

# Studio meccanico del potere consolidante di alcuni adesivi in rapporto a cariche e pigmenti utilizzati in pittura

Alain Roche<sup>1</sup>, Silvia Ottolini<sup>2</sup>, Davide Riggiardi<sup>3</sup>

## Introduzione

L'efficacia di un consolidamento dipende innanzitutto dalla compatibilità tra il consolidante, le particelle (pigmenti, cariche, additivi) e il legante. Allo stesso tempo dipende anche dai fenomeni di penetrazione e di interfaccia. Il *potere consolidante*, che viene utilizzato come misura di consolidamento, può essere definito come l'attitudine di un consolidante a ridare ad un solido pulverulento un grado di coesione superiore alla coesione del solido stesso prima del consolidamento.

Lo scopo di questo studio è determinare il *potere consolidante* di un certo numero di resine in soluzione, rispetto a cariche e pigmenti tradizionalmente utilizzati in pittura.

## Aspetto teorico dell'adesione

Le teorie sull'adesione non mancano. Esse sono comunque complicate e concordano tutte sulla necessità di considerare le forze di interazione che agiscono sull'interfaccia. È per questo motivo che in primo luogo andremo a definire le energie di superficie dei solidi e le tensioni superficiali dei liquidi.

### Tensione superficiale dei liquidi ed energia di superficie dei solidi

Nel 1962 Fowkes ha dimostrato che le tensioni di superficie dei liquidi e le energie libere dei solidi hanno sempre una componente dispersiva  $LW$  ed eventualmente una componente acida base  $AB$ . Si può dunque scrivere che:

$$\text{Per un liquido} \quad \gamma_L = \gamma_L^{LW} + \gamma_L^{AB}$$

$$\text{Per un solido} \quad \gamma_S = \gamma_S^{LW} + \gamma_S^{AB}$$

### Energia di adesione

L'energia di adesione è data da Dupré con la formula seguente:

$$W_a = (\gamma_L + \gamma_S) - \gamma_{SL}$$

Nel caso in cui il solido e il liquido abbiano delle energie e tensioni superficiali affini, ci si può liberare dalla tensione interfacciale e l'energia di adesione si decompone in

$$W_a^{LW} = (\gamma_L^{LW} + \gamma_S^{LW}) \quad W_a^{AB} = (\gamma_L^{AB} + \gamma_S^{AB})$$

<sup>1</sup> LARCROA, Parigi.

<sup>2</sup> Restauratrice, Parma.

<sup>3</sup> Restauratore, Milano.

L'energia di adesione è la somma dei contributi delle energie di adesione dovute alle componenti dispersive e acido base.

Le forze d'interazione che potrebbero svilupparsi tra un substrato e un adesivo sono di 3 ordini:

- le forze di Van der Waals (dispersione e polari)  $LW$
- i legami a idrogeno o acido base ( $AB$ )
- i legami ionici nel caso dei composti ionizzabili ( $LI$ )

La maggior parte degli adesivi polimerici utilizzati come consolidanti e i substrati sono caratterizzati sia da una tensione superficiale sia da una energia di superficie  $\gamma = \gamma^{LW} + \gamma^{AB}$ .

La presenza di siti attivi sulla loro struttura chimica è in grado di generare interazioni di tipo ( $LW$ ) e ( $AB$ )

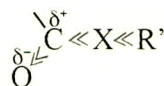
Sulle catene polimeriche che compongono gli adesivi, i gruppi funzionali più frequenti come ammidi, esteri, chetoni e aldeidi sono all'origine dei legami ( $LW$ ). Le funzioni alcoliche, carbossiliche, ossidriliche e amminiche presenti all'interno degli adesivi e dei substrati sono responsabili delle forze di interazione ( $AB$ ).

#### Legami $LW$

Le interazioni di tipo ( $LW$ ) sono di natura fisica poiché non implicano modificazioni chimiche degli elementi presenti. I gruppi funzionali hanno reattività diverse dovute alla loro struttura.

Le loro polarità dipendono dall'effetto repulsivo del gruppo alchilico  $R'$  e dall'atomo più o meno elettronegativo  $X$ . In modo generale più è elevata la lunghezza del gruppo più l'effetto repulsivo aumenta e la molecola diviene polare.

Effet répulsif de  $R'$



La polarizzazione del gruppo  $C=O$  si trova quindi fortemente influenzata dalla struttura della molecola e il valore dei momenti dipolari cresce:

ammidi < esteri < chetoni

#### Legami idrogeno ( $AB$ ), fisico-chimici

Nel caso di un modello elettrostatico, il legame a idrogeno interviene ogni volta che un orbitale  $\sigma$  asimmetrico in un gruppo  $O-H$  o  $N-H$  è in prossimità di un orbitale  $\pi$  di un atomo elettronegativo, portatore di uno o più doppietti liberi e implicati in un dipolo permanente (fig. 1).



Fig 1. Rappresentazione di un legame idrogeno.

È un legame dipolo/dipolo particolarmente forte che varia da 10 a 40 kJ/mole. Tale cambio di elettroni, tra l'idrogeno (accettore di elettroni)<sup>1</sup> e l'ossigeno nucleofilo (donatore di elettroni)<sup>2</sup>, ci consente di parlare di un legame fisico-chimico acido-base ( $AB$ ). D'altra parte il valore del momento dipolare dei legami a idrogeno dipende dall'elettronegatività dell'atomo in modo che:

Momento dipolare di  $N-H$  < Momento dipolare di  $O-H$

Esiste un altro legame ( $AB$ ) che si sviluppa tra due ossidrili o due ammine o tra un ossidrile e un'ammina (fig. 2)

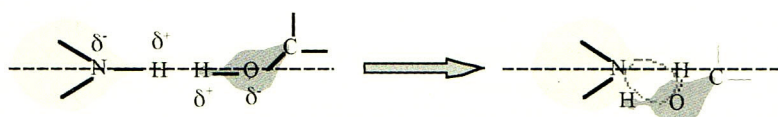


Fig 2. Rappresentazione di un doppio legame idrogeno.

Le forze d'interazione all'interno di questi gruppi sono le più elevate.

### "Modellizzazione" dell'adesione

Possiamo prendere a modello alcune di queste funzioni allo scopo di semplificare i processi di adesione con una rappresentazione grafica relativamente semplice (fig. 3).

#### Modellizzazione dell'adesione

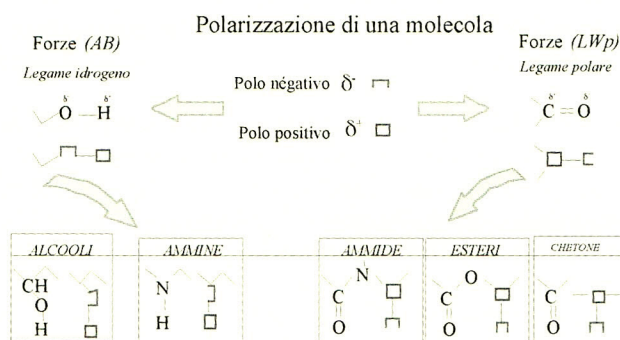


Fig 3. "Modellizzazione" dell'adesione.

Tale rappresentazione vale sia per adesivi sia per i substrati. La combinazione dei gruppi funzionali degli adesivi e dei substrati permette di mettere in evidenza le interazioni che si creano e di prevedere l'efficacia degli adesivi in rapporto ad un determinato substrato (fig. 4).

*Acrylates et méthacrylates Plextol B 500, Acryl 33,  
Paraloid B 72, Plexisol P 550*

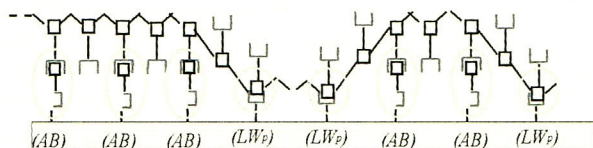


Fig 4. Consolidamento di un'argilla con un acrilato.

Nel caso di un acrilato utilizzato per il consolidamento dell'argilla, le forze ( $LW$ ) e ( $AB$ ) possono agire dal momento che sulla superficie dell'argilla vi sono dei gruppi ossidrili e degli ossigeni e sulle macromolecole degli acrilati sono presenti i gruppi esteri. I legami che si formano sono dunque all'origine dell'adesione del consolidante sul substrato.

### Natura degli adesivi studiati<sup>3</sup>

Gli adesivi e i consolidanti costituiscono un gruppo di prodotti chimici molto variegati provenienti da prodotti naturali o di sintesi. Ciascun prodotto scelto possiede proprie caratteristiche di adesione.

**Funori.** È un polisaccaride, contenente essenzialmente delle funzioni ossidrili.

Proprietà di aderenza: le funzioni ossidriliche sono in grado di creare delle forze ( $AB$ ). La rigidità e la conformazione della molecola impedisce la partecipazione di tutti gli ossidrili all'adesione.

**Colla di pelle e colla di storione.** Il collagene è una proteina fibrosa costituita da catene polipeptidiche. Una parte delle funzioni amminiche contribuiscono a formare dei legami idrogeno che si dispongono nella configurazione elicoidale. Le funzioni carbossiliche e amminiche sono ionizzabili.

Proprietà di aderenza: la funzione ammidica inclusa nel legame peptidico è in grado di creare delle forze ( $AB$ ) e ( $LW$ ). I raggruppamenti ionici carbossilati e ammonio sono capaci di rinforzare l'adesione con forze ioniche ( $LI$ ).

**Klucel G: Idrossipropilcellulosa.** Al momento dell'eterificazione della cellulosa, i raggruppamenti idrossi-propilici si sostituiscono agli ossidrili. Il Klucel G, derivato della cellulosa, è solubile in solventi polari come l'acqua o gli alcoli di debole peso molecolare.

Proprietà di aderenza: le funzioni ossidriliche sono capaci di creare forze ( $AB$ ) con il substrato. La rigidità della molecola può limitare la partecipazione di tutti gli ossidrili.

**Aquazol 200: PEOX, poly(2-etil-2 ossazolina).** È un polimero lineare, termoplastico, non ionico, solubile in acqua e in acetone.

Proprietà di aderenza: la funzione ammidica polare è responsabile della formazione di forza ( $LW$ ) a contatto con il substrato. L'ingombro sterico del gruppo etile può limitare la possibilità d'interazione dei carbonili con il substrato.

**Plextol B 500, Acryl 33, Paraloid B72, Plexisol P 550.** Gli acrilati e i metacrilati appartengono alla famiglia delle resine acriliche. Sono polimeri lineari omo o copolimeri.

Proprietà di aderenza: i gruppi esteri più o meno polari generano con il substrato interazioni di tipo ( $LW$ ). In emulsione la penetrazione di questi prodotti è condizionata dalla bagnabilità e dalla grandezza delle particelle. In soluzione in solventi organici a debole tensione superficiale, il loro potere bagnante è buono e la penetrazione di questi liquidi entro solidi porosi a debole energia di superficie non pone alcun problema.

**Beva O.F.371.** A base di un copolimero etilen-acetato di polivinile. Gli acetati di polivinile contengono tracce d'acido caratterizzate dall'indice di acidità<sup>4</sup>. Copolimerizzato con l'etilene forma un polimero più morbido con proprietà gombose più marcate. Proprietà di aderenza: i gruppi acetati sono responsabili di una forte polarità ( $u = 1,9$  debye), capaci di creare legami ( $LW$ ) col substrato mentre i gruppi acidi residui consentono dei legami ( $AB$ ).

**Gelvatol. Alcool polivinilico.** Gli alcoli polivinilici sono ottenuti da un'idrolisi parziale o totale dell'acetato di polivinile. Il tasso di sostituzione e il grado di polimerizzazio-

Funori	Polisaccaride, funzioni ossidriliche. Adesione: le funzioni ossidriliche sono in grado di creare forze ( $AB$ )
Collagene	Proteine fibrose, costituite da catene polipeptidiche. Adesione: la funzione ammidica inclusa all'interno del legame peptidico è in grado di creare forze ( $AB$ ) e ( $LW$ ). I gruppi ionici possono rinforzare l'adesione tramite le forze ioniche ( $LI$ )
HPcellulosa	Polisaccaride, funzioni ossidriliche. Adesione: le funzioni ossidriliche sono in grado di creare forze ( $AB$ )
PEOX	Polimero lineare, termoplastico, non ionico, solubile in acqua e in acetone. Adesione: la funzione ammidica è responsabile della formazione di forze ( $LW$ )
Acrilici	Polimeri lineari omo e copolimeri. Adesione: i gruppi esteri consentono di generare delle interazioni di tipo ( $LW$ )
EVA	Copolimero dell'acetato di vinile e di polietilene. Adesione: gli ossidrili creano dei legami ( $AB$ ) e i gruppi acetati delle interazioni ( $LW$ )
Alcool polivinilico	Ottenuto per idrolisi parziale o totale dell'acetato di polivinile. Adesione: gli idrossili creano legami ( $AB$ ) e i raggruppamenti di acetati delle interazioni ( $LW$ )

Tavola I

ne sono responsabili delle proprietà di solubilità e di viscosità degli alcoli polivinilici.  
 Proprietà di aderenza: questi prodotti hanno eccellenti proprietà adesive poiché i gruppi ossidrilici e acetati partecipano entrambi. Gli ossidrilici creano legami (*AB*) e i raggruppamenti acetati creano interazioni (*LW*)

## Natura e proprietà delle cariche e dei pigmenti<sup>5</sup>

Le cariche ed i pigmenti inseriti in questo studio sono tradizionalmente utilizzati in pittura e quindi molto rappresentativi. Le loro proprietà di superficie sono molto differenti e di conseguenza è interessante comparare l'effetto dei diversi adesivi sui diversi materiali.

**La Kaolinite.** È un'argilla bianca a base di silicati d'alluminio. Le particelle sono formate da lamelle 0.2 fino a 4  $\mu\text{m}$  (media 1  $\mu\text{m}$ ), la loro superficie specifica è elevata. Il peso specifico va da gr 2.5 a gr 2.6. Il pH è leggermente acido.  
 Reattività della superficie: presenza di Ossidrilici OH e Ossigeni O (polare).  
 Proprietà di aderenza: possibilità di creare forze (*AB*) e (*LW*).

**Carbonato di calcio.** Si tratta di una carica minerale ionica formata da particelle di forma sferica da 0.1 a 20  $\mu\text{m}$  (media 2.5  $\mu\text{m}$ ). Il peso specifico va da gr 2.5 a gr 2.6. la solubilità in acqua è bassissima, pari a 0.015 g/l.  
 Reattività della superficie: solubilizzazione in superficie e ioni liberi.  
 Proprietà di aderenza: possibilità di creare legami ionici.

**Solfato di calcio.** Gesso «biidratato», carica minerale ionica. I cristalli sono formati da agglomerati di lamelle. Il peso specifico è di gr 2,32. la solubilità del solfato di calcio in acqua è di 2,4 g/l.  
 Reattività della superficie: solubilizzazione in superficie e ioni liberi  
 Proprietà di aderenza: possibilità di creare legami ionici

**Ocra gialla.** Questo pigmento proviene dalla limonite. È un miscuglio di ossidi di ferro idrati.  
 Reattività della superficie: zone di attività: Ossidrilici OH.  
 Proprietà di aderenza: possibilità di creare forze (*AB*).

**Terra Ombra bruciata.** Si caratterizza per la presenza di biossido di manganese e per la maggior parte di ossidi e idrossido di ferro.  
 Reattività della superficie: zone di attività: Ossidrilici OH e ossigeno O (polare).  
 Proprietà di aderenza: possibilità di creare forze (*AB*) e (*LW*).

Kaolinite	Argilla bianca pura a base di alluminosilicati Zone di attività: Ossidrilici OH e ossigeno O Proprietà di adesione: possibilità di creare forze ( <i>AB</i> ) e ( <i>LW</i> )
Carbonato di calcio	Carbonato di calce precipitato, carica minerale ionica Zone di attività: ioni in superficie Proprietà di adesione: possibilità di creare delle forze d'interazione
Solfato di calcio	Gesso bi-idrato, carica minerale ionica Zone di attività: ioni in superficie Proprietà di adesione: possibilità di creare delle forze d'interazione
Ocra gialla	Ossidi di ferro idrati Zone di attività: Ossidrilici OH Proprietà di adesione: possibilità di creare forze ( <i>AB</i> ) e ( <i>LW</i> )
Terra d'ombra bruciata	Miscela di ossidi di ferro idrati, di manganese e silicati d'alluminio Zone di attività: Ossidrilici OH e ossigeno O Proprietà di adesione: possibilità di creare forze ( <i>AB</i> ) e ( <i>LW</i> )
Vermiglione	Solfuro di mercurio Zone di attività: zolfo S (equivalente a O) Proprietà di adesione: possibilità di creare forze ( <i>AB</i> )

Tavola 2

**Vermiglione.** Solfuro di mercurio, pigmento artificiale di sintesi. Il cinabro è un vermiglione naturale, macinato e purificato.

Reattività di superficie: zone di attività: zolfo S (polare)

Proprietà di aderenza: possibilità di creare delle forze (LW)

## Identificazione delle interazioni tra gli adesivi e i substrati

La struttura chimica degli adesivi e dei pigmenti e delle cariche ci permette, a partire da modelli che andremo a definire, di prevedere le differenti interazioni che si possono creare tra gli adesivi e i substrati. Queste si dividono in 3 categorie:

### Forze di interazione tra adesivi e substrati ossidrilati - (Tabelle 3-4-5)

Adesivi	OH	NH	C=O	OC=O	NC=O
Substrato ossidrilato	OH	OH	OH	OH	OH
Forze	(AB) <sup>2</sup>	(AB) <sup>2</sup>	AB	AB	AB

### Forze di interazione tra adesivo e substrato di tipo ossido - Tavola 4

Adesivi	OH	NH	C=O	OC=O	NC=O
Substrato di tipo ossido	O	O	O	O	O
Forze	AB	AB	LW	LW	LW

### Forze di interazione tra adesivi e substrato ionico - Tavola 5

Adesivi	Ion	OH	NH	O
Substrato ionico	Ion	Ion	Ion	Ion
Forze	Li	Li	Li	Li

## Metodo di valutazione delle interazioni

All'interno di una problematica complessa come l'adesione è difficile distinguere ciò che riguarda le forze dispersive, polari o la partecipazione di legami a idrogeno, acido/base o ionici. Noi dobbiamo considerare che, quando si tratta di un sistema complesso, l'interazione molecolare è la risultante dell'insieme delle interazioni dei gruppi costituenti le molecole.

(AB) <sup>1</sup> [OH:OH]	(AB) <sup>2</sup> [NH:OH]	(AB) <sup>3</sup> [OH:O]	(AB) <sup>4</sup> [NH:O]	(AB) <sup>5</sup> [CO:OH]	(AB) <sup>6</sup> [OCO:OH]	(AB) <sup>7</sup> [NCO:OH]	LW <sup>8</sup> [CO:O]	LW <sup>9</sup> [OCO:O]	LW <sup>10</sup> [NCO:O]	Li <sup>1</sup> [Ion:ion]	Li <sup>2</sup> [Ion:OH-NH]	Li <sup>3</sup> [Ion:O]
1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	1,3	1,2	1,1

Tabella 6

Sono stati messi a punto dei metodi di simulazione molecolare al fine di stabilire, a partire da un modello, le proprietà macroscopiche di un insieme di molecole. Queste tecniche di simulazione sono esse stesse una semplificazione

Se ciascuna di queste forze d'interazione deve avere un valore di energia di legame noi possiamo così attribuirgli un valore arbitrario tenendo conto della natura e la struttura delle funzioni molecolari.

	Funori [OH]	Ipropil-cell [OH]	Collagene [NH, NCO,ions]	PEOX [NCO]	PVAI [OCO,OH]	Acilati [OCO]	EVA [OCO]
Argilla [OH, O, ion]	3	3	5,7	1,6	4,8	1,8	1,8
Ocra gialla [OH]	1	1	2,5	0,4	1,5	0,5	0,5
Terra d'ombra bruciata [OH, O]	1,8	1,8	4,4	0,5	2,5	0,7	0,7
Vermiglione [S=O]	0,8	0,8	1,9	0,1	1,0	0,2	0,2
Carbonato di calcio [ioni]	1,2	1,2	3,6	1,1	2,3	1,1	1,1
Solfato di calcio [ioni]	1,2	1,2	3,6	1,1	2,3	1,1	1,1

Tabella 7

Prendendo come unità l'interazione ossidrile/ossidrile, le forze sono ordinate in ordine decrescente, sapendo che i legami ionici hanno il valore più elevato. I valori si estendono da 1,3 a 0,1. Aggiungendo, inoltre, l'insieme delle interazioni che si possono creare nell'interfaccia tra un adesivo e un substrato, si ottiene un valore globale che permette di stabilire una stima delle forze di interazione.

Per esempio, prendendo il Gelvatol e la Terra d'ombra bruciata, noi abbiamo da un lato dei gruppi ossidrilici e degli ossigeni e dall'altro dei gruppi acetati e idrossilici. Le interazioni che si possono produrre sono: [OH/OH] ( $AB_1$ ) = 1, [OH/O] ( $LW_1$ ) = 0,8, [OC=O/OH] ( $LW_3$ ) = 0,5, [OC=O/O] ( $LW_7$ ) = 0,2. Il totale è di 2,5.

Questi valori in sé non hanno nessun significato di natura chimica o fisico-chimica. Hanno lo scopo di mettere in relazione in maniera empirica l'energia di adesione e il potere consolidante.

## Determinazione del potere consolidante

Al fine di misurare l'efficacia degli adesivi in rapporto a delle cariche e dei pigmenti consolidati, è stata considerata la flessione in tre punti. La scelta di questa prova meccanica è legata innanzitutto alla sua fattibilità e alla sua riproducibilità. La prova di flessione in tre punti consiste nel sollecitare un campione nella sua parte centrale con una forza applicata perpendicolarmente (fig. 5). Abbiamo adattato la procedura standardizzata (NFB51-124). La forza, premendo nel centro del campione, lo deforma fino alla rottura.

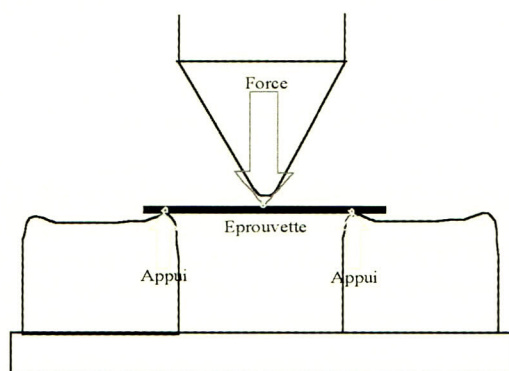


Fig 5. Test di flessione in tre punti.

In un campione in flessione una parte è sottoposta ad una compressione mentre l'altra viene sollecitata in trazione. La forza massima di trazione si esercita a livello della parte superficiale esterna. È generalmente a questo livello che la rottura si manifesta. Tale forza si esprime in N/cm: si tratta di una forza lineare che si sviluppa sulla larghezza del campione.

$$\sigma_{rupt\ flexion} = \frac{F_{rupt\ flex}}{A_{sect\ épron}}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{rf/c} - \sigma_{rf/inc}$$

Lo "stress" di rottura in flessione è ottenuto dal rapporto tra la forza di flessione e l'area della sezione del campione.

Il potere consolidante di un adesivo è ottenuto a partire dalle differenze di resistenza alla rottura di un campione consolidato e di un campione "testimone" non consolidato.

$$Q = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100$$

Infatti, tale variazione di resistenza è un primo risultato dell'effetto di consolidamento di un materiale degradato impregnato da un adesivo. Tuttavia, tale misura, non tenendo conto della quantità di consolidante, ha un significato limitato e i valori non possono essere confrontati tra di loro. Introducendo un valore della quantità di consolidante come la sua percentuale in peso

$$P_{cs} = \frac{\Delta\sigma}{Q}$$

si ottiene il "potere consolidante specifico".

Il potere consolidante specifico traduce bene l'attitudine di un consolidante a restituire ad un solido un grado di coesione superiore alla coesione del solido stesso prima del consolidamento, in maniera del tutto indipendente dalla quantità del consolidante.

## Fabbricazione dei campioni

I campioni sono stati ottenuti tramite stampo all'interno di controforme in resina sili-conica di dimensioni definite (fig. 6), lunghezza mm 100, larghezza mm 15 e spessore mm 2.

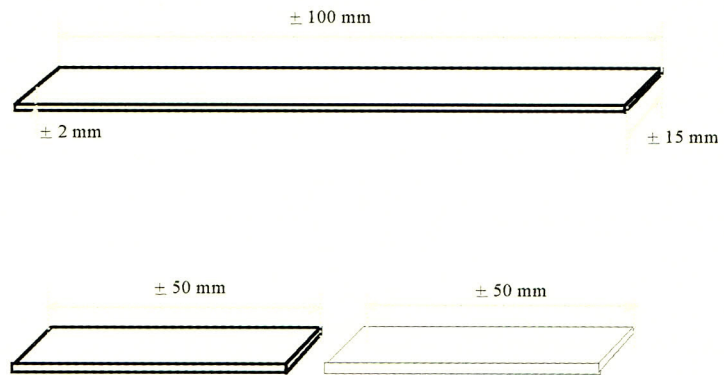


Fig 6. Dimensione dei campioni.

L'impasto che compone i campioni è stato ottenuto miscelando le diverse cariche con una minima quantità di legante, al fine di ottenere una materia molto fragile e porosa, con una resistenza alla rottura assai debole.

Per rispondere alla necessità di immergere i nostri campioni in adesivi disciolti sia in acqua sia in solventi organici, abbiamo scelto come legante per tutti i campioni realizzati l'Akeogard AT35 al 2% in acqua. Questa resina ha dimostrato una buona resistenza sia ai diversi solventi sia all'acqua, ed ha consentito di ottenere una "insolubilità" adeguata a garantire una sufficiente coesione ai campioni durante la loro immersione nel consolidante. La quantità minima di Akeogard AT35 necessaria per rendere i diversi campioni manipolabili ha richiesto una concentrazione volumetrica di pigmento tra 98,5% e 99,5%. Solo l'argilla, essendo un materiale che indurisce naturalmente, non ha avuto bisogno dell'addizione del legante per ottenere la coesione necessaria.

*Calcolo della CPP (per "Concentration Pondérale Pigmentaire" si intende la concentrazione volumetrica di pigmento)*

$P_1$ : pesi di pigmenti, cariche o argilla

$P_2$ : pesi di una colla in soluzione ad una concentrazione  $C$

ES: estratto secco della colla  $ES = (P_2 \times C) / 100$

$$CPP = [P_1 / (P_1 + ES)] \times 100$$



*Esempio:* fabbricazione di un campione di solfato di calcio

Quantità di solfato di calcio      P<sub>1</sub>: 100 g  
 Quantità di Akeogard al 2 %      P<sub>2</sub>: 35g  
 Estratto secco adesivo              ES: 35 x 2 % = 0,70g

Carica legante	quantità carica gr	quantità legante gr	estratto secco del legante gr	CPP %
carbonato di calcio	100	35	0,70	99,30 %
solfato di calcio	100	35	0,70	99,30 %
vermiglione	100	24	0,48	99,56 %
terra d'ombra bruciata	100	71,4	1,43	98,59%
ocra gialla	100	62,5	1,25	98,76%.

Tabella 8

Questa miscela ha garantito una consistenza adeguata al nostro scopo.

$$\text{CPP} = [100 / (100 + 0,70)] \times 100 = 99,30 \%$$

### Preparazione dei campioni

La stesura negli stampi dell'impasto ottenuto miscelando legante e cariche è stata realizzata con molta perizia, al fine di evitare il più possibile la formazione di bolle d'aria e di creare bordi frastagliati. Ogni difetto avrebbe infatti potuto compromettere i risultati. L'impasto è stato lisciato in superficie con una spatola e, infine, lasciato essiccare all'aria. I campioni sono rimasti ad asciugare negli stampi per 48 ore prima di poter essere estratti senza rischi. Una volta rimossi dalle controforme, i campioni sono stati tagliati a metà ottenendo barrette da mm 50 x mm 15, rettificata e levigate lungo i bordi.

I campioni così preparati sono pronti per il consolidamento negli adesivi selezionati.

### Procedura di consolidamento per immersione

Questa procedura di consolidamento è stata scelta perché limita le variabili dovute alle abilità manuali dell'operatore, che non renderebbero "parametrabile" il lavoro.

L'immersione del campione nell'adesivo in soluzione o in emulsione per un tempo preciso, consente di operare nelle medesime condizioni e di limitare le differenze legate all'operazione stessa (fig. 7).

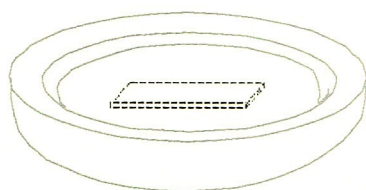


Fig 7. Consolidamento dei campioni per immersione.

La scelta delle diluizioni degli adesivi è stata decisa a partire dai risultati di una piccola indagine sulle percentuali maggiormente utilizzate eseguita presso un gruppo eterogeneo di restauratori.

L'immersione di ogni campione è durata 1 minuto. Durante l'immersione tutti i campioni hanno creato bolle d'aria, indicando che l'adesivo stava penetrando per capillarità (fig. 8). Dopo l'estrazione dal consolidante tutti i campioni sono stati tamponati con una carta assorbente al fine di rimuovere l'eccesso di adesivo sulla superficie.

Adesivo	Solvente <sup>6</sup>	Percentuale diluizione	Temperatura durante l'immersione <sup>7</sup>
Funori	acqua demineralizzata	1%	25°C
Colla di pelli	acqua demineralizzata	2,5%	40°C
Colla di storione	acqua demineralizzata	2,5%	40°C
Aquazol 200	acqua demineralizzata	5%	25°C
Aquazol 200	acetone	5%	25°C
Klucler G	acqua demineralizzata	1%	25°C
Gelvato	acqua demineralizzata	5%	25°C
Plectol B500	acqua demineralizzata	5%	25°C
Acryl 33	acqua demineralizzata	5%	25°C
Paraloid B72	acetone	5%	25°C
Beva O.F. 371	white spirit	5%	40°C
Plexisol P550	white spirit	5%	40°C

Tabella 9

## Determinazione della quantità di colla acquisita da ciascun campione

La procedura è semplice e consiste in:

- pesatura dei campioni non consolidati<sup>8</sup>  $P_1$
- immersione dei campioni nell'adesivo diluito per 1 minuto.
- asciugatura dei campioni per almeno 15 giorni
- nuova pesatura dei campioni consolidati  $P_2$
- calcolo del peso del consolidante (gr)
- calcolo della quantità relativa di consolidante in percentuale (%)

L'insieme dei risultati è presente nell'Appendice.

$$P_{cons.} = P_2 - P_1$$

$$Q = \frac{P_2 - P_1}{P_1} \times 100$$

## Analisi dei risultati

### Resistenza alla rottura dei campioni non consolidati

La resistenza alla rottura di ciascun pigmento e carica non consolidato è stata realizzata con dei lotti che vanno dai 10 ai 19 campioni.

La resistenza della terra d'ombra bruciata non consolidata ha un valore di circa 180 volte più elevato rispetto al carbonato di calcio. L'ampiezza dell'intervallo dei valori sottolinea l'eterogeneità dei lotti. La grande fragilità e conseguente scarsa resistenza meccanica dei campioni non consolidati è in gran parte dipendente dalla porosità (dovuta anche alla minima quantità di legante) e dai difetti di fabbricazione.

Cariche e pigmenti non consolidati	Numero dei campioni	Resistenza alla rottura MPa	Intervallo tra i valori massimi e minimi
terra d'ombra bruciata	19	<b>1,434</b>	<b>0,4453</b>
argilla	15	<b>0,970</b>	<b>0,2605</b>
ocra gialla	16	<b>0,731</b>	<b>0,2020</b>
solfato di calcio	12	<b>0,610</b>	<b>0,1600</b>
vermiglione	10	<b>0,010</b>	<b>0,0070</b>
carbonato di calcio	16	<b>0,008</b>	<b>0,0065</b>

Tabella 10

### Resistenza alla rottura dei campioni consolidati

Esaminiamo questi risultati sia dal punto di vista degli adesivi sia da quello di pigmenti e cariche. Un certo numero di risultati sono stati scartati per diverse ragioni:

- il numero dei campioni era insufficiente per poter essere rappresentativo
- il valore della resistenza alla rottura del campione era inferiore alla resistenza alla rottura del campione non consolidato
- il peso del campione era inferiore a quello del campione non consolidato

Numerosi campioni si sono rotti o si sono infragiliti durante il trasporto dall'Italia a Parigi. Quando il peso del campione consolidato è inferiore a quello del campione non consolidato, ciò è dovuto alla disgregazione (visivamente non percepibile) del campione durante l'impregnazione. Pertanto, abbiamo preso in considerazione soltanto i risultati significativi.

### Assorbimento dei consolidanti da parte dei campioni

Tutti i campioni sono stati consolidati per immersione all'interno dei diversi adesivi diluiti. Come già indicato, la durata dell'immersione è sempre stata di 1 minuto, tempo in cui l'adesivo penetra all'interno del materiale poroso. Si sa che i criteri di penetrazione sono:

- la tensione superficiale dell'adesivo in soluzione o in emulsione
- la bagnabilità delle cariche e dei pigmenti in rapporto ai liquidi
- la viscosità delle soluzioni e delle emulsioni
- la dimensione delle molecole e delle particelle delle resine
- la dimensione e la distribuzione dei pori nei solidi pulverulenti

La quantità di consolidante ottenuta attraverso la pesatura dopo l'asciugatura dei campioni ci indica la quantità totale di resina inclusa nel campione, senza tener conto della distribuzione della resina nel campione stesso. I valori medi dell'adesivo trattato vanno da 0,10% a 1,51%.

È l'Aquazol 200<sup>9</sup>, diluito al 5% in acetone, l'adesivo che impregna meglio i campioni di pigmenti e cariche (1,51%). In acqua questa stessa resina ha un potere penetrante

Q dell'adesivo in %	Argilla	Ocra gialla	Terra d'ombra bruciata	Vermiglione	Solfato di calcio	Carbonato di calcio	Media
Funori		0,0508			0,0526	0,2053	0,10
Colla di storione	0,0647	0,3365		0,2322	0,2478	0,4983	0,28
Colla di pelli	0,1035	0,3795	0,0604	0,2649	0,3753	0,578	0,29
Aquazol 200 + acetone	0,4459	1,9245	0,5983	1,29	2,2629	2,5383	1,51
Aquazol 200 + acqua	0,2163	0,9345	0,5440		0,9585	3,0271	1,14
Kluccel G	0,1138					0,1778	0,15
Gelvatol	0,1909	0,9793	0,4872	0,5496	0,9531	1,2497	0,73
Plectol B 500		0,9691	0,7341	0,6243	0,9631	1,2922	0,92
Acryl 33			0,3937	0,4713	0,6864	1,2098	0,69
Paraloid B 72	0,3361	1,1282		0,6109	1,0561	1,2387	0,87
Beva O.F.371			0,5814		1,3577	1,5184	0,97
Plexisol P550	0,6028	1,0978	0,4922		1,5685	1,7157	1,10
Media	0,26	0,87	0,49	0,58	0,95	1,25	

Tabella 11

leggermente inferiore (1,14%). La ragione di questa differenza è probabilmente dovuta alla tensione superficiale della soluzione acquosa.

Il Plexisol P550<sup>10</sup> in soluzione al 5% in white spirit ha ugualmente un valore relativamente elevato (1,10%). I due adesivi sopra descritti hanno un potere d'impregnazione elevato.

Allo stesso modo osserviamo che anche i campioni impregnati con Beva O.F.371 e Paraloid B72 in soluzione organica raggiungono una capacità di consolidamento piuttosto significativa.

Per quanto riguarda il Plectol B500 e l'Acryl 33 abbiamo osservato, dopo l'asciugatura, la presenza di un film in superficie (fig. 9). Questa pellicola ci induce a pensare che la penetrazione di questi adesivi è piuttosto debole e che il consolidamento è solo superficiale

Il Funori e il Klucel G, in soluzione all'1% in acqua, si ritrovano in quantità molto ridotta nei campioni dopo l'asciugatura (0,10% e 0,15%). La scelta di una diluizione elevata è determinata dalla viscosità della soluzione.

Le colle animali, storione e pelli, in soluzione al 2,5% in acqua, sono scarsamente assorbite dai pigmenti e dalle cariche. In entrambi i casi la quantità di colla assorbita è molto simile (0,28% e 0,29%). Probabilmente la concentrazione e la consistenza di queste colle, utilizzate durante l'immersione a 40°C, sono responsabili di questa debole impregnazione.

In tutti i casi sopra citati la percentuale di consolidante presente nei campioni è debole e non invasiva. Essa aumenta man mano che aumenta la concentrazione degli adesivi nei solventi.

La carica che assorbe gli adesivi con i migliori risultati è il carbonato di calcio (1,25%). In ben otto adesivi su dodici la percentuale di adesivo che si trova in questi campioni è superiore all'1%. L'Aquazol 200 in soluzione acquosa e in acetone ha le più elevate medie percentuali di adesivo nelle diverse cariche.

Il solfato di calcio ha anch'esso una buona capacità di assorbimento delle resine e delle colle (0,95%). Le soluzioni organiche lo impregnano in misura maggiore rispetto alle soluzioni acquose.

L'argilla, a causa della sua struttura, si lascia difficilmente impregnare dagli adesivi. L'ocra gialla, il vermiglione e la terra d'ombra bruciata hanno dei valori intermedi.

### Resistenza alla rottura dei campioni consolidati

Questo valore, ottenuto sottoponendo le barrette al test di stress meccanico, ci consente di calcolare la differenza della resistenza alla rottura in flessione tra un campione consolidato e non consolidato. Teoricamente, più consolidante è presente nel campione, maggiore è la sua resistenza. È il caso per la maggior parte degli adesivi, anche se non possiamo generalizzare questo assunto.

Abbiamo studiato l'influenza di Q% in rapporto alla resistenza alla rottura di cinque adesivi su campioni di ocra gialla: colla di pelli, Aquazol 200, Plextol B500, Paraloid B72 e Plexisol P550. Partendo dalle pesature e dai test di flessione effettuati, abbiamo verificato l'evoluzione della resistenza alla rottura in funzione alla quantità di adesivo presente nei diversi campioni, tracciando delle linee di comportamento su di un grafico. L'individuazione dei valori di Q su x in rapporto a  $\sigma$  su y permette di ottenere un grafico rappresentativo dell'evoluzione della resistenza alla rottura in funzione della quantità di adesivo.

Pigmento Ocra gialla		Es.1	Es.2	Es.3	Es.4	Es.5	Es.6	Es.7	Es.8	Es.9	Es.10
Colla di pelli	Q% (x)	0,41	0,36	0,39	0,41	0,39	0,39	0,34	0,39	0,37	0,34
	$\sigma$ (y)	2,73	2,77	2,42	3,37	3,09	2,91	2,51	2,48	3,26	1,71
Aquazol 200	Q%	0,95	0,94	0,97	0,92	0,90	0,90	0,95	0,97	0,91	
	$\sigma$	0,71	1,97	2,21	1,86	1,83	2,13	2,83	2,20	2,26	
Plextol B 500	Q%	1,31	1,01	1,55	0,69	1,18	0,76				
	$\sigma$	0,92	0,93	0,98	0,98	0,98	1,02				
Paraloid B72	Q%	1,15	1,10	1,05	1,11	1,15	1,21				
	$\sigma$	1,95	2,67	0,64	1,34	2,32	1,14				
Plexisol P 550	Q%	1,06	1,15	1,05	1,06	1,14	1,35				
	$\sigma$	1,33	1,09	1,03	1,48	1,33	1,84				

Tabella 12.

Delle cinque linee ottenute, quattro presentano un andamento positivo e una un andamento negativo (fig. 10).

La linea della colla di pelli ha la pendenza più elevata che corrisponde ad una maggiore capacità di resistenza allo stress. Un piccolo aumento della sua massa comporta una forte crescita della resistenza alla rottura. La linea dell'Aquazol 200 ha una pendenza meno accentuata ma superiore alla pendenza delle linee del Paraloid B72 e del Plexisol P550.

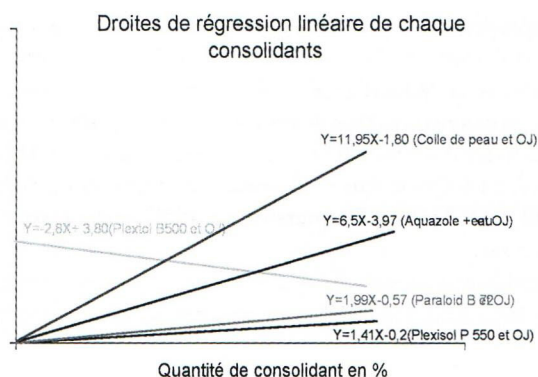


Fig 10. Resistenza alla rottura dei campioni in funzione della quantità di adesivo.

Solo la pendenza della linea del Plexitol B500 è negativa. Questa tendenza si verifica per tutti i pigmenti e le cariche studiate. Tali differenze di comportamento dei campioni consolidati sono probabilmente in rapporto con le proprietà meccaniche degli adesivi.

Nondimeno, per ritornare alla resistenza alla rottura di un adesivo, ci troviamo di fronte a valori medi molto differenti che vanno da 0,31 a 2,89 MPa.

Tra i migliori risultati ci sono quelli dell'Aquazol 200 in acetone (2,89MPa), del Paraloid B72 (1,80 MPa), dell'Aquazol 200 in acqua (1,64 MPa), del Gelvatol (1,56 MPa), della colla di pelli (1,34 MPa) e della colla di storione (1,21 MPa).

Osservando i risultati dal punto di vista delle cariche il solfato di calcio (1,77 MPa) e il carbonato di calcio (1,43 MPa) si consolidano relativamente bene se confrontate con l'argilla, che da dei risultati mediocri (0,75 MPa).

Resistenza alla rottura	Argilla	Ocra gialla	Terra d'ombra bruciata	Vermiglione	Solfato di ca	Carbonato di ca	Media
Funori		0,2917			1,12	0,8088	0,74
Colla di storione	0,3545	0,9696		0,8406	1,9783	1,8894	1,21
Colla di pelli	0,4038	1,9923	1,0778	0,8628	2,0445	1,6498	1,34
Aquazol 200 + acetone	0,8248	2,6444	1,737	2,8755	4,2113	5,0456	2,89
Aquazol 200 + acqua	1,4726	1,2670	2,042		1,8734	1,5675	1,64
Kluccel G	0,1903					0,4316	0,31
Gelvatol	1,2669	1,9865	1,833	0,4457	2,8661	0,9685	1,56
Plexitol B500		0,3518	0,759	0,598	0,6652	0,4692	0,57
Acryl 33			0,6469	0,4977	1,0227	0,8502	0,75
Paraloid B72	1,2624	0,9489		1,4481	2,6704	2,6463	1,80
Beva O.F.371			0,4267		0,331	0,2645	0,34
Plexisol P550	0,2418	0,6179	0,9545		0,68	0,5628	0,61
Media	0,75	1,23	1,18	1,08	1,77	1,43	

Tabella 13.

### Quantità di consolidante e resistenza alla rottura dei campioni consolidati

I campioni che durante l'immersione hanno acquisito quantità simili di consolidante, vale a dire che hanno simili valori di Q% (vedi tavola 11), ad esempio per l'Aquazol 200 in acqua (1,14%) e il Plexisol P550 (1,10%), hanno valori assai differenti di resistenza alla rottura in flessione (1,64 MPa e 0,61 MPa) (vedi tavola 13). Inversamente, per campioni con valori simili di resistenza alla rottura, come nel caso dell'Aquazol 200 in acqua (1,64 MPa) e del Gelvatol (1,56 MPa), la quantità percentuale di consolidante acquisita è rispettivamente di 1,14% e 0,73%, con una significativa differenza di 0,41%. (Fig. 11)

I risultati che abbiamo ottenuto mostrano che la quantità di adesivo assorbito dai campioni non è la *conditio sine qua non* per ottenere un buon consolidamento. Il potere consolidante, vale a dire il rapporto tra la resistenza alla rottura in flessione dei campioni consolidati e la quantità di adesivo, ci affranca da quest'ultimo parametro.

### *Potere consolidante*

Le due colle animali si distinguono per il miglior potere consolidante (3,94 MPa/%); il funori ha, purtroppo, fornito pochi dati validi e questo non ci consente adeguate considerazioni. Il Gelvatol (3,07 MPa/%) e l'Aquazol 200 in acqua (3,05 MPa/%) danno dei risultati simili. Questi quattro adesivi sono tutti in soluzione acquosa.

Il Paraloid B72 (2,33 MPa/%) e l'Aquazol 200 in acetone (2,22 MPa/%) hanno un potere consolidante meno elevato. Questi adesivi rimangono tuttavia interessanti nel caso in cui la materia pittorica sia sensibile all'acqua.

Nell'ambito di questo studio le altre resine non hanno fornito *performances* rilevanti. (Fig.12)

### *Relazione tra PCs e interazioni molecolari*

A partire dal metodo di valutazione delle interazioni precedentemente spiegato (paragrafi 4 e 5), abbiamo raggruppato in questa tavola i valori di interazione di ciascuna carica e pigmento in rapporto al tipo di adesivo. (Fig. 13)

Le colle animali (collagene) hanno le migliori affinità fisiche e fisico-chimiche con l'argilla, la terra d'ombra bruciata, il solfato e il carbonato di calcio e molto buone con ocra gialla e vermiglione.

Anche il Gelvatol presenta buone affinità con i medesimi pigmenti e cariche, seppure i valori sono un po' inferiori.

Per quanto riguarda il funori e il Klucel G le affinità con cariche e pigmenti sono meno elevate ma comunque superiori alle interazioni con pigmenti e cariche dell'Aquazol 200, degli acrilati e del Beva O.F. 371.

Le relazioni tra le interazioni e il PCs sono illustrate nel grafico. (Fig. 14)

I tre adesivi indicati nel grafico (fig.14) sono caratterizzati da forze d'interazione diverse:

- la colla di storione ha una capacità forte di interazione (*AB*), (*LW*) e (*LI*)
- il Gelvatol ha capacità di interazione media (*AB*) e (*LW*)
- il Paraloid B 72 ha una capacità scarsa di interazione (*LW*)

Questi tre adesivi sono accoppiati con due pigmenti (ocra gialla e vermiglione) e una carica (carbonato di calcio).

Nel primo gruppo gli elevati valori di interazione sono accompagnati da valori elevati di potere consolidante. Nel caso del vermiglione, dove le interazioni sono minori, il PCs è importante tanto quello del carbonato di calcio dove le interazioni sono più elevate. Teoricamente, nessuna relazione diretta lega queste due grandezze.

Nel terzo gruppo l'insieme dei valori del PCs è inferiore rispetto a quelli del primo gruppo. I rapporti tra PCs e le interazioni tra adesivi - pigmenti - cariche non hanno alcun legame.

Nel secondo gruppo, le coppie Gelvatol/vermiglione e Gelvatol/carbonato di calcio hanno un potere consolidante inferiore rispetto alle interazioni e confermano l'assenza di un legame diretto tra queste due grandezze.

Nel nostro studio il PCs è una misura scaturita da prove eseguite rigorosamente secondo un protocollo sperimentale conosciuto e affidabile, mentre i valori di approssimazione delle interazioni non sono che indicativi. La complessità degli accadimenti che si verificano nel corso del consolidamento ci impedisce di constatare l'esistenza di una relazione tra i fenomeni fisico-chimici e il potere consolidante. Tuttavia, ci si può domandare se le proprietà meccaniche degli adesivi non hanno esse stesse un'influenza sul consolidamento.

## Influenza delle proprietà meccaniche sul potere consolidante

Lo studio di un parallelepipedo solido in legno di piccole dimensioni, sottoposto a flessione in tre punti e analizzato secondo il metodo degli elementi finiti FEA, è una maniera di mettere in evidenza l'influenza delle proprietà meccaniche sul potere consolidante. Il solido pieno rappresenta il *solido non degradato*. La degradazione del solido è rappresentata da un 1/2 canale cilindrico assiale e longitudinale, che chiameremo "capillare". L'adesivo solidificato è rappresentato da 1/2 cilindro pieno o cavo di materiale solido, che ha le caratteristiche sia di un adesivo duro e rigido sul tipo di una colla animale, sia di un adesivo morbido e flessibile sul tipo del Plextol B500 (fig.15).

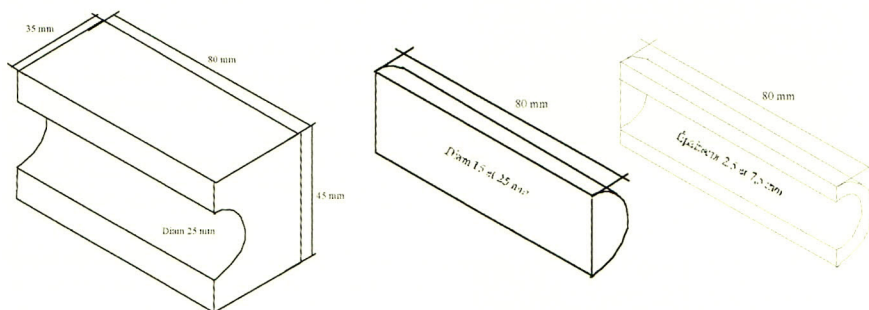


Fig. 15. Rappresentazione dei modelli, solido e consolidanti.

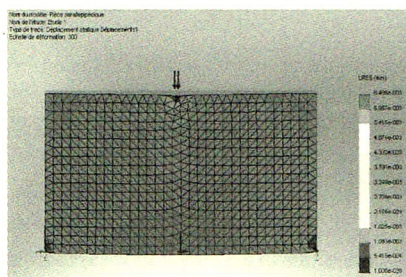
### Caratteristiche dei materiali in discussione Test di flessione in tre punti

#### Condizioni sperimentali:

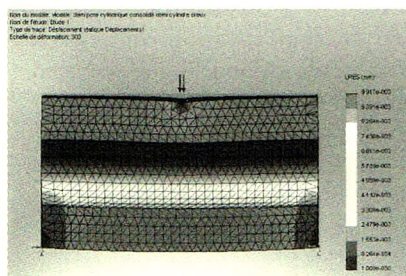
Due punti di fissaggio

Forza 100 N applicata al centro

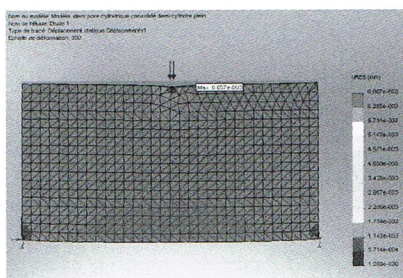
Balsa	Adesivo 1	Adesivo 2
E = 3000 Mpa (module de Young)	E = 2510 MPa	E = 400 Mpa
$\mu = 0,29$ (Coefficient de Poisson)	$\mu = 0,38$	$\mu = 0,48$
G = 300 Mpa (Module de cisaillement)	G = 8667 Mpa	G = 1080 Mpa
$\sigma = 20$ Mpa (Contrainte de rupture)	$\sigma = 40.7$ MPa	$\sigma = 7,5$ MPa



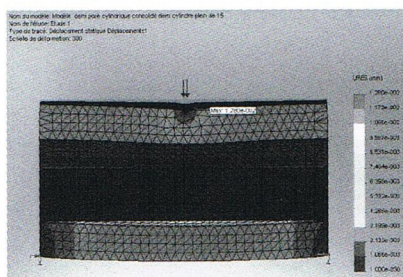
Test 1. Sollecitazione di un solido non degradato in flessione in tre punti.



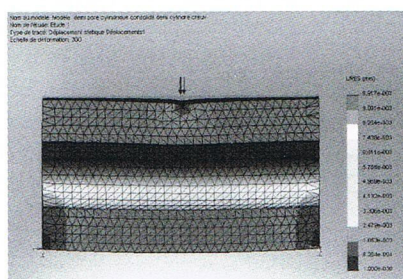
Test 2. Sollecitazione dello stesso solido degradato dalla presenza di un canale cilindrico che simula un capillare.



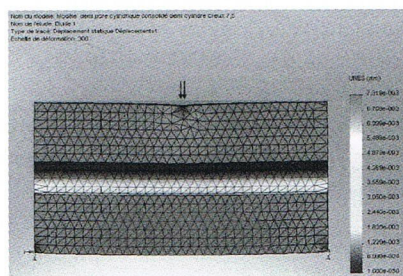
*Test 3.* Sollecitazione di un solido degradato riempito da un consolidante che forma un cilindro di 25 mm di diametro e di 80 mm di lunghezza, per un volume pari a 39 250 mm<sup>3</sup>. Il test è stato fatto con i due consolidanti previsti.



*Test 4.* Sollecitazione di un solido degradato riempito parzialmente con un adesivo formando un cilindro di un diametro inferiore a quello del capillare. È il caso di un adesivo che non ha compatibilità con il materiale del capillare. Asciugandosi il volume diminuisce sino a formare un cilindro di 15 mm di diametro e di 80 mm di lunghezza. Il volume del cilindro è di 14130 mm<sup>3</sup>. Il test è stato fatto con i due consolidanti previsti.



*Test 5.* Sollecitazione di un solido degradato riempito parzialmente con un adesivo che forma un cilindro cavo di 2,5 mm di spessore. Questo è il caso di un adesivo che ha compatibilità con il materiale del capillare. Il volume dell'adesivo diminuisce asciugando ma resta aderente alle pareti del capillare formando un cilindro cavo. Il volume del cilindro è di 14130 mm<sup>3</sup>. Il test è stato fatto con i due consolidanti previsti.



*Test 6.* Stessa situazione del test n. 5 ma con una quantità di adesivo più elevata; di conseguenza il volume dell'adesivo è di 32973 mm<sup>3</sup>.

## Risultati

La deformazione risultante dalla forza esercitata nel centro di un solido in appoggio su due punti permette di valutare la capacità del solido di resistere alla deformazione. Più la deformazione è piccola in rapporto ad una stessa forza applicata più la resistenza alla flessione è maggiore (fig. 16).

1. Il solido pieno (0,00650 mm) perde il 49,21% della sua resistenza quando è forato (0,01280 mm);
2. il consolidamento con gli adesivi 1 e 2, non presentando affinità con il capillare e riempiendolo fino al 36% (cilindro pieno di 15 mm di diametro), non apporta alcun miglioramento;
3. il consolidamento con gli adesivi 1 e 2, avendo un'affinità con il capillare e riempiendolo fino al 36% (cilindro cavo di 2,5 mm di spessore), apporta dei miglioramenti:
  - con l'adesivo 1 si ha il 45% del miglioramento della resistenza in flessione
  - con l'adesivo 2 non si ha che il 12%;
4. se la quantità di consolidante aumenta e raggiunge l'84% del volume del capillare, l'efficacia della resistenza in flessione aumenta:
  - con l'adesivo 1 si ha l'87% del miglioramento della resistenza in flessione
  - con l'adesivo 2 non si ha che il 39%;



5. infine, se il capillare è riempito integralmente di adesivo (100%), la resistenza in flessione aumenta:
- con l'adesivo 1 si ha il 93,9% di miglioramento della resistenza in flessione
  - con l'adesivo 2 non si ha che il 46%.

Questa analisi di un modello semplificato di solido degradato e consolidato da due adesivi con diverse caratteristiche è sufficientemente esplicito. Sulla base dei risultati possiamo concludere che:

- a) l'adesivo che presenta le proprietà meccaniche più affini a quelle del solido è il più efficace;
- b) la quantità di adesivo non è una *conditio sine qua non* per ottenere il miglior consolidamento in rapporto al peso dell'oggetto consolidato.

	Deformazione	Deformazione con C1	Deformazione con C2
	mm	mm	mm
1 Solido cavo	0,01280		
2 Solido cavo + cilindro pieno 15		0,01280	0,01280
3 Solido cavo + cilindro cavo 2,5		0,00992	0,01200
4 Solido cavo + cilindro cavo 7,5		0,00732	0,01030
5 Solido cavo + cilindro pieno 25		0,00688	0,00984
6 Solido pieno	0,00650		

Tabella 14.

## Conclusioni

Lo studio degli adesivi scelti per questo lavoro in rapporto a determinate cariche e pigmenti fa luce sull'efficacia di alcuni di essi. Abbiamo cercato di sviluppare i risultati al fine di mettere in evidenza i parametri principali che entrano in gioco nel consolidamento.

Benché alcuni adesivi penetrino meglio nelle cariche e nei pigmenti, essi non hanno necessariamente le migliori *performances* dal punto di vista del potere consolidante. D'altra parte la resistenza alla rottura cresce in modo più o meno apprezzabile a seconda dei prodotti e in funzione alla loro quantità, anche se abbiamo mostrato per due volte che la quantità di adesivo non è la *conditio sine qua non* per ottenere un buon consolidamento.

Sono senza dubbio le colle animali quelle che, nell'ambito di questo studio, hanno dato i migliori risultati. I loro valori sono elevati e mai inferiori a 2,8 MPa/%. L'Aquazol 200 in acqua e il Gelvatol offrono ugualmente dei risultati soddisfacenti. Va notato che tutti questi adesivi sono delle soluzioni acquose.

Le emulsioni Acril 33 e il Plextol B500 migliorano senza dubbio la resistenza alla rottura, ma attraverso la formazione di un film superficiale. La dimensione delle particelle dei polimeri in emulsione è probabilmente all'origine delle difficoltà di penetrazione di questi adesivi nei corpi porosi e dunque delle loro mediocri *performances*.

L'Aquazol 200 in acetone e il Paraloid B72 sono soluzioni organiche che hanno un potere consolidante sufficiente per consolidare superfici degradate che non tollerano gli adesivi acquosi.

I risultati ottenuti con il funori non sono stati sufficienti per poter stilare informazioni certe. È importante ricordare che nonostante la bassissima concentrazione da noi utilizzata, la caratteristica viscosità del funori riduce la capacità dell'adesivo di diffondersi all'interno dei materiali porosi. Un comportamento di diffusione analogo a quello del funori può essere segnalato per il Klucl G.

Osservando i valori ottenuti dal Beva O.F.371, ad una Q% alta non corrispondono valori di PC e forza meccanica significativi (addirittura sono inferiori a quelli del Plexisol P550). Il Beva O.F.371 e il Plexisol P550, diffusamente utilizzati dai restauratori, sottoposti a stress, dimostrano una scarsissima resistenza meccanica, sembrerebbero manifestare maggiori qualità come adesivi che non come coesivi di strati porosi.

Allo stato attuale dello studio, non si è potuta mettere in evidenza alcuna relazione tra le interazioni di tipo ( $AB$ ), ( $LW$ ) e ionica e il potere consolidante.

L'utilizzo di un'analisi con procedure standardizzate (FEA) attraverso la realizzazione un modello semplice rappresentante un solido degradato, ha permesso di studiare l'influenza di due parametri: proprietà meccaniche degli adesivi compatibili o meno con il solido.

I risultati di questa analisi si possono riassumere in tre punti:

- a) a pari quantità di adesivo, quello che presenta buone affinità con le pareti del capillare migliora la resistenza in flessione del materiale;
- b) a pari quantità di adesivo, quello che ha le proprietà meccaniche più affini a quelle del materiale da consolidare, è il più efficace;
- c) ci possiamo aspettare un buon miglioramento della resistenza con una quantità limitata di adesivo, se esso risponde a due criteri: compatibilità e proprietà meccaniche affini a quelle del materiale.

## Note

<sup>1</sup> Acido di Lewis

<sup>2</sup> Base di Lewis

<sup>3</sup> Funori e colla di storione: Bresciani S.r.l. via Breda, 142 Milano.  
Gelvatol, Klucel G, Aquazol 200, Beva O.F.371, Plexisol P550, Acril 33, Plextol B500, Paraloid B72: C.T.S. S.r.l. via Piave, 20-22 Altavilla Vicentina (VI).  
Colla di pelli: Zecchi s.n.c., via dello Studio, 19r Firenze.

<sup>4</sup> L'indice di acidità è rappresentato dal numero di milligrammi di idrossido di potassio necessario per neutralizzare 1 grammo di sostanza.

<sup>5</sup> Carbonato e solfato di calcio, terra d'ombra bruciata e ocre gialla: C.T.S. S.r.l. via Piave 20-22 Altavilla Vicentina (VI).

Vermiglione: Zecchi s.n.c. via dello Studio, 19r Firenze.

<sup>6</sup> Sono stati utilizzati: acqua demineralizzata, White Spirit D40 (CTS), Acetone Carlo Erba cod. 400974.

<sup>7</sup> Il valore di 25°C è inteso come la temperatura dell'ambiente di lavoro.

<sup>8</sup> Per renderli riconoscibili durante il lavoro, tutti i campioni sono stati numerati prima della pesatura iniziale. Si ringraziano la professoressa Paola Battilani dell'Istituto di Entomologia e Patologia Vegetale della Facoltà di Agraria, Università Cattolica di Piacenza e i Professori Bruno Messiga e Maria Pia Ricciardi del Laboratorio di Scienza dei Materiali Antichi, Dipartimento Scienze della Terra, Università degli Studi di Pavia per averci gentilmente concesso l'uso di bilance elettroniche a 4 decimali di grammo per le pesate dei modelli.

<sup>9</sup> Peso molecolare: 200.000 (valore indicato dal fabbricante).

<sup>10</sup> Peso molecolare: 50.000 a 150.000 (valore indicato dal fabbricante).

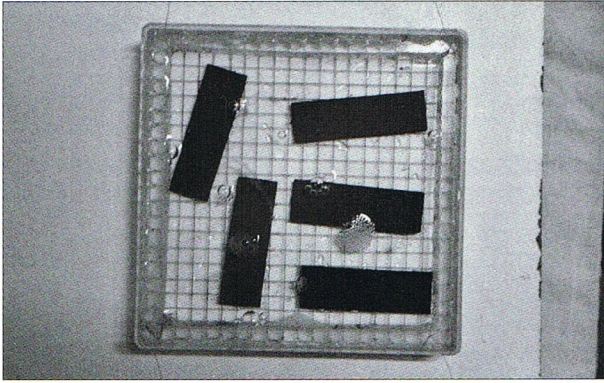


Fig 8. Campioni di vermiglione durante l'immersione.

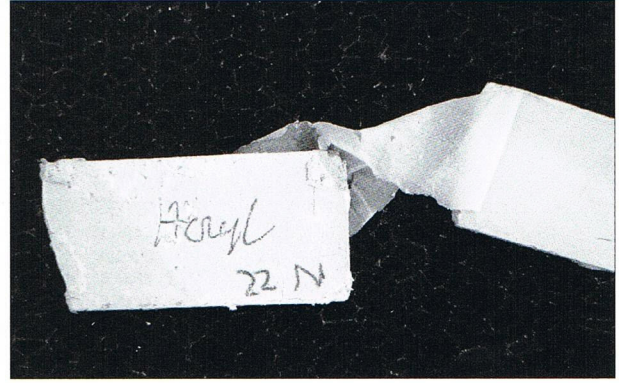


Fig 9. Film di Acril 33 sulla superficie di un campione.

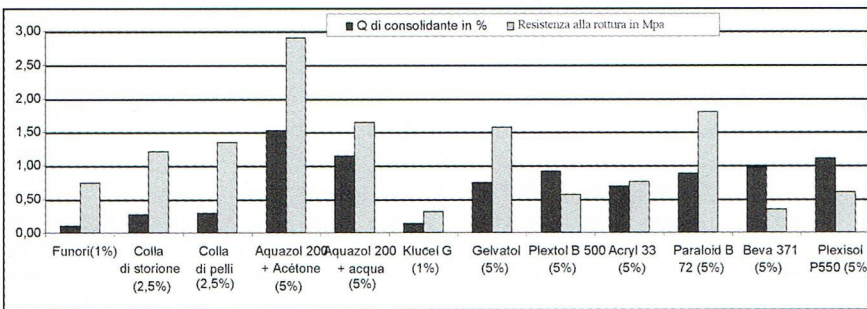


Fig 11. Resistenza alla rottura dei campioni consolidati.

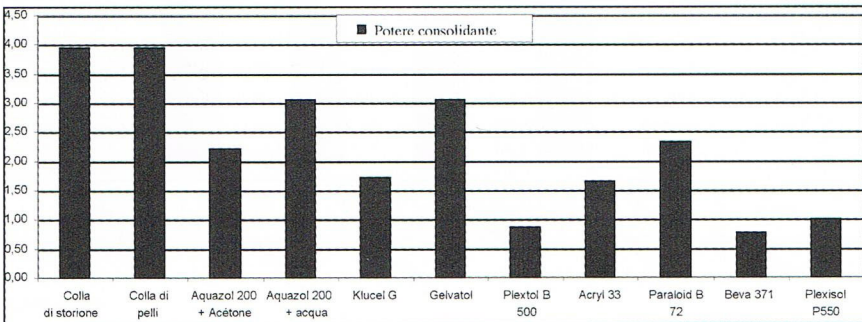


Fig 12. Potere consolidante degli adesivi.

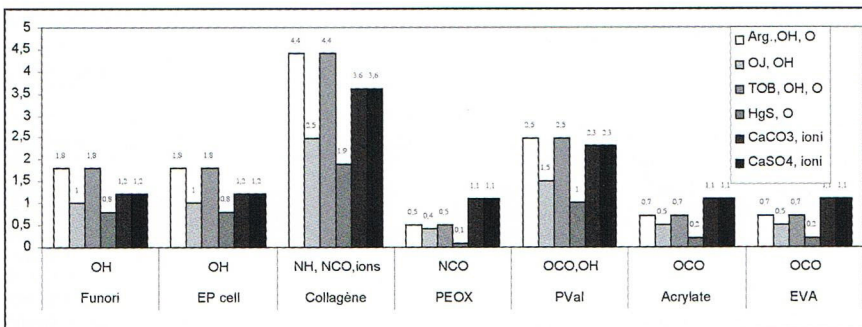


Fig 13. Interazioni tra adesivi, pigmenti e cariche.

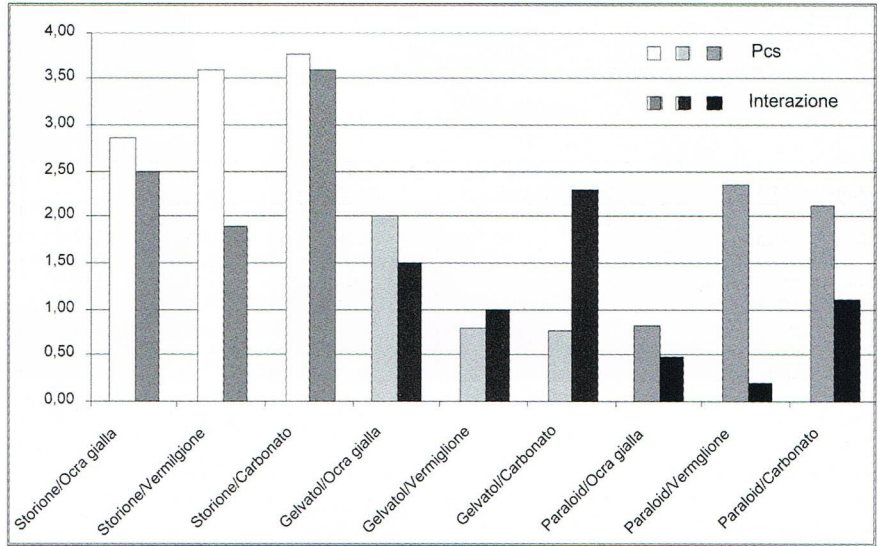


Fig 14. Interazioni e potere consolidante degli adesivi in rapporto a pigmenti e cariche.

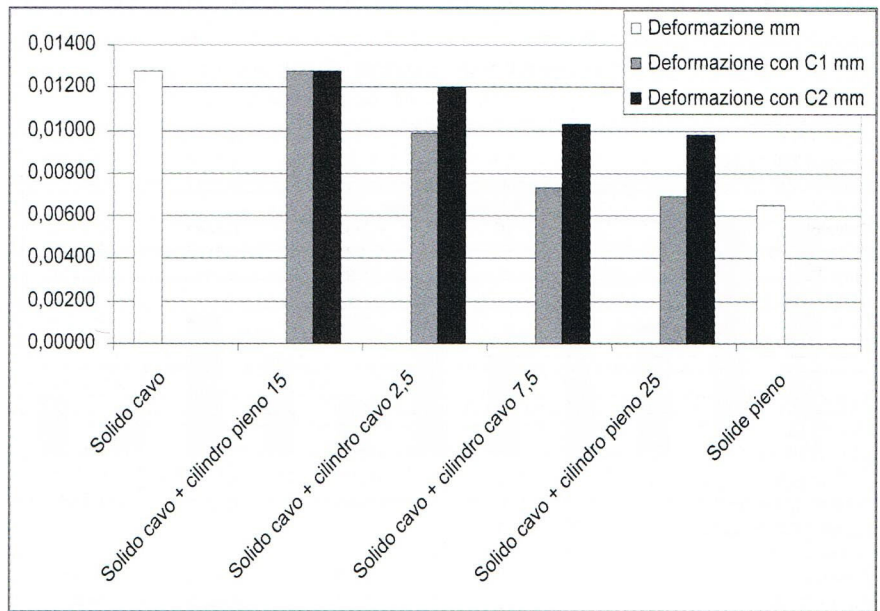


Fig 16. Deformazioni nei differenti test.

## Appendice

### Tavole dei valori

<b>Argilla <math>\sigma = 0,97\text{MPa}</math></b>	<b>n. campioni</b>	<b>Resistenza alla rottura MPa</b>	<b>Pcs</b>	<b>Q conso. %</b>
Funori	1			
Colla di storione	10	1,3245	5,4770	0,0647
Colla di pelli	7	1,3738	3,9034	0,1035
Aquazol 200 + Acetone	6	1,7948	1,8400	0,4459
Aquazol 200 + acqua	5	2,4426	6,4419	0,2163
Klucel G	6	1,1603	1,0069	0,1138
Gelvato	6	2,2369	6,6380	0,1909
Plextol B 500	6			
Acryl 33	1			
Paraloid B 72	7	2,2324	3,7564	0,3361
Beva 371	1			
Plexisol P550	7	1,0015	0,4332	0,6028

<b>Ocra gialla <math>\sigma = 0,731\text{MPa}</math></b>	<b>n. campioni</b>	<b>Resistenza alla rottura MPa</b>	<b>Pcs</b>	<b>Q conso. %</b>
Funori	8	1,0227	5,7578	0,0508
Colla di storione	10	1,7006	2,8844	0,3365
Colla di pelli	10	2,7233	5,2524	0,3795
Aquazol 200 + Acetone	10	3,3754	1,3746	1,9245
Aquazol 200 + acqua	9	1,9980	1,3568	0,9345
Klucel G	6			
Gelvato	9	2,7175	2,0294	0,9793
Plextol B 500	6	1,0828	0,3641	0,9691
Acryl 33	1			
Paraloid B 72	6	1,6799	0,8419	1,1282
Beva 371	1			
Plexisol P550	6	1,3489	0,5638	1,0978

<b>Terra d'ombra bru. <math>\sigma = 1,433\text{MPa}</math></b>	<b>n. campioni</b>	<b>Resistenza alla rottura MPa</b>	<b>Pcs</b>	<b>Q conso. %</b>
Funori	10			
Colla di storione	10			
Colla di pelli	7	2,5108	29,0076	0,0604
Aquazol 200 + Acetone	10	3,17	4,0214	0,5983
Aquazol 200 + acqua	4	3,4750	4,9911	5440
Klucel G	4			
Gelvato	10	3,2660	5,1441	0,4872
Plextol B 500	10	2,1920	1,9508	0,7341
Acryl 33	8	2,0799	3,3523	0,3937
Paraloid B 72	4	annulé	annulé	
Beva 371	7	1,8597	1,8914	0,5814
Plexisol P550		2,3875	3,3130	0,4922

<b>Vermigione <math>\sigma = 0,01\text{MPa}</math></b>	<b>n. campioni</b>	<b>Resistenza alla rottura MPa</b>	<b>Pcs</b>	<b>Q conso. %</b>
Funori	7			
Colla di storione	8	0,8506	3,6198	0,2322
Colla di pelli	7	0,8728	3,2569	0,2649
Aquazol 200 + Acetone	10	2,8855	2,2291	1,2900
Aquazol 200 + acqua	3			
Klucel G	1			
Gelvato	10	0,4557	0,8110	0,5496
Plextol B 500	9	0,6080	0,9579	0,6243
Acryl 33	10	0,5077	1,0560	0,4713
Paraloid B 72	10	1,4581	2,3704	0,6109
Beva 371	0			
Plexisol P550	2			

<b>Solfato di calcio <math>\sigma = 0,610\text{MPa}</math></b>	<b>n. campioni</b>	<b>Resistenza alla rottura MPa</b>	<b>Pcs</b>	<b>Q conso. %</b>
Funori	7	1,7300	21,2797	0,0526
Colla di storione	5	2,5883	7,9827	0,2478
Colla di pelli	7	2,6545	4,4477	0,3753
Aquazol 200 + Actone	10	4,8213	1,8610	2,2629
Aquazol 200 + acqua	9	2,4834	1,9546	0,9585
Klucel G	3			
Gelvato	6	3,4761	3,0072	0,9531
Plextol B 500	5	1,2752	0,6907	0,9631
Acryl 33	9	1,6327	1,4900	0,6864
Paraloid B 72	10	3,2804	2,5284	1,0561
Beva 371	10	0,9410	0,2475	1,3577
Plexisol P550	10	1,2900	0,4336	1,5685

Carbonato di calcio $\alpha = 0,008\text{MPa}$	n. campioni	Resistenza alla rottura MPa.	PCs	Q conso. %
Funori	9	0,8168	3,9389	0,2053
Colla di storione	8	1,8974	3,7917	0,4983
Colla di pelli	10	1,6578	2,8542	0,5780
Aquazol 200 + Acetone	8	5,0536	1,9878	2,5383
Aquazol 200 + acqua	8	1,5755	0,5178	3,0271
Kluccel G	4	0,4396	2,4277	0,1778
Gelvatol	10	0,9765	0,7750	1,2497
Plextol B 500	10	0,4772	0,3631	1,2922
Acryl 33	7	0,8582	0,7028	1,2098
Paraloid B 72	10	2,6543	2,1363	1,2387
Beva 371	6	0,2725	0,1742	1,5184
Plexisol P550	10	0,5708	0,3280	1,7157

## Bibliografia

- J. Arslanoglu, *Evaluation of the use of Aquazol as an adhesive in painting conservation*, in Western association for conservation - Newsletter, vol. 25, n° 2, 2003.
- M. Bicchieri, B. Mucci, *Hydroxypropyl Cellulose and Polyvinyl Alcohol on paper as fixatives for pigments and dyes*, in "Restaurator," n. 17 1996.
- L. Borgioli, P. Cremonesi, *Le resine sintetiche usate nel trattamento di opere policrome*, Padova, il prato 2005.
- E. Buzzegoli, L. Landi, D. Minotti, *Fenomeni di diffusione in uno strato poroso di consolidanti utilizzati per il consolidamento di opere di pittura*, in Atti del 3° Convegno internazionale - L'attenzione alle superfici pittoriche, Milano 10 - 11 novembre 2007, Padova, il prato 2008.
- P. Carnazza, *Funori: adesivo giapponese di origine vegetale*, in "Progetto restauro", n. 30, il prato 2004.
- J. L. Down, M. A. McDonald, J. Tétreault, R. Scott Williams, *Adhesive testing at the Canadian Institute - An evaluation of selected poly(vinyl acetate) and acrylic adhesives*, in "Studies in Conservation", n. 41, 1990.
- L. Fuster Lòpez, *Filling materials for canvas paintings: technical evolution and physico-mechanical analysis*, PhD Dissertation, Ed. Universidad Politècnica de Valencia, 2008.
- R. J. Gettens; R. L. Feller; W.T. Chase, *Vermilion and Cinnabar*, in "Studies in Conservation". vol. 17 n° 2, 1972.
- M. Mecklenburg; *Meccanismi di cedimento nei dipinti su tela: approcci per lo sviluppo di protocolli di consolidamento*, Padova, il prato 2007.
- S. Michalski, *Un modello fisico del processo di consolidamento applicato ai dipinti*, in Atti del 3° Convegno internazionale - L'attenzione alle superfici pittoriche, Milano 10 - 11 novembre 2007, Padova, il prato 2008.
- G. Montagna, *I pigmenti. Prontuario per l'arte e il restauro*, Firenze, Nardini 1993.
- AA.VV., *La fabbrica dei colori. Pigmenti e coloranti nella pittura e nella tintura*, Roma, Il Bagatto 1986.
- T. Petukhova, S. D. Bonadies, *Sturgeon glue for painting consolidation in Russia*, in "Journal of the American Institute for Conservation", n° 32, 1993.
- A. Roche, *Per una nuova lettura del concetto di adesione e decoesione: aspetti fisico-chimici e meccanici*, in Atti del 3° Convegno internazionale - L'attenzione alle superfici pittoriche, Milano 10 - 11 novembre 2007, Padova, il prato 2008.
- J. R. Swider; M. Smith, *Funori: overview of a 300-year-old consolidant*, in Journal of the American Institute of conservation, vol.44, n° 2, 2005.