

*Mario Verdelli - Nadia Presenti - Marco Goretti*

# TECNICHE AVANZATE DI SOTTOVUOTO NEL RESTAURO DEI DIPINTI

~ **PARTE I e II** ~

Ricerche - Sperimentazioni - Applicazioni

a cura di

Mario Verdelli

© 2017

Il seguente testo per il web, tratto dall'omonimo volume pubblicato da Edifir nel 2007 e 2000, è stato completamente riveduto e corretto, ed è dedicato a Michelangelo Verdelli

## GLI AUTORI

MARIO VERDELLI - Specializzato nelle nuove tecnologie della conservazione dei dipinti, in particolare nelle tecniche del sottovuoto, svolge attività di ricerca e di consulenza per enti pubblici e privati, inoltre si presta all'attività didattica con conferenze e seminari.

NADIA PRESENTI - Dal 1988 al 1991 frequenta il corso regionale di formazione professionale della Regione Toscana per la conservazione dei Beni Culturali.

Negli ultimi due anni del corso, si specializza nella conservazione e nel restauro dei dipinti su tela e su tavola sotto la direzione del Dr. Marco Ciatti e degli insegnanti dell'OPD.

Dal 1991 lavora come professionista per musei, enti ecclesiastici e collezionisti privati.

Collabora con incarichi diretti con la Soprintendenza di Siena, Arezzo, Pisa, Modena.

MARCO GORETTI - Laureato in Ingegneria Nucleare presso l'Università di Pisa, ottiene numerosi incarichi dal Centro di Ricerca delle Comunità Europee di Ispra e dall'ENEA; effettua studi sulla sicurezza, affidabilità e compatibilità ambientale di componenti e impianti. Come consulente industriale, si occupa di problematiche inerenti i controlli di qualità dei processi produttivi e le tecniche di controllo statistico.

# INDICE

## (Parte I e II)

- 3.    **PREFAZIONE**
  
- 5.    **(Parte I) - INTRODUZIONE AL SOTTOVUOTO**
  
- 12.   **(Parte II) - IL SOTTOVUOTO, SCIENZA E TECNICA NEL  
RESTAURO**

  - 12.    1 - Aspetti generali
  - 13.    2 - Gli strumenti di misura
  - 17.    3 - Sistemi di sottovuoto
  - 20.    4 - Prove sperimentali di sottovuoto
  - 20.        *Prova 1. Misurazioni delle pressioni nella busta*
  - 22.        *Prova 2. Misurazioni delle pressioni sulla superficie di un piano*
  - 23.        *Prova 3. Misurazioni delle pressioni attigue a un piano*
  - 24.        *Prova 4. Un nuovo sistema di aspirazione*
  - 27.        *Prova 5. Sistemi di aspirazione tradizionali*
  - 28.        *Prova 6. Cause di disomogeneità della pressione*
  - 29.    4.1 - Appendice alle prove. Controlli e verifiche
  - 30.    5 - Schema delle attrezzature
  - 31.    6 – Tavola dei fattori di conservazione delle unità di misura di vuoto e di  
pressione

## PREFAZIONE

(edizione del 2000)

Quando con Nadia, mia moglie, decidemmo di “raccontare” le nostre ricerche sulle tecniche del sottovuoto stavamo lavorando al dipinto di San Donato del Vasari; il Santo ci guardava con il suo occhio grande e bellissimo, comprensivo e severo al tempo stesso, e sembrava che dicesse: «Attenti a quello che state facendo, potrebbe portarvi verso la perdizione!».

Prudentemente ci spostammo verso la finestra, dove l’occhio del Santo faticava ad arrivare direttamente, anche se quello sguardo era comunque presente e riempiva tutta la grande stanza; in fondo erano ormai dieci anni che praticavamo la tecnica del sottovuoto sui dipinti su tela e su tavola, annotando scrupolosamente la storia di ogni intervento, comprese le innumerevoli prove e campioni.

Raccogliere il materiale prodotto, ordinarlo, preparare un articolo sembrava un lavoro di qualche giorno, un paio di settimane al massimo, e sarebbe stato molto utile anche per noi riordinare quella massa di dati e documenti che avevamo prodotto; in molti casi il materiale fotografico era veramente interessante e, sarebbe stato un peccato lasciarlo inutilizzato dentro i cassette.

Ed ecco che man mano che venivano fuori i documenti, le fotografie, gli appunti, ci rendevamo conto che da un lato avevamo molto più materiale di quello che in un primo momento pensavamo, dall’altro erano presenti molte lacune dal punto di vista scientifico. Ecco, San Donato ci stava ammonendo, ci stava ricordando il grande Rinascimento toscano, premessa alla rivoluzione di Galileo, e a una cultura scientifica alla quale ci sentiamo di appartenere, per cui ogni asserzione deve essere documentata e provata, ogni prova rigorosamente descritta e ripetibile da altri. Eravamo sicuri del fatto nostro, delle nostre tecniche, dei lavori realizzati ma quanti dubbi avremmo sollevato, quante domande e magari anche contestazioni. Stavamo mettendo in dubbio la bontà di alcune procedure di restauro praticate da anni in tutto il mondo e la cosa poteva anche essere presa per il verso sbagliato, magari suscitando polemiche che invece volevamo assolutamente evitare. Il nostro scopo era, ed è, quello di dare un contributo alla ricerca di nuove tecniche di restauro, lontano da qualsiasi forma di polemica.

Iniziammo quindi un intenso lavoro di completamento della sperimentazione, che ci sembrava necessaria per supportare le nostre metodologie, registrando per ogni prova i dati d’ingresso, i parametri, i risultati ottenuti, le attrezzature utilizzate. Lo sguardo del Santo approvava, era una dimostrazione di onestà scientifica, e l’onestà, com’è noto, è uno dei requisiti per il paradiso; ma il monito «Attenti a quello che fate» non era sparito anzi, adesso cominciavamo a capirne a pieno il significato. Non sempre l’esito delle prove dava i risultati attesi, e questo comportava la ripetizione, la modifica dei parametri, nuove interpretazioni e poi, quasi inutile dirlo, ogni momento nascevano nuove curiosità, tentativi di migliorare le attrezzature e modifiche alle procedure di esecuzione delle prove.

Sono quindi trascorsi cinque anni e siamo passati dall'idea dell'articolo alla realizzazione di questo volume che riteniamo possa rappresentare un vero e proprio manuale, ordinato in quattro parti. Nella prima parte, si sono introdotti i principali elementi del sottovuoto. Nella seconda, si sono studiate le tecniche operative. Nella terza, gli effetti delle tecniche su modelli di dipinti. Nella quarta, si sono descritti le applicazioni pratiche di restauro e i risultati. Una breve introduzione (aspetti generali) per ogni capitolo li ha resi autonomi e consultabili in modo indipendente. Nel testo si prendono in considerazione specificamente le tecniche del sottovuoto nei dipinti su tavola; tuttavia, nei primi due capitoli si è parlato anche dei dipinti su tela e, in particolare, nel capitolo "Introduzione al sottovuoto" per spiegare meglio i principi generali della pressione, e nel capitolo "Il sottovuoto, scienza e tecnica nel restauro" perché questa nostra ricerca scientifica è nata per essere utilizzata in entrambe le tipologie. Con la sperimentazione del capitolo "La ricerca di nuove metodologie", abbiamo pensato di dare alcuni riferimenti nel campo del consolidamento in sottovuoto. Non sarebbe stato possibile realizzare questi studi direttamente sui dipinti, non solo perché li avremmo danneggiati sottoponendoli a innumerevoli prove, ma perché non si sarebbero ottenuti dei parametri di riferimento perché ogni dipinto è unico e rappresenta un caso a sé. Invece, compiendo uno studio su modelli tutti identici, sono state individuate delle misure certe e ripetibili; di contro, trasferire i dati della ricerca nelle attività di restauro non è facile né automatico, come ripeteremo più volte nel corso di questo lavoro. Un altro aspetto che vogliamo evidenziare, consiste nel fatto che abbiamo riportato molti dati nel testo non solo per permettere una verifica scientifica ma anche per consentire la possibilità di interpretare i risultati in funzione delle conoscenze soggettive in modo da ottenere confronti costruttivi con altre esperienze di ricerca e di pratica. In ogni caso saremo già molto soddisfatti se questo contributo servirà a colmare una lacuna informativa (le pubblicazioni sono scarse e frammentarie) o a stimolare l'approfondimento delle tecniche di consolidamento. È questo, un campo molto interessante che nonostante il progresso tecnologico affronta grandi difficoltà oggettive. Riteniamo che tali difficoltà possano essere in gran parte superate attraverso la ricerca e la sperimentazione, l'utilizzo di specifici materiali e consolidanti progettati per il restauro, le effettuazioni di verifiche sperimentali degli effetti e di controlli prolungati nel tempo delle applicazioni pratiche.

*Mario Verdelli*

## ~ PARTE I ~

### INTRODUZIONE AL SOTTOVUOTO

*Mario Verdelli*

L'estrazione dell'aria da un recipiente sigillato crea all'interno il vuoto, e l'atmosfera esterna inizia a premere sulle pareti, in alto, in basso, lateralmente, e se l'estrazione dell'aria è effettuata con una pompa dotata di un'apposita strumentazione (esempio un manometro sulla linea di aspirazione), potremo conoscere il valore del vuoto che si è realizzato.

Idealmente, quando tutta l'aria all'interno del recipiente sarà estratta, la pressione atmosferica eserciterà una forza di circa 1 kg per cm<sup>2</sup> sulle pareti, senza essere controbilanciata dalla pressione interna. In altri termini sarà la stessa pressione del nostro contenitore a pressione atmosferica immerso nel mare alla profondità di circa 10 metri<sup>1</sup>.

Nella conservazione delle opere d'arte, il sistema del sottovuoto è impiegato da oltre cinquant'anni<sup>2</sup> per le più svariate applicazioni tecniche e scientifiche.

Nei dipinti su tela e su tavola, la tecnica consiste semplicemente nel togliere l'aria attorno al manufatto, in modo da sfruttare la pressione esterna che si esercita su di esso per compiere numerose operazioni di restauro.

Le più importanti sono la fermatura del colore<sup>3</sup>, il consolidamento del supporto, il miglioramento della superficie, l'applicazione di strisce perimetrali, la foderatura, quest'ultime solo per i dipinti su tela.

Altre applicazioni del sottovuoto interessano le indagini diagnostiche<sup>4</sup>, la disinfestazione dei parassiti dai supporti, l'imballaggio, la conservazione dei manufatti in teche, ecc.

---

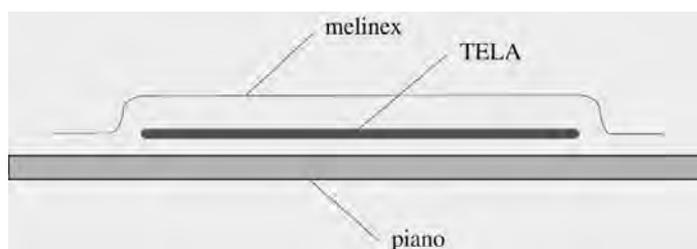
1 - Nella fisica, celebre è l'esperienza con la quale Evangelista Torricelli (Faenza 1608 - Firenze 1647) dimostrò l'esistenza della pressione atmosferica. Il grande scienziato utilizzò un sottile tubo chiuso a un'estremità che riempì di mercurio, elemento ca. 14 volte più pesante dell'acqua; dopo aver accuratamente fatto uscire tutta l'aria dal tubo, ne chiuse l'estremità aperta con un dito e lo capovoltò in una bacinella contenente anch'essa mercurio. Fece osservare, allora, che il livello del mercurio nel tubo decresce fino ad arrestarsi ad una altezza di ca. 76 cm dalla superficie libera del mercurio contenuto nel recipiente. Dalla misura di tale altezza risalì, applicando la legge di Stevino, alla misura della pressione atmosferica che è espressa dal prodotto del peso specifico del mercurio per l'altezza  $h$  della colonna.

2 - L'idea di adoperare la pressione atmosferica invece di quella meccanica, per non schiacciare l'impasto di colore nelle rintelature, è stata introdotta nel 1955 da R. E. Straub e S. Jones Rees ma, come accade spesso, risolto un problema ne sorgono di nuovi, così entrata in uso la tecnica iniziano ad emergere effetti non previsti e piuttosto complessi.

3 - Con "fermatura del colore" viene tecnicamente e generalmente definito l'intervento di adesione e consolidamento degli strati preparatori e pittorici.

Le operazioni di restauro in precedenza accennate si possono eseguire con due tecniche.

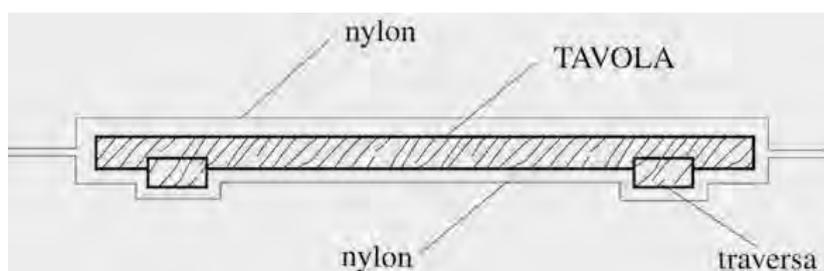
La prima tecnica, relativamente al trattamento dei dipinti su tela (figura 1), consiste nel valersi di un piano rigido, che può essere anche quello di una tavola calda, nel quale il dipinto è appoggiato in diverse simmetrie. Il tutto è coperto da un foglio trasparente di melinex<sup>5</sup> sigillato con un nastro di plastilina.



*Fig. 1. Sezione di un sistema di sottovuoto relativo al trattamento dei dipinti su tela: piano rigido, dipinto su tela, foglio di melinex*

La seconda tecnica, relativamente al trattamento dei dipinti su tavola (figura 2), consiste nell'introdurre l'opera in una busta<sup>6</sup>, costruita con fogli di melinex o più generalmente di nylon<sup>7</sup>. Questa metodica può applicarsi con qualche difficoltà anche alle sculture lignee.

Per la realizzazione del vuoto, occorre inserire in questi sistemi uno o più tubi collegati a una pompa di aspirazione.



*Fig. 2. Sezione di una busta di nylon che contiene un dipinto su tavola con traverse*

---

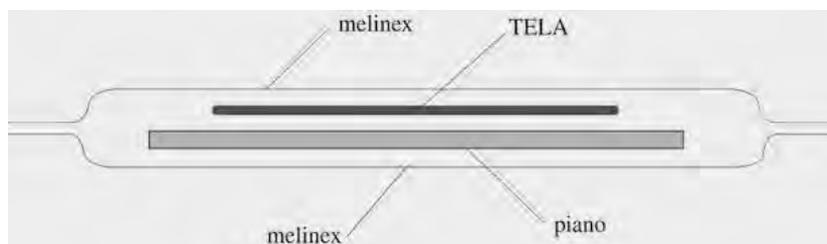
4 - Nelle riprese radiografiche, il sottovuoto mantiene a contatto le lastre fotografiche sulla superficie di un dipinto. - Alfredo Aldrovandi e Marcello Picollo, *Metodi di documentazione e indagini non invasive sui dipinti*, Il Prato, Padova (1999), pp. 55-62.

5 - Naturalmente questo è uno schema semplificato, in quanto, secondo le varie tecniche di restauro, insieme al dipinto si possono introdurre tutta una serie di materiali come tele, telai, piani elastici, carte siliconate, ecc.

6 - Il principio della busta è stato introdotto per la prima volta da G. Berger nel 1964.

7 - Dipende dalle tecniche: il melinex monosiliconato è adatto per le resine sintetiche e non si deforma alle temperature ma è fragile; il nylon è sensibile al calore ma è più elastico e resistente ed è indicato nel consolidamento e la chiusura con colletta a caldo nelle tavole.

Il sistema della busta può risultare pratico anche per i dipinti su tela (figura 3), e consiste nell'introdurvi all'interno un piano rigido o semi rigido<sup>8</sup> per l'appoggio solido della tela sprovvista del telaio, ma attenzione: se durante il sottovuoto si eliminasse il piano, la pressione atmosferica eserciterebbe delle forze disuniformi sulla busta deformandola (figura 4), ciò non permetterebbe di operare correttamente. Mentre se il dipinto è inserito nella busta tensionato in un telaio interinale, non solo la busta non si deforma, ma la pressione atmosferica si distribuisce nella stessa misura sui rilievi e sugli interstizi della trama del verso della tela, come dalla parte del recto ugualmente sui rilievi e sulle depressioni della superficie pittorica. Questo sistema è specialmente sfruttato nelle foderature, dove non si vuole premere la tela di rifodero e del dipinto (tensionato) sul piano (figura 5).



*Fig. 3. Sezione di una busta di melinex che contiene un piano rigido e un dipinto su tela*



*Fig. 4. Deformazione di una busta sottoposta a depressione*

---

8 - Per alcune operazioni si possono utilizzare piani di gomma tipo Pirelli spessi 5 mm.

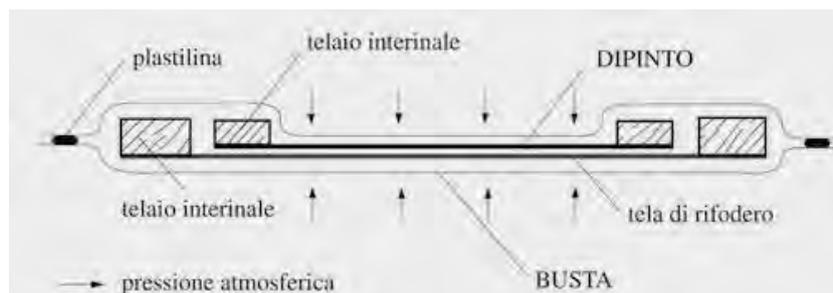


Fig. 5. Sezione di una busta che contiene una tela di rifodero e un dipinto su tela tensionati su telai interinali

Immaginiamo ora di avere un dipinto su tela che misura 200 cm x 150 cm, pari a 30.000 cm<sup>2</sup>, appoggiato sopra un piano e coperto da un foglio di melinex (figure 1 e 3). Estruendo completamente l'aria presente tra il melinex e il piano, la pressione atmosferica raggiungerà il valore di un 1 kg/cm<sup>2</sup> sul melinex di copertura e di conseguenza sulla tela che sarà compressa sul piano, dal retro o dal davanti, secondo il verso in cui è stata collocata. La forza risultante sarà pari a circa 1 kg/cm<sup>2</sup> x 30.000 cm<sup>2</sup> = 30.000 kg (10 tonnellate/m<sup>2</sup>); anche se decidiamo di effettuare un sottovuoto equivalente ad una pressione di 0,1 kg/cm<sup>2</sup>, pari al 10% del sottovuoto totale, il peso complessivo sarà di 3.000 kg.

Per questo prima di operare bisogna sempre tener presente l'enorme potenzialità e gli effetti della pressione introdotti con questa tecnica, ma non bisogna nemmeno farsi impressionare dai dati relativi all'intera superficie. Infatti, parlando di sottovuoto tra il 10% e il 5%, la pressione per cm<sup>2</sup> oscilla tra circa 100 g e 50 g; cioè una pressione inferiore a quella esercitata (a parità di superficie) con un ferro riscaldato leggero o con un termocauteriu nelle normali operazioni di restauro. Si potrebbe osservare che l'introduzione della busta anche per i dipinti su tela, come prima accennato (vedi figura 5), riduce i problemi indotti dalla pressione del sottovuoto ma non li elimina del tutto. Mentre pressioni inferiori al 5% del sottovuoto totale sono a nostro avviso poco utili per alcune lavorazioni, come per la distribuzione dell'adesivo nelle fermature del colore nei dipinti su tavola, pressioni che raggiungono anche 1% del sottovuoto totale sono ad esempio sfruttate dalla tavola a bassa pressione a circolazione d'aria per il consolidamento e la foderatura a freddo dei dipinti su tela. Comunque queste pressioni così deboli ci sembrano più assimilabili all'"effetto ventosa" che ad un sottovuoto realizzato con complessi sistemi di aspirazione.

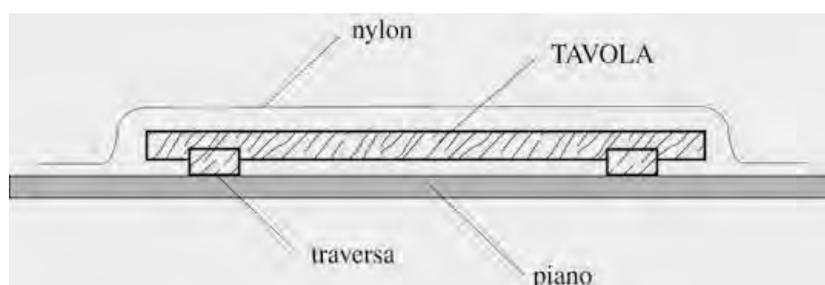
Esiste un problema importante nella tecnica del sottovuoto, nata e principalmente utilizzata per distribuire sul dipinto una pressione uniforme; in realtà, in sistemi di sottovuoto come quelli in precedenza descritti, la pressione esercitata sull'intera area non è omogenea, già tra il 10% e il 5% del sottovuoto totale è molto probabile che la pressione non si ottenga in alcune parti del sistema.

Realizzare il vuoto in un contenitore rigido come per esempio una sfera di metallo, è una cosa relativamente semplice e la pressione è sempre uniforme su tutta la superficie, mentre è più complesso estrarre l'aria presente nell'intercapedine che si

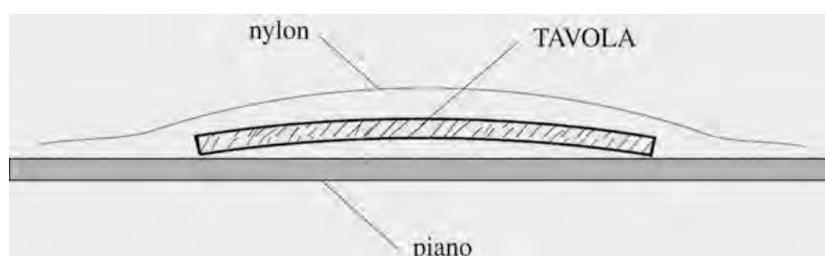
viene a creare tra la superficie del dipinto e il foglio di melinex o di nylon, appoggiato sulla superficie stessa, come illustrato per esempio nella figura 2.

Nel prossimo capitolo affronteremo l'argomento in dettaglio.

Se esiste una letteratura che descrive gli effetti di schiacciamento causati dal sottovuoto per i dipinti su tela<sup>9</sup>, poco o nulla è stato documentato degli effetti del vuoto per i dipinti su tavola. In passato questa mancanza di riferimenti ha portato a commettere errori grossolani, come il posizionare il dipinto con supporto ligneo e traverse sopra un piano (figura 6), senza rendersi conto che con tale configurazione si creavano pressioni e stati tensionali enormi.



*Fig. 6. Sezione di un sistema di sottovuoto relativo ai dipinti su tela, erroneamente applicato a un dipinto su tavola con traverse*



*Fig. 7. Sezione di un sistema di sottovuoto relativo ai dipinti su tela, erroneamente applicato a un dipinto su tavola imbarcato*

---

9 - A. J. Cummings e G. A. Hedley in *Surfaces texture changes in vacuum linings: experiments with raw canvas*, Conference on Comparative linig techniques, Greenwich, aprile 1974, definiscono sette diverse forme di cambiamenti nei dipinti su tela:

1. Schiacciamento dell'impasto (Flattening of Impasto)
2. Deformazione a forma di "fossi" (Moating)
3. Smarrimento della tessitura della tela (Weave Texture Loss)
4. Sottolineamento della tessitura della tela (Weave Emphasis)
5. Impressione della tessitura di altri materiali (Imprinting)
6. Interferenza del modello del tessuto (Weave Interference)
7. Ingrandimento della tessitura (Texture Magnification)

In questo caso, qualsiasi depressione creata nell'intercapedine, si trasformerà per effetto della pressione atmosferica in uno stress effettivo sulla tavola, che si comporterà similmente alla “campata di un ponte” soggetta a un enorme carico. Situazione analoga alla precedente viene a crearsi nel caso di tavole “imbarcate” e appoggiate sul piano (figura 7); anche in questo caso la pressione atmosferica premerà con un effetto devastante, con la concreta possibilità di spezzare la tavola. Allo stesso modo una non attenta esecuzione della busta (figura 8), che non considera correttamente lo spazio per le traverse, può creare, durante la realizzazione del vuoto, un forte stress (*macrostress*) alla struttura dell'opera. Nel caso di forti pressioni dovute ad un sottovuoto piuttosto spinto, si può arrivare a fenditure e rotture del legno (il nylon in trazione non si rompe facilmente, è più probabile che si rompa la tavola antica, indebolita e poco elastica).

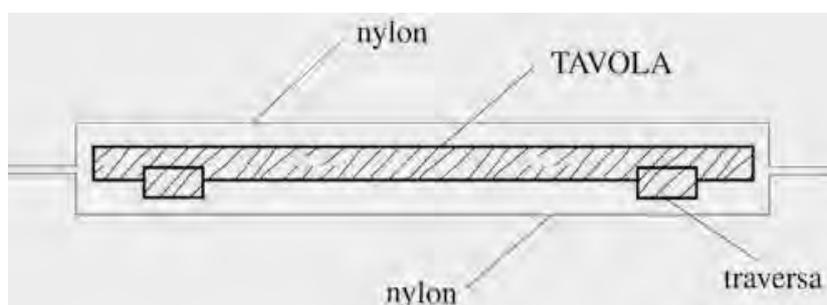
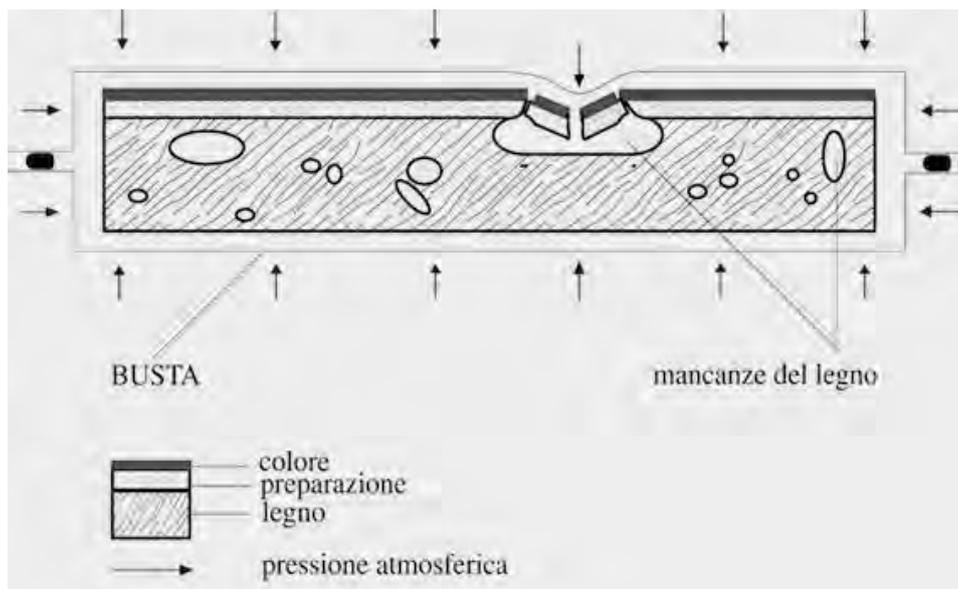


Fig. 8. Sezione di una busta erroneamente realizzata relativa a un dipinto su tavola

In realtà, per fare una busta corretta, il nylon deve adagiarsi perfettamente su tutte le parti della tavola, come mostrato nella figura 2. Quando la busta è realizzata correttamente, la pressione esercitata dall'atmosfera si distribuisce uniformemente su ogni area del manufatto (sul recto, sui lati, sul verso e sulle traverse). In questo modo la pressione viene equilibrata dalla superficie pittorica, ma non in presenza delle mancanze del supporto, come nei casi in cui nella tavola sono presenti le gallerie scavate dagli insetti xilofagi, vicino o subito sotto la preparazione e il colore. In queste situazioni si vengono a creare forti pressioni localizzate (*microstress*) con possibilità di collassamenti della struttura, creando danni irreversibili, come illustrato schematicamente nella figura 9.



*Fig. 9. Sezione di una busta e spaccato di un dipinto su tavola che presenta mancanze del legno*

In conclusione, ciò che dobbiamo evitare per i dipinti trattati con la tecnica del sottovuoto è l'eccessiva pressione esercitata. È quindi fondamentale ricercare le più basse pressioni possibili, che garantiscano la perfetta riuscita delle operazioni di restauro. Ma trovare queste pressioni non è sufficiente, bisogna che queste siano stabili e distribuite uniformemente su tutta l'area del dipinto. Per questo è importante lo studio del sistema del sottovuoto e del suo controllo, al fine di individuare le migliori soluzioni, evitare possibili danneggiamenti ai profili della superficie, evitare rischi per la stabilità strutturale.

## ~ PARTE II ~

### IL SOTTOVUOTO, SCIENZA E TECNICA NEL RESTAURO

*Mario Verdelli e Nadia Presenti*

#### *1. Aspetti generali*

Da tempo i restauratori che utilizzano la tecnica del sottovuoto si sono resi conto che la pressione nella busta non è omogenea. Si è tentato di risolvere il problema inserendo intorno al dipinto della tela arrotolata, sperando così di veicolare meglio l'aria verso il tubo collegato alla pompa oppure aprendo delle falle per il passaggio dell'aria intorno al dipinto, cosa che a nostro avviso aggrava il problema invece di risolverlo; in realtà si creano differenze di pressione ancora maggiori, facilmente rilevabili attraverso un sistema di misurazione realizzato con opportuni strumenti. Infine, nella maggioranza dei casi si è adottata la soluzione più semplice, cioè quella di indurre una pressione maggiore in modo da compensare le differenze o le eventuali falle nel sistema; così facendo però si è andati incontro ai rischi di sprofondamenti della preparazione e a schiacciamenti del colore.

Con lo scopo di trovare adeguate soluzioni tecniche a queste problematiche, seguendo per quanto possibile una metodologia scientifica (progettazione delle esperienze, registrazione di tutti i risultati, ripetibilità delle procedure, ecc.), abbiamo pensato di studiare con simulazioni e misurazioni la distribuzione della pressione all'interno della busta e come questa pressione sia influenzata da fattori esterni, quali ad esempio l'inserimento di tubi o di piani rigidi. D'altra parte abbiamo evitato di introdurre tutti quegli elementi (come ad esempio i tessuti) che irrigidendosi con la pressione possono cambiare le proprietà fisiche, facendo in tal modo venir meno la possibilità di ottenere valori ripetibili e misurabili.

Al termine di questo complesso di studi e sperimentazioni, sono quindi nate diverse soluzioni interessanti, facilmente applicabili, che ci permettono durante le fasi di restauro di raggiungere una distribuzione della pressione sostanzialmente uniforme su tutta l'area del dipinto, con valori tali da non compromettere il profilo della superficie e la stabilità strutturale nel caso dei dipinti su tavola.

## 2. Gli strumenti di misura

Il posizionamento degli strumenti di misura<sup>10</sup>, come andremo a dimostrare, ha una grande importanza nell'effettuare un corretto sottovuoto.

Nello schema, illustrato nella figura 10, il vacuometro A e il vacuometro B registrano la medesima pressione quando l'ingresso dell'aria che regola il sistema<sup>11</sup> è posto vicino alla pompa di aspirazione.

L'uguaglianza di misurazione è dovuta al posizionamento della presa d'aria presso il vacuometro B; tra il vacuometro A e il vacuometro B collegati dal tubo di aspirazione esiste un sottovuoto uniforme.

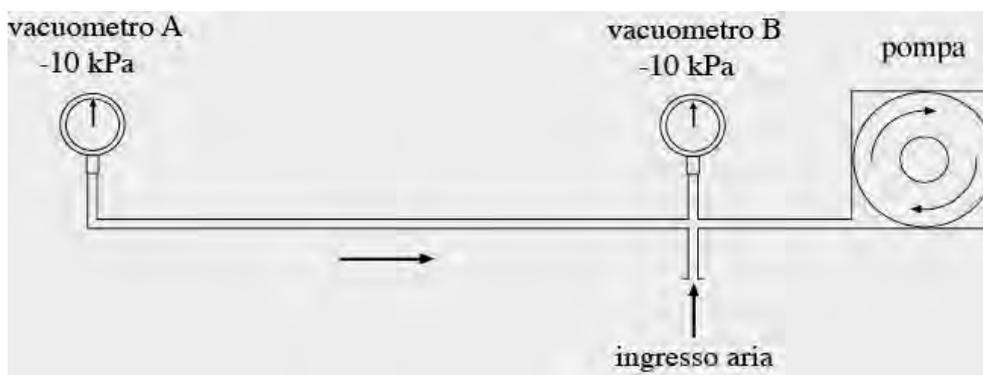


Fig. 10. Schema di un semplice sistema di sottovuoto

Nello schema, illustrato nella figura 11, il vacuometro A e il vacuometro B registrano pressioni diverse, in quanto l'ingresso dell'aria è posto lontano dalla pompa di aspirazione.

La differenza di misurazione è dovuta al posizionamento dell'ingresso dell'aria presso il vacuometro A.

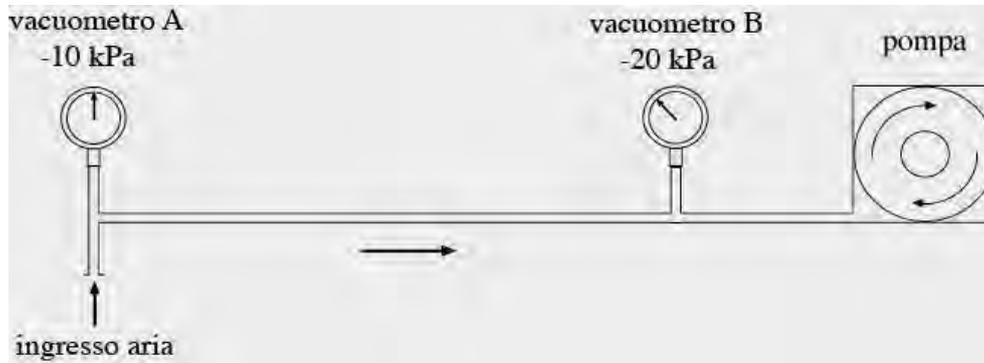
Numerosi fattori, come la lunghezza, il diametro, la rugosità delle pareti del tubo di aspirazione, la densità e il coefficiente della viscosità dell'aria alle diverse temperature e pressioni, determinano una perdita di carico<sup>12</sup> tra il vacuometro A e

10 - Gli strumenti di misura del sottovuoto (vacuometri) normalmente sono dotati sia di una scala in cmHg (centimetri di mercurio) sia di una scala in kPa (chilopascal). Le scale partono da 0 cmHg o 0 kPa (niente vuoto) e arrivano a -76 cmHg o -100 kPa (100% di vuoto o vuoto assoluto). Durante le nostre sperimentazioni, e quindi in questo testo, abbiamo preferito utilizzare il kPa, in quanto multiplo del Pa (pascal) che è l'unità di misura della pressione nel Sistema Internazionale (S.I.); il pascal equivale a newton/m (1 Pa = 1 N/m<sup>2</sup>). Al termine di questo capitolo è riportata una tabella con i fattori di conversione tra le diverse unità di misura delle pressioni.

11 - Nel sistema di realizzazione graduale del sottovuoto per raggiungere percentuali di vuoto (1,2,3%...10,11,12%... 20%...ecc.), è necessario effettuare una regolazione fine aspirando l'aria dall'ambiente.

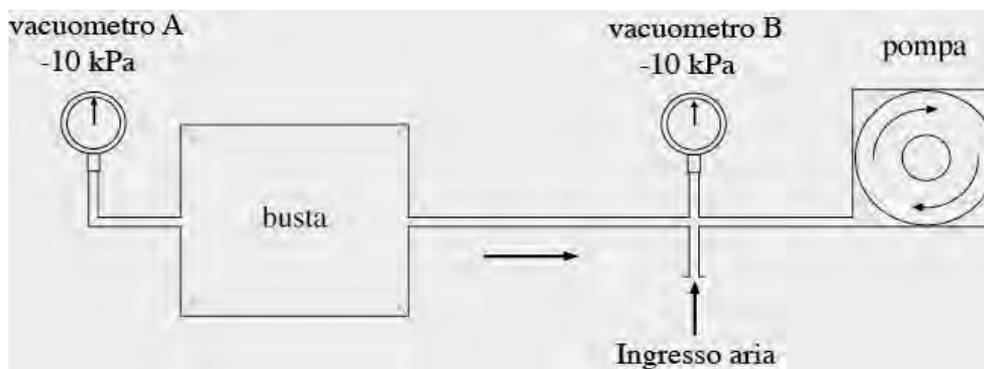
12 - Nei sistemi di sottovuoto utilizzati per il restauro dei dipinti, la pompa di aspirazione è collocata di consueto vicino alla busta, quindi la perdita di carico che riguarda la lunghezza e il diametro del tubo può essere trascurabile; non lo è, se abbiamo la necessità di allontanare la pompa di molti metri o se dobbiamo ottenere un forte sottovuoto. In questo caso, per ridurre la perdita di carico, si deve ricorrere a un calcolo matematico per ottenere la giusta misura della sezione del tubo di aspirazione.

il vacuometro B; di fatto, tra questi due punti esiste una differenza di grado di sottovuoto (sottovuoto non uniforme).



*Fig. 11. Differenti valori della pressione di un sistema di sottovuoto*

Lo schema, illustrato nella figura 12, è l'equivalente di quello illustrato nella figura 10; con l'inserimento della busta tra il vacuometro A e il vacuometro B non cambiano le condizioni di sottovuoto.



*Fig. 12. Collocazione della busta in un sistema di sottovuoto*

Lo schema, illustrato nella figura 13, mostra una situazione equivalente a quella illustrata nella figura 11; in quanto al posto dell'ingresso dell'aria presso il vacuometro A (figura 11) è inserita una falla nella busta del diametro di circa 3 mm.

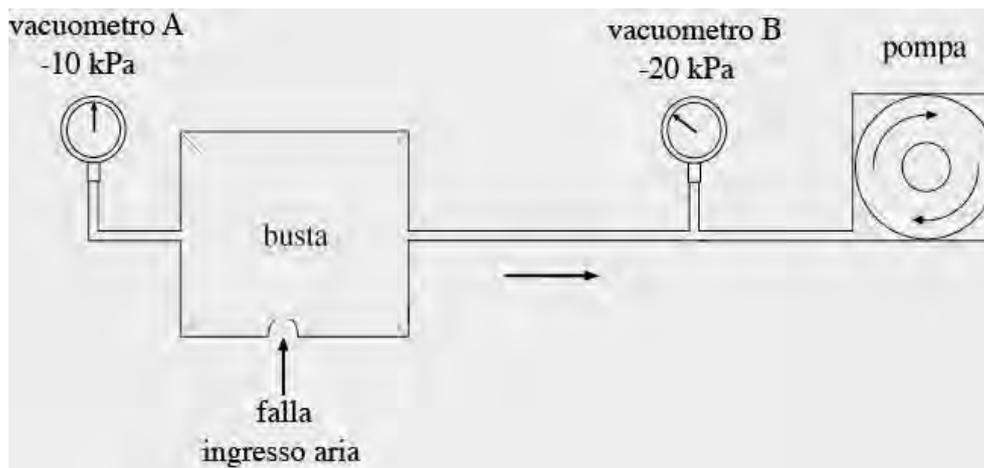


Fig. 13. L'inserimento di una falla nella busta crea differenti valori di pressione in un sistema di sottovuoto

Riportiamo nella tabella 1, a titolo esemplificativo, i risultati di alcune misure relativi alla configurazione descritta nella figura 13.

Vacuometro B [kPa]	Vacuometro A [kPa]	Percentuale perdita di carico
-10	-7	30%
-20	-10	50%
-30	-13	55%
-40	-16	60%

Tabella 1. Riduzione del grado di vuoto dovuto a perdite di carico

Gli elevati valori della perdita di carico dimostrano la difficoltà di ottenere valori predeterminati e uniformi di sottovuoto.

Inoltre gli strumenti, posti come di consueto vicino alla pompa, non rilevarebbero la perdita di carico e di conseguenza non registrerebbero in maniera veritiera la pressione nella busta in presenza di perdite.

Possiamo concludere che, per effettuare misurazioni precise, lo strumento di misura (vacuometro A) deve essere sistemato dalla parte opposta al tubo di aspirazione della busta (come nella figura 12), mentre la presa dell'ingresso dell'aria che controlla la pressione del sistema, deve essere collocata lontano dalla busta.

Già con questi primi semplici accorgimenti la configurazione del sistema migliora sensibilmente e si creano le premesse per interventi controllati.

Nella relazione presentata da Leif Einar Planter<sup>13</sup> al Congresso Nazionale di Restauro di Oslo del 6 maggio 1974, fu descritta un'esperienza del tutto simile a quelle illustrate nelle figure 12 e 13; riteniamo interessante citare testualmente alcuni passi significativi:

«Se esistono delle falle notevoli nel sistema del vuoto alla tavola (il vuoto è stato fatto sulla tavola calda) la pressione atmosferica del quadro sarebbe un po' meno di quanto la indica il manometro (vicino alla pompa). Recentemente abbiamo collaudato le differenze di pressione nel sistema sotto vuoto con due manometri: uno vicino alla pompa del vuoto e l'altro attraverso il foglio del vuoto sulla tavola calda. Il sistema fu dapprima chiuso il più possibile, e la pressione fu variata con la valvola dosatrice. Misurandone la pressione i due manometri mostrarono più o meno la stessa pressione. La valvola fu poi completamente chiusa, e la pressione variata con delle falle introdotte nella tavola calda. Misurandone la pressione il manometro della tavola calda mostrò una pressione notevolmente più bassa di quello vicino alla pompa. La differenza di pressione fu di 100-150 torr. (circa -13 kPa/-20 kPa)».

La relazione non riportava la spiegazione del fenomeno, né dati tecnici come l'ampiezza della "falla" o il diametro e la lunghezza del tubo di aspirazione, ma da come l'esperienza è stata descritta, riteniamo che sia stata semplicemente misurata la variazione della perdita di carico del tubo di aspirazione, come illustrato nelle figure 11 e 13.

Questi primi studi già dimostravano la disomogeneità del sistema in molte delle usuali condizioni operative e quindi la necessità di ulteriori ricerche e approfondimenti.

---

13 - Leif Einar Planter, Osservazioni sulla rintelatura con cera e resina sottovuoto, Relazione Congresso Nazionale di Restauro, Oslo, 6/10 maggio 1974, pp. 79-89.

### 3 - Sistemi di sottovuoto

In questo paragrafo si è creduto utile illustrare in sintesi alcuni sistemi comunemente usati per spiegare e poi sviluppare successivamente l'aspetto strettamente tecnico-operativo del sottovuoto.

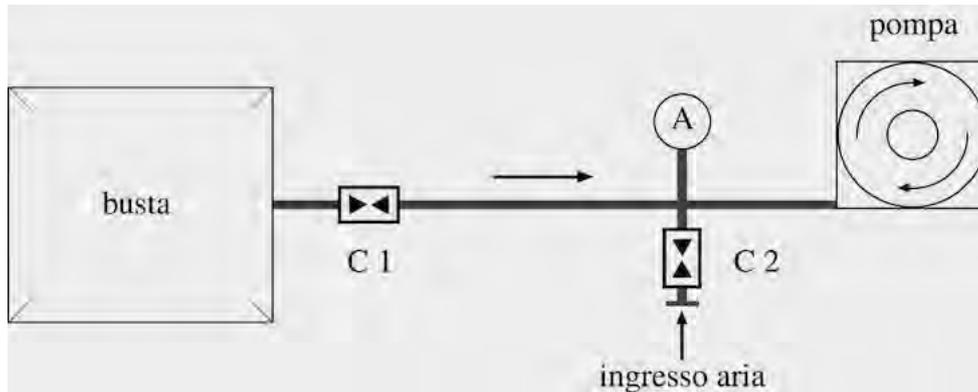


Fig. 14. Sistema (A)

A. Vacuometro di misura del grado di vuoto.

C1. Valvola di chiusura del tubo di aspirazione della busta.

C2. Valvola di regolazione del sottovuoto (ingresso dell'aria esterna e filtro antipolvere).

Le frecce indicano la direzione del movimento dell'aria

*Sistema (A).* Nello schema, illustrato nella figura 14, il sottovuoto è effettuato mettendo in funzione la pompa di aspirazione; l'aria, seguendo il percorso indicato dalle frecce, viene risucchiata dalla busta tramite il tubo di aspirazione.

Quando la valvola di aspirazione C2 è completamente aperta<sup>14</sup> non si ottiene il sottovuoto e lo strumento A indica "zero"; se chiudiamo lentamente la valvola si ha una variazione della percentuale di sottovuoto partendo dallo "zero" fino al 100% del sottovuoto massimo raggiungibile, realizzato con la completa chiusura della valvola, nel nostro caso circa -100 kPa.

Chiudendo la valvola C1, dopo che si è raggiunto il desiderato livello di sottovuoto, la busta viene isolata dal sistema di aspirazione.

Va detto che la costruzione della busta nei dipinti su tavola è resa più difficoltosa a causa delle traverse e per questo motivo spesso non è perfettamente sigillata, soprattutto in corrispondenza delle giunzioni e dell'ingresso dei tubi; così non sempre è possibile eliminare completamente le perdite (flusso di aria che entra dentro la busta) e la pressione tende a diminuire.

Con questo sistema possiamo regolare il vuoto in modo fine e graduale e lo possiamo stabilizzare anche a piccolissime percentuali di sottovuoto.

---

14 - La valvola è scelta sulla base della portata d'aria del gruppo pompa-sistema di aspirazione, cioè deve avere un diametro sufficientemente grande da lasciare passare tutta l'aria che la pompa riesce ad aspirare.

Durante tutto il periodo di mantenimento del sottovuoto, la pompa rimane sempre in funzione, per questo è necessario utilizzare una macchina con delle caratteristiche tecniche tali da garantire almeno un lungo tempo di funzionamento pressoché ininterrotto<sup>15</sup>.

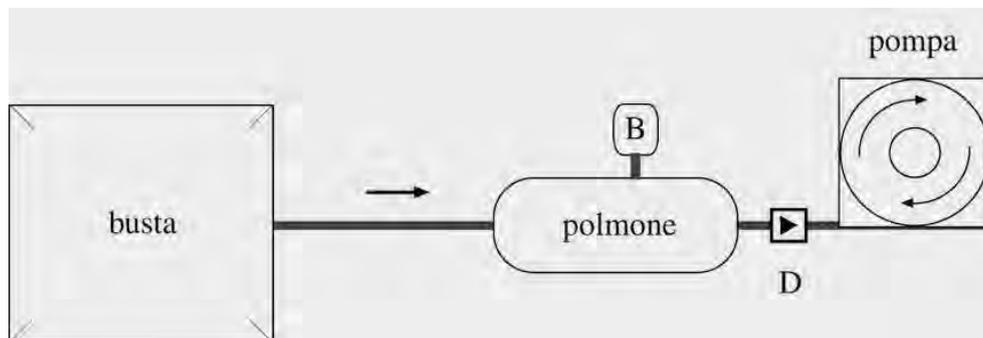


Fig. 15. Sistema (B)

*B. Vuotostato, regola la pressione del sistema.*

*D. Valvola di non ritorno, l'aria passa solo nella direzione della freccia.*

*La freccia indica la direzione del movimento dell'aria*

*Sistema (B).* Nello schema, illustrato nella figura 15, il sottovuoto è effettuato aspirando l'aria da un polmone<sup>16</sup>, regolato da un vuotostato che ha la funzione di attivare la pompa a un minimo grado di vuoto impostato e di disattivarla a un massimo grado di vuoto impostato; il polmone ha la funzione di compensare la perdita di pressione della busta.

La percentuale di sottovuoto lentamente diminuisce a causa di fenomeni di perdite descritti in precedenza, fino a raggiungere un valore di soglia (low vacuum) per il quale la pompa riceve un segnale di partenza. Con la pompa in funzione la percentuale di sottovuoto torna ad aumentare fino a un valore di soglia massimo (high vacuum) per il quale la pompa riceve un segnale di arresto.

Il ciclo si ripete con una frequenza tanto maggiore quanto più piccola è la differenza tra soglia minima (low vacuum) e soglia massima (high vacuum) e tanto maggiori sono le perdite nella busta.

Il vantaggio di questa configurazione consiste nel fatto che la pompa funziona in modo discontinuo; lo svantaggio invece, che non si può effettuare una regolazione graduale e stabile specialmente a basse pressioni.

---

15 - Qui ci si riferisce alla durata delle operazioni di restauro in sottovuoto, come nel consolidamento della preparazione e del colore nei dipinti su tavola, che si può protrarre quasi ininterrottamente per alcuni giorni.

16 - Serbatoio cilindrico la cui capienza è proporzionale alla quantità di vuoto da utilizzare.

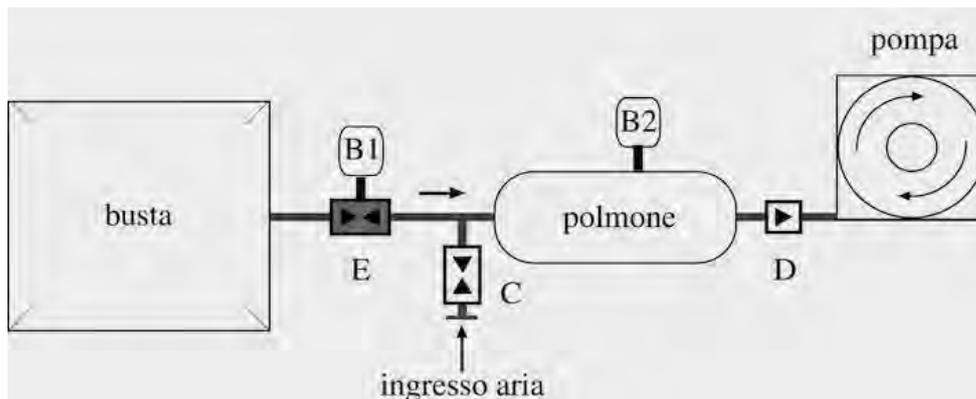


Fig. 16. Sistema (C)

B1. Vuotostato, regola la pressione della busta.

B2. Vuotostato, regola la pressione del polmone.

E. Elettrovalvola di chiusura del tubo di aspirazione posizionata in prossimità della busta .

C. Valvola di regolazione del sottovuoto (ingresso dell'aria esterna e filtro antipolvere).

D. Valvola di non ritorno, l'aria passa solo nella direzione della freccia.

Le frecce indicano la direzione del movimento dell'aria

*Sistema (C).* Lo schema, illustrato nella figura 16, si può considerare come la sintesi dei sistemi (A) e (B) precedentemente descritti.

Manovrando la valvola di aspirazione dell'aria C, si inizia il sottovuoto partendo da "zero" fino a raggiungere una pressione programmata dal vuotostato B1, con funzione per esempio di "off" al valore di -15 kPa e "on" al valore di -10 kPa. Il vuotostato è collegato all'elettrovalvola E che ha la funzione di chiudere il tubo di aspirazione isolando la busta quando il vuotostato ha raggiunto i -15 kPa; contemporaneamente viene chiusa manualmente e completamente la valvola C.

Ora la pompa realizza il vuoto nel polmone controllato dal vuotostato B2, con funzione per esempio "off" -80 kPa e "on" -40 kPa. Quando nel polmone si raggiunge la pressione di -80 kPa, la pompa si ferma e l'aria non può entrare perché bloccata dalla valvola di non ritorno D.

Con il tempo, all'interno della busta inevitabilmente il grado di vuoto si riduce, da -15 kPa raggiunge i -10 kPa, il vuotostato B1 apre l'elettrovalvola E compensando con il "vuoto" del polmone, fino a quando il vuotostato B2 raggiunge la pressione di -40 kPa, attivando così di nuovo la pompa.

Questa configurazione ha il vantaggio di conseguire gradualmente il sottovuoto programmato, di funzionare in modo automatico, di risparmiare l'utilizzo della pompa e di mantenere nella busta, con un modesto scarto (5 kPa), il valore del sottovuoto impostato.

#### 4. Prove sperimentali di sottovuoto

Con numerose prove di sottovuoto abbiamo voluto studiare in dettaglio le vie di fuga dell'aria, l'efficacia dei sistemi tradizionali e di quelli innovativi, e misurare l'effettivo grado di vuoto all'interno della busta e le relative pressioni esercitate sui materiali.

*Configurazione della busta.* Tutte le prove (eccetto la prova 1, eseguita senza il piano rigido e senza la tela) sono state effettuate con una busta (figura 3) così strutturata:

- Foglio di melinex di 150 cm x 100 cm.
- Piano rigido di 120 cm x 80 cm.
- Tela a simulazione di un dipinto di 90 cm x 80 cm.
- Foglio di melinex di 150 cm x 100 cm.

La busta è chiusa ermeticamente sigillando i due fogli di melinex con strisce di plastilina.

*Dati tecnici dell'attrezzatura.* Le attrezzature utilizzate durante le prove descritte nei successivi paragrafi hanno le seguenti caratteristiche:

- Pompa di aspirazione con portata di 9 m<sup>3</sup>/h (massimo sottovuoto -95 kPa).
- Tubo di aspirazione con diametro interno di 8,5 mm.
- Tubo collegato al vacuometro con diametro interno di 8,5 mm.
- Vacuometro con scala da 0 kPa (niente vuoto) a -100 kPa (vuoto totale).

#### PROVA 1. MISURAZIONI DELLE PRESSIONI NELLA BUSTA

Scopo della prova è verificare alle varie pressioni il differente grado di sottovuoto in prossimità e alle diverse distanze dell'ingresso del tubo di aspirazione della pompa posto dentro la busta.

*Configurazione.* La prova è stata realizzata inserendo dentro una busta di melinex un tubo di aspirazione collegato alla pompa e a un vacuometro di controllo (denominato A); altresì è stato inserito, per effettuare le misurazioni, un tubo collegato a un vacuometro (denominato B1, B2 e B3 secondo le diverse e successive simmetrie), come schematicamente illustrato nella figura 17.

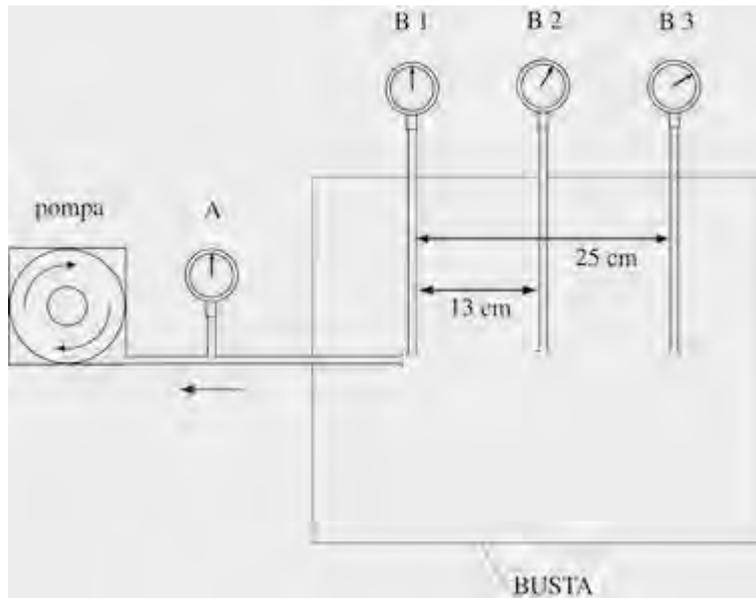


Fig. 17. Sistema di misurazioni della pressione nell'intercapedine della busta

*Risultati.* La pressione all'interno di un sistema di sottovuoto, nel caso specifico come quello effettuato tra le due facce di melinex della busta, diminuisce proporzionalmente all'aumentare della distanza dall'ingresso del tubo di aspirazione della pompa (tabella 2).

A Sottovuoto impostato  [kPa]	B1 Misurazione all'ingresso del tubo di aspirazione A  [kPa]	B2 Misurazione alla distanza di 13 cm dall'ingresso del tubo di aspirazione A  [kPa]	B3 Misurazione alla distanza di 25 cm dall'ingresso del tubo di aspirazione A  [kPa]
-10	-10	-10	-9
-20	-20	-19	-18
-30	-30	-28	-27
-40	-40	-37	-36

Tabella 2. Grado di sottovuoto nella busta

*Commenti.* La prova evidenzia subito le difficoltà di rimuovere l'aria dall'intercapedine della busta man mano che ci si allontana dal punto di aspirazione e proporzionalmente all'aumentare del sottovuoto impostato.

Il problema è stato accennato nel capitolo *Introduzione al sottovuoto* e la causa si deve ricercare in complessi fattori di attrito, effetto ventosa, perdita di carico, ecc.

## PROVA 2. MISURAZIONI DELLE PRESSIONI SULLA SUPERFICIE DI UN PIANO

Scopo della prova è la misura delle pressioni esercitate in prossimità del piano inserito nella busta.

*Configurazione.* Dentro la busta i vacuometri di verifica B1 e B2 sono collegati a tubi a contatto del bordo del piano, come il tubo di aspirazione della pompa, mentre il vacuometro B3 è collegato a un tubo appoggiato sulla superficie del piano, in questo modo il foro d'ingresso dell'aria del tubo di "misura" si trova esattamente nel centro del piano (figura 18).

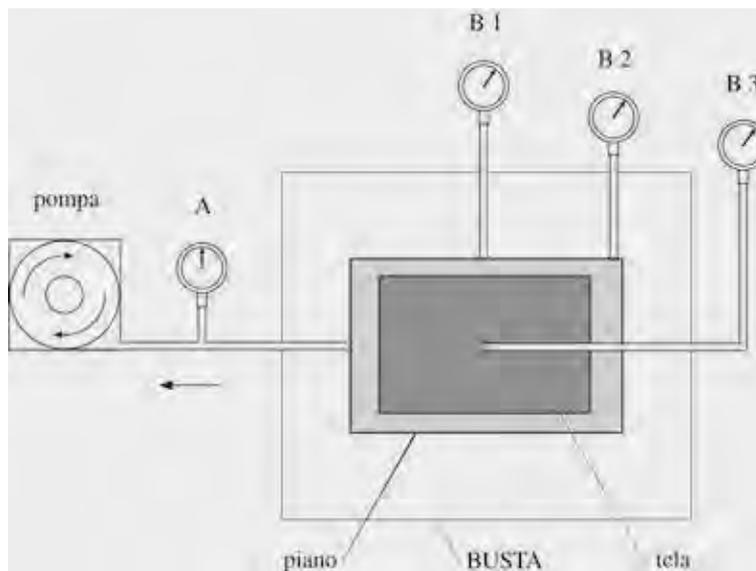


Fig. 18. Sistema di misurazioni della pressione sulla superficie di un piano inserito all'interno della busta

*Risultati.* I risultati, riportati nella tabella 3, mostrano che le pressioni del sottovuoto nel bordo e nella superficie del piano, nonostante le differenti distanze dal tubo di aspirazione della pompa, sono tra loro omogenee ma inferiori a quella misurata dalla strumentazione A collocata al tubo di aspirazione.

<b>A</b> Sottovuoto impostato con l'aspirazione sul bordo del piano [kPa]	<b>B1</b> Misurazione nel bordo del piano distante 120 cm da A [kPa]	<b>B2</b> Misurazione nel bordo del piano distante 150 cm da A [kPa]	<b>B3</b> Misurazione nel centro del piano distante 80 cm da A [kPa]
-10	-9	-9	-9
-20	-18	-18	-18
-40	-35	-35	-35

Tabella 3. Grado di sottovuoto sulla superficie di un piano

*Commenti.* Attenzione, nella realtà la distribuzione delle pressioni non è così omogenea come potrebbe sembrare dai risultati di questa prova.

Si è verificato che l'introduzione del tubo di misura (B3) altera la pressione in quella zona. Queste differenze saranno misurate nella prova 5 e saranno spiegate nella prova 6.

### PROVA 3. MISURAZIONI DELLE PRESSIONI ATTIGUE A UN PIANO

Scopo della prova è la valutazione delle differenze di pressione nei diversi posizionamenti dei tubi sia di verifica sia di aspirazione

*Configurazione.* Il tubo del vacuometro B2 è a contatto del bordo del piano, il tubo del vacuometro B1 è collocato alla distanza di 7 cm dal piano, come il tubo di aspirazione A è collocato alla distanza di 15 cm (figura 19).

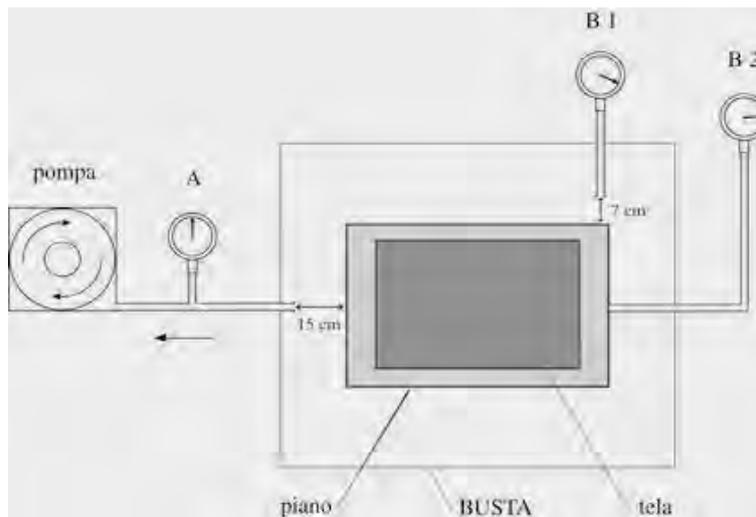


Fig. 19. Sistema di misurazioni della pressione in prossimità e nel bordo del piano

*Risultati.* I risultati, riportati nella tabella 4, rilevano le differenze di misura tra B1 e B2. Queste differenze dimostrano l'esistenza di vie privilegiate al percorso dell'aria (bordo del piano) e l'ottenimento in quella zona (B2) di un grado di vuoto più alto. Gli stessi risultati evidenziano tra A e B2 differenze di valori dovuti alla distanza del tubo di aspirazione dal piano. Questo dato è più chiaro specialmente se si paragona B2 della tabella 4, con B1 o B2 della tabella 3.

<b>A</b> Sottovuoto impostato con l'aspirazione distante 15 cm dal bordo del piano [kPa]	<b>B1</b> Misurazione distante 7 cm dal bordo del piano e 140 cm da A [kPa]	<b>B2</b> Misurazione nel bordo del piano [kPa]
-10	-7	-8
-20	-13	-16
-40	-26	-30

Tabella 4. Valori di vuoto misurati nel bordo del piano

*Commenti.* Arrivati a questa fase di sviluppo delle prove, è chiaro che il piano dentro la busta non solo ha la funzione di supporto ad un ipotetico dipinto su tela ma si comporta a tutti gli effetti come un dipinto su tavola.

Inoltre, le prove evidenziano la necessità di collocare il sistema di aspirazione più vicino possibile all'oggetto del sottovuoto per aumentarne l'efficacia.

#### PROVA 4. UN NUOVO SISTEMA DI ASPIRAZIONE

Scopo della prova è di verificare nella pratica l'efficacia di un nuovo sistema di aspirazione da inserire dentro la busta o altro sistema di sottovuoto.

*Il nuovo sistema*<sup>17</sup>. Il cuore del sistema è formato da moduli, di circa 35 cm di lunghezza e circa 2 cm di diametro, costituiti da una struttura d'acciaio rivestita di tessuto di garza che ha la funzione di dare corpo al tutto e di filtrare la polvere.

I moduli, collegati tra loro, applicati a mo' di cornice intorno all'oggetto da mettere in sottovuoto (figura 20), con la loro forma costituiscono una sorta di galleria aperta che separa le due facce della busta e che corre tutto intorno alla tavola o tela che sia (figura 21).

È un sistema innovativo, le cui caratteristiche funzionali sono completamente verificabili, al contrario di quanto avviene con l'inserimento delle «strisce di tela come respiratori»<sup>18</sup>. Le «strisce di tela» o materiali assimilabili, sottoposti a una procedura di sottovuoto, riducono il loro volume e tendono a irrigidirsi; le caratteristiche di «canali di trasporto» per l'aria si modificano e risultano difficilmente quantificabili.

I moduli progettati e messi a punto dal nostro studio hanno invece caratteristiche costanti nelle diverse condizioni operative, e si può misurare l'effettivo grado di vuoto in ogni momento e in ciascuna parte del sistema, come vedremo in seguito.

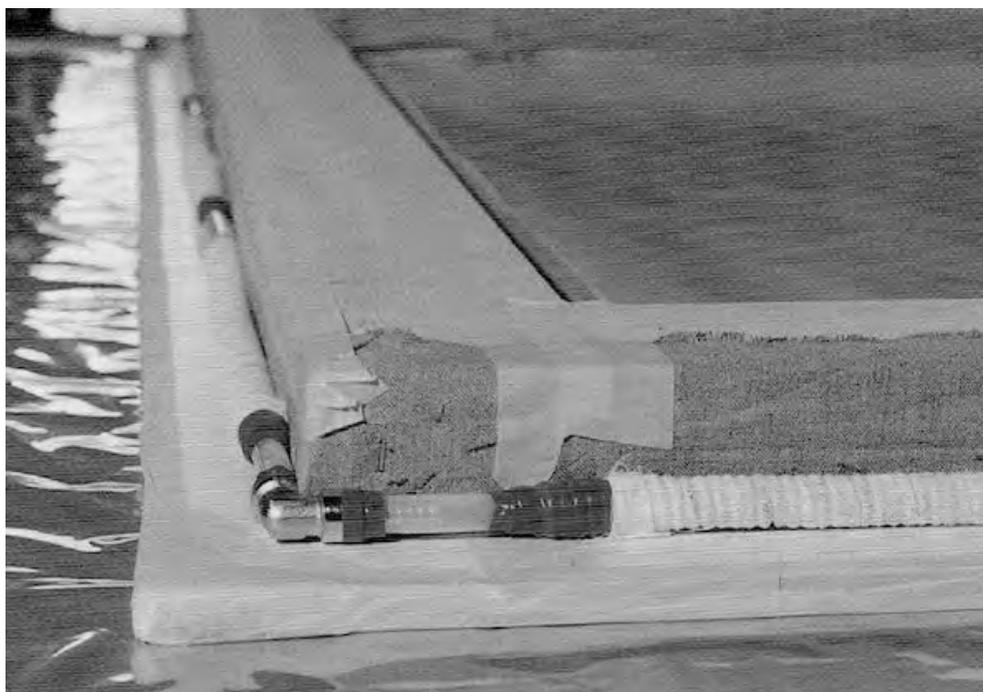
Lo scopo di questo nuovo sistema è aumentare e ridistribuire in maniera omogenea i punti di aspirazione; ad esempio, con sei moduli di una superficie utile di aspirazione calcolata di 140 cm<sup>2</sup> per ciascun modulo, si ottiene una superficie totale

17 - Questo sistema è stato introdotto nella pratica di restauro nell'ottobre del 1993 sotto la direzione della Soprintendenza di Arezzo

18 - G. A. Berger, *La foderatura*, Nardini Editore, Firenze 1992, pp. 62-66. Berger descrive questo sistema delle strisce di tela intorno al dipinto per migliorare l'aspirazione dentro la busta.

di 840 cm<sup>2</sup>. Se questo risultato si divide per la superficie del tubo di aspirazione di diametro 0,85 cm, utilizzato per estrarre l'aria dalla busta, si ottiene il numero 1500. Questo vuol dire che è come mettere accanto al dipinto più di mille tubi di aspirazione, oppure un solo tubo del diametro di circa 35 cm!<sup>19</sup>.

Il punto interessante di questo sistema è facilmente intuibile e consiste nell'invariabilità delle prestazioni (aumentando il numero dei moduli) all'aumento dimensionale del dipinto e quindi della busta, ovviamente nei limiti delle misure standard dei dipinti<sup>20</sup>.



*Fig. 20. Particolare dell'assemblaggio del sistema di aspirazione con "moduli" sono collocati in modo da formare una cornice intorno al soggetto del sottovuoto, in questo caso un telaio interinale*

---

19 - Naturalmente, nel nostro caso, la portata dei due tubi di aspirazione che collegano la busta alla pompa rimane la stessa, invece aumenta in modo macroscopico l'efficacia del sistema, di fatto le perdite di carico all'interno della busta vengono drasticamente ridotte.

20 - Ci sono dei dipinti anche su tavola di grandissime dimensioni. I problemi, non solo sono legati al potenziamento del sistema di aspirazione che va attentamente progettato, ma anche alla reperibilità dei materiali costituenti la busta per i limiti dimensionali degli stessi. Riteniamo che queste difficoltà possano essere superate, per esempio, utilizzando dei teli di nylon di grandi dimensioni che si trovano in commercio spesso ripiegati; quindi, prima del loro utilizzo per il sottovuoto le pieghe "secche", causa di non pochi problemi, vanno attentamente eliminate.

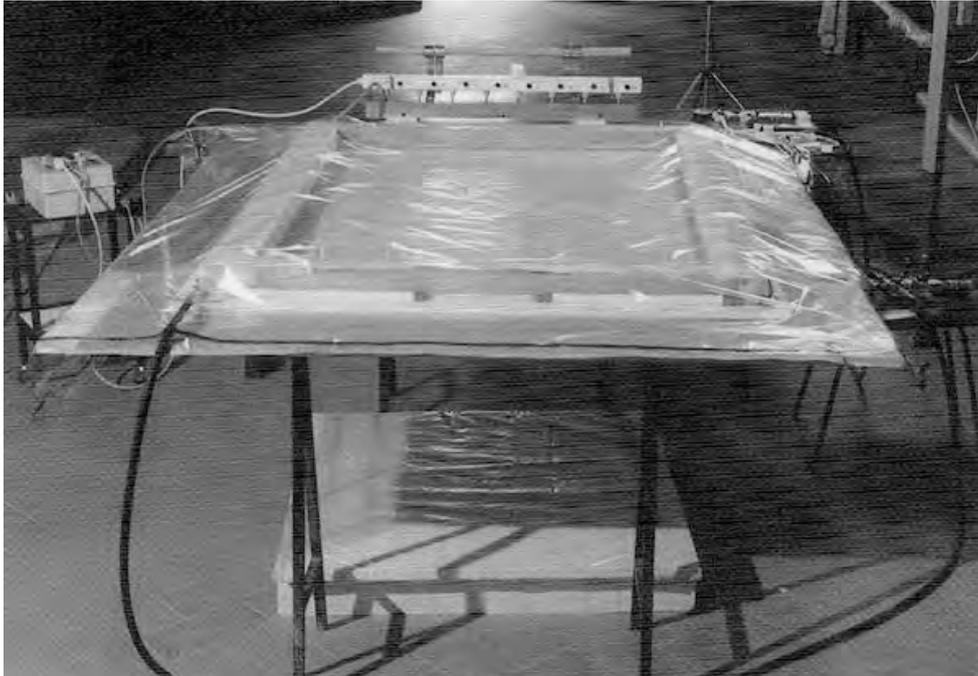


Fig. 21. Il sistema dei “moduli” è stato inserito all’interno della busta e collegato a due tubi di aspirazione della pompa

*Configurazione.* Sono stati inseriti sei moduli collegati con due tubi di aspirazione A1 e A2 contrapposti e simmetrici.

Il tubo di misura del vacuometro B è stato inserito per la prima volta al centro del piano senza passarlo dentro la busta, ma collocandolo dall’esterno tramite un’apposita apertura sigillata per non creare vie privilegiate di fuga dell’aria, così da avere una misurazione non alterata dal sistema di rilevamento (figura 22).

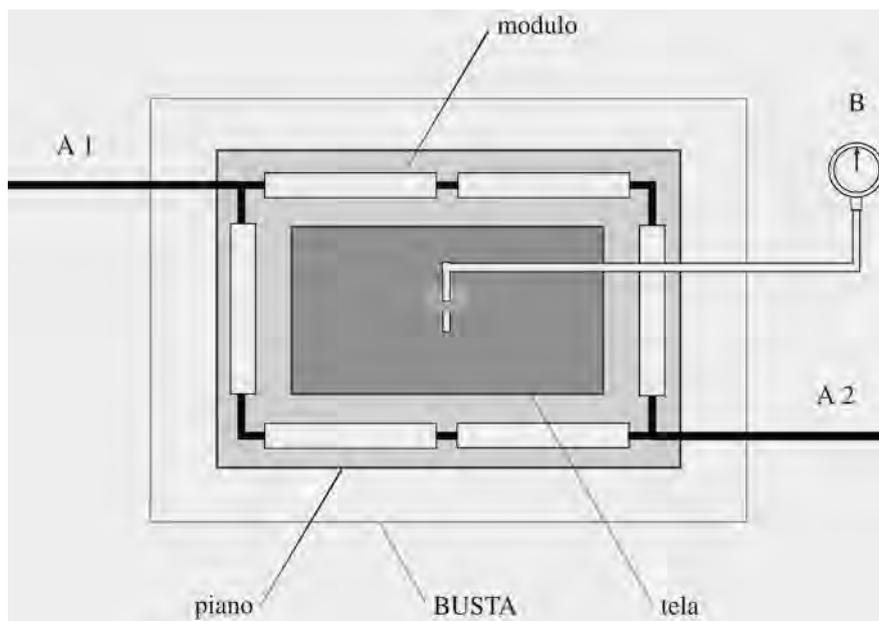


Fig. 22. Posizionamento dei punti di aspirazione utilizzando il nuovo sistema dei “moduli”

*Risultati.* Il risultato, sintetizzato nella tabella 5, evidenzia in tutte le condizioni di sottovuoto, che è stata raggiunta quella omogeneità della distribuzione della pressione<sup>21</sup> che era tra i nostri obiettivi primari, in quanto indispensabile per operare efficacemente con un basso grado di sottovuoto.

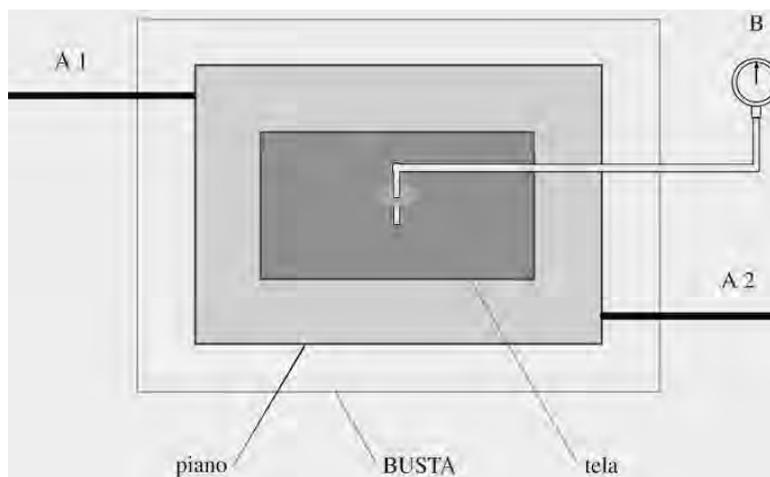
<b>A1 + A2</b> Sottovuoto impostato [kPa]	<b>B</b> Misurazione nel centro del piano [kPa]
-5	-5
-10	-10
-20	-20
-30	-30
-40	-40

*Tabella 5. Valori di vuoto ottenuti con l'utilizzo del nuovo sistema di aspirazione*

## PROVA 5. SISTEMI DI ASPIRAZIONE TRADIZIONALI

Scopo della prova è di misurare la distribuzione della pressione nel campione senza i moduli, per poi confrontare i risultati ottenuti con quelli della prova 4 (distribuzione della pressione nel campione con i moduli).

*Configurazione.* Rispetto alla configurazione della prova 4 (figura 22) sono stati tolti i moduli, lasciando i tubi di aspirazione A1 e A2, posizionati contrapposti e simmetrici a contatto del bordo del piano (figura 23), per garantire un miglior funzionamento; mentre per il tubo di misura del vacuometro B è rimasta la stessa configurazione della prova 4.



*Fig. 23. Sistema di aspirazione tradizionale*

21 - Se il punto B è il punto di misurazione equidistante e quindi il più lontano possibile da tutti i punti di aspirazione di A1 e A2, si presume che tutte le distanze intermedie diano la stessa misura, salvo qualche irrilevante variazione locale sempre possibile.

*Risultati.* La tabella 6 mostra i risultati di tre differenti misurazioni, le prime due con una aspirazione alla volta e l'ultima con entrambi i tubi in funzione.

Confrontando i risultati del valore di B di "solo" A1 e "solo" A2, ci aspetteremmo delle misurazioni coincidenti, essendo le condizioni simili; al contrario, si evidenziano divergenze che mostrano come in questo tipo di configurazione, all'interno della busta, vi siano delle variabili difficilmente valutabili, come vie di fuga dell'aria privilegiate, che saranno l'oggetto del prossimo studio.

Se invece si esamina il valore di B misurato con A1 e A2 in funzione, si nota un significativo miglioramento (ricordiamo che B misura sempre l'effettiva pressione al centro della busta).

<b>A1</b> Sottovuoto impostato [kPa]	<b>B</b> Misurazione nel centro del piano [kPa]	<b>A2</b> Sottovuoto impostato [kPa]	<b>B</b> Misurazione nel centro del piano [kPa]	<b>A1+A2</b> Sottovuoto impostato [kPa]	<b>B</b> Misurazione nel centro del piano [kPa]
-10	-7	-10	-7	-10	-8
-20	-12	-20	-14	-20	-15
-40	-20	-40	-25	-40	-30

Tabella 6. Valori di vuoto ottenuti con l'utilizzo di sistemi di aspirazione tradizionali

*Commenti.* Questi risultati, se paragonati con la prova 4, mostrano come si sia ottenuto in quella prova un controllo estremamente soddisfacente del sottovuoto, superando i limiti e le difficoltà dei metodi di aspirazione che sono poi quelli tradizionali fin qui sperimentati e misurati.

## PROVA 6. CAUSE DI DISOMOGENEITÀ DELLA PRESSIONE

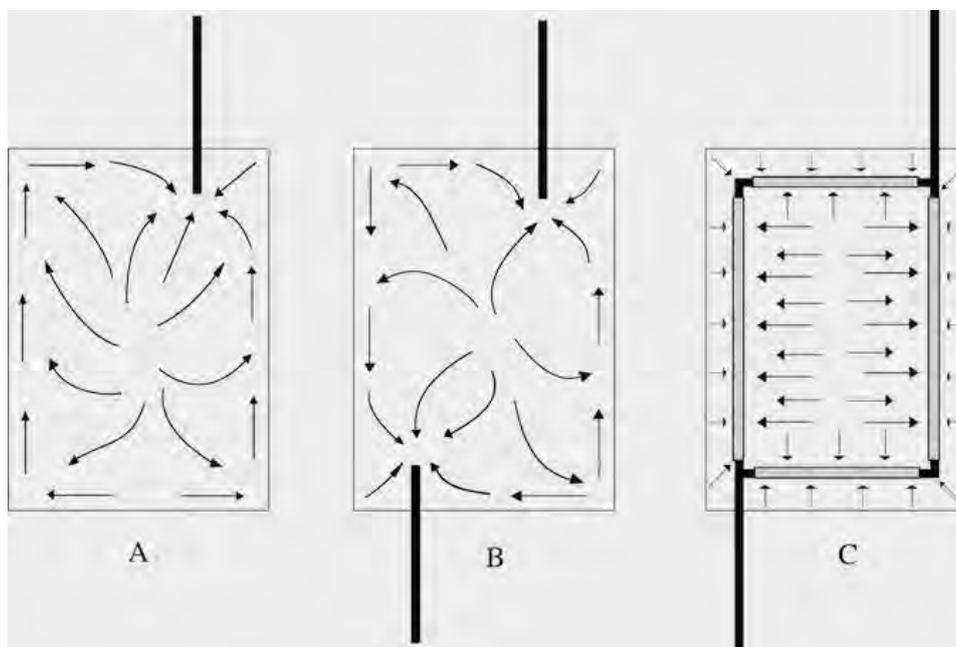
Per capire meglio le cause di alcune disomogeneità dei valori di pressione, evidenziati in molte delle prove fin qui illustrate, si è pensato di osservare il movimento di un liquido colorato all'interno di un sistema di sottovuoto, che svelasse il percorso dell'aria aspirata in prossimità di un piano inserito nella busta.

*Configurazione.* Per effettuare le osservazioni, è stata inserita una tavoletta di formica dentro una busta di melinex. Questo materiale è stato scelto per permettere al liquido di scorrervi sopra liberamente senza esserne assorbito; accanto al bordo del piano è stato collocato il tubo di aspirazione collegato alla pompa.

*Realizzazione e risultati.* È stato praticato un foro nella superficie della busta in corrispondenza del centro della tavoletta ed è stato iniettato in sottovuoto, con una siringa, del liquido colorato. Seguendo il movimento del liquido, si sono visualizzati gli spostamenti dell'aria e di conseguenza le differenti zone di pressione. Iniettati circa 5 ml del liquido, si è osservato che questo si è subito

distribuito in maniera circolare intorno al foro di apertura, creando una grande macchia e si è quindi diretto verso il tubo di aspirazione, privilegiando il bordo del piano e le "pieghe secche" del foglio di melinex che costituiva la parte superiore della busta; se ne è dedotto che in quelle zone la pressione del sottovuoto è maggiore e va diminuendo man mano che ci si allontana da queste parti della busta (figura 24, busta A).

*Commenti.* La prova 6 ha evidenziato, oltre a quanto sopra descritto, che l'inserimento del tubo di misura al centro del piano, passandolo dentro la busta, è un elemento di perturbazione e crea a sua volta una zona di sottovuoto più forte rispetto alle altre parti. È il tipico caso in cui gli strumenti di verifica influenzano la misurazione.



*Fig. 24 - Confronto di tre differenti sistemi di sottovuoto.*

*Nella busta A, è presente un solo tubo inserito di aspirazione (in nero).*

*Nella busta B, sono presenti due tubi inseriti contrapposti.*

*Nella busta C, è stato predisposto il sistema dei moduli collegati a due tubi di aspirazione.*

*Le frecce indicano schematicamente il percorso dell'aria aspirata, inoltre sottolineano, per le prime due buste, le vie privilegiate, le turbolenze, le disomogeneità della pressione. Invece, la regolarità e l'omogeneità del percorso dell'aria nella busta C visualizzano il motivo per cui si è ottenuto con il sistema dei moduli un sottovuoto perfettamente omogeneo.*

#### *4.1. Appendice alle prove. Controlli e verifiche*

Riportiamo di seguito alcune verifiche annotate durante le prove in sottovuoto.

Nella prova 2, si è osservato che chiudendo rapidamente la valvola di aspirazione C2 (figura 14) fino a raggiungere i -40 kPa indicati dalla strumentazione vicino alla

pompa, all'interno della busta la pressione relativa di -35 kPa è stata raggiunta dopo circa 30 minuti.

Anche nella prova 3, si è osservato che dopo la chiusura della valvola di aspirazione al valore prestabilito di -40 kPa, sono stati necessari circa 30 minuti perché nella busta si potesse raggiungere il valore di -30 kPa.

*Commenti.* Prima di operare in sottovuoto, quando si lavora con un solo tubo di aspirazione, come nel caso delle prove citate, e si vuole effettuare una rapida pressione<sup>22</sup>, si consiglia di lasciarla stabilizzare almeno per 30/35 minuti.

### 5. Schema delle attrezzature

L'apparecchiatura che andremo a esaminare in dettaglio è più complessa di quelle usate comunemente nell'ambito del restauro, in quanto è stata progettata per la ricerca, e accoppia alla possibilità di operare sulle opere d'arte la capacità di effettuare verifiche e misure senza dover introdurre altra strumentazione.

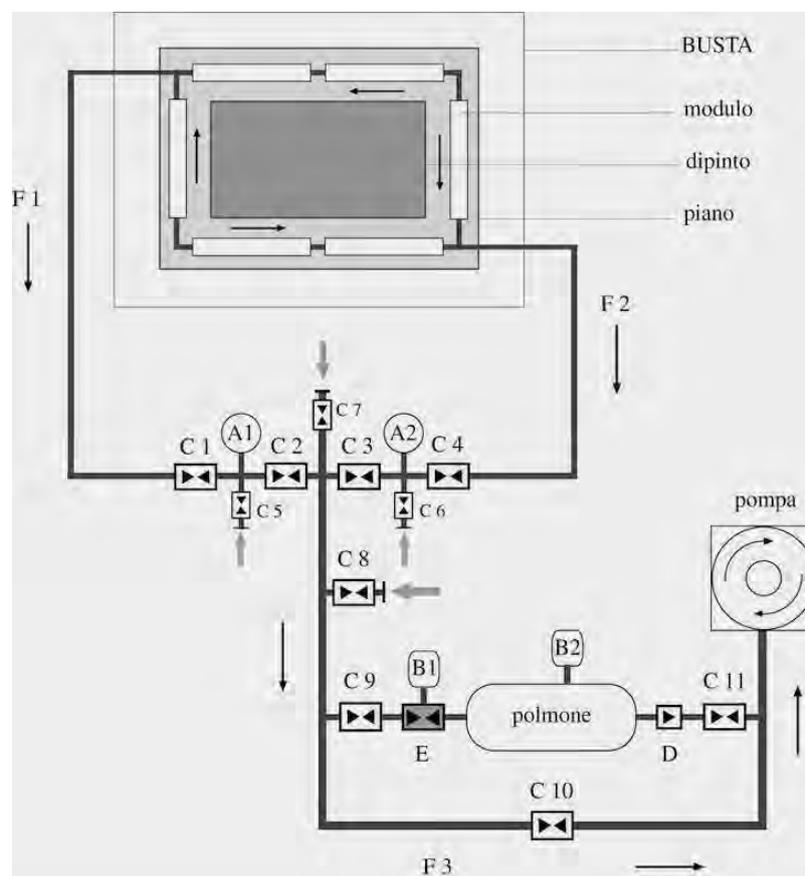


Fig. 25. Descrizione:

**A1 e A2.** Vacuometri.

**B1 e B2.** Vuotostati elettronici programmabili.

**C1, C2, C3, C4, C9, C10, C11.** Valvole con passaggio dell'aria in entrambe le direzioni.

22 - Questo può succedere quando si utilizza un'attrezzatura di sottovuoto come quella del "sistema (B)" illustrata nella figura 15.

**C5, C6 ,C7, C8.** Valvole di aspirazione con associate prese d'aria munite di filtro antipolvere.

**D.** Valvola di non ritorno, l'aria passa solo nella direzione della freccia.

**E.** Elettrovalvola, comandata dal vuotostato B1.

**F1 e F2.** Tubi di aspirazione, lunghi circa 4 m, del diametro interno di 0,85 cm.

**F3.** È il tubo di aspirazione della pompa, lungo circa 6 m e del diametro interno di 1,3 cm.

**MODULO.** Struttura di 35 cm di lunghezza e del diametro di 2 cm, rivestita di garza.

**POLMONE.** Serbatoio della capacità di 50 litri.

**POMPA.** Portata di 9 m<sup>3</sup>/h (massimo sottovuoto -95 kPa), lubrificata a olio, munita di vacuometro di controllo, di filtro antipolvere (all'entrata dell'aria), di caricamento dell'olio a pressione (per rifornire la pompa anche durante il funzionamento) e di filtro con recupero dell'olio (all'uscita dell'aria).

*Il funzionamento.* Con questa configurazione, operando opportunamente sulle valvole dosatrici, si può ottenere:

1. La verifica della taratura degli strumenti di misura con sistema di azzeramento degli stessi.
2. La misura della perdita di carico del percorso di aspirazione: busta - controllo - pompa.
3. La rilevazione di eventuali perdite di carico del sistema di aspirazione dentro la busta, come l'ostruzione di un tubo di aspirazione, ecc.
4. La registrazione di perdite o falle nella busta.
5. La verifica precisa della pressione in differenti zone della busta senza introdurre apparecchiature di misura esterne al sistema, ma cambiando alternativamente il percorso dell'aria dei rispettivi tubi F1 e F2. I vacuometri A1 e A2, alternativamente, indicheranno la pressione nella zona della busta di loro competenza.
6. La scelta del sistema di sottovuoto, cioè la possibilità di operare sia come "sistema (A)" descritto a pag. 15 sia come "sistema (C)" descritto a pag. 17<sup>23</sup>.

Tutte queste funzioni, eccetto la 2, si possono ottenere mentre si esegue il sottovuoto, con le operazioni di restauro in corso, senza alterare in alcun modo la disposizione del dipinto e dell'apparecchiatura.

#### *6. Tavola dei fattori di conservazione delle unità di misura di vuoto e di pressione*

Riteniamo utile pubblicare, come complemento al capitolo dedicato ai sistemi di misurazione, la tavola dei fattori di conversione delle unità di misura delle pressioni. Sarà più facile così confrontare e tradurre i differenti sistemi di misurazione del sottovuoto, utilizzati o pubblicati in questo e in altri lavori.

---

23 - Il "sistema (A)", prevede un funzionamento continuo della pompa ed è utilizzato prevalentemente per attività di ricerca e sperimentazione.

Il "sistema (C)", prevede un funzionamento discontinuo della pompa ed è utilizzato durante il restauro vero e proprio.

Come si consulta la tavola. La consultazione della tavola è molto semplice:

*Esempio 1.* Se vogliamo sapere a quante atmosfere corrisponde 1 bar, si cerca “**bar**” nella colonna verticale e si cerca “**atm**” nella riga orizzontale; è così individuato il fattore di conversione 0,987.

Quindi:  $1 [\text{bar}] \times 0,987 [\text{fatt. conversione}] = 0,987 [\text{atm}]$ .

*Esempio 2.* Se vogliamo sapere a quale percentuale di vuoto corrisponde  $31 \text{ g/cm}^2$ , si cerca “**g/cm<sup>2</sup>**” nella colonna verticale e si cerca “**% vuoto**” nella riga orizzontale; è così individuato il fattore di conversione 0,0968.

Quindi:  $31 [\text{g/cm}^2] \times 0,0968 [\text{fatt. conversione}] = 3 [\% \text{ vuoto}]$ .

	% Vuoto	atm	mmHg o torr.	cmHg	kPa	kg/cm <sup>2</sup>	g/cm <sup>2</sup>	m H <sub>2</sub> O	bar	mbar
% Vuoto	1	0,01	7,6	0,76	1,013	0,0103	10,33	0,1033	0,0101	10,132
atm	100	1	760	76	101,3	1,033	1033	10,33	1,0132	1013,2
mmHg o torr.	0,131	0,0013	1	0,1	0,1333	0,0013	1,36	0,0136	0,0013	1,333
cmHg	1,31	0,0131	10	1	1,333	0,0136	13,6	0,136	0,0133	13,33
kPa	0,987	0,0098	7,5	0,75	1	0,0102	10,2	0,102	0,01	10
kg/cm <sup>2</sup>	96,8	0,968	735	73,5	98,1	1	1000	10	0,981	981
g/cm <sup>2</sup>	0,0968	0,0009	0,735	0,0735	0,0981	0,001	1	0,01	0,0009	0,981
m H <sub>2</sub> O	9,68	0,0968	73,57	7,35	9,81	0,1	100	1	0,0981	98,1
bar	98,7	0,987	750	75	100	1,02	1020	10,2	1	1000
mbar	0,0987	0,0009	0,75	0,075	0,1	0,0010	1,02	0,0102	0,001	1

*Tavola dei fattori di conversione delle unità di misura di vuoto e di pressione*

Per ragioni di spazio alcuni fattori di conversione riportati nella tavola sono indicati con i primi quattro decimali.