.8] Piantina del salone principale al piano nobile di Palazzo Fortuny con due particolari della sala che mettono in risalto l'illuminazione adottata all'interno dello spazio espositivo
- [3.9] Datalogger Tinytag Ultra 2 TGU4500 utilizzato per il monitoraggio a Palazzo Fortuny
- [3.10] Collocazione del datalogger all'interno del salone principale del primo piano nobile di Palazzo Fortuny
- [3.11] luxmetro utilizzato per le misurazioni d'illuminamento
- [3.12] Punti di registrazione dell'illuminamento
- [3.13] Struttura a sostegno dei provini di tessuto sporcati artificialmente che devono subire un ciclo termo igrometrico stabilito
- [3.14] Contenitore per cicli termo igrometrici con termo igrometro e soluzione satura sul fondo

Tabelle

- [3.1] Dimensioni provini per le diverse prove
- [3.2] Riepilogo provini in seta
- [3.3] Riepilogo provini in cotone
- [3.4] Caratteristiche tecniche Tinytag Ultra2 TGU4500
- [3.5] Caratteristiche tecniche del luxmetro utilizzato per le misure d'illuminamento
- [3.6] Cicli termoigrometrici

4. Risultati e discussioni

Figure

- [4.1] spettro ATR-IR del campione di cotone
- [4.2] spettro ATR-IR del campione di seta
- [4.3] Andamento microclimatico salone al piano nobile di palazzo Fortuny
- [4.4] Andamento temperatura interna/esterna a Palazzo Fortuny a sinistra mentre l'umidità è mostrata nell'immagine a destra
- [4.5] Collocazione del datalogger all'interno del salone principale del primo piano nobile di Palazzo Fortuny
- [4.6] deposizioni Palazzo Fortuny
- [4.7] Agglomerati di natura organica
- [4.8] Particelle tonde
- [4.9] particelle contenenti Sali
- [4.10] particelle organiche
- [4.11] particelle contenenti silico-alluminati
- [4.12] particelle contenenti metalli
- [4.13] Spettro IR delle polveri raccolte a palazzo Fortuny
- [4.14] Spettro IR delle polveri con cera d'api
- [4.15] Spettro IR della parte fibrosa delle polveri
- [4.16] macro-occlusione formatesi tra le fibre di seta
- [4.17] macro-occlusioni tra le fibre di cotone
- [4.18] micro-occlusioni che si formano a causa del deposito di particolato tra le irregolarità delle fibre di cotone.
- [4.19] Particolare di alcune fibre di cotone a seguito di tre mesi di esposizione in museo
- [4.20] fenomeno di cementazione tra particolato e fibre di seta
- [4.21] Variazione L* durante i mesi di monitoraggio in museo. Con l'indicatore ● viene rappresentato il tessuto in cotone e con indicatore ▲ il tessuto in seta

- [4.22] Variazione C* durante i mesi di monitoraggio in museo. Con l'indicatore ● viene rappresentato il tessuto in cotone e con indicatore ▲ il tessuto in seta
- [4.23] Manca
- [4.24] Manca
- [4.25] Variazione percentuale dell'allungamento alla forza massima dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro
- [4.26] Variazione percentuale dell'allungamento alla forza massima dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro
- [4.27] Variazione percentuale della tenacità dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro
- [4.28] Variazione percentuale di allungamento a rottura dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro
- [4.29] curve di riflettanza R.U. 60% COTONE A SINISTRA SETA A DESTRA blu pre-deposizione, rosso post-deposizione, verde post-trattamento
- [4.30] curve di riflettanza R.U. 90% COTONE A SINISTRA SETA A DESTRA blu pre-deposizione, rosso post-deposizione, verde post-trattamento
- [4.31] Spettri del tessuto di cotone trattato con polveri e del tessuto di cotone non trattato a seguito del ciclo al 60% di umidità relativa
- [4.32] Spettri del tessuto di seta trattato con polveri e del tessuto di cotone non trattato a seguito del ciclo al 60% di umidità relativa
- [4.33] Spettri del tessuto di cotone con e senza deposizioni a seguito del ciclo al 90% di umidità relativa
- [4.34] Spettri del tessuto di seta con e senza deposizioni a seguito del ciclo al 90% di umidità relativa
- [4.35] Variazione percentuale della tenacità dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro
- [4.36] Variazione percentuale dell'allungamento alla forza massima dei provini di cotone. Direzione A rosso chiaro, direzione B rosso scuro
- [4.37] Variazione percentuale della tenacità dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro
- [4.38] Variazione percentuale di allungamento a rottura dei provini di seta. Direzione A blu chiaro, direzione B blu scuro

Tabelle

- [4.1] Osservazione del tessuto e delle fibre allo stereo microscopio e al microscopio in luce polarizzata
- [4.2] Osservazione dei tessuti di cotone
- [4.3] Osservazione dei tessuti di seta
- [4.4] Caratteristiche meccaniche provini di cotone
- [4.5] Caratteristiche meccaniche provini di seta
- [4.6] Dati grado di polimerizzazione museo
- [4.7] Valori di temperatura e umidità riferiti alla sala principale al primo piano di Palazzo Fortuny
- [4.8] valori d'illuminamento rilevati nel salone principale di Palazzo Fortuny
- [4.9] Immagini effettuate allo stereo microscopio dei depositi polverulenti
- [4.10] Tipologie di particolato
- [4.11] immagini dei tessuti allo stereomicroscopio per ciascun mese di deposizione
- [4.12] immagini del tessuto di seta e cotone a seguito dei tre mesi di stazionamento in museo
- [4.13] variazioni dei principali parametri cromatici nei campioni stazionati a Palazzo Fortuny

- [4.14] manca
- [4.15] manca
- [4.16] Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di cotone
- [4.17] Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di seta
- [4.18] ?
- [4.19] Flsdhg
- [4.20] variazioni dei principali parametri cromatici nei campioni sottoposti a trattamenti
- [4.21] Dati colorimetrici acquisiti
- [4.22]
- [4.23] Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di cotone
- [4.24] Dati relativi alle prove fisico-meccaniche dei provini di cotone