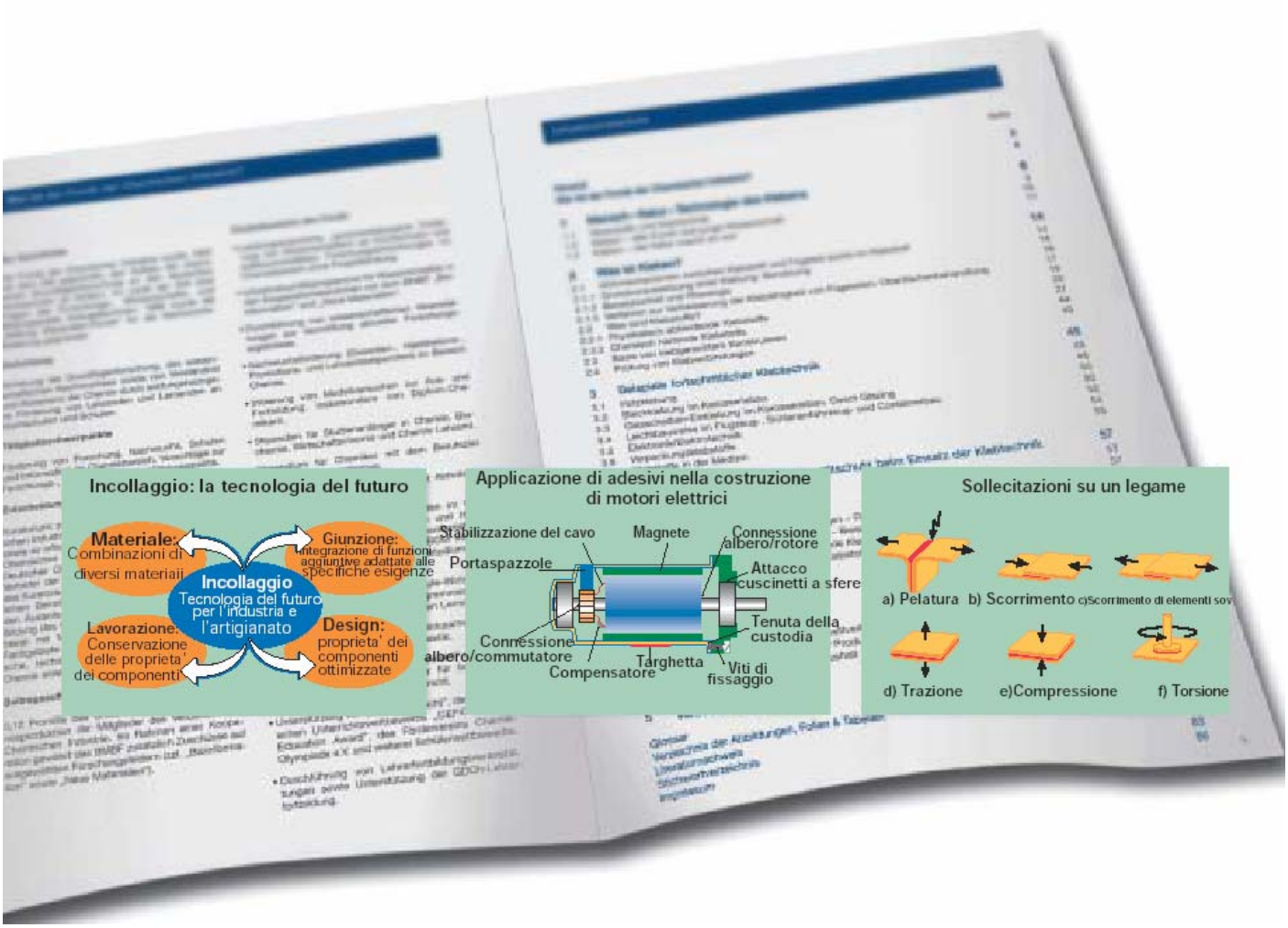
FEDERCHIMICA
CONFINDUSTRIA

AVISA
Gruppo Adesivi e Sigillanti

Materiali Didattici
Incollaggio/Adesivi



Ringraziamenti

L'Associazione italiana dei produttori di adesivi (AVISA) desidera ringraziare le seguenti aziende per il sostegno offerto nella realizzazione dei "Materiali Didattici":

Henkel Loctite Adesivi S.r.l.
Mapei S.p.A.
National Starch & Chemical S.r.l.

Premessa

L'incollaggio è divenuto una tecnica indispensabile per accoppiare due o più substrati, non solo in campo industriale ma anche nella vita quotidiana. L'incollaggio consente di produrre laminati, agevola i trasporti e le comunicazioni, offre innumerevoli vantaggi per la movimentazione dei generi alimentari, salvaguarda la salute e l'igiene e migliora la nostra qualità di vita. Non solo, molti prodotti innovativi non potrebbero essere fabbricati senza utilizzare le tecniche di incollaggio. Il presente manuale della serie "Materiali Didattici", dal titolo "Incollaggio/Adesivi", offre numerosi esempi in merito.

In Europa vengono prodotti e impiegati ogni anno oltre 2.300.000 tonnellate di collanti e questa cifra è in crescita. I produttori di adesivi offrono oltre 250.000 prodotti differenti per le più svariate applicazioni e questi prodotti sono personalizzabili, potenzialmente per qualsiasi utilizzo. Ciò è importante perché ogni adesivo deve soddisfare esigenze diverse. A seconda dell'applicazione, un adesivo deve essere in grado, ad esempio, di resistere a temperature bassissime o al calore di diverse centinaia di gradi oppure deve essere molto elastico o estremamente rigido. Il presente manuale "Materiali Didattici" "Incollaggio/Adesivi" viene fornito gratuitamente alle scuole e agli istituti di formazione italiani, disponibile anche su CD-ROM.

La finalità che l'Industria Europea di adesivi si pone con la pubblicazione dei "Materiali Didattici" è di fornire informazioni sugli adesivi e sulla tecnologia di incollaggio. E' nostro desiderio mostrare come i prodotti di uso quotidiano derivino dalla scoperta di processi chimici a cui seguono lo sviluppo e la produzione industriale. Alla base di una invenzione ci sono spesso il caso e la natura, ma nel mondo commerciale solo quei prodotti che soddisfano le nostre attuali esigenze, sempre più sofisticate, riescono a sopravvivere sul mercato.

Il presente manuale "Materiali Didattici" si basa sul documento informativo in lingua tedesca "Kleben/Klebstoffe" redatto e pubblicato da Fonds der Chemischen Industrie di Francoforte in collaborazione con l'Associazione Tedesca degli adesivi (Industrieverband Klebstoffe) di Düsseldorf. I rappresentanti dell'industria chimica e di produzione degli adesivi hanno collaborato, dando vita a comitati, con docenti di chimica e professori di istituti tecnici e atenei. Confidando nell'esperienza quotidiana del lettore in materia di incollaggio e colle, ci auguriamo che questo documento susciti interesse sulla tecnologia di incollaggio ad alte prestazioni nel settore industriale e sui processi chimici e fisici ad esso correlati.

Milano, marzo 2006

L'Editore

Un cenno su AVISA

AVISA è l'Associazione di Federchimica (Federazione Nazionale dell'Industria Chimica aderente a Confindustria in Italia e al CEFIC in Europa) che rappresenta i produttori di adesivi.

Scopo di AVISA è favorire il progresso dell'industria attraverso:

- la promozione di forme di solidarietà e collaborazione tra le imprese associate
- la rappresentanza degli interessi delle imprese associate nei rapporti con le Istituzioni, con gli Enti e gli organismi economici e politici
- la consulenza e l'assistenza ai soci relativamente ai problemi generali e specifici di loro interesse
- l'organizzazione di ricerche e studi, dibattiti e convegni su temi tecnici, economici e sociali di interesse dei settori rappresentati.

AVISA, inoltre, garantisce il collegamento con FEICA, l'Associazione Europea dei produttori di adesivi che ha sede a Düsseldorf. Fondata nel 1972, FEICA nacque con l'obiettivo di promuovere gli interessi dell'industria degli adesivi a livello europeo, in un'atmosfera di crescente internazionalizzazione. Oggi FEICA rappresenta oltre 480 imprese produttrici di adesivi, sigillanti e materie prime, attraverso le 15 Associazioni nazionali dei seguenti Paesi: Austria, Belgio, Danimarca, Finlandia, Francia, Germania, Gran Bretagna, Italia, Norvegia, Olanda, Portogallo, Slovenia, Spagna, Svezia, Svizzera.

Per informazioni:
Federchimica – AVISA
Via Giovanni da Procida 11
20149 MILANO
Tel.: +39.02. 34.565.341
Fax: +39.02.34.565.350
e-mail: avisa@federchimica.it

Indice

		Pagina
Premessa		3
Un cenno su AVISA		4
1	**L'uomo – La natura – Le tecnologie di incollaggio**	**6**
1.1	Materiali e tecnologie di incollaggio	6
1.2	Incollaggio – arte antica e nuova scienza	12
1.3	Incollaggio – la natura ci insegna come fare!	13
2	**Che cos'è l'incollaggio?**	**15**
2.1	Meccanismi di incollaggio tra l'adesivo e il substrato e all'interno dell'adesivo	16
2.1.1	Bagnabilità: condizione preliminare per l'incollaggio	19
2.1.2	Proprietà bagnanti e reologia	19
2.1.3	Tecniche per migliorare l'incollabilità dei substrati: trattamento superficiale	21
2.2	**Che cosa sono gli adesivi?**	**22**
2.2.1	Adesivi che induriscono per processo fisico	23
2.2.2	Adesivi che induriscono per reazione chimica	34
2.3	Fondamenti per la progettazione del giunto	61
2.4	Prove su giunti incollati	62
3	**Esempi di tecnologia di incollaggio all'avanguardia**	**65**
3.1	Incollaggio del legno	65
3.2	Incollaggio di lamiere metalliche nella costruzione di carrozzerie per autoveicoli	66
3.3	Incollaggio di lastre di vetro nelle carrozzerie – montaggio diretto	68
3.4	Fabbricazione di aerei e veicoli ferroviari alleggeriti e di container e carri frigoriferi	69
3.5	Elettronica/ingegneria elettrica	72
3.6	Adesivi per imballaggio	75
3.7	Adesivi per legatoria	77
3.8	Adesivi per applicazioni medicali	77
3.9	Adesivi per l'industria delle costruzioni	79
4	**Sicurezza, salute e tutela ambientale nel campo degli adesivi**	**81**
4.1	Tutela della salute	82
4.1.1	Sicurezza sul lavoro	82
4.1.2	Tutela del consumatore	82
4.1.3	Rischi per la salute	82
4.1.4	Tutela della salute in caso di uso di adesivi – esempi di valutazione tossicologica	83
	4.1.4.1 Adesivi che induriscono per processo fisico	83
	4.1.4.2 Adesivi che polimerizzano chimicamente	84
4.1.5	Scelta dell'adesivo	85
4.2	Tutela ambientale nella tecnologia dell'incollaggio	86
4.2.1	Aria	87
4.2.2	Acqua	87
4.2.3	Suolo	87
4.2.4	Prospettive	87
5	**Esperimenti**	**88**
Glossario		101
Elenco delle figure e tabelle		110
Bibliografia		112
Indice dei nomi		113
Annotazioni		116

1 L'uomo – La natura – Le tecnologie di incollaggio

1.1 Materiali e tecnologie di incollaggio

Il mondo che ci circonda, il nostro stile di vita e le modalità di lavoro utilizzate stanno mutando a grande velocità. Chi avrebbe mai pensato 20 anni fa che i computer e i telefoni cellulari sarebbero oggi entrati a fare parte della nostra vita quotidiana? Chi avrebbe mai potuto immaginare un motore per l'auto da 3 litri? E chi si sarebbe mai sognato nastri adesivi staccabili che non lacerano la carta da parati quando si toglie un poster dalla parete? I requisiti sempre più rigorosi che si pretendono dai nuovi prodotti di consumo sono la forza motrice del progresso tecnologico: oggi, ogni nuovo prodotto che si realizza deve, come in passato, non soltanto essere migliore e avere un prezzo più economico rispetto al suo predecessore ma deve anche soddisfare il requisito della sostenibilità.
Il rispetto delle problematiche ambientali rende la progettazione di nuovi prodotti sempre più impegnativa e i produttori devono tenere in considerazione requisiti sempre più complessi per i loro nuovi prodotti. I crescenti requisiti che devono possedere i prodotti sono stati, da tempo immemore, lo sprone dello sviluppo di materiali innovativi e all'avanguardia.

Oltre ai metalli tradizionali, questi materiali comprendono leghe speciali, materie plastiche e anche ceramica e vetro. I cosiddetti materiali compositi, prodotti combinando vari materiali, hanno avuto un ruolo di primo piano in questo sviluppo.

Il cemento armato è un materiale composito molto conosciuto che ha fatto la sua strada. Materiali compositi di recente introduzione sono le materie plastiche rinforzate con fibra di vetro e le materie plastiche rinforzate con fibra di carbonio che vengono utilizzate, ad esempio, per la costruzione di motoscafi e yacht e, in misura sempre crescente, anche per la produzione di automobili, veicoli su rotaie e aeromobili.

Un altro valido esempio di sviluppo e utilizzo di nuovi materiali riguarda le ruote e i pneumatici *(Figura 1).* Le ruote a raggi in legno soddisfacevano i requisiti degli antichi Egizi. Oggi, la produzione di pneumatici per mezzi di trasporto moderni non può più avvenire utilizzando unicamente gomma naturale. L'alta velocità che oggi ci si attende da un'autovettura può essere raggiunta soltanto utilizzando materiali compositi ottenuti dalla combinazione di diversi materiali - e il pneumatico di un'auto non è nient'altro che questo.

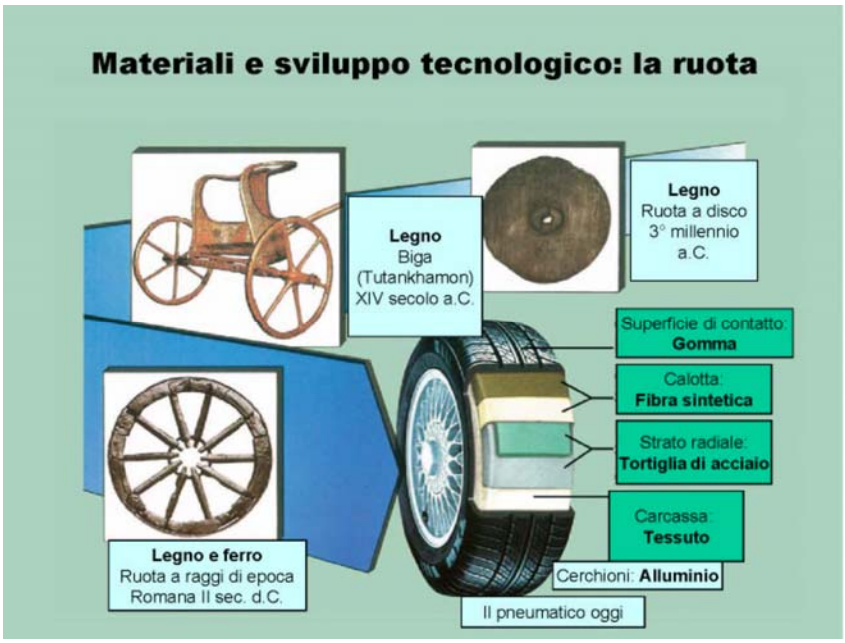


Figura 1

Tecniche di giunzione

Lo sviluppo di nuovi materiali con differenti applicazioni offre ulteriori sfide alla tecnologia di trasformazione. Questo è tanto più vero quando le valide proprietà dei singoli materiali da congiungere per ottenerne un articolo devono essere mantenute inalterate e utilizzate vantaggiosamente anche nel prodotto composito. A questo punto è lecito porsi la seguente domanda: quale tecnica di giunzione (*figura 2*) riesce a unire questi diversi materiali senza alterare le loro proprietà specifiche?

Figura 2

Le tecniche di giunzione tradizionali presentano i loro svantaggi, come è noto. Le tecniche di tipo termico come la saldatura alterano le proprietà specifiche del materiale nel punto sottoposto all'azione del calore. Le tecniche meccaniche come la rivettatura o l'avvitamento consentono solo il trasferimento di forza localizzato; inoltre, è necessario forare i pezzi che devono essere uniti e questo arreca un "danno" indebolendo i materiali.
La tecnologia di incollaggio, al contrario, avrà presumibilmente un ruolo sempre più significativo nell'industria e nell'artigianato del futuro, per quattro motivi precipui (*Figura 3):*

1. Con l'applicazione specializzata, la tecnologia di incollaggio può essere utilizzata per accoppiare potenzialmente qualsiasi combinazione di materiali che si desideri creando legami duraturi.
2. L'utilizzo della tecnologia di incollaggio nei processi produttivi consente, in genere, di conservare le proprietà del materiale che costituisce i substrati: rispetto alla saldatura e saldatura a dolce/brasatura, il processo di incollaggio richiede un'immissione di calore relativamente modesta. Non si verificano danni, a differenza di quanto accade con la rivettatura e l'avvitamento.

3. Nella fabbricazione dei prodotti, i due aspetti appena citati consentono di sfruttare al meglio negli articoli le proprietà del materiale dei substrati. In questo modo possono essere impiegati nuovi metodi costruttivi.
4. È altresì possibile utilizzare la tecnologia di incollaggio per introdurre nell'articolo, attraverso l'accoppiamento, ulteriori proprietà richieste dal cliente.

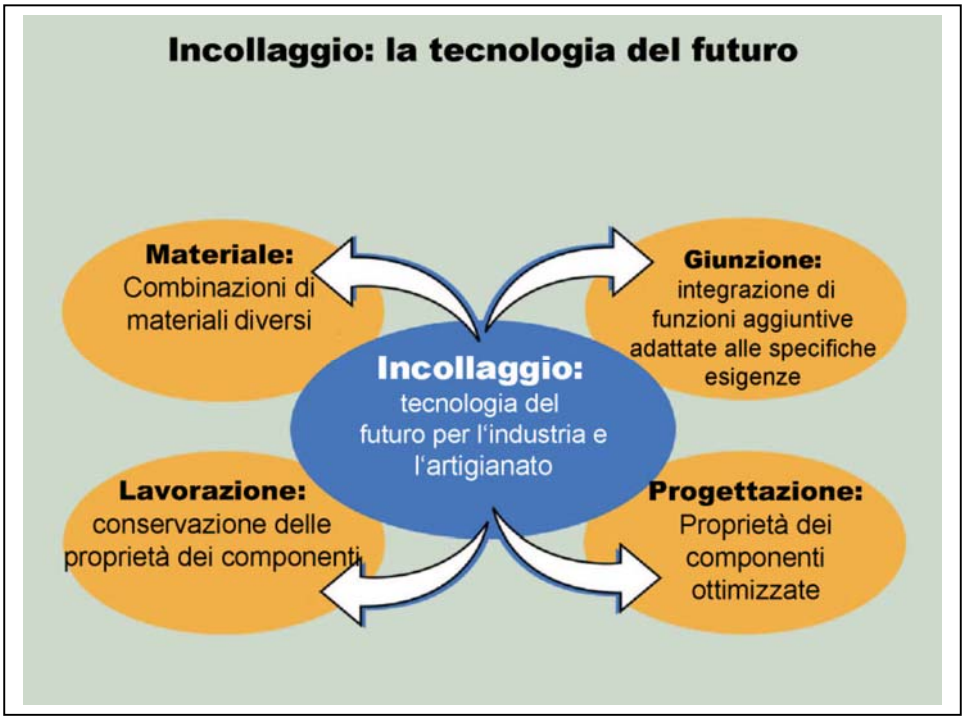


Figura 3

Inoltre, l'utilizzo della tecnologia di incollaggio nella produzione industriale può contribuire a evitare perdite di tempo, può accelerare il processo produttivo generando specifici vantaggi economici. Ad esempio, nella costruzione navale i ponti interni possono oggi essere incollati alla struttura primaria eliminando così il lungo lavoro di raddrizzatura che altrimenti sarebbe necessario se i ponti interni fossero accoppiati tramite saldatura. La tecnologia di incollaggio presenta anche altri vantaggi che elenchiamo qui di seguito:

- Trasferimento di elevate sollecitazioni di taglio su elementi sovrapposti grazie alle ampie superfici di incollaggio. Ad esempio: adesivi epossidici con polimerizzazione a caldo – circa 40 MPa su alluminio; adesivi poliuretanici monocomponenti con reticolazione attivata dall'umidità – circa 5 MPa *(valori ai sensi della norma EN 1465, cfr. pag. 63)*.

- Eliminazione delle discontinuità sulle superfici dei materiali; maggiore tolleranza grazie agli adesivi di riempimento.

- Prevenzione della corrosione per contatto per le giunzioni metalliche, a differenza di quando si utilizzano chiodi o viti (l'adesivo funge da isolante).

Esempi di incollaggio nella vita quotidiana e nell'industria
Il collante che utilizziamo ogni giorno per effettuare piccole riparazioni è già stato ampiamente utilizzato per tanto tempo dall'industria. Questo adesivo rimane, in genere, assolutamente nascosto tra due o più substrati, lontano dalla vista dei consumatori.

Esempio: industria agro-alimentare
Le moderne pratiche di vendita al dettaglio e il self-service di generi alimentari con i suoi cibi pronti, i prodotti surgelati e gli alimenti ad impiego rapido sarebbero impensabili senza gli adesivi utilizzati per la fabbricazione di materiali di imballaggio impermeabili, come le pellicole composite, o per gli imballaggi a chiusura ermetica. L'etichettaggio delle bottiglie (*Figura 4*) viene qui preso ad esempio per illustrare come le applicazioni di incollaggio di uso "quotidiano" e apparentemente semplici siano in realtà soluzioni "high tech": incollare due fogli di carta è un gioco da ragazzi, basta utilizzare uno stick di adesivo o un adesivo liquido per carta. La forza dell'incollaggio dipende dalla resistenza allo strappo della superficie della carta ed è, quindi, limitata. L'incollaggio delle etichette alle bottiglie rappresenta, tuttavia, qualcosa di speciale: l'alta velocità di esercizio delle linee di riempimento richiede un'alta "appiccicosità" iniziale della colla, poiché l'etichetta pulita deve essere prelevata da un caricatore e, quindi, rimanere attaccata alla bottiglia solitamente bagnata; l'etichetta non si deve né muovere, né accartocciare. Se la bottiglia dovesse mai stare sotto la pioggia o dovesse formarsi della condensa sull'etichetta, quest'ultima dovrà rimanere attaccata. Successivamente, quando il vuoto viene reso per il riutilizzo, l'etichetta deve comunque staccarsi facilmente durante le operazioni di lavaggio che precedono il riempimento. Uno speciale adesivo alla caseina riesce a soddisfare tutti questi requisiti: incolla rapidamente, resiste all'acqua ed è solubile nella soluzione di lavaggio alcalina.

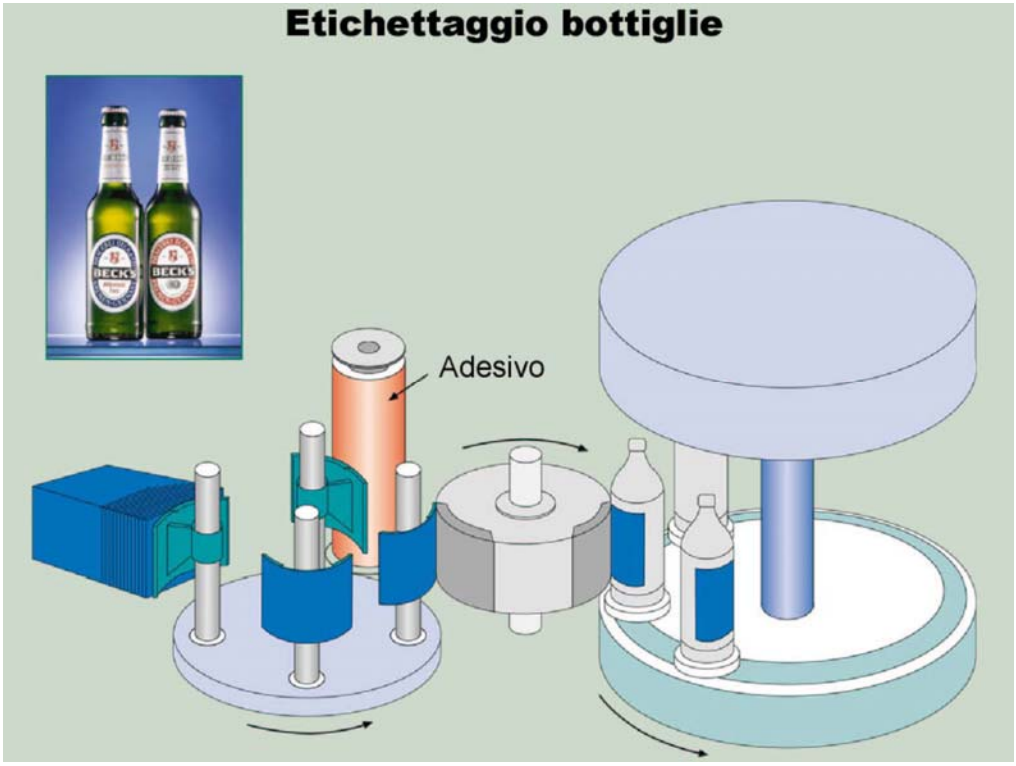


Figura 4

Esempio: tecnologia medicale
Gli adesivi sono largamente utilizzati in medicina, dai comuni cerotti alle applicazioni medicali più avanzate. Gli adesivi vengono utilizzati per produrre salviette e pannolini, consentono di proteggere le compresse dagli effetti dell'umidità e di bendare le ferite.

Esempio: uso domestico
Chi ricorda il fastidioso portasciugamano a ventosa e quante volte sembrava volere cadere sul pavimento insieme all'asciugamano? Anche i ganci di plastica con l'autoadesivo si sono finora dimostrati insoddisfacenti per questa applicazione. La risposta è l'adesivo a contatto (*cfr. capitolo 2.2.1*): la superficie adesiva del gancio, rivestita con questo speciale collante, viene fatta aderire con forza sul rivestimento della parete per poco tempo e poi rimossa di nuovo. Questa operazione trasferisce uno strato di adesivo al rivestimento della parete. Le pellicole adesive vengono lasciate per circa 15 minuti all'aria finché l'adesivo è asciutto al tatto. Le due pellicole adesive vengono quindi unite premendo il gancio saldamente contro il rivestimento della parete. In breve tempo, il legame è sufficientemente saldo e il gancio può essere utilizzato. In genere, gli adesivi che aderiscono tramite evaporazione di un solvente volatile non sono particolarmente indicati per accoppiare due materiali non assorbenti, giacché può volerci molto tempo prima che il solvente fuoriesca dal giunto incollato. In questo caso, si aggira l'ostacolo utilizzando adesivi a contatto attraverso i quali il solvente nelle due pellicole adesive viene fatto evaporare prima di unire insieme saldamente le due parti.

L'operazione apparentemente semplice di incollare il manico di una tazzina rotta offre un primo saggio di quanto siano complessi i problemi che la tecnologia di incollaggio deve soddisfare: se si impiega un "attaccatutto", che dà ottimi risultati nel caso di molte riparazioni domestiche, il risultato, nel caso della tazzina, è deludente. Dopo un paio di lavaggi in lavastoviglie il legame non tiene. Ciò è dovuto al fatto che l'"attaccatutto" non è adatto per essere utilizzato nelle condizioni particolari che si verificano nelle lavastoviglie (alcalinità, liquidi per lavastoviglie contenenti detergenti e temperature fino a 70° C). Per applicazioni di questo tipo, si consiglia di utilizzare un adesivo a base di resina epossidica bicomponente *(cfr. capitolo 2.2.2)*: mescolare i componenti di resina e l'indurente dell'adesivo epossidico, applicare uno strato sottile sulle superfici spezzate, premere il manico sulla tazza e usare il nastro adesivo per tenere il manico in posizione fino a quando non si è concluso il processo di polimerizzazione. Un consiglio per gli interventi difficili: se ci sono diversi pezzi rotti, attendere che l'adesivo sia diventato viscoso prima di unire i pezzi. In questo modo i pezzi possono essere fissati insieme molto più facilmente.

Esempio: artigianato
La prossima volta che vedrete un calzolaio al lavoro in una bottega di servizio rapido, osservatelo mentre incolla un nuovo tacco di gomma. Con le pinze toglie dalla scarpa il vecchio tacco, irruvidisce la superficie da incollare in modo da asportare ogni residuo di adesivo precedente, applica un adesivo di media viscosità sul bordo del nuovo tacco per una larghezza di circa mezzo centimetro. Infine preme il tacco sulla scarpa e lo tiene sotto una pressa per un breve lasso di tempo. Il giunto è ora perfetto e il bordo può essere pulito. L'adesivo reattivo che gli consente di lavorare così rapidamente è il cianoacrilato *(cfr. capitolo 2.2.2)*. Se applicato in strato sottile, questo adesivo polimerizza molto rapidamente a contatto con l'umidità o in presenza di tracce di sostanze alcaline. Per il tipo di lavoro che deve svolgere il calzolaio, non è necessario applicare l'adesivo sull'intera superficie da incollare. Ciò sarebbe un problema se la calzatura dovesse essere riparata di nuovo, perché il legame estremamente saldo non potrebbe essere staccato meccanicamente senza danneggiare la scarpa. Le suole di cuoio e gomma sono invece incollate generalmente con un adesivo a contatto *(cfr. capitolo 2.2.1)* costituito da policlorobutadiene. A differenza dei cianoacrilati, questa sostanza forma uno strato elastico flessibile. Entrambe le superfici incollate vengono rivestite con adesivo a contatto e, dopo avere lasciato la suola a contatto con l'aria per circa 15 minuti, questa viene premuta sulla calzatura. Ancora una volta, l'elevata forza di adesione iniziale, subito dopo l'incollaggio, è tangibile.

Gli esempi di cui sopra hanno illustrato gli effetti dell'incollaggio grazie a meccanismi di adesione e coesione *(cfr. capitolo 2.1)*. L'esempio che segue evidenzia un'altra particolarità, ovvero la capacità dell'adesivo di sciogliere la superficie del substrato.

Esempio: Modellismo
Nel modellismo, il comune adesivo impiegato per i componenti di polistirolo come, ad esempio, per assemblare i modellini amatoriali di trenini, è costituito essenzialmente da una soluzione di polistirolo contenuta in un solvente organico. Dopo avere applicato l'adesivo, la superficie del materiale da incollare inizia a sciogliersi e a rigonfiarsi. Quando viene premuto l'altro componente contro la superficie, si ottiene lo stesso effetto. In pratica, l'interfaccia tra le due componenti scompare in seguito ad amalgamazione o diffusione. Dopo che il solvente è evaporato, i componenti aderiscono saldamente tra loro. Si tratta della "saldatura per diffusione", detta talvolta anche saldatura a freddo. (in pratica, lo stesso principio viene impiegato per saldare le tubazioni casalinghe o industriali in plastica o in PVC).

Esempio: produzione industriale
L'industria aeronautica ha dato il massimo impulso, sotto il profilo tecnologico, alla tecnologia moderna di incollaggio. La necessità fondamentale di ridurre il peso è stata la forza motrice che ha permesso l'introduzione di nuovi modelli e metodi costruttivi. Nel moderno Airbus, ad esempio, il 30% di tutti i componenti è tenuto insieme grazie alla tecnologia di incollaggio.

Nel settore automobilistico, le tecniche tradizionali di giunzione vengono oggi utilizzate insieme all'incollaggio. In alcuni settori, l'incollaggio ha addirittura sostituito completamente le tecniche tradizionali. Le crescenti esigenze avanzate nel campo delle guarnizioni di tenuta dei motori ha favorito la diffusione su vasta scala della tecnologia di incollaggio applicata ai motori moderni, ad esempio per la tenuta delle testate, a vari componenti del sistema di raffreddamento dell'acqua e della coppa dell'olio. Gli adesivi vengono utilizzati in misura sempre più crescente come materiali strutturali. Le auto moderne contengono fino a 150 metri di parti incollate nella struttura della scocca. Inoltre, i parabrezza anteriori e posteriori, se incollati, aumentano la rigidità delle scocche oltre a ridurne il peso. Uno speciale sistema di incollaggio a strato spesso attutisce le vibrazioni oltre a migliorare l'isolamento termico senza dovere utilizzare ulteriori materiali, come invece richiedono i sistemi costruttivi tradizionali. Progettazioni ottimizzate con migliori performance di guida, peso ridotto e minore corrodibilità producono valori C_w bassi *(cfr. Glossario)* e risparmi energetici significativi.

La tecnologia di incollaggio svolge un ruolo speciale nelle costruzioni leggere con funzioni multiple integrate: questa modalità costruttiva cerca di creare prodotti dotati di funzioni supplementari senza l'aggiunta di altri componenti. Per esempio, incollaggi, opportunamente progettati, tra due elementi metallici, lastre di vetro o listelli di legno possono fungere anche da giunti di dilatazione.

Nel campo dell'elettronica, la tradizionale tecnica della saldatura viene sempre più sostituita dall'incollaggio per congiungere, ad esempio, componenti altamente integrati evitando qualunque sollecitazione e senza che sia necessario utilizzare fonti di calore eccessivo.

Limitazioni della tecnologia di incollaggio
Esattamente come altre tecnologie all'avanguardia, l'utilizzo di adesivi in un ambiente produttivo richiede l'adozione di speciali processi di lavorazione. In generale, non è possibile una valutazione dettagliata della qualità di un legame tramite una prova non distruttiva. L'incollaggio – al pari della saldatura con leghe - è dunque considerato un processo cosiddetto speciale. Quando si utilizza un incollaggio in un ambiente produttivo, è dunque richiesta un'alta qualità del processo produttivo poiché la qualità del prodotto non può essere testata. Si devono tenere in considerazione i meccanismi di degradazione se si richiede una stabilità dell'incollaggio nel tempo. La degradazione può ridurre la

resistenza dei legami ma può in generale essere tenuta sotto controllo. Non si deve, tuttavia, dimenticare una limitazione imposta dalla natura all'utilizzo della tecnologia di incollaggio: un palese svantaggio della tecnologia di incollaggio rispetto ad altre tecniche di giunzione è dato dal fatto che i legami ottenuti hanno solo una limitata stabilità al calore in quanto gli adesivi sono composti organici.

1.2 Incollaggio – arte antica e nuova scienza

In epoca neolitica, e precisamente intorno all' 8000 a.C. *(cfr.Tabella 1)*, si utilizzava una resina ricavata dalla betulla per attaccare le punte di lance e asce *(Figura 5)*. Quando venne rinvenuto "Ötzi", l'uomo venuto dal ghiaccio, furono trovati utensili e frammenti di indumenti, compresa un'ascia di legno di tasso la cui lama era attaccata con pece di betulla (adesivo) e nastri di pelle. Intorno al 5000 a.C. in Babilonia venivano utilizzati come adesivi per la costruzione di abitazioni e templi sangue animale, proteine, varie resine vegetali e asfalto. Nell'antico Egitto (circa 3500 anni fa) l'incollaggio era persino una professione: era nato il mestiere del produttore di adesivi (Kellopsos) *(Figura 5).* L'arte di ottenere adesivi per cottura di sostanze naturali, inventata dagli antichi Egizi, era stata successivamente adottata anche da Greci e Romani. Una testimonianza che attesta quanto l'arte dell'incollaggio fosse già ad uno stadio avanzato al tempo dei Romani è la scatola di rovere di epoca romana rinvenuta a Breslavia intorno al 1886: cinque monete metalliche erano incollate sul coperchio della scatola. L'adesivo utilizzato si pensa fosse composto da una miscela di gesso e proteine e doveva avere un'adesività altissima perché quattro delle cinque monete sono ancora incollate sulla superficie di legno dopo quasi duemila anni. A metà del XIV secolo gli Aztechi sfruttavano le proprietà di adesione del sangue per i lavori di costruzione. E' l'albumina contenuta nel sangue a conferire queste proprietà adesive. Gli Aztechi mescolavano il sangue animale con il cemento. Le strutture costruite da questo popolo sono tutt'oggi in ottime condizioni e sono la dimostrazione della qualità degli agenti adesivi *(Figura 5).*

Figura 5

La gomma naturale venne utilizzata per la prima volta come materia prima per gli adesivi intorno al 1830. La scoperta della vulcanizzazione della gomma nel 1841 da parte di Goodyear segnò la nascita delle plastiche sintetiche e quindi degli adesivi sintetici. Era la prima volta nella storia dell'umanità che una sostanza chimica naturale veniva modificata per essere trasformata in un materiale semisintetico (plastica) con nuove proprietà meccaniche e tecnologiche. Nel 1864, W. Parks riuscì a ottenere la celluloide semisintetica. Le prime "vere" materie plastiche sintetiche, uscite dai laboratori chimici, che

non avevano uguali in natura, furono le resine fenoliche. Esse vennero utilizzate per la prima volta nel 1902 e sono strettamente associate al nome di Baekeland il quale, appunto, vendette la prima resina fenolica nel 1905 con il nome commerciale di bachelite. Questo fu un primo passo fondamentale nell'evoluzione cronologica delle materie plastiche, ossia dai materiali naturali passando per i materiali modificati chimicamente si arrivò alle materie plastiche interamente sintetiche. Nei decenni a seguire lo sviluppo di plastiche e adesivi sintetici conobbe una veloce ascesa. Vennero sintetizzate le gomme sintetiche, come il policloroprene, la buna (polibutadiene) e la gomma siliconica. Poi fu la volta delle resine epossidiche e dei poliuretani e dopo la seconda Guerra Mondiale degli adesivi a base di metacrilati e cianoacrilati.

1.3 Incollaggio – la natura ci insegna come fare!

La storia dell'umanità ci offre così tanti esempi sulle applicazioni di incollaggio nel corso di ogni epoca tanto da essere tentati di affermare che l'incollaggio è un'invenzione dell'uomo. A dire il vero, però, è la natura ad averci insegnato come fare. I seguenti esempi di incollaggio tratti dal regno animale e vegetale dimostrano come l'uomo abbia imparato dalla natura fino a consentirci di sviluppare la tecnologia dell'incollaggio.

Esempio: le vespe muraiole
Si pensi all'incollaggio e al mondo degli insetti e in particolare si prenda in esame la vespa muraiola originaria dell'Europa centrale: questo animale possiede delle pinze che gli permettono di rompere il legno meccanicamente e disgregare grossolanamente le lunghe fibre di cellulosa triturandole. Poi ingerisce questi frammenti mescolandoli ai succhi digestivi acquosi. Questo processo chimico accorcia ulteriormente le fibre di cellulosa. L'adesivo per la costruzione del nido è ora pronto per l'uso. Asciugandosi, l'acqua evapora dalla massa, le fibre di cellulosa formano una sorta di tessuto e l'adesivo si indurisce. Le vespe muraiole (dette anche "vespe della carta") riescono a costruire nidi estremamente resistenti con questa tecnica. Questa tecnologia è stata impiegata per lungo tempo dall'uomo per decorare le abitazioni: la collosità dell'adesivo per la carta da parati si basa proprio sullo stesso principio.

Esempio: l'albero della gomma
L'acqua, che è un solvente e agente disperdente, può costituire un problema per la stabilità a lungo termine dei legami. La natura, anche in questo caso, ci offre una soluzione, questa volta derivante dal regno vegetale: il lattice di gomma ricavato dal tronco dell'albero della gomma è una dispersione di polimeri (lattice naturale) in acqua. Utilizzare una dispersione polimerica è dunque un modo per impiegare l'acqua come solvente compatibile con l'ambiente e creare, al contempo, legami con una buona stabilità nel tempo. Questo trucco della natura è stato impiegato per lungo tempo nel settore della lavorazione del legno.

Esempio: le api mellifere
Rispetto alle vespe muraiole che utilizzano un adesivo a base di acqua come solvente, l'adesivo utilizzato dalle api mellifere per la costruzione dei favi non contiene solventi, bensì la cera che, alla temperatura corporea delle api, si presenta allo stato liquido. Solo quando si raffredda l'adesivo riesce a solidificarsi fino ad assumere la sua forma resistente. La cera d'api soddisfa quindi i requisiti ideali dei moderni collanti (adesivi termofusibili): senza solventi ma applicabile allo stato liquido.

Tabella 1

Storia dell'incollaggio

3 miliardi di anni fa
Processi assimilabili all'incollaggio nelle cellule primordiali: producono una membrana esterna collosa che consente loro di attaccarsi alle cellule vicine e formare gruppi e colonie. I mitili formano legami molto resistenti con una svariata serie di superfici; la drosera e i ragni producono secrezioni adesive; le api producono lastre di cera; gli uccelli creano i primi materiali compositi "incollati" per la costruzione del nido.

80000 anni fa
Da questo momenti in poi, l'uomo utilizza l'incollaggio: l'uomo delle caverne nei pressi del Mar Morto faceva i "collage". Negli scavi sono stati individuati materiali adesivi utilizzati per le decorazioni sui teschi, come sigillante per contenitori e come adesivo.

35000 anni fa
Sangue animale e proteine utilizzate come legante per la superficie di base delle iscrizioni rupestri; capanne di legno realizzate con ramoscelli e canne rinforzate con adesivo.

8000 a.C.
Armi nelle culture evolute dedite alla caccia: le resine ricavate dagli alberi permettono un incollaggio migliore della pietra e delle estremità delle ossa a manici o bastoni di legno; "adesivi in pasta" prodotti dall'addensamento, tramite evaporazione, di componenti vegetali; "colle" prodotte dalla cottura di componenti animali.

5000 a.C.
In Mesopotamia ed Egitto: uso di asfalto (presente in natura) come adesivo (mosaici) e combinato a resine come sigillante per le imbarcazioni.

2000 a.C.
Medio Oriente: adesivo a base di gelatina animale per la produzione di suppellettili.

1000 a.C.
Cina: per la laccatura utilizzo di colla di pelle oppure di linfa dell'albero della lacca.

1500 d.C.
Gli Spagnoli importarono la gomma in Europa dall'America centrale dove veniva già impiegata da molto tempo dagli Aztechi e dai Maia; la caseina, conosciuta persino dai Romani, fu la prima "plastica" ad essere utilizzata per rivestire la carta e per la rilegatura dei libri.

1700
Produzione su vasta scala di adesivi per cottura

1841
Goodyear scopre la vulcanizzazione della gomma.

1905
Baekeland immette sul mercato la prima resina fenolica sintetica con il nome di "bachelite".

1921
Principi della chimica macromolecolare definiti da Max Staudinger.

1922
BASF ottiene un brevetto per la produzione di resine urea-formaldeide solubili in solventi organici.

1928
Prima produzione di cloruro di polivinile (PVC) negli Stati Uniti; produzione di polimetilmetacrilato (PMMA) col nome di "plexiglas" da parte di Röhm & Haas.

1930
Prima produzione industriale di acetato di polivinile (PVAC), polistirolo (PS) e poliacrilonitrile (PAN).

1931
Prima dispersione stabile di plastica composta da esteri dell'acido acrilico (BASF, Röhm & Haas) e acetato di vinile (Wacker, Hoechst); inizio della produzione di policloroprene.

1936
P. Castan (de Tre Frères, Svizzera) utilizza la poliaddizione per creare materie plastiche e inventa le resine epossidiche da lui brevettate nel 1939. C. Ellis (Ellis-Foster Comp. USA) scopre la polimerizzazione rapida degli esteri insaturi e dello stirene per effetto dei perossidi.

1937
La poliaddizione di diisocianati e polioli per formare i poliuretani (PUR) si basa sul lavoro di ricerca di O. Bayer a Leverkusen.

1940
IG Farben ottiene il brevetto per gli adesivi a base di metacrilato (oggi "Agomet" di Degussa).

1941
Produzione su larga scala di resine poliestere sature e insature.

1943
Produzione di gomme siliconiche resistenti al calore; negli Stati Uniti si utilizza per la prima volta un formulato resina fenolica acetato di polivinile per ottenere gli accoppiamenti di metallo/legno nella costruzione di aeromobili.

1946
Produzione industriale di resine epossidiche.

1953
V. Krieble (USA) introduce gli adesivi a polimerizzazione anaerobica a base di dimetacrilato con il nome di "Loctite".

1958
Vengono immessi sul mercato i primi adesivi a base di cianoacrilati: "Eastman 910" negli Stati Uniti e nel 1960 "Sicomet" in Germania.

1967
Primi adesivi di poliimmide resistenti al calore (fino a 300° C) immessi sul mercato negli Stati Uniti.

1968
Inizio del lavoro di sviluppo sugli adesivi poliuretanici che polimerizzano per esposizione all'umidità (igroindurenti) "Sikaflex" e "Betaseal" per la sigillatura/incollaggio dei parabrezza anteriori e posteriori delle auto.

1970
Ulteriore rapida evoluzione della chimica dei poliuretani con un'ampia gamma di formule per adesivi mono e bicomponenti; prime formulazioni di acrilati polimerizzabili per esposizione a raggi UV; sviluppo dei polimeri siliconici modificati poliuretanici (MS polymer) in Giappone, applicazione negli edifici antisismici.

1980
Adesivi termofusibili reattivi.

1984
Sviluppo di adesivi conduttivi anisotropi. La conduttività deriva dal collegamento dei substrati, che non si toccano, attraverso particelle di riempitivo elettricamente conduttive (es.: microsfere di polistirolo rivestite d'oro) nella matrice dell'adesivo.

1988
Sviluppo di adesivi ad elevate prestazioni per incollare lamiere di acciaio oliate durante i processi produttivi industriali (es.: industria automobilistica). Si tratta di speciali adesivi epossidici monocomponenti con polimerizzazione a caldo.

Dal 1990
Sviluppo di svariati adesivi che richiedono una combinazione di meccanismi di polimerizzazione, ad esempio cianoacrilati che polimerizzano inizialmente per esposizione ai raggi UV per poi completare questo processo per effetto dell'umidità.

1993
Sviluppo di adesivi che polimerizzano aerobicamente la cui polimerizzazione è indotta dall'ossigeno. A questi adesivi vengono aggiunte sostanze capaci di generare idroperossidi (es.: idrazone). In condizioni di ossidazione si producono perossidi che danno inizio alla polimerizzazione.

1995
Sviluppo dei prepolimeri poliuretanici reticolabili mediante silani (S-PUR) che si affiancano alla gamma di adesivi monocomponenti elastici igroindurenti. Possiedono un migliore equilibrio tra reattività e stabilità al magazzinaggio, non danno luogo a formazione di bolle e non funzionano più con un meccanismo di reazione basato sull'isocianato.

2000
Sviluppo di sistemi di incollaggio ristaccabili ("bond on command") per la riparazione e il riciclaggio, basati su variazioni di temperatura, sollecitazione, tensione elettrica, e/o pH.

Esempio: Ostriche di carena
Le ostriche di carena (*Figura 6*) sono molluschi che vivono nelle acque costiere. Le larve, che nuotano liberamente, possono attaccarsi potenzialmente a tutti i materiali marini duri. Il congiungimento avviene per mezzo della secrezione emessa dalle cosiddette "ghiandole del cemento". Questa secrezione è un adesivo reattivo bicomponente che ha un'elevata resistenza all'acqua e una sorprendente stabilità a lungo termine. Il fatto di rimanere attaccata non dipende affatto dalla composizione della superficie di base. Anche quando l'ostrica di carena cresce e perde la sua pelle esterna, rimane saldamente attaccata alla superficie di base in quanto secerne costantemente una nuova quantità di adesivo per preservare intatto il legame.

Figura 6

Esempio: termiti
Circa 150 milioni di anni or sono i soldati delle termiti primitive avevano mascelle a "sciabola" per respingere il nemico. Circa 30 milioni di anni più tardi svilupparono una struttura a forma di becco al di sopra delle pinze. La forma più evoluta venne raggiunta 70 milioni di anni più tardi: le pinze della mascella erano scomparse e rimaneva solo il becco da cui viene spruzzato l'adesivo per neutralizzare gli "aggressori". La produzione delle auto moderne sarebbe impensabile se non fossimo in grado di applicare l'adesivo con le stesse modalità a spruzzo.

2 Che cos'è l'incollaggio?

L'incollaggio è la giunzione di due substrati tramite adesivo. In base alla norma UNI EN 923 l'adesivo viene definito come: sostanza non metallica in grado di congiungere materiali mediante fissaggio superficiale (adesione), e in modo tale che il legame ottenuto possieda adeguata forza interna (coesione).

Adesione e coesione
L'adesione consiste nel congiungere tra loro materiali simili o diversi. La coesione è la forza intrinseca di un materiale come, nel nostro caso, l'adesivo.

Le interazioni di adesività tra l'adesivo e il substrato riguardano non soltanto l'effettiva zona di contatto (zona di adesione) tra l'adesivo e il substrato ma anche lo stato dell'adesivo vicino alla superficie del substrato (zona di transizione) *(Figura 7)*.

- Nella zona di coesione, l'adesivo è presente nel suo stato normale.

- Nella zona di adesione, l'adesivo ha una struttura e composizione modificate a causa dell'adesione alle superfici dei substrati. La struttura e la composizione sono quindi diverse da quelle riscontrabili nella zona di coesione. Di conseguenza, anche le proprietà macroscopiche dell'adesivo nella zona di adesione saranno diverse.

- La struttura, la composizione e le proprietà macroscopiche dell'adesivo cambiano continuamente nella zona di transizione compresa tra la zona di adesione e quella di coesione. Potrebbe verificarsi, ad esempio, una separazione dei componenti dell'adesivo a causa della diffusione dei componenti più piccoli dell'adesivo all'interno dei pori superficiali del substrato. Se così fosse, la composizione ottimale dell'adesivo ne sarebbe compromessa.

Figura 7

2.1 Meccanismi di incollaggio tra l'adesivo e il substrato e all'interno dell'adesivo

- Zona di adesione
- zona di transizione
- zona di coesione

strato limite

La zona di adesione

Come sopra indicato, l'adesivo ha una struttura molecolare modificata nella zona di adesione a causa dell'incollaggio sulla superficie del substrato. Il fenomeno di adesione è causato dalle interazioni molecolari tra la superficie del substrato e l'adesivo. In questo caso, è possibile distinguere tra interazioni intermolecolari (deboli) e legami chimici (forti) *(Tabella 2)*. I legami chimici si formano, tuttavia, soltanto in presenza di pochissime combinazioni di substrato/adesivo, ad es. tra il silicone e il vetro, il poliuretano e il vetro e la resina epossidica e l'alluminio. È stato dimostrato per alcuni di questi

giunti incollati che i legami chimici rappresentano fino al 50% di tutte le interazioni. La stabilità a lungo termine di questi legami dipende direttamente dalla loro resistenza all'umidità.
Tuttavia, oltre alle forze di adesione chimiche e intermolecolari, anche il meccanismo di incollaggio chiamato "adesione micromeccanica" può sortire degli effetti, a seconda della morfologia della superficie del substrato. Questa definizione è dovuta al fatto che un adesivo, come è risaputo, può effettivamente "ancorarsi meccanicamente" alla superficie ruvida del substrato. In genere, l'"adesione micromeccanica" è considerata di secondaria importanza. Eppure, se sono presenti degli interstizi regolari sul substrato – eventualmente creati anche per ragioni progettuali – nei quali penetra l'adesivo, la forza del giunto incollato risulta accresciuta.

Forze di adesione

Tipo	Lunghezza del giunto in nm	Energia del giunto in kJ/mol
Legami chimici		
• Covalenti	0.1–0.2	150–950
• metallici	0.3–0.5	100–400
• ionici	0.2–0.3	400–800
Interazioni		
• forzediVan der Waal	0.4–0.5	2–15
• Legami di idrogeno	0.2	20–30

Tabella 2

La zona di transizione

La zona di transizione, in cui le proprietà chimiche, meccaniche e ottiche dell'adesivo risultano alterate, presenta uno spessore variabile, da alcuni nanometri fino a estensioni millimetriche. Lo spessore dipende dalla natura della superficie del substrato, dall'adesivo e dalle condizioni di indurimento. Se ci sono zone di transizione di ampio spessore o giunti incollati sottili, il comportamento dell'intero giunto incollato può dipendere dalle proprietà della zona di transizione poiché in questo caso non vi è alcuna zona di coesione.

La zona di coesione

Nella zona di coesione, l'adesivo possiede le proprietà nominali riportate nella scheda tecnica. Queste proprietà dipendono dalle seguenti forze molecolari *(Figura 8)*:
1. i legami molecolari all'interno dei polimeri;
2. i legami chimici derivanti dalla reticolazione del polimero;
3. le interazioni intermolecolari tra molecole nell'adesivo;
4. l'aggrappaggio meccanico tra varie molecole nell'adesivo.

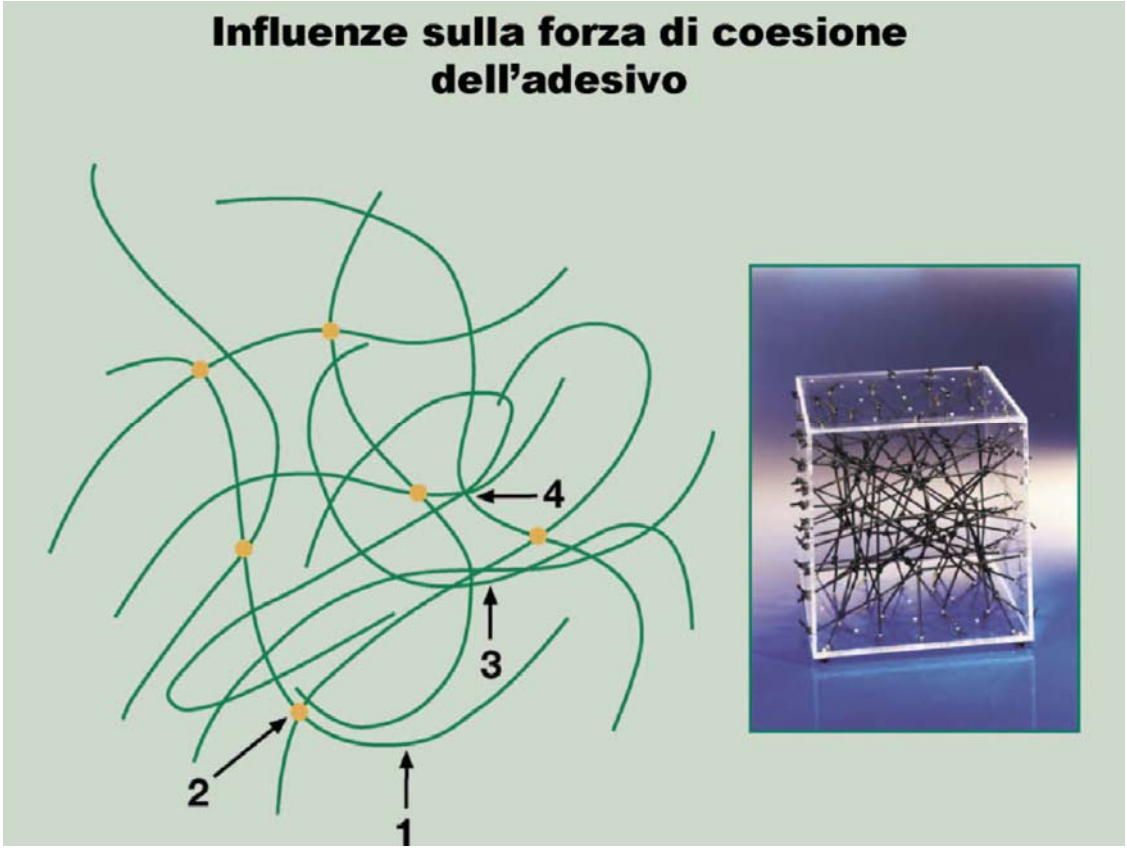


Figura 8

Le quattro forze coesive di cui sopra influiscono sulle proprietà dell'adesivo non indurito e determinano, ad esempio, la viscosità dell'adesivo. L'indurimento dell'adesivo comporta, nella maggior parte dei casi, la sua solidificazione attraverso legami che si verificano tra le molecole. In questo processo si formano nuovi legami veri e propri (es.: reticolazione di molecole con concatenazioni corte per formare molecole con concatenazioni lunghe) o si rafforzano quelli esistenti.

Sia l'adesione (che interessa la zona di transizione) che la coesione giocano un ruolo importante nella ottimizzazione della forza di un legame. Proprio come in una catena, l'anello più debole in un giunto incollato stabilisce quali carichi può sopportare il giunto.

- Le proprietà coesive di un adesivo sono già stabilite dal produttore. Spetta agli utilizzatori provarle e raggiungerle, attraverso l'indurimento in condizioni ottimali.

- Inoltre, la forza di adesione deve essere sufficientemente elevata. Questo è il caso in cui il fattore limitante nelle prove di resistenza è la forza interna dell'adesivo e non l'adesione.

Il carico massimo, specifico per un determinato adesivo, che può sostenere un incollaggio viene dunque raggiunto durante la prova di resistenza quando la frattura avviene nell'adesivo (frattura coesiva) e non nella zona di adesione tra il substrato e l'adesivo.

2.1.1 Bagnabilità: condizione preliminare per l'incollaggio

Un requisito imprescindibile per formare lo strato limite adesivo è dato dalla capacità dell'adesivo liquido di bagnare la superficie del substrato in modo efficace. Il grado di bagnabilità – che, tra l'altro, è determinato dalla tensione superficiale dell'adesivo e del substrato – è quindi una condizione per la qualità dell'adesione. Tuttavia, l'avvicinamento di substrato e adesivo ad una distanza tale da permettere l'interazione tra i loro atomi è soltanto un requisito preliminare per la formazione delle forze di adesione. I fattori determinanti per l'effettiva adesione sono la accessibilità e il numero delle strutture fisicamente o chimicamente attive sulla superficie del substrato e nell'adesivo.

> La bagnabilità della superficie del substrato con l'adesivo liquido è necessaria perché ci sia adesione, anche se da sola non è sufficiente. Una buona bagnabilità, comunque, non garantisce necessariamente un'adesione duratura dell'adesivo alla superficie.

Si pensi, ad esempio, all'acciaio di alta qualità: sebbene presenti un'elevata tensione superficiale, per cui può essere bagnato facilmente, tuttavia, a causa della sua passività (scarse proprietà adesive) l'adesione alla superficie risulta relativamente bassa.

Se la superficie del substrato è incompatibile con l'adesivo – ad esempio perché l'adesivo liquido non bagna adeguatamente la superficie o perché i legami adesivi sono troppo deboli – allora la superficie può essere rivestita con un adeguato promotore di adesione. Questi promotori di adesione agiscono tramite diversi gruppi chimici bifunzionali. Alcuni gruppi sono adattati alla chimica della superficie del substrato mentre altri sono adattati all'adesivo. I promotori di adesione più comuni si attaccano chimicamente a entrambi i substrati. I metodi di trattamento della superficie (*cfr. Figura 9*) offrono altre alternative per aumentare la bagnabilità della superficie del substrato.

L'adesione contribuisce notevolmente alla resistenza del giunto incollato. Gli utilizzatori possono aumentare in modo significativo l'adesione:

- assicurandosi della pulizia delle superfici dei substrati e, ove necessario, pretrattando le superfici del substrato,

- scegliendo un adesivo e, ove possibile, un promotore di adesione / primer adatto alla chimica della superficie del substrato.

Tuttavia, non è possibile correlare in modo immediato ed univoco l'adesione (a livello microscopico) con la resistenza del giunto a livello macroscopico (e viceversa). Inoltre, le proprietà di coesione macroscopiche di un adesivo (es.: forza di coesione, comportamento elastico) dipendono, nella maggior parte dei casi, dalla scelta dell'adesivo di base e dalla formula dell'adesivo e l'utente può intervenire molto limitatamente per modificarle.

2.1.2 Proprietà bagnanti e reologia

La reologia è una branca della scienza dei materiali che studia le modalità secondo le quali un corpo (solido, liquido o gassoso) si deforma se esposto a forze esterne. Fluidi perfetti come liquidi o gas

subiscono una deformazione irreversibile e scorrono. Anche i solidi possono deformarsi in modo irreversibile se subiscono l'azione di forze sufficientemente intense e anche in questo caso scorrono. Oltre alla forza, occorre qui tenere presente anche il fattore tempo. L'esempio che segue intende dimostrare questa relazione: il vetro delle famose vetrate della Cattedrale di Chartres in Francia è "defluito" giacché queste vetrate vennero costruite più di 600 anni fa. Nel Medio Evo, le vetrate che venivano montate avevano lo stesso spessore sul lato superiore e inferiore. Nel corso del tempo, però, i silicati sono defluiti verso il basso per effetto della gravità tanto che lo spessore del singolo pannello di vetro sul lato superiore è diventato sottile come un'ostia. Sul lato inferiore, invece, lo spessore del vetro è quasi raddoppiato. Il vetro pieno può dunque essere considerato un fluido – ma occorre attendere molto tempo prima di vederlo colare!

La capacità di un adesivo di bagnare la superficie di un substrato dipende anche dalle proprietà reologiche che possiede. In questo caso, la viscosità e le qualità tixotropiche sono importanti e possono essere riunite nel termine "proprietà reologiche". Un prerequisito fondamentale per la lavorazione e applicazione di un adesivo è la conoscenza di queste particolari proprietà (cfr. Tabella 3 per i valori di viscosità tipici). Decisiva per la viscosità di un adesivo *(Tabella 3)* è la struttura molecolare, in special modo la lunghezza delle catene principali e la presenza di eventuali catene laterali, la presenza di gruppi polari da cui dipendono, in misura sostanziale, le forze che influenzano la mobilità dei gruppi laterali e dei segmenti di catena.

Esempi tipici di viscosita'

viscosita' dinamica espressa in mPa s at 20°C

Benzina	0.65	Panna per caffé	~ 10
Acqua	1.0	Miele	~ 10^4
Mercurio	1.5	Polimeri fusi	~10^3–10^6
Succo d'uva	2–5	Bitume	~ 10^8
Sangue (37°C)	4–25	Vetro	~ 10^{23}

Tabella 3

La viscosità elevata è utile per evitare, ad esempio, che l'adesivo fuoriesca troppo dai bordi dei giunti incollati. La viscosità deve variare in funzione del metodo di applicazione che si intende adottare: per esempio, è richiesta una bassa viscosità nelle applicazioni a spruzzo/ugello e una consistenza pastosa, invece, per le applicazioni serigrafiche. Si può aumentare la viscosità fino a raggiungere il grado necessario per l'applicazione aggiungendo agenti addensanti. Se la viscosità degli adesivi a base di solventi è troppo alta, è sufficiente aggiungere più solvente. Per quanto riguarda gli adesivi privi di solventi, l'utilizzatore non può variare la viscosità se non di poco; in questo caso, infatti, vanno utilizzati metodi più sofisticati quali l'impiego di diluenti reattivi o polimeri a peso molecolare più basso. Queste modifiche sono normalmente apportate dal produttore di adesivi.

La viscosità di un adesivo normalmente si esprime, come valore per la viscosità dinamica, in Pa.s; negli adesivi a bassa viscosità viene invece espressa in mPa.s. Può essere definita come la forza espressa in newton necessaria a muovere una superficie di separazione, parallela alla superficie opposta, in uno strato di fluido avente una superficie di 1 m^2 e un'altezza di 1 m alla velocità di 1 ms^{-1}. Viene misurata con viscosimetri o reometri *(vedere Glossario)* costruiti in base alla natura dei processi di flusso in esame.

La tixotropia è la proprietà del materiale fluido di trasformarsi temporaneamente passando a uno stato di viscosità più bassa in seguito all'azione delle forze meccaniche (es.: agitazione, scuotimento,

impastamento). Gli adesivi tixotropici hanno una composizione variabile a seconda delle richieste del cliente e nelle composizioni vengono aggiunti gli agenti tixotropizzanti. Ciò conferisce i seguenti vantaggi:

- sulle superfici di incollaggio verticali l'adesivo non cola;
- minore assorbimento dell'adesivo nei substrati molto porosi;
- migliore applicazione e capacità di coprenza dell'adesivo;
- si possono ottenere strati di adesivo più spessi.

2.1.3 Tecniche per migliorare l'incollabilità dei substrati: trattamento superficiale

I principali meccanismi di incollaggio, di cui si è discusso in precedenza, hanno evidenziato chiaramente che la struttura del substrato deve soddisfare certi requisiti se si desidera ottenere un legame forte e di alta qualità:

1. La superficie del substrato deve essere facilmente bagnabile, ossia l'adesivo scelto non deve formare schivature, cioè deve distribuirsi (distendersi) su tutta la superficie del substrato.

2. La superficie del substrato deve possedere buone proprietà recettive, ossia devono intervenire interazioni intermolecolari e chimiche con le molecole dell'adesivo.

3. Lo strato superficiale del substrato deve essere ben attaccato al substrato. Si pensi, per esempio, a supporti di acciaio molto arrugginiti che devono essere incollati. Se non si asporta lo strato di ruggine superficiale, la ruggine viene semplicemente incollata alla ruggine. Sottoponendo i substrati a carichi, la ruggine si stacca insieme all'adesivo.

4. Dopo l'operazione di incollaggio, la superficie non deve modificarsi in modo incontrollato. L'acciaio rettificato, ad esempio, si arrugginisce anche sotto lo strato di adesivo se il giunto si trova in un ambiente umido. Al fine di creare un giunto che abbia una stabilità nel tempo, non basta semplicemente rettificare la superficie dell'acciaio ma devono essere adottate misure ulteriori adeguate per impedire che si formi la ruggine sotto lo strato di adesivo qualora si utilizzi il pezzo di acciaio in un ambiente umido.

Questi aspetti evidenziano la necessità di sottoporre il substrato a un trattamento superficiale per creare una superficie che soddisfi i criteri sopra citati. In linea generale, ciò significa trattare i materiali in modo tale che:

1. In un ambiente produttivo si creino condizioni di incollaggio che garantiscano una qualità riproducibile del giunto;

2. la bagnabilità e l'adesione siano migliori;

3. sia migliore la stabilità nel tempo dei giunti incollati.

In generale, si distingue tra 3 tipologie di "trattamenti superficiali" *(Figura 9)*: preparazione della superficie, pretrattamento superficiale e post-trattamento superficiale.

La preparazione della superficie del substrato consiste essenzialmente nella pulizia (es.: sgrassatura, cardatura, piallatura, carteggiatura).

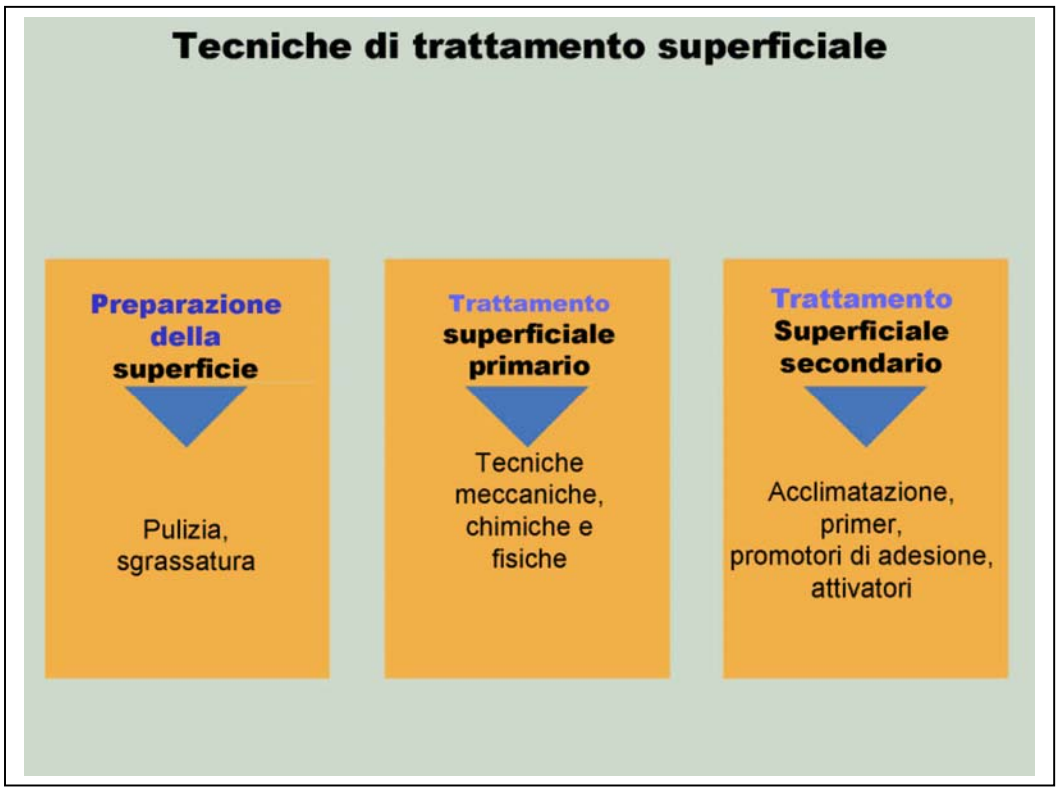


Figura 9

Il trattamento superficiale comprende tutte le operazioni meccaniche (es.: rettifica, lavaggio a getto), i processi chimici (su metalli: es.: passivazione e decapaggio)*;* su materie plastiche: es.: fluorurazione allo stato gassoso) e processi fisici (su materie plastiche: plasma a bassa pressione) che modificano la struttura e/o la composizione chimica della superficie a seconda del materiale di base di partenza. A titolo esemplificativo viene illustrato il trattamento superficiale del polietilene. Senza il pre-trattamento superficiale il polietilene sarebbe difficile da incollare. La tecnica utilizzata per questo pre-trattamento è il cosiddetto metodo “corona”. Per migliorare, ad esempio, le proprietà di adesione nella produzione di pellicole composite, si sfrutta l’azione delle scariche elettriche sui materiali, in presenza di ossigeno atmosferico e con una tensione fino a 60.000 volt.

Il post-trattamento superficiale riguarda tutte le tecniche atte a migliorare ulteriormente le proprietà recettive della superficie trattata, ad es. applicazione di primer.

2.2 Che cosa sono gli adesivi?

Quanto ribadito nel capitolo 1.3 è servito a spiegare chiaramente che innumerevoli tipi di adesivi diversi vengono utilizzati in campo “naturale” e tecnico. Gli adesivi a noi noti possono essere classificati in base alla loro composizione chimica *(Figura 10)* oppure secondo il loro meccanismo di polimerizzazione/indurimento dei polimeri *(Figura 11)*.
La consueta classificazione dei polimeri in termoindurenti, termoplastici ed elastomeri non è di grande utilità per gli adesivi. Affinché ciascun gruppo di adesivi abbia una posizione ben definita nella classificazione complessiva, è necessario un ulteriore criterio di classificazione in base al metodo e alla modalità con cui un adesivo polimerizza, ovvero se l’incollaggio comporta un meccanismo fisico o chimico.

Figura 10

Figura 11

2.2.1 Adesivi che induriscono per processo fisico

Si tratta di adesivi che al momento dell'applicazione si trovano già nello stato chimico finale *(Figura 12)*.

Possono essere utilizzati soltanto i polimeri che possono essere ridotti allo stato fluido, ovvero le resine termoplastiche che possono fondersi o le resine termoplastiche solubili o emulsionabili. Benché gli elastomeri, a basso grado di reticolazione ma con capacità di rigonfiamento siano, a rigor di termine, insolubili possono, tuttavia, essere utilizzati in alcuni casi. E' sufficiente che si rigonfino quanto basta per permettere la bagnabilità del substrato.

Adesivi che induriscono per processo fisico

Descrizione	Meccanismo di incollaggio	Materie prime di base	Campo di applicazione
Adesivi termofusibili	Passaggio di stato da liquido (fuso) a solido	Copolimeri di etilene /acetato di vinile, poliammidi, poliesteri, ecc.	Industria dell'imballaggio, legatoria, tessile, settore calzaturiero, lavorazione legno, automobilistico, ingegneria elettronica.
Adesivi a solvente	Evaporazione del solvente	Composti vinilici polimerici, polimetilmetacrilato, gomma naturale e sintetica, ecc.	Incollaggio tubi in PVC, adesivi ad uso domestico, settore calzaturiero, legno, auto, edilizia.
Adesivi a contatto	Evaporazione del solvente	Policloroprene, gomma di acrilonitrile-butadiene, ecc.	Rivestimenti pavimenti, materassi e calzature, industria automobilistica, legno e mobile.
Adesivi in dispersione acquosa	Evaporazione dell'acqua	Polimeri non solubili in acqua di acetato di vinile, in combinazione anche con co-monomeri, poliacrilati, ecc.	Industria dell'imballaggio, legatoria, calzaturiera, agro-alimentare, lavorazione del legno, edilizia, auto.
Altri adesivi all'acqua	Evaporazione dell'acqua	Glutine, caseina, destrina, metil cellulosa, alcool polivinilico, ecc.	Carta, carta da parati, etichettaggio, imballaggio, legatoria.
Autoadesivi	Tramite contatto superficiale degli strati adesivi	Poliacrilati speciali, etere polivinilico, gomma naturale, ecc.	Nastri adesivi per l'artigianato e l'industria, cerotti, etichette autoadesive, igienico-sanitari.
Plastisol	Trasformazione sol-gel in fase di riscaldamento	PVC e plastificanti	Auto

Figura 12

Adesivi termofusibili

Possono essere utilizzati diversi polimeri come adesivi termofusibili *(Figura 13)*. I polimeri fondono per effetto del calore e quindi possono essere lavorati, ma quando si raffreddano si solidificano. Gli adesivi termofusibili impiegati nell'industria possono essere sotto forma di blocchi, barrette, granulati, polvere e film quando sono a temperatura ambiente. Si applicano alla superficie del substrato quando sono fusi. La colla viene applicata con un rullo o spruzzata tramite un ugello e l'accoppiamento viene eseguito subito dopo l'applicazione o dopo avere riscaldato di nuovo lo strato solidificato. In alternativa, la colla solida può essere stesa sul substrato sotto forma di film o microgranuli e poi pressata a caldo. In generale, la fase di accoppiamento richiede l'applicazione di pressione.

Una caratteristica degli adesivi termofusibili è l'aumento molto rapido della forza interna in fase di raffreddamento (tempo di presa rapido).

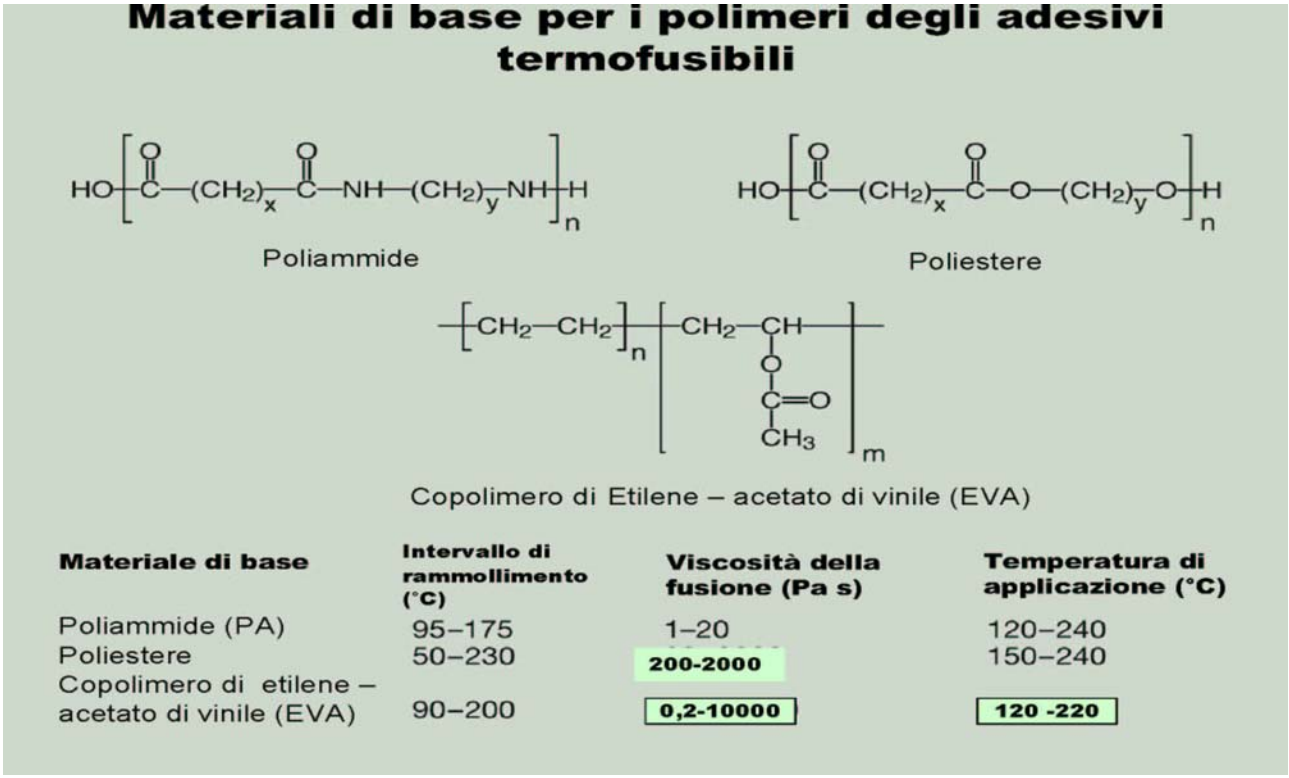


Figura 13

Un “adesivo termofusibile” naturale noto a tutti è la cera d’api che le api impiegano come materiale da costruzione *(cfr. capitolo 1.3)*. Con gli adesivi termofusibili industriali è possibile ottenere giunti con resistenze comprese tra 15 e 35 MPa. Tuttavia, i giunti tendono a subire deformazioni permanenti qualora vengano sottoposti a una sollecitazione costante o se esposti ad alte temperature. L’aspetto positivo è che queste colle, grazie alla struttura termoplastica, possono essere utilizzate per creare giunti staccabili termicamente ovvero giunti incollati ristaccabili. Il giunto incollato non deve mai, tuttavia, durante l’uso essere riscaldato fino all’intervallo di fusione perché la colla perde la sua forza anche a temperature inferiori, nella cosiddetta “regione di rammollimento”. La temperatura di lavorazione può variare entro un certo limite *(Figura 13)* e dipende dalla viscosità che si intende ottenere per una particolare applicazione. La viscosità dell’adesivo fuso determina le proprietà di applicazione della colla. In generale, è la bassa viscosità a facilitare la bagnabilità del substrato.

Gli adesivi termofusibili vengono utilizzati nell’industria per un’ampia gamma di applicazioni. E’ soprattutto l’industria dell’imballaggio (fabbricazione di imballaggi di carta, cartone, film metallici e plastici) a farne grande uso. Gli adesivi termofusibili vengono utilizzati anche nell’editoria per incollare il dorso dei libri, nell’industria tessile per incollare toppe e inserti, e nell’industria calzaturiera per incollare, ad esempio, puntali, contrafforti e tomaie delle scarpe. L’industria della lavorazione del legno utilizza gli adesivi termofusibili per le rifiniture dei bordi delle impiallacciature e dei contorni. L’industria automobilistica impiega gli adesivi termofusibili per una lunga serie di applicazioni che comprendono l’incollaggio dei materiali di isolamento e delle imbottiture, l’incollaggio dei fanali nelle intelaiature metalliche e i copriruota. Anche l’industria dell’elettronica utilizza gli adesivi termofusibili, ad esempio, per incollare gli avvolgimenti a bobina e le estremità delle bobine *(Figura 14)*.

Figura 14

Adesivi a solvente

Il "trucco" per applicare questo tipo di adesivo è quello di utilizzare solventi organici in cui sono sciolti polimeri in generale termoplastici *(Figura 15)*. Il contenuto di solventi in questi adesivi è in genere elevato. Dopo l'applicazione, il solvente evapora consentendo così alle macromolecole di formare il film e fare aderire l'adesivo. Lo sviluppo delle interazioni di Van der Waal e l'intreccio delle catene del polimero assicurano la coesione. Questa categoria di adesivi ha buone proprietà bagnanti su molti substrati, soprattutto su quelli che sono permeabili ai solventi. Le prestazioni dell'adesivo variano in funzione della gamma di possibili materie prime con cui l'adesivo è stato prodotto. Il processo di applicazione degli adesivi a solvente è vincolato a precisi intervalli di tempo che i produttori indicano nelle loro schede tecniche. Il "**tempo di essiccamento minimo"** per un adesivo a solvente è l'intervallo di tempo in cui l'adesivo deve essere lasciato dopo l'applicazione in attesa che una parte del solvente evapori. Questo tempo di essiccamento minimo deve essere rispettato prima di congiungere i substrati. Dopo questa fase subentra il "**tempo aperto"** che è l'intervallo entro il quale l'adesivo a solvente applicato può rimanere sul substrato prima dell'accoppiamento senza compromettere la forza finale del legame.
Se si supera il "tempo aperto" e la congiunzione dei substrati avviene in un tempo successivo, si avrà un legame più debole. Gli adesivi a solvente hanno generalmente una forza iniziale bassa che aumenta gradualmente fino a resistere alla movimentazione del pezzo per poi raggiungere la forza finale.

Con questo tipo di adesivi non è possibile raggiungere un'elevata resistenza allo sforzo di taglio *(cfr. Glossario).* A causa della loro natura termoplastica, gli adesivi a solvente hanno in generale una resistenza limitata alla deformazione se esposti all'azione del calore. Inoltre, per loro natura, reagiscono sensibilmente ai solventi e tendono a deformarsi in modo permanente se sottoposti a carichi. In campo industriale questi adesivi sono usati prevalentemente nell'industria del mobile, della calzatura, dell'auto oltre che nella saldatura per diffusione (saldatura di solubilizzazione e saldatura a freddo) di termoplastiche solubili (es.: tubazioni in PVC). Per ragioni di tutela ambientale, la tendenza che predomina nello sviluppo degli adesivi è comunque di soppiantare gli adesivi contenenti solventi prediligendo sistemi privi di solventi.

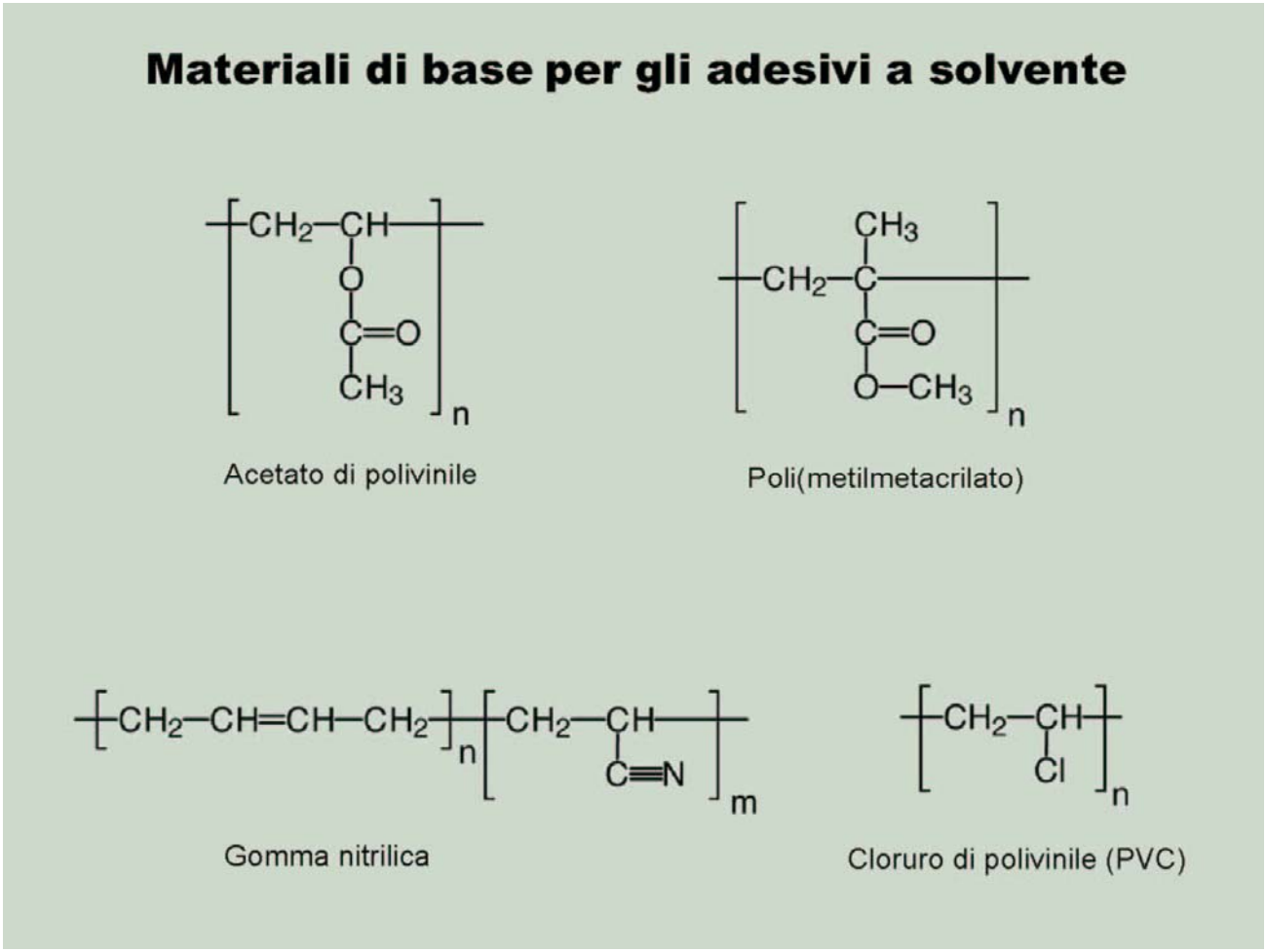


Figura 15

Adesivi a contatto

Gli adesivi a contatto sono costituiti da una miscela di elastomeri e resine solubili sotto forma di soluzione in un solvente organico o sotto forma di dispersione in acqua. Il "trucco per l'applicazione" è lo stesso indicato per gli adesivi a umido: il solvente evapora e l'adesivo filma (Cfr. glossario). I nomi diversi utilizzati per queste due categorie di adesivi contraddistinguono le loro diverse caratteristiche: mentre le "colle a umido" formano uno strato "umido" di adesivo e il solvente evapora solo durante la fase di accoppiamento, gli adesivi a contatto aderiscono precipuamente allo stato "asciutto". L'adesivo viene applicato sui due substrati e il solvente viene fatto evaporare quasi completamente prima di congiungere i substrati. L'acqua, il solvente ecologico utilizzato in alcuni adesivi a contatto, non è stata finora in grado di sostituire i solventi organici in tutte le applicazioni a causa della sensibilità all'umidità di questi adesivi.

Le comuni materie prime utilizzate per gli adesivi a contatto sono il policloroprene, la gomma stirene-butadiene e la gomma butadiene-acrilonitrile nei solventi organici, ma si usano anche le dispersioni acquose di acrilati. Il tempo di evaporazione indicato per il solvente designa l'intervallo trascorso il quale la superficie dell'adesivo applicato risulta asciutta al tatto anche se contiene ancora residui di solventi. Il congiungimento viene eseguito applicando una pressione il più possibile elevata – i due strati di adesivo vengono così messi a stretto contatto e i polimeri dell'adesivo si compenetrano. Le schede tecniche forniscono dati sul "tempo aperto", cioè l'intervallo che può trascorrere prima di congiungere i due strati senza che la forza finale del legame ne risulti compromessa. Questo tempo è limitato dall'avvio della cristallizzazione dello strato di adesivo che fa perdere ai polimeri la capacità di creare legami adesivi tra loro. Quando si eseguono incollaggi per mezzo di adesivi a contatto, non è rilevante la durata della pressione quanto piuttosto l'intensità della pressione esercitata. La forza di questo legame viene determinata dalle forze di Van der Waal e dall'intreccio delle molecole tra gli strati di polimeri. In generale, nonostante gli adesivi a contatto formino immediatamente legami che non possono essere staccati con la forza della mano, non raggiungono mai un'elevata resistenza allo scorrimento. I legami hanno un'elevata flessibilità che può essere corretta a piacere, entro certi limiti. Tuttavia, sono poco resistenti alla deformazione in condizioni di sollecitazione termica e reagiscono sensibilmente ai solventi o, per quelli in dispersione, all'acqua. Un importante campo di applicazione dell'adesivo a contatto riguardava l'incollaggio del PVC e i rivestimenti in gomma. In molte parti d'Europa questi adesivi sono stati ampiamente rimpiazzati da sistemi privi di solventi. Tuttavia, gli adesivi a contatto sono ancora largamente impiegati nel settore automobilistico, calzaturiero e nella produzione di divani in virtù dell'elevata flessibilità dei legami e per la loro capacità di offrire un'elevata forza dell'incollaggio iniziale.

Adesivi in dispersione

Gli adesivi in dispersione *(Tabella 4)* sono sistemi eterogenei che comprendono una fase polimerica solida e una fase acquosa con un contenuto di solidi compreso tra il 40% e il 70%. Il capitolo 1.3 illustra come le vespe muraiole utilizzano questo tipo di adesivo per la costruzione del favo e come la secrezione digestiva impedisca alle particelle di adesivo di far presa troppo presto per poi evaporare al fine di fare seccare la colla.

Adesivi in dispersione

Acetato di polivinile	Buona adesione a substrati contenenti cellulosa come legno e carta. Utilizzato principalmente negli adesivi per legno e imballaggio.
Copolimeri di acetato di vinile	Buona adesione a molte materie plastiche polari.
Poliacrilati	Buone proprietà di resistenza all'invecchiamento e resistenza ad agenti. Utilizzati principalmente negli autoadesivi (etichette, nastri adesivi), negli adesivi permanenti (es.: piastrelle e rivestimenti per pareti e pavimenti) e negli adesivi per laminazione (es.: plastificazione).
Cloruro di polivinilidene	Fisiologicamente innocuo e quindi utilizzato negli adesivi per l'imballaggio nel settore agro-alimentare.
Copolimeri stirene-butadiene	Adesivi per accoppiamento (es.: foglio di alluminio su carta).
Poliuretani	In genere buona adesione a molti substrati ed elevata forza di adesione. Applicazioni nel settore calzaturiero e per l'accoppiamento di fogli o film.
Policloroprene	Elevata elasticità e forza di adesione. Utilizzato prevalentemente nel settore calzaturiero.
Lattici di gomma	(Es.: lattice o cloroprene). In alternativa agli adesivi a contatto contenenti solventi.

Tabella 4

Negli adesivi in dispersione prodotti industrialmente *(Figura 16),* le singole particelle di adesivo vengono tenute in sospensione nell'acqua da materiali ausiliari ed emulsionanti. Sono quindi presenti allo stato liquido che ne consente la lavorazione. Con gli adesivi in dispersione, il processo di incollaggio avviene lentamente mano a mano che l'acqua viene eliminata per evaporazione o per assorbimento da parte dei substrati. Con la perdita d'acqua aumenta la concentrazione delle particelle di polimero.

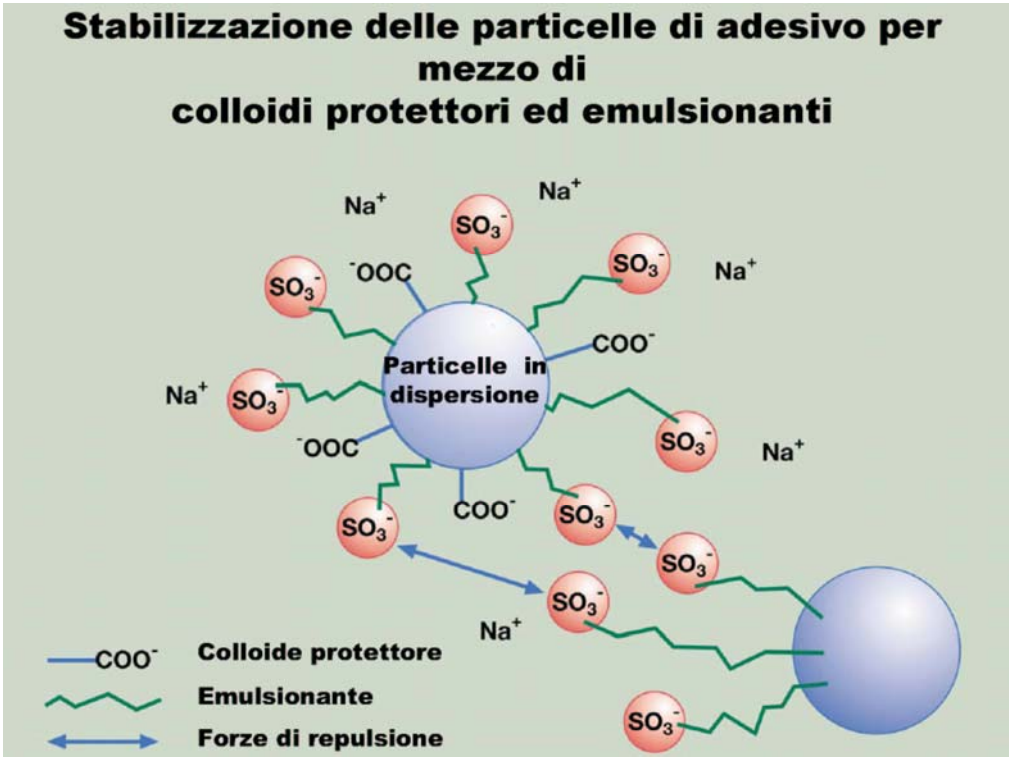


Figura 16

Queste particelle si avvicinano sempre di più fino a compenetrarsi. Questo processo viene definito "filmazione" *(Figura 17)*. Per gli adesivi in dispersione il "tempo aperto", ovvero l'intervallo entro il quale l'adesivo può rimanere sul substrato senza compromettere la forza finale del legame, dipende dalla temperatura, dallo spessore dello strato di adesivo e dalle proprietà di assorbenza dei substrati. I substrati vengono quindi premuti tra loro, generalmente per alcuni minuti (a seconda della temperatura). Prima di passare alle altre fasi, deve essere rispettato un certo tempo di ulteriore indurimento, anch'esso condizionato dalla temperatura.

Figura 17

Gli adesivi in dispersione non offrono un'elevata resistenza al taglio a trazione *(cfr. Glossario)*. Per la loro natura termoplastica presentano soltanto una limitata stabilità dimensionale se esposti all'influenza del calore. La presenza di emulsionanti al loro interno fa sì che siano sensibili all'umidità e, se sottoposti a carichi, tendono a subire deformazioni permanenti. I legami sono però molto flessibili e questa flessibilità può essere modificata entro certi limiti. Gli adesivi in dispersione sono particolarmente indicati per incollare grandi superfici di materiali permeabili all'acqua. Per questo motivo, questi adesivi sono spesso utilizzati nella lavorazione della carta, nel settore dell'imballaggio e nella fabbricazione di mobili. Il riepilogo illustrato in *Tabella 4* offre una panoramica sui molteplici campi di applicazione degli adesivi in dispersione e dei polimeri impiegati.

Adesivi a base acqua

La categoria degli adesivi a base acqua comprende quattro sottogruppi *(Tabella 5)*: gli adesivi a base di proteine animali derivanti dal tessuto connettivo (colle animali), i prodotti vegetali naturali (amidi e destrine), il gruppo di adesivi a base di caseina e gli adesivi contenenti alcool polivinilico (PVAL) come materia prima. Negli adesivi a base acqua, lo strato adesivo si forma per evaporazione dell'acqua o per assorbimento dell'acqua nei substrati. I suddetti adesivi si contraddistinguono per una parziale insolubilità in acqua fredda delle materie prime di base e pertanto devono essere "cotti" in acqua o disciolti in soluzioni alcaline. La seguente panoramica illustra una selezione di diversi componenti di adesivi a base acqua e i loro principali campi di applicazione.

Altri adesivi a base acqua

Tipo di adesivo	Origine della materia prima di base	Campo di applicazione
Colle animali		
Colle di pelle	Scarti di pelle greggia, tessuto connettivo e ossa	Incollaggio carta
Colla di pesce	Pelle di pesce	Falegnameria
A base di prodotti naturali vegetali		
Colla d'amido	Mais, patate, riso, frumento	Incollaggio carta
Metilcellulosa	Cellulosa e legno	Adesivi per carta da parati
Colle alla caseina	Caseina: componente proteico del latte	Etichettaggio bottiglie
Colle PVAL	Prodotto di saponificazione dell'acetato di polivinile o altri esteri di polivinile	Incollaggio carta, cartone, legno; materiale di base per incollaggi attivati con l'umidità (buste e nastri adesivi gommati)

Tabella 5

Autoadesivi

Gli autoadesivi sono adesivi pronti all'uso con un alto grado di viscosità. Generalmente vengono applicati in strato su un materiale di supporto flessibile (nastro adesivo o etichette). Questi adesivi si differenziano dagli altri per la loro capacità di non diventare solidi, ma di rimanere viscosi.
Per questa loro caratteristica occupano un posto speciale nella categoria degli adesivi che aderiscono tramite meccanismo fisico. Per produrre sistemi di incollaggio di tipo autoadesivo, gli adesivi possono essere disciolti in solventi organici (es.: gomme naturali, acrilati), possono presentarsi come dispersioni acquose (es.: dispersioni di acrilati) o possono essere masse fuse prive di solventi (autoadesivi termofusibili).
Questi autoadesivi hanno comunque una composizione simile: contengono tutti il polimero di base (il componente che determina la coesione), resine adesive e plastificanti (i componenti che determinano l'adesione) e additivi capaci di conferire particolari proprietà.

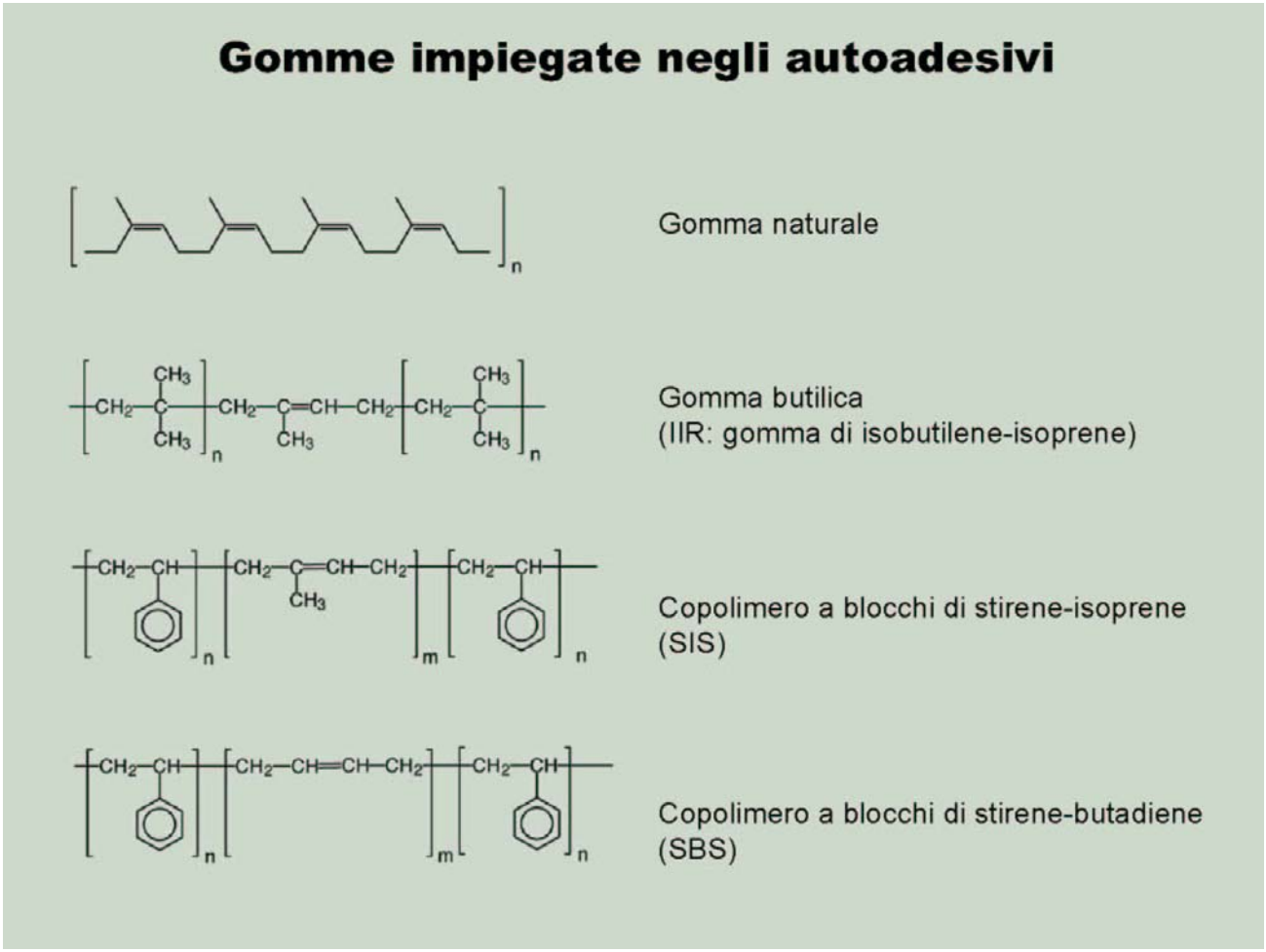


Figura 18

Un'ampia gamma di polimeri di base e additivi (resine adesive, plastificanti, antiossidanti) è attualmente impiegata negli autoadesivi *(cfr. Figura 18)*. Il termine "autoadesivo" deve essere inteso nel senso che, a differenza degli altri adesivi, si sviluppa un'immediata adesione e coesione quando i substrati vengono uniti. Per favorire l'adesione, si deve applicare una pressione di circa 0,2 MPa (di qui il termine inglese "pressure sensitive adhesives" – PSA – per gli autoadesivi). Se si applica una pressione insufficiente o la temperatura di lavorazione è troppo bassa possono verificarsi difetti di incollaggio, come la formazione, ad esempio, di bolle o scollamenti. Come nel caso degli altri adesivi, l'effettiva adesione che si ha con gli autoadesivi è dovuta alle interazioni intermolecolari. Tuttavia, con gli autoadesivi nel legame finale l'adesivo permane ancora allo stato di liquido viscoso. Per questo motivo la viscosità influisce direttamente sulla forza di coesione. Si distingue in questo caso tra adesivi removibili e permanenti. Se si stacca da una superficie l'autoadesivo (es.: nastro adesivo), non viene intaccata l'adesione tra l'adesivo e la superficie, piuttosto si verifica una rottura nella zona di coesione dell'adesivo in prossimità della superficie ed è per questa ragione che residui di adesivo possono rimanere sulla superficie del substrato (es.: frammenti di colla di etichetta su finestre).

Se un nastro adesivo è rivestito con autoadesivo a bassa viscosità, la sua forza di coesione è bassa e può essere staccato e riposizionato nuovamente. Tuttavia, non è possibile raggiungere forze finali elevate. Un aspetto caratteristico è il rapido conseguimento di un'adesione iniziale elevata perché con gli autoadesivi a bassa viscosità i processi di bagnatura si verificano rapidamente.

Per contro, non è possibile un incollaggio iniziale rapido per gli adesivi con un grado di viscosità più elevato. Questi adesivi impiegano più tempo per bagnare completamente la superficie del substrato. Grazie all'elevata viscosità si ottiene, però, una maggiore coesione con una forza di legame finale più elevata. Per questi motivi questi adesivi vengono utilizzati per creare incollaggi permanenti. Poiché le superfici ruvide rendono più difficile la bagnatura e ritardano il processo di bagnatura soprattutto negli autoadesivi con alto grado di viscosità, i substrati da incollare devono avere, in teoria, superfici lisce. Molti autoadesivi (specialmente gli adesivi a base di gomma naturale e i siliconi) hanno una tensione superficiale molto bassa per cui non necessitano di pre-trattamento se non la normale pulizia della superficie del substrato; gli autoadesivi permettono di ottenere incollaggi direttamente su gran parte delle superfici di plastica.
La resistenza alla "pelatura" e la resistenza allo scorrimento degli autoadesivi diminuiscono all'aumentare della temperatura. Gli autoadesivi sono anche inclini a subire delle deformazioni permanenti se sottoposti a carichi. Tra tutti i tipi di colle, gli autoadesivi sono quelli più impiegati nelle applicazioni quotidiane. Proprio per le loro particolari proprietà trovano impiego nelle più diverse situazioni, dai cerotti alle etichette adesive fino ai vari tipi di nastro adesivo per l'artigianato e a scopo industriale *(Figura 19).*

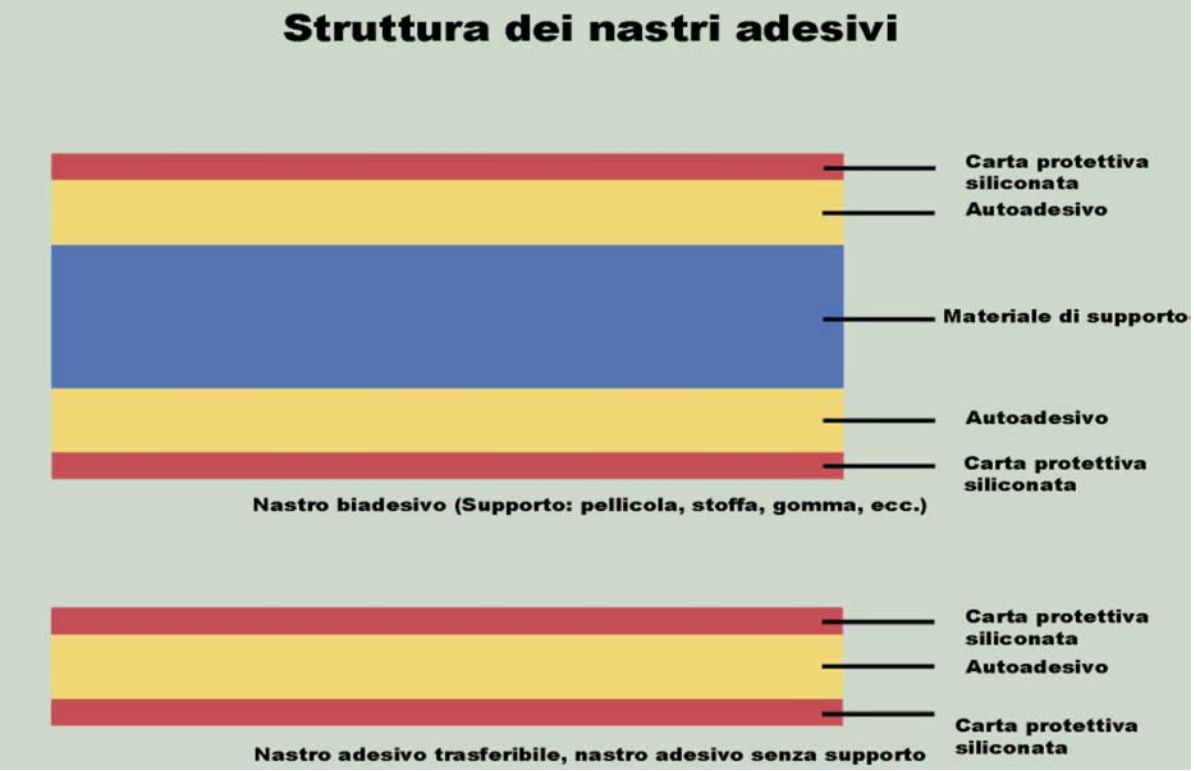


Figura 19

Plastisol

I plastisol sono adesivi monocomponenti applicati al substrato in forma di pasta. La pasta è composta, a sua volta, da due componenti miscelati insieme: le particelle di PVC e il plastificante *(cfr. Glossario)*. Le particelle solide di PVC sono disperse nel plastificante altamente viscoso in un rapporto variabile da 1:1 a 4:1. Per ottenere l'adesione, l'adesivo applicato viene riscaldato in modo tale che il PVC termoplastico si dilati fino a inglobare il plastificante. Questa fase implica un processo sol-gel puramente fisico *(Figura 20)*. Il sistema a due fasi (sol) si converte in un sistema monofase (gel) inglobando il pastificante nel polimero rigonfiato. Questo processo avviene soltanto a una temperatura compresa tra 150 e 180°C e si crea uno strato di adesivo costituito dal polimero plastificato.

I plastisol presentano un'elevata flessibilità e una buona resistenza alla "pelatura". Ciononostante, hanno lo svantaggio di essere sensibili a sollecitazioni tangenziali che portano allo scorrimento di strati di adesivo e tendono anche a subire deformazioni permanenti se sottoposti a carichi - anche se nelle applicazioni normali come sigillanti questi effetti negativi non sono riscontrabili. Essendo termoplastici, hanno, per loro natura, solo una scarsa resistenza al calore. Inoltre, se surriscaldati, ad esempio durante la saldatura a punti, potrebbero liberare acido cloridrico. I plastisol trovano frequente applicazione nel settore della costruzione di carrozzerie per auto. Oltre alla loro funzione adesiva, i plastisol servono anche per rendere ermetiche le giunture contro l'umidità, per attutire le vibrazioni e per aumentare la rigidità della carrozzeria. I plastisol possono essere altresì impiegati per incollare lamiere metalliche non pre-trattate in quanto sono in grado di assorbire l'olio. Dal punto di vista, invece, degli aspetti negativi, i plastisol di PVC presentano problemi di inquinamento ambientale (PVC) quando si tratta di riciclare i componenti incollati, per cui tendono ad essere sostituiti sempre più di frequente con adesivi alternativi, ad esempio con gli adesivi a base di resine epossidiche.

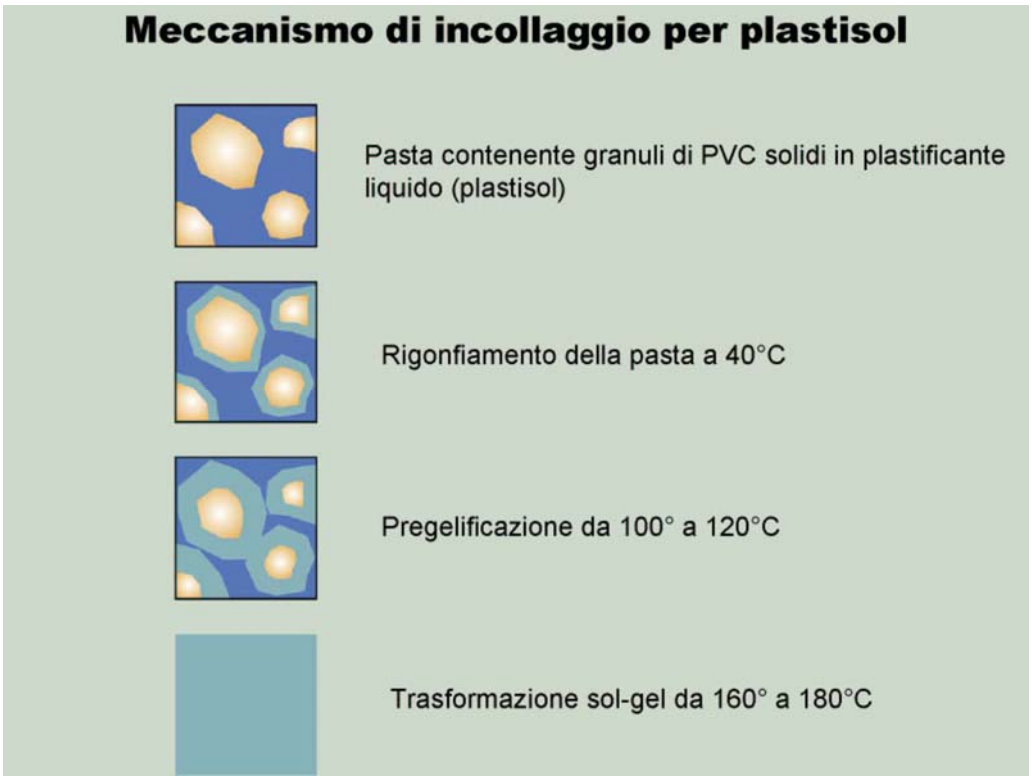


Figura 20

2.2.2 Adesivi che induriscono per reazione chimica

Di seguito, vengono descritti i diversi tipi di adesivo che polimerizzano chimicamente (adesivi reattivi). Sono suddivisi in tre categorie in base al tipo di reazione che producono *(Figura 21)*. Per fare sì che l'adesivo polimerizzi effettivamente soltanto nel giunto, i produttori hanno dovuto studiare una tecnica di applicazione che consente di bloccare o rallentare la reazione chimica, che conduce ad un adesivo solido, per un tempo sufficiente tale da permettere all'adesivo di raggiungere la destinazione finale prevista, ovvero il giunto. La specifica tecnica di lavorazione dipende dal meccanismo di polimerizzazione delle varie colle: gli adesivi che dopo miscelazione di due coreagenti reagiscono spontaneamente, ad esempio, a temperatura ambiente, sono commercializzati con il nome di adesivi bicomponenti. Si presentano in confezioni distinte contenenti ciascuna la "resina" e l'"indurente" e

sono quindi fisicamente separati. Poco prima dell'applicazione vengono semplicemente miscelati per formare l'adesivo.

Adesivi che induriscono per reazione chimica

Descrizione	Meccanismo di polimerizzazione	Materie prime di base	Campi di applicazione
Cianoacrilati	Polimerizzazione anionica	Cianoacrilati	Incollaggio di piccoli componenti, incollaggio di tutti i tipi di vetro, adesivi per stoffe, spray cicatrizzanti
Metilmetacrilati	Polimerizzazione radicalica	Metilmetacrilati	Incollaggio di materie plastiche nel settore automobilistico e fabbricazione di veicoli ferroviari
Adesivi che polimerizzano anaerobicamente (adesivi anaerobici)	Polimerizzazione radicalica	Diacrilati di dioli	Motori, motori elettrici, fissaggio viti, parti metalliche
Adesivi che polimerizzano con le radiazioni	Polimerizzazione radicalica	Epossiacrilati, poliesteri acrilati	Incollaggio di vetro e plastiche trasparenti, odontoiatria
Resine fenolformaldeide	Policondensazione	Fenoli, formaldeide	Materiali di legno, incollaggio di guarnizioni freno e frizione, incollaggio strutturale di alluminio nell'industria aeronautica
Siliconi	Policondensazione	Poliorganosilossani	Sigillatura, ingegneria elettrica; applicazioni speciali nella tecnologia aeronautica e aerospaziale
Poliimmidi	Policondensazione	Anidride di acidi tetracarbossilici Aromatici e diammine aromatiche	Incollaggio di metalli nella tecnologia aeronautica e aerospaziale
Adesivi epossidici	Poliaddizione	Diepossidi oligomerici e poliammine o poliammidoammine	Adesivi strutturali nella produzione automobilistica e di aeromobili, nella costruzione di carrozzerie per auto, nell'elettronica, incollaggio di materie plastiche rinforzate con fibre, riparazioni
Adesivi poliuretanici	Poliaddizione	Isocianati bifunzionali e talvolta trifunzionali, polioli	Costruzione di carrozzerie per auto, incollaggio di materiali con tolleranza ai carichi e proprietà di espansione alla temperatura molto diversificate, incollaggio di lastre di vetro nell'industria automobilistica

Figura 21

Nel caso degli adesivi monocomponenti, i componenti dell'adesivo vengono premiscelati nelle loro proporzioni finali anche se rimangono chimicamente bloccati. Fintanto che non vengono esposti alle condizioni che attivano l'indurente, questi adesivi non aderiscono. Per potere avviare il meccanismo di polimerizzazione necessitano di una temperatura elevata oppure di sostanze od agenti (luce, umidità) presenti nell'ambiente. I contenitori in cui trasportare e conservare questi tipi di adesivi devono essere scelti con cura per evitare eventuali reazioni indesiderate.

Adesivi che induriscono per polimerizzazione

Cianoacrilati

Negli USA i cianoacrilati vengono definiti nel linguaggio comune "superglue", "supercolle". Questo termine descrive molto chiaramente la caratteristica predominante di questa categoria di adesivi. In pochi secondi si ottengono, grazie a questi adesivi, legami saldi che non possono essere staccati con la sola forza della mano. La forza finale si raggiunge però solo dopo diverse ore. Chimicamente sono adesivi reattivi monocomponenti a base di cianoacrilati. La speciale struttura dei cianoacrilati spiega anche l'alta velocità alla quale ha inizio la reazione di polimerizzazione *(Figura 22)*.

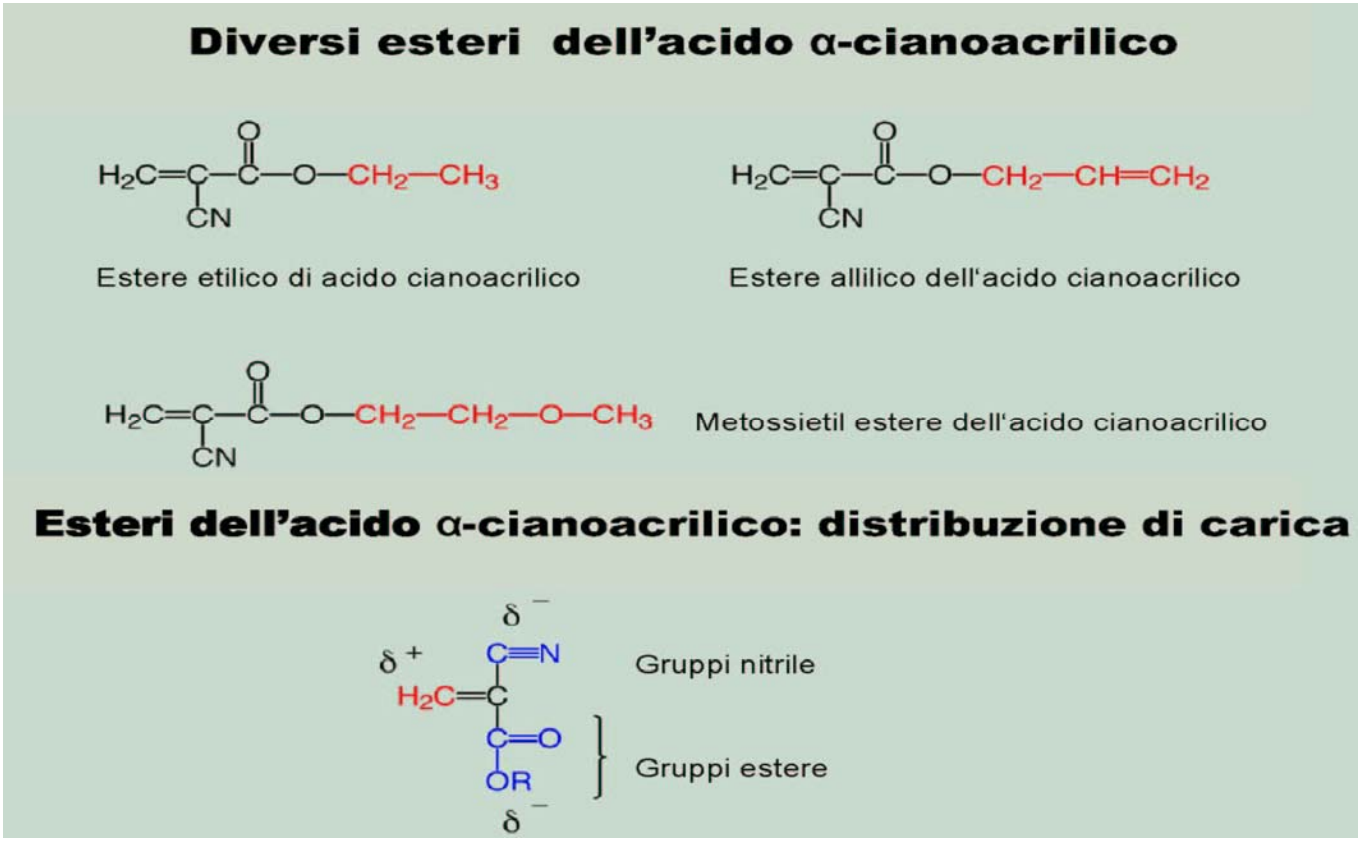


Figura 22

I gruppi nitrile ed estere esercitano un forte effetto elettrofilo che favorisce l'attacco da parte di sostanze nucleofile, come le ammine, e stabilizza il carbanione che ne risulta. Gli ioni ossidrile ottenuti dalla dissociazione dell'acqua o le ammine presenti nei primer possono eseguire l'attacco e innescare una reazione di polimerizzazione anionica *(Figura 23)*.

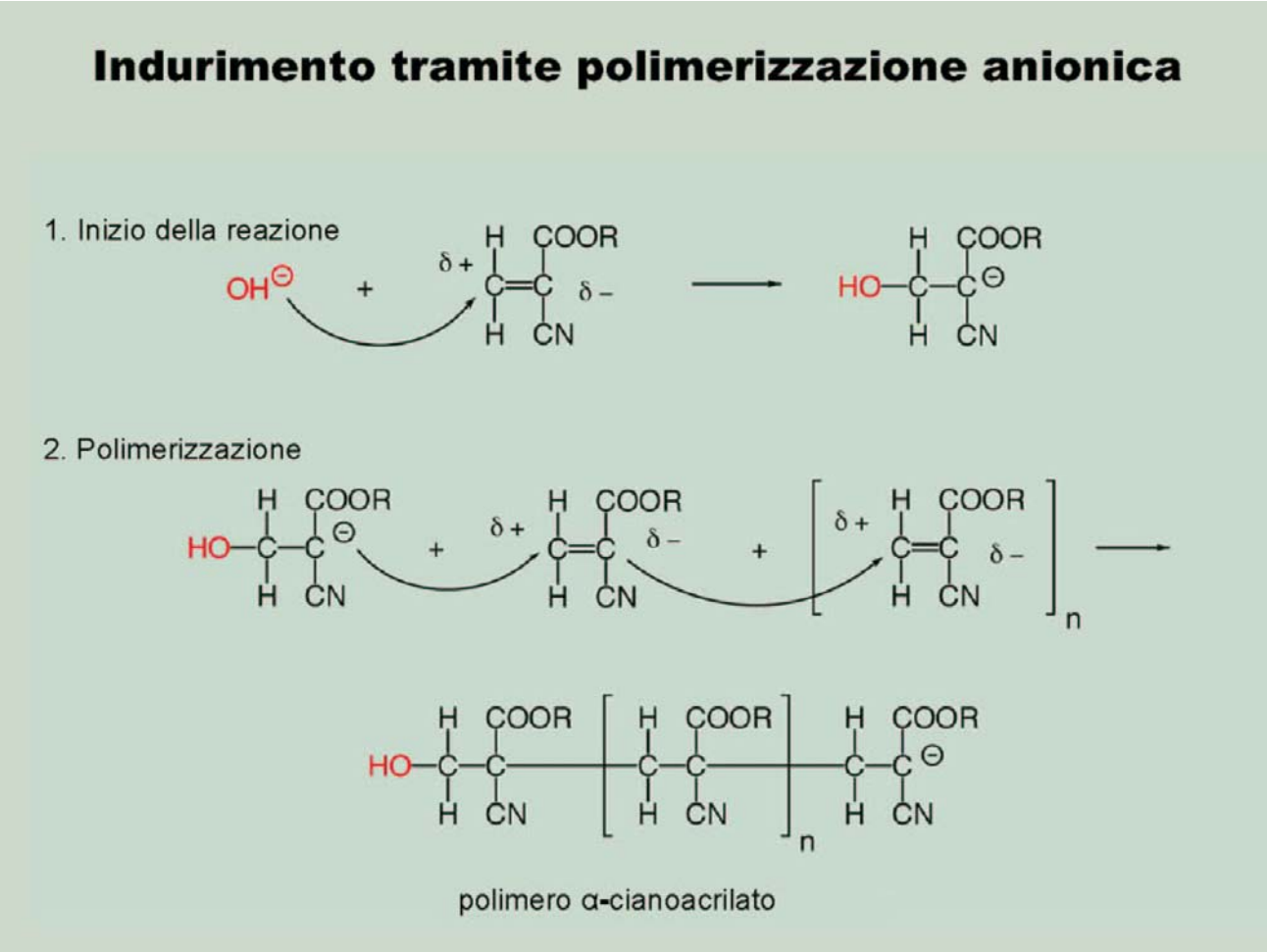


Figura 23

La polimerizzazione di questo tipo di adesivo può innescarsi, inoltre, per effetto dell'umidità, se compresa tra il 50% e il 70%, o per l'umidità presente sulla superficie del substrato o con il contatto con superfici basiche. Ciononostante, se si aggiunge acido o sono presenti superfici acide, la necessaria concentrazione di ioni ossidrile nucleofili viene ridotta fino a rallentare la polimerizzazione dei cianoacrilati. Gli acidi forti provocano la protonazione del carbanione interrompendo immediatamente la reazione a catena. Benché gli acidi deboli possano provocare l'interruzione della reazione di polimerizzazione, le loro basi coniugate nucleofile possono attivarne di nuove. In un ambiente neutro o basico la reazione continua fino al completo esaurimento del monomero. Il comportamento dei cianoacrilati all'acqua è ambivalente: se da un lato hanno bisogno dell'acqua per polimerizzare, dall'altro la troppa umidità può provocare la rottura idrolitica del legame. Il meccanismo di reazione, in questo caso, pare essere l'idrolisi basica del polimero di cianoacrilato *(Figura 24)*.

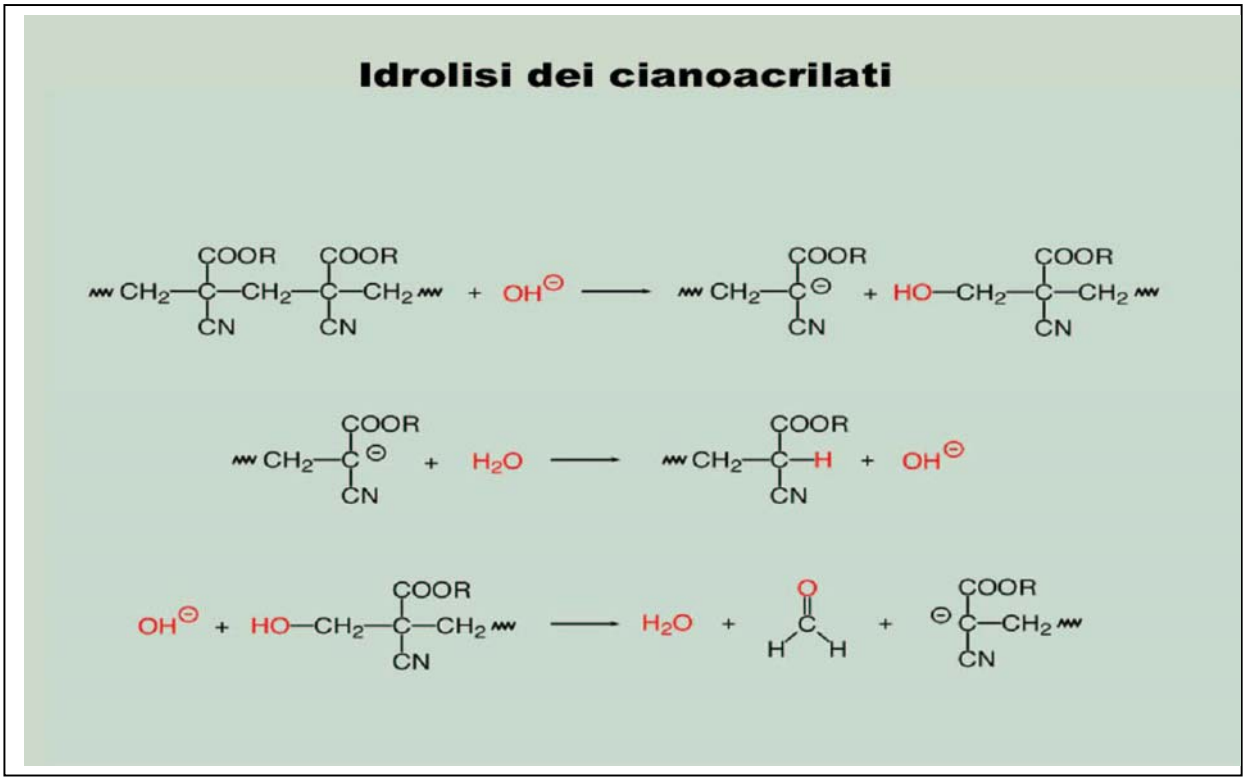


Figura 24

In effetti, a riprova di questo meccanismo di reazione di idrolisi, si trova della formaldeide. Ciò che avvalora ulteriormente il meccanismo ipotizzato è l'aumento della velocità di reazione di due ordini di grandezza quando il pH aumenta da 7 a 8, il che porta a farci concludere che la reazione viene attivata dagli ioni ossidrile. Oltre alla forza di adesione relativamente elevata, altre proprietà caratteristiche dei cianoacrilati sono la fragilità, la bassa flessibilità e una resistenza limitata al calore, tipica dei polimeri termoplastici. I cianoacrilati non polimerizzati sono generalmente liquidi molto fluidi, pertanto questa categoria di adesivi può incollare efficacemente superfici distanti anche pochi micron, ma non funge da riempitivo per spessori superiori ai decimi di millimetro. Ciò è dovuto principalmente al loro meccanismo di polimerizzazione.
Infatti se si utilizzano strati di adesivo di maggiore spessore, l'umidità necessaria per la reazione non penetra sufficientemente in profondità all'interno del giunto incollato interrompendo il processo di polimerizzazione. Il risultato è un adesivo che non polimerizza completamente. I campi di applicazione dei cianoacrilati sono molto diversificati. I cianoacrilati sono adatti per incollare molte combinazioni di materiali e sono utilizzati, in genere, per incollare piccoli componenti. I cianoacrilati sono famosi per riuscire a incollare tutti i tipi di vetro. Sul vetro altamente alcalino sussiste tuttavia il rischio di una polimerizzazione eccessivamente rapida e le tensioni che si creano nello strato di adesivo possono ridurre la forza del legame. Lo stesso effetto può essere prodotto da un elevato grado di umidità (> 80%). Oltre a numerose applicazioni in campo ottico, nella microelettronica e nella produzione di veicoli, in futuro si assisterà a un crescente ed estremamente diversificato ventaglio di applicazioni per i cianoacrilati speciali nel settore della tecnologia medicale, ad esempio come adesivo di sutura o negli spray cicatrizzanti.

Metilmetacrilati (MMA)

I metilmetacrilati sono adesivi reattivi bicomponenti a base di metilmetacrilato (estere metilico dell'acido metacrilico). È altresì presente un indurente, contenente perossido di dibenzoile (comunemente addizionato come sostanza che causa la formazione di radicali) e N,N-dimetil-p-toluidina (comunemente addizionata come accelerante). La polimerizzazione del sistema reattivo - comprendente i monomeri di MMA, la sostanza che genera la formazione di radicali (da 3 a 5%) e l'accelerante - avviene tramite meccanismo di polimerizzazione radicalica *(Figura 25)*.

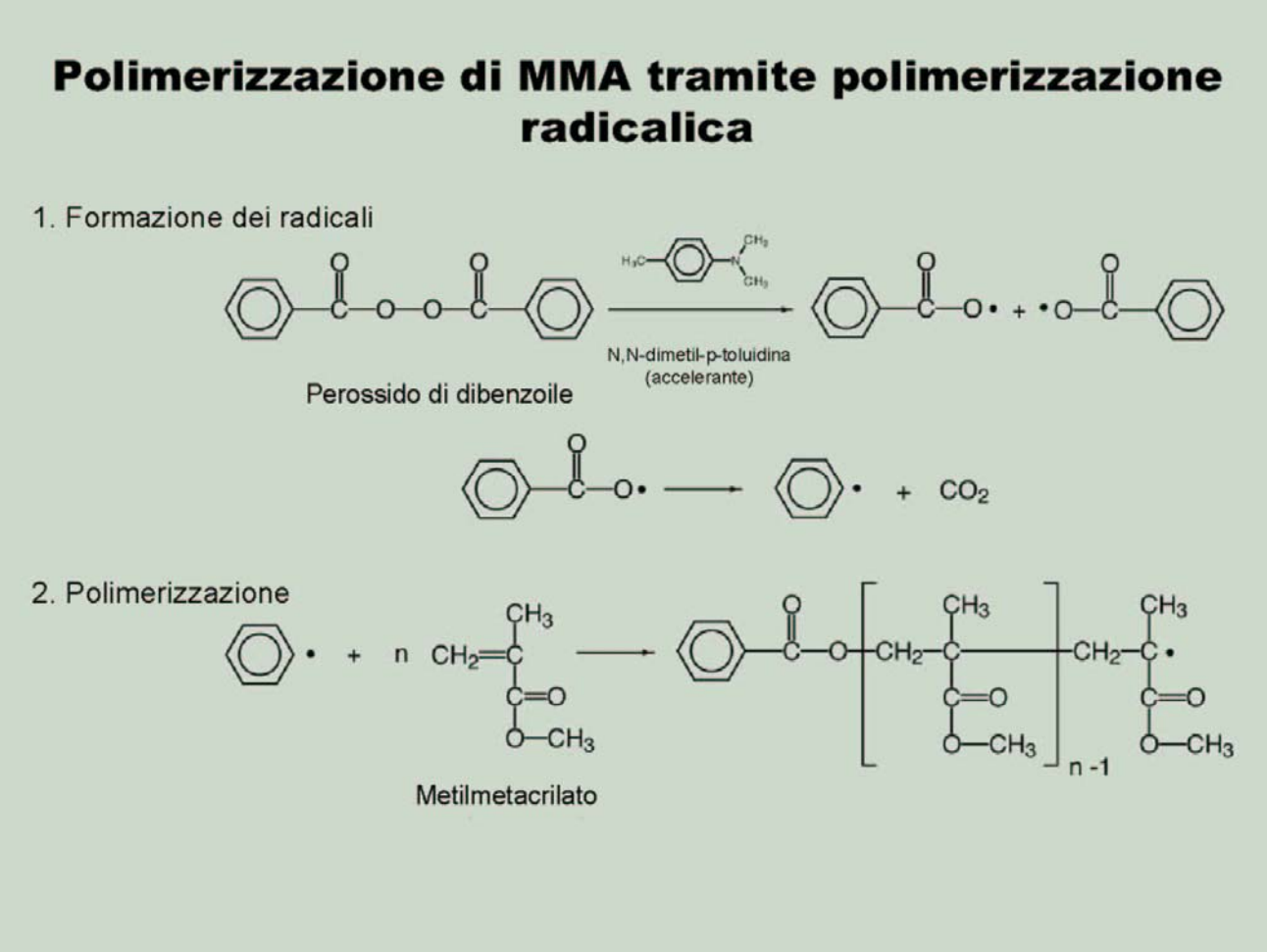


Figura 25

Se la frazione dell'indurente è maggiore del 5%, la forza dell'adesivo diminuisce lievemente. Se la frazione dell'indurente è inferiore al 3%, il tempo di polimerizzazione aumenta considerevolmente anche se è accompagnato da un lieve aumento della forza del legame. Con gli adesivi MMA è possibile conseguire una resistenza al taglio a trazione (prima dell'invecchiamento) fino a oltre 30 MPa e in molti casi la resistenza oltre 5 MPa viene raggiunta dopo soli 5 minuti. A temperatura ambiente la resistenza finale viene raggiunta dopo circa 12-14 ore. Aumentando la temperatura di polimerizzazione si accelera il processo, ma la forza finale ne risulta compromessa. Gli adesivi MMA polimerizzano come materie termoplastiche. Possono resistere a temperature comprese tra –50° C e 100° C circa e anche fino a 180° C per brevi istanti. Aderiscono bene su moltissime superfici di plastica e sono abbastanza adatte a incollare superfici che contengono una certa quantità di olio/grasso. A seconda della viscosità, questo tipo di adesivo può essere utilizzato efficacemente in

giunti ad alto spessore. L'elasticità e flessibilità dell'adesivo polimerizzato possono essere corrette entro certi limiti.
Una caratteristica interessante è data dalle diverse condizioni di lavorazione utilizzate per gli adesivi MMA. Oltre alle tecniche normalmente utilizzate per gli adesivi bicomponenti (applicazione di adesivo con cartucce doppie, lavorazione con aggiunta diretta dell'indurente), con gli adesivi MMA è possibile applicare separatamente ciascuno dei componenti, ognuno su uno dei substrati. L'effettiva reazione di polimerizzazione si verifica soltanto nel giunto incollato dopo che sono stati uniti i substrati. Così facendo, si evita di dover mescolare i singoli componenti in difficili proporzioni (ad es., resina: indurente 100:3) e si evita un tempo di lavorabilità troppo breve, cosa che potrebbe chiaramente rappresentare un problema in un ambiente produttivo su scala industriale. Gli adesivi MMA vengono impiegati per incollare le materie plastiche tra loro e per incollare i metalli alle plastiche. Applicazioni tradizionali per questo tipo di adesivo riguardano la produzione automobilistica e i veicoli ferroviari, ma anche l'assemblaggio di vasche da bagno e vetrine.

Adesivi che polimerizzano in condizioni anaerobiche (adesivi anaerobici)

Questi adesivi monocomponenti sono composti da dimetilacrilati e polimerizzano in condizioni anaerobiche, ovvero in assenza di ossigeno. Dopo l'applicazione dell'adesivo si crea un ambiente privo di ossigeno nello spazio del giunto, se la geometria dei substrati è tale da non fare entrare aria. Al fine di innescare la reazione di polimerizzazione, è necessario che avvenga il contatto con un metallo (rame o ferro). Se i substrati non contengono rame e ferro, è necessario ricorrere ad un accelerante. Per evitare che l'adesivo polimerizzi prima del tempo, la colla, dentro il suo contenitore, deve rimanere a contatto con l'ossigeno fino a quando non viene utilizzata. Ciò è possibile se si utilizzano bottiglie di plastica permeabili all'aria, riempite fino a metà.
Una materia prima usata di frequente per gli adesivi anaerobici è il dimetacrilato di tetraetilenglicole (abbreviato in TEGMA). Per gli adesivi anaerobici, la coesione si ottiene attraverso un meccanismo di polimerizzazione radicalica *(Figura 26)*.

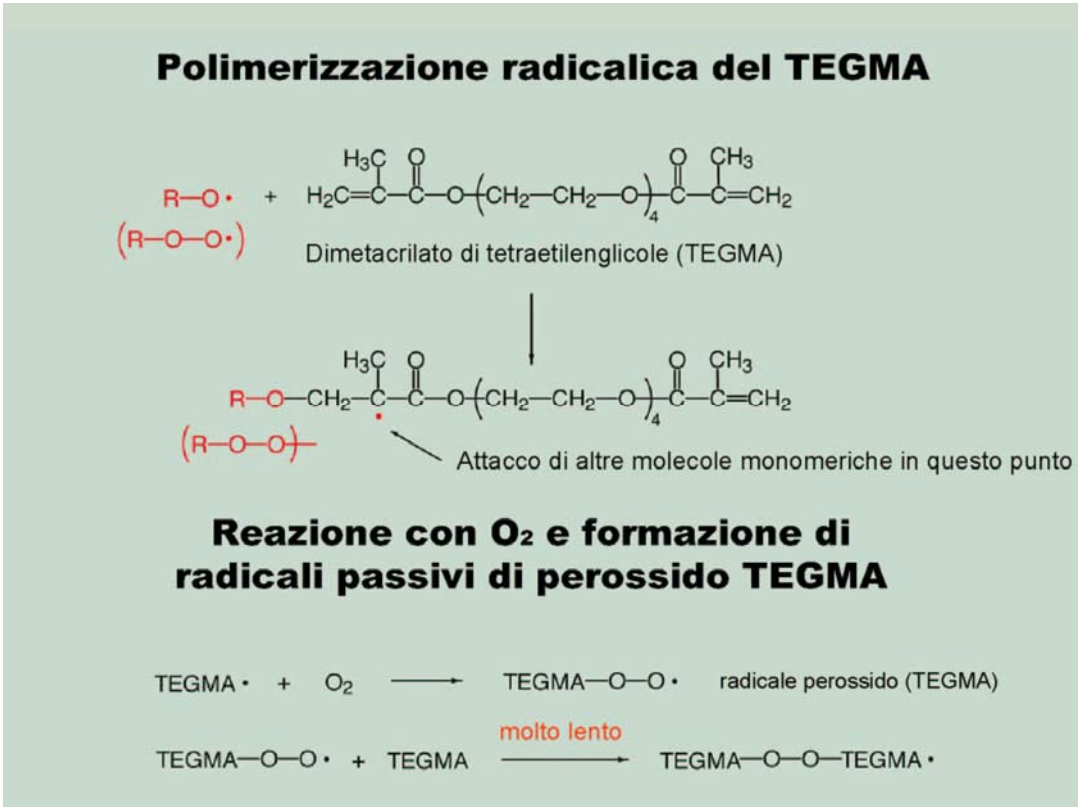


Figura 26

Questa reazione viene inibita dall'ossigeno in presenza del quale i radicali TEGMA reagiscono formando radicali passivi di perossido di TEGMA. Nella sua confezione l'adesivo si presenta in questo stato. Quando poi l'adesivo viene applicato, si impedisce il contatto con l'ossigeno e i componenti dell'indurente diventano attivi. Si tratta di un sistema complesso che comprende le sostanze che causano la formazione di radicali (es.: idroperossido di cumene), l'accelerante e la saccarina che viene utilizzata come agente complessante e riducente per gli ioni metallici. La reazione tra la saccarina e la N,N-dimetil-p-toluidina *(Figura 27)* esaurisce qualsiasi dose residua di ossigeno presente nell'adesivo e nel giunto incollato. Si produce così un addotto amminico che a sua volta scioglie gli ioni del metallo dalla superficie del substrato e li riduce a uno stato di ossidazione più basso. Questi ultimi poi catalizzano la degradazione della sostanza che forma i radicali con ottenimento di radicali attivi. Questa reazione rappresenta una parte dell'intero meccanismo di polimerizzazione degli adesivi anaerobici *(Figura 27)*. L'addotto amminico è il reagente principale in questo caso. I radicali attivati innescano la reazione di polimerizzazione a catena. Poiché la reazione è ciclica, la costante formazione dell'addotto amminico tramite le fasi di reazione sopra descritte garantisce l'elevato numero di radicali attivi necessari per l'effettiva polimerizzazione dell'adesivo nel giunto incollato.

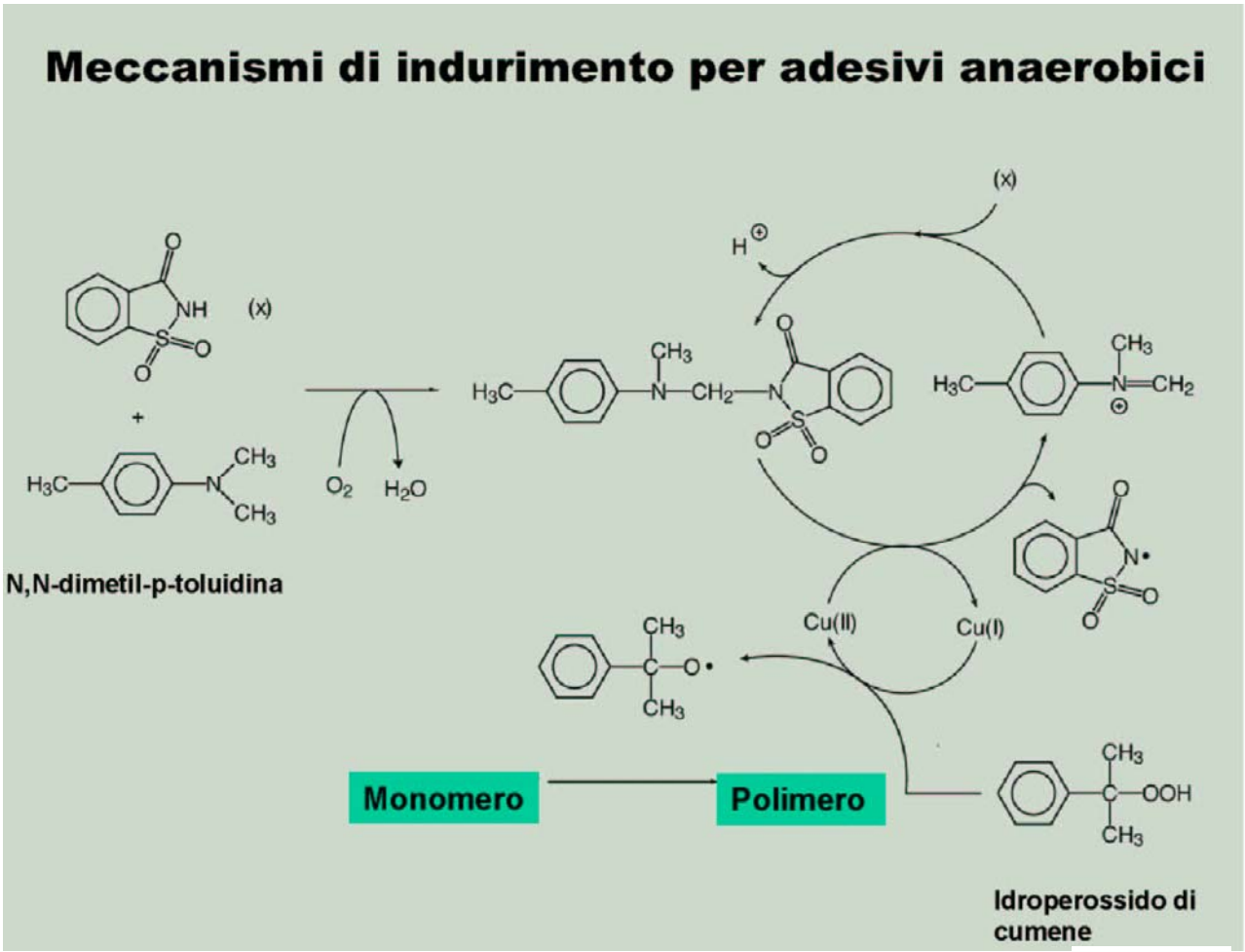


Figura 27

Gli adesivi anaerobici sono polimeri termoindurenti e formano legami molto forti e resistenti al calore. I substrati uniti mediante l'impiego di adesivi anaerobici ad altissima resistenza possono essere disgiunti solo a temperature comprese tra i 300° e i 400° C. Questi giunti incollati sono però molto fragili e non sono quindi adatti se i substrati sono flessibili. La polimerizzazione avviene

esclusivamente nella zona di contatto con il metallo e gli spazi da chiudere devono avere una larghezza relativamente ridotta (distanza massima dei substrati 0,1 mm).

Oltre alla funzione adesiva, gli adesivi anaerobici sono spesso utilizzati anche per le loro proprietà sigillanti perché sono molto resistenti a oli, solventi e umidità. Tutte queste proprietà ne fanno un adesivo adatto per l'assemblaggio dei motori nell'industria automobilistica. Inoltre trovano largo impiego anche nel fissaggio di viti e per l'incollaggio di substrati simmetrici rotazionali, come nel caso dei motori elettrici *(Figura 28)*.

Figura 28

Adesivi che induriscono per esposizione alle radiazioni

Questi adesivi sono sistemi monocomponenti la cui polimerizzazione viene innescata dalle radiazioni (es.: luce, electron-beam, UV). Gli adesivi che polimerizzano per esposizione alle radiazioni non richiedono temperature elevate, né solventi. Tutto ciò che serve sono le onde della luce con una certa lunghezza d'onda. I tempi di polimerizzazione variano da un secondo soltanto fino a diversi minuti. L'impiego degli adesivi che polimerizzano per esposizione alle radiazioni è soggetto a una condizione preliminare: almeno uno dei substrati deve essere permeabile alla radiazione.
Sono disponibili adesivi che polimerizzano per esposizione alle radiazioni a base di poliuretani, poliesteri, polieteri, siliconi e altre sostanze. Si tratta di adesivi che polimerizzano tramite una reazione

radicalica che interessa i gruppi acrilici. La reazione viene innescata da un meccanismo primario fotochimico UV/VIS generato da fotoiniziatori. Il processo di polimerizzazione di questi adesivi non dipende semplicemente dalla lunghezza d'onda della luce: la coesione ottimale dipende infatti anche dalla dose di radiazione richiesta per ottenere una reticolazione adeguata dell'adesivo.

Il grado di reticolazione può essere regolato a piacere scegliendo con attenzione le materie prime contenute nell'adesivo. La scelta di materie prime determina altresì l'elasticità e la deformabilità dell'adesivo indurito. Questo adesivo può raggiungere una resistenza al taglio a trazione fino a circa 25 MPa. Gli incollaggi ottenuti possono essere esposti a temperature costanti variabili da –30° C fino a max. 120° C. Gli stessi possono inoltre essere esposti, per brevi intervalli, anche a temperature fino a 180° C. Gli adesivi che polimerizzano per esposizione alle radiazioni vengono prevalentemente impiegati per incollare vetro (ottica, realizzazione di prodotti in vetro) *(Figura 29)*. Questi adesivi sono altresì impiegati per incollare materie plastiche trasparenti e come sigillanti liquidi per rivestimenti metallo/plastica. Trovano, inoltre, sempre più largo impiego in odontoiatria *(cfr. pag. 78)*.

Figura 29

Adesivi che polimerizzano tramite policondensazione

Resine fenolo-formaldeide (resine fenoliche)

Gli adesivi a base di fenolo-formaldeide (generalmente noti come resine fenoliche) polimerizzano a temperature comprese tra i 100 e 140° C a seconda della composizione della colla. Il meccanismo alla base di questi adesivi reattivi è costituito da una reazione tra la formaldeide e il fenolo in condizioni alcaline che comporta la formazione di un prodotto di addizione: il cosiddetto resolo *(Figura 30)*. Nell'adesivo pronto all'uso questa reazione è già completata. Il resolo viene poi fatto polimerizzare nel giunto incollato, liberando acqua fino a formare un solido termoindurente (reazione di condensazione) *(Figura 31)*. Considerato che il processo di polimerizzazione richiede temperature superiori ai 100° C, l'acqua liberata si presenta in forma gassosa. Per evitare che si formi schiuma, le resine fenoliche vengono polimerizzate esercitando pressioni di contatto fino a 0,8 MPa.
La reazione di policondensazione delle resine fenoliche può anche avvenire in ambiente acido, dando luogo alle cosiddette novolacche. In questo caso la reazione viene terminata addizionando alla polvere di novolacca, e alle eventuali cariche, paraformaldeide e riscaldando la massa adesiva tra 100 e 200°C fino a fusione e successiva completa reticolazione della stessa.
Le novolacche, contrariamente ai resoli, sono termoplastiche fino ad avvenuta reticolazione finale e vengono pertanto applicate allo stato solido e successivamente fuse.

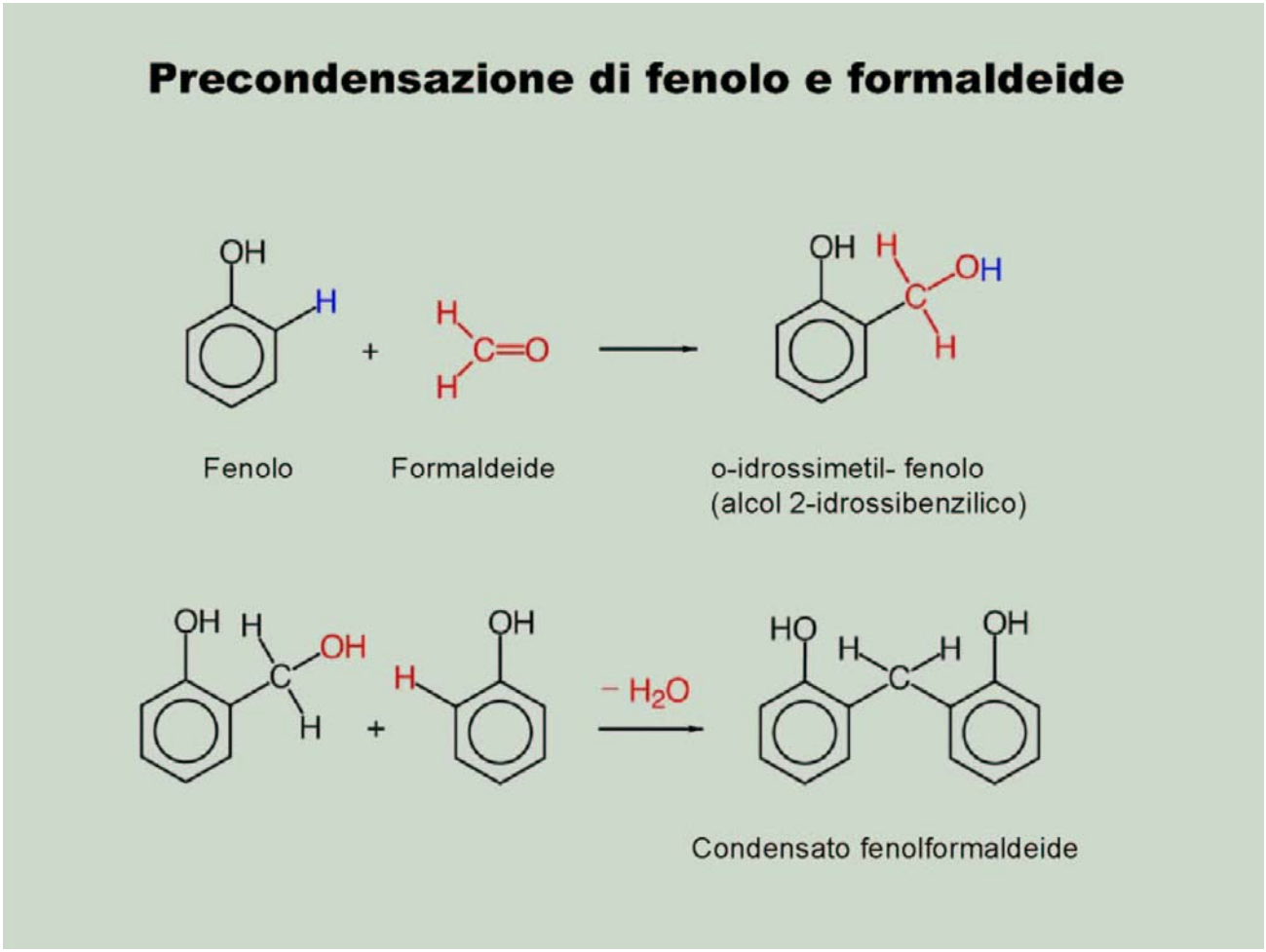


Figura 30

Le resine fenoliche pure sono molto fragili e sensibili alla sollecitazione di pelatura *(cfr. Glossario)*. Per questa ragione contengono in genere additivi per aumentare l'elasticità (es.: gomma sintetica). Gli adesivi di resina fenolica modificata offrono in genere un legame molto stabile e con buone proprietà meccaniche. Le resine fenoliche garantiscono ottima adesione e durabilità su superfici di alluminio pre-trattate con attacco con ossidante (passivazione). Inoltre, presentano anche una buona resistenza a temperature fino a circa 250° C. Oltre all'utilizzo del fenolo come monomero di partenza per la reazione di condensazione con la formaldeide, si utilizzano negli adesivi anche i derivati del fenolo, quali la resorcina (m-diidrossibenzene). Le resine di resorcina-formaldeide, a differenza di altri adesivi di resina fenolica, consentono una maggiore reticolazione e in virtù di questa caratteristica sono più resistenti all'acqua e all'azione degli agenti atmosferici. Vengono principalmente impiegate nelle strutture di legno che devono resistere all'acqua e agli agenti atmosferici (adesivi per le imbarcazioni).

In genere, si preferisce impiegare le resine fenoliche quando lo strato di adesivo è destinato ad essere sottoposto ad alte temperature. Un'applicazione tradizionale riguarda l'incollaggio dei rivestimenti per freno e frizione *(Figura 32)*. Altri settori tipici in cui viene applicato questo tipo di adesivo sono la produzione di aeromobili *(cfr. capitolo 3.4)*, l'incollaggio strutturale di alluminio e l'industria del mobile. L'uso più consistente delle resine fenoliche, dal punto di vista quantitativo, si ha nell'industria del mobile e per l'incollaggio del legno.

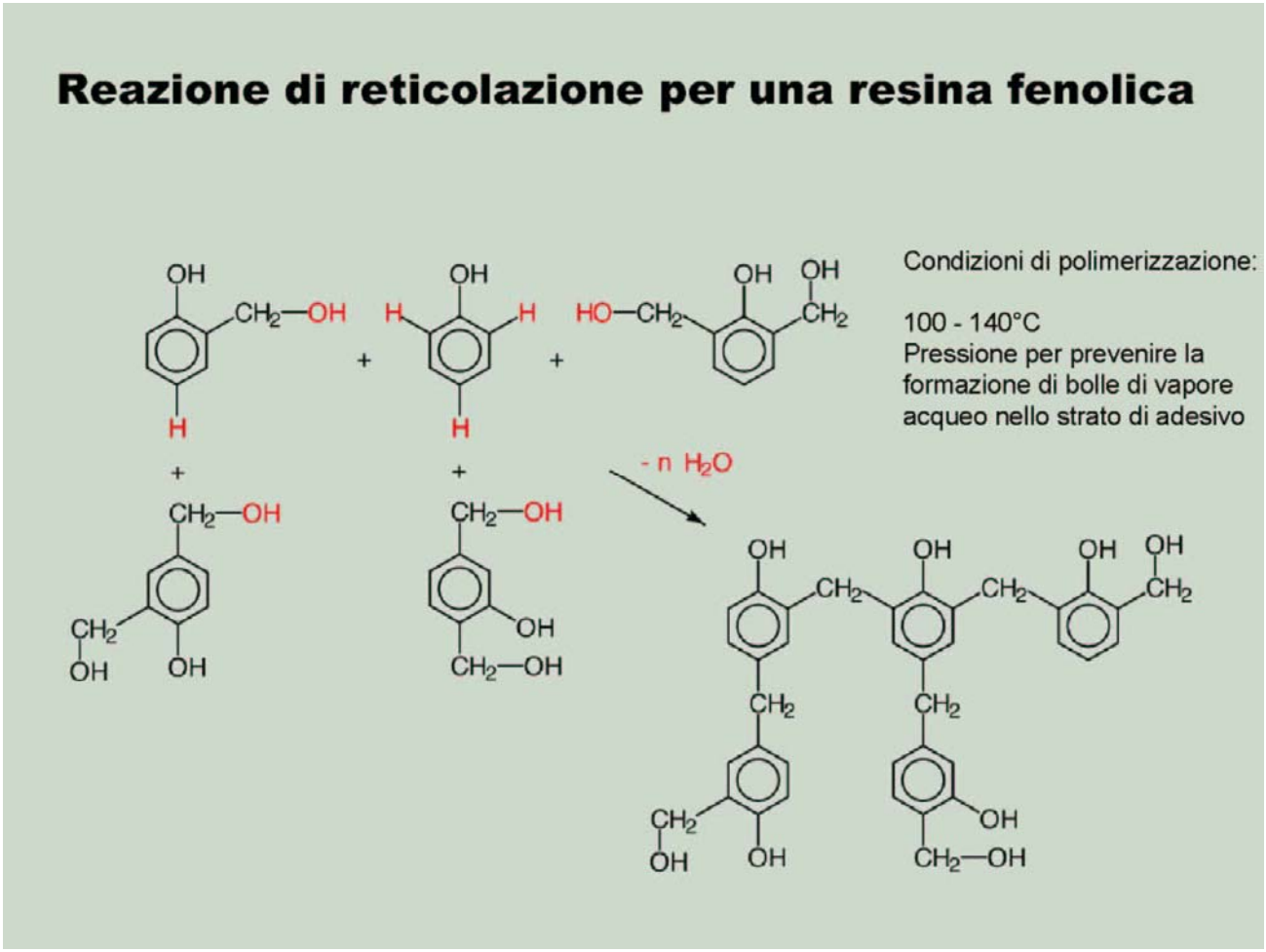


Figura 31

Figura 32

Resine ureiche, tioureiche, melaminiche

Le resine ureiche, tioureiche, melaminiche sono polimeri termoindurenti comunemente detti anche amminoplasti in quanto la loro formazione e reticolazione è legata alla presenza di almeno un gruppo amminico.
Le resine ureiche si ottengono dalla condensazione dell'urea con la formaldeide a formare mono e dimetiloluree che in ambiente acido vengono reticolate a formare una struttura rigida tridimensionale.
Analogamente dalla tiourea (NH_2CSNH_2) si producono le resine tioureiche che dopo reticolazione presentano una migliore resistenza all'acqua.
Le resine melaminiche si ottengono dalla policondensazione della melamina con formaldeide che in ambiente acido analogamente alle resine ureiche danno luogo ad una struttura tridimensionale termoindurente.
Entrambe queste resine possono essere usate sia per fabbricare polveri da stampaggio se addizionate di materiale inerte (fibre, segatura, cariche minerali etc.) o in alternativa possono essere utilizzate per la produzione di adesivi.
Gli impieghi più comuni sono :

1) fabbricazione di pannelli truciolari impastando le resine ureiche con trucioli di legno, catalizzandole con cloruro di ammonio (acido) e reticolandole con il calore;
2) fabbricazione di compensato usando le resine ureiche come adesivi per i diversi strati di legno fino a formare compensati e multistrati;

3) nobilitazione dei pannelli truciolari mediante incollaggio di carte impregnate con resina ureica o melaminica riproducenti l'immagine del legno naturale o semplicemente colorate;
4) incollaggio del legno (incastri, piani, etc);
5) impiallacciatura, ovvero incollaggio di foglia di legno pregiato su compensato, truciolare, MDF, o legno non pregiato allo scopo di migliorare le caratteristiche visive e commerciali del legno stesso.

Le differenze tra resine melaminiche e ureiche, al di là dei costi, sono : miglior resistenza all'acqua e miglior stabilità alla luce per le resine melaminiche.
Tutti i manufatti prodotti con resine melaminiche o ureiche sono termoindurenti e presentano una buona resistenza al fuoco.

Con l'aggiunta di particolari additivi si possono ottenere anche adesivi ignifughi con resistenze fino a 350/400 gradi di temperatura ed esposizione alla fiamma diretta.

Siliconi

I siliconi ricoprono una posizione a sé stante all'interno della categoria degli adesivi "organici" in virtù del fatto che la loro struttura molecolare è costituita da atomi di silicio e ossigeno che conferiscono ai siliconi proprietà particolari. A differenza di qualsiasi altro adesivo organico, i siliconi mantengono un'elevata elasticità a basse temperature (da -70 a –90° C) pur conservando pressoché intatte le altre proprietà che possiedono. Questa elevata elasticità è dovuta all'alto grado di mobilità della catena dei polimeri del silicio. Gli angoli molto diversificati dei legami Si-O-Si (143°) e O-Si-O (110°) impediscono che la struttura a catena sia lineare e ostacolano l'azione delle forze Van der Waal tra le catene *(Figura 33)*. Le singole catene di polimeri possono così muoversi facilmente e ciò conferisce elasticità all'adesivo.

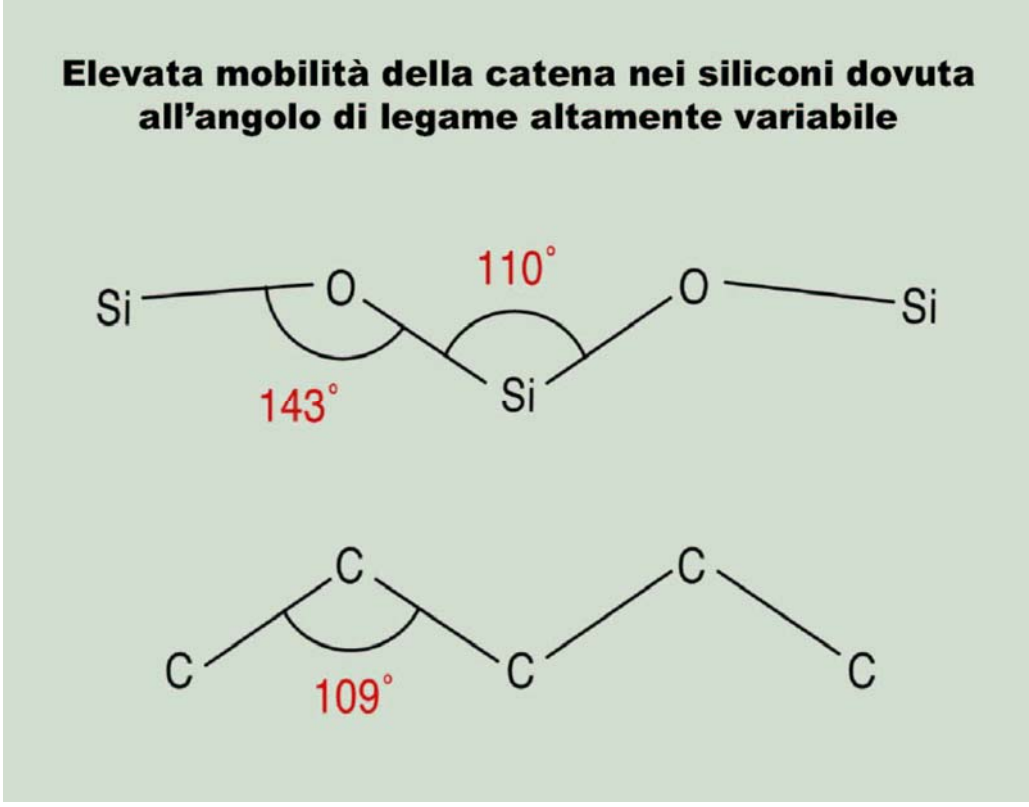


Figura 33

I siliconi vantano anche un'ottima stabilità alla temperatura (in esposizione continua da -100° fino a 200° C e, per brevi intervalli, anche fino a 300° C). Ciò è dovuto alle maggiori energie dei legami silicio/ossigeno (circa 370 kJ/mol) rispetto ai legami carbonio/carbonio (350 kJ/mol). Un altro vantaggio delle catene silicio/ossigeno, rispetto alle catene carbonio/carbonio è la resistenza ai raggi UV. Con l'esposizione ai raggi UV parte dell'ossigeno dell'aria diventa attivo (radicali, O_3). La catena di carbonio degli adesivi organici veri e propri viene attaccata dall'ossigeno attivo nei punti deboli. Il carbonio si ossida e la catena si distrugge. Questo attacco è impossibile con le catene di silicio/ossigeno, perché il silicio è già presente in forma ossidata. I siliconi sono potenzialmente inerti anche all'attacco di altre sostanze chimiche aggressive, hanno un'ottima resistenza all'umidità e all'azione degli agenti atmosferici. I legami ottenuti con il silicone possono essere sottoposti solo a modesti carichi meccanici (resistenza iniziale al taglio a trazione in genere inferiore a 1 MPa), per cui vengono impiegati prevalentemente come sigillanti. In genere, non possono essere laccati o verniciati a causa della bassa tensione superficiale. Sui siliconi potrebbero anche formarsi muffe. Vengono impiegati per incollare i metalli nei casi in cui la bassa resistenza del legame conta meno dell'elevata flessibilità e resistenza a basse temperature.

I siliconi sono disponibili come sistemi monocomponenti e bicomponenti. Entrambi polimerizzano per policondensazione; i sistemi monocomponenti sono innescati dall'umidità, i sistemi bicomponenti dalla reazione di idrossipolisilossani con un estere dell'acido silicico. I componenti di base di questi adesivi reattivi vanno a formare poli-organosilossani mediante policondensazione. I prodotti che vengono liberati durante la condensazione variano in base al reticolante utilizzato. Con i reticolanti acidi vengono liberati acidi; con i reticolanti basici, vengono liberate ammine; con i sistemi neutri, viene liberata ossima o alcool.

Gli adesivi **siliconici monocomponenti,** a seconda della specifica composizione, richiedono per polimerizzare una umidità compresa tra 5% e 95%, per poter attivare e propagare il processo chimico di reticolazione. Nell'adesivo reattivo pronto all'uso, i gruppi ossidrilici terminali sulle molecole di polidimetilsilossano sono bloccati dai reticolanti stessi (*Figura 34)*.

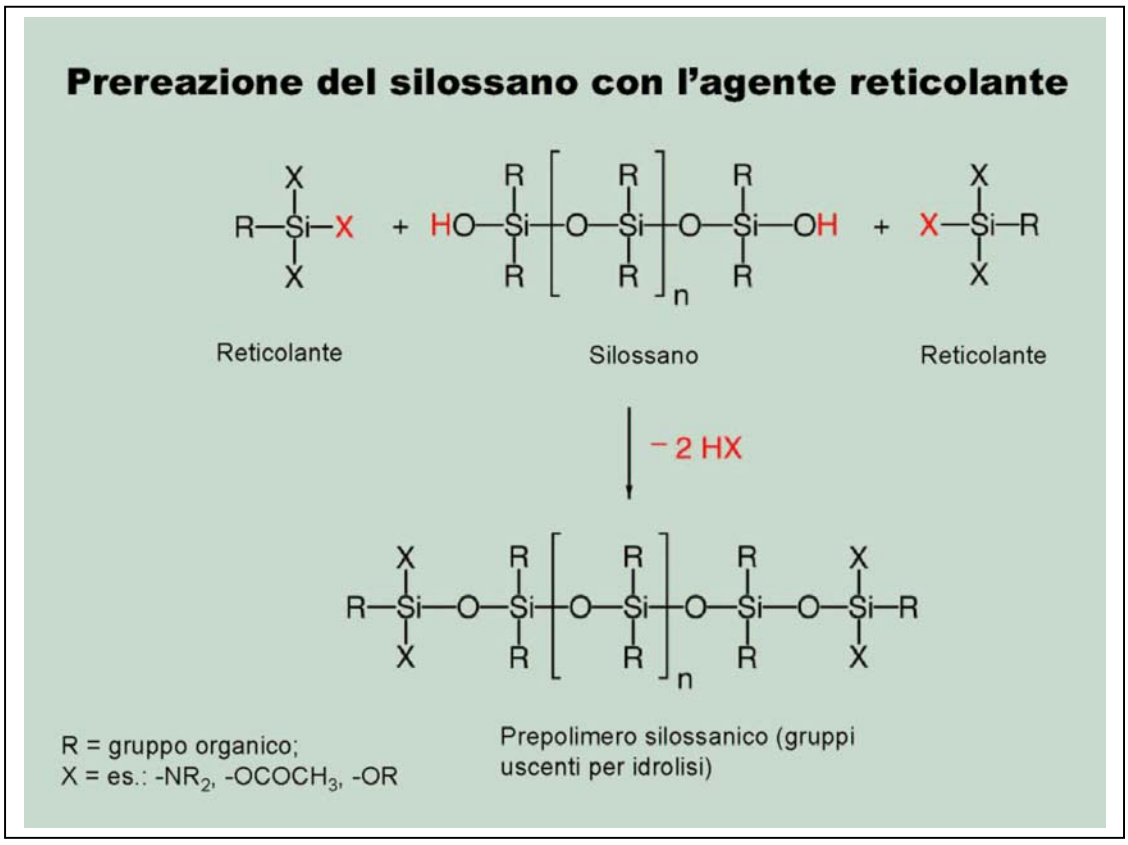


Figura 34

Oltre alla presenza dell'umidità, è necessaria una temperatura compresa tra i 5 e i 40°C affinché il silossano bloccato possa sbloccarsi e l'adesivo possa subire il processo di reticolazione, che avviene tramite un processo di idrolisi seguito da reazioni di policondensazione *(Figura 35)*.

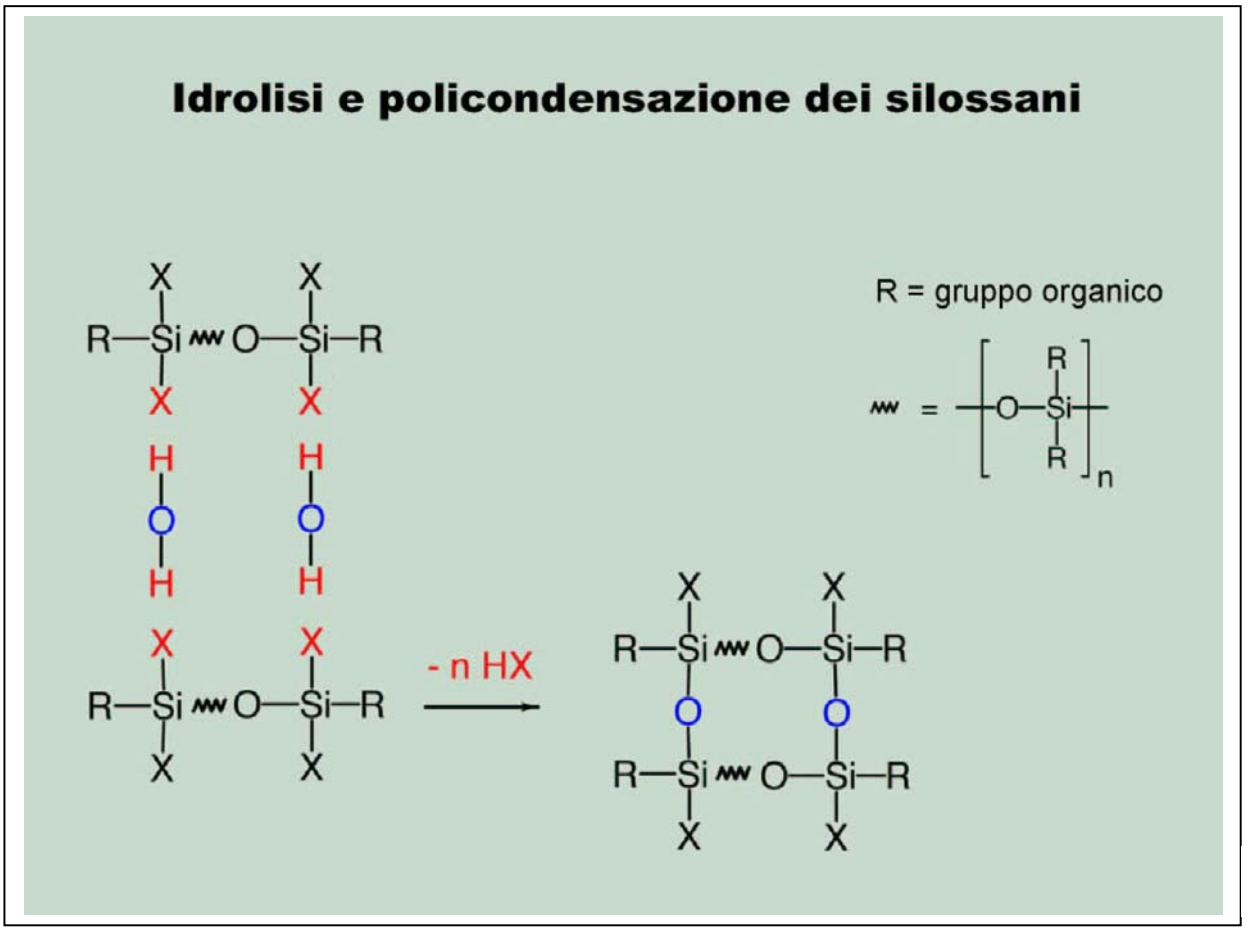


Figura 35

La completa reticolazione e indurimento dipende dallo spessore dello strato di adesivo e può protrarsi per diversi giorni. L'attivazione della polimerizzazione si rileva dalla formazione di pelle superficiale. Se lo spessore dello strato di adesivo è di alcuni millimetri, la polimerizzazione richiede 24 ore per completarsi. I campi di applicazione dei siliconi monocomponenti variano a seconda dell'indurente impiegato. I sistemi reticolati acidi sono utilizzati principalmente per ottenere legami con il vetro e la ceramica che siano resistenti all'umidità, es.: per la sigillatura di giunti nel campo igienico-sanitario. Nel caso dell'incollaggio dei metalli, occorre dapprima valutare il rischio di corrosione che, per effetto dell'acido liberato (solitamente acido acetico), potrebbe presentarsi con questo tipo di silicone. Nel caso dell'incollaggio delle materie plastiche, con i siliconi a reticolazione acida si deve preventivamente valutare il rischio che si creino microcrepe di tensione. I sistemi a reticolazione alcalina sono particolarmente indicati per gli incollaggi e le sigillature su calcestruzzo, intonaci, laterizi, malte e metalli. Tuttavia, la presenza di ammine in questi sistemi, potrebbe causare un ingiallimento, inconveniente evitabile con sistemi a reticolazione neutra, adatti all'incollaggio di vetro, calcestruzzo, intonaci, pietra naturale e artificiale. Per l'incollaggio di metallo/plastica, quando si desidera evitare microcrepe di tensione, sono particolarmente indicati i sistemi reticolanti che liberano alcool. In generale, il ventaglio di applicazioni degli adesivi siliconici monocomponenti è ampio e varia dalla siderurgia, passando per l'industria automobilistica e l'ingegneria elettrica, fino alle applicazioni speciali in aeronautica e nella tecnologia aerospaziale.

Gli adesivi **siliconici bicomponenti** sono invece utilizzati nella produzione in serie come nell'elettronica e nel settore elettrico, nella produzione di elettrodomestici e nell'industria automobilistica, qualora lo spessore dello strato di adesivo richiesto debba essere superiore a 6 mm o in caso di grandi superfici da incollare. Questo tipo di adesivo siliconico viene impiegato quando l'umidità presente nell'aria non è sufficiente a completare il processo di polimerizzazione. Questi adesivi sono a base di idrossipolisilossani e la reticolazione avviene tramite transesterificazione con un estere dell'acido silicico accelerata, per esempio, da un catalizzatore a base di stagno *(Figura 36)*. La reazione di polimerizzazione può richiedere fino a 24 ore in funzione del pH, della concentrazione del catalizzatore e delle materie prime presenti. Mentre i sistemi monocomponenti possono essere prelevati per l'applicazione direttamente dal contenitore utilizzando normali pompe, i componenti degli adesivi siliconici bicomponenti devono essere invece messi insieme e miscelati. Questa procedura deve essere eseguita molto scrupolosamente. In primo luogo, non deve essere introdotta aria nella miscela durante la fase di agitazione per evitare che il processo di polimerizzazione ne risulti disturbato. In secondo luogo, la miscela non deve essere agitata troppo velocemente altrimenti si svilupperebbe troppo calore e l'adesivo comincerebbe a polimerizzare troppo presto *(cfr. Glossario, Tempo limite di lavorabilità).*

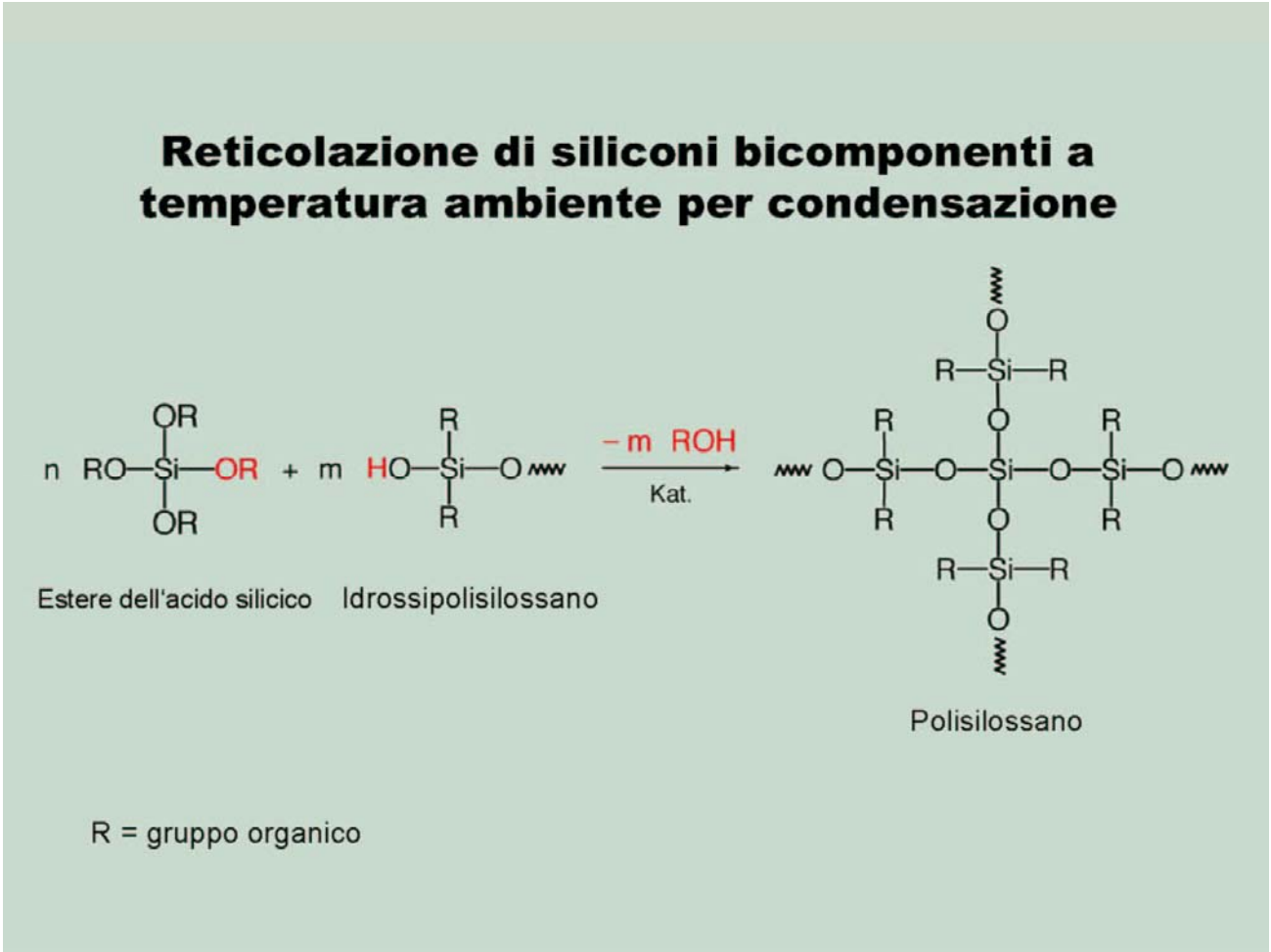


Figura 36

Poliimmidi

Le poliimmidi hanno una speciale caratteristica. Sebbene presentino una struttura polimerica lineare non reticolata e siano quindi termoplastiche, sono difficili da fondere e sono praticamente insolubili. Ciò dipende dalla struttura ad anello aromatica ed eterociclica delle unità del polimero. Questa complessa struttura della catena riduce in modo significativo la mobilità delle catene polimeriche, anche ad alte temperature.
Le forze di attrazione tra le singole catene di polimeri difficilmente si riescono a rompere e quindi le poliimmidi fondono a temperature notevolmente elevate. I dati riportati nella *Tabella 6* illustrano l'effetto della struttura molecolare dei polimeri sull'intervallo di fusione.

Effetto della struttura molecolare sull'intervallo di fusione

Struttura molecolare	Esempio	Intervallo di fusione in °C
Molecola a catena lineare	Polietilene	110 -130
Molecola a catena con catene laterali corte	Polipropilene	160 – 165
Molecola a catena lineare con eteroatomi	Poliammide 6,6	220 – 240
Molecola a catena lineare con strutture ad anelli aromatici	Polietilene tereftalato	250 -260
Struttura lineare ad anelli aromatici	Polisulfone	260 – 320
Strutta lineare ad anelli eterociclici e aromatici	Poliimmide	380 - 400

Tabella 6

La produzione di poliimmidi su scala industriale avviene facendo reagire le anidridi di acidi tetra-basici (come l'anidride piromellitica) insieme alle diammine aromatiche (diamminodifeniletere) *(cfr. Figura 37)*. Il prodotto intermedio è una poliammide con gruppi carbossilici formata dall'addizione dell'ammina aromatica all'anidride dell'acido carbossilico tramite apertura dell'anello dell'anidride. Questo prodotto intermedio è solubile in solventi polari e può essere disperso in acqua.

L'adesivo viene applicato sotto questa forma e dopo la congiunzione dei substrati la polimerizzazione deve avvenire in autoclave a temperature comprese tra 230 e 350° ed esercitando una pressione di contatto compresa tra 0,8 e 1 MPa. Particolari poliimmidi vengono sottoposte a ulteriore polimerizzazione fino a 16 ore a una temperatura di 400° C.
Le poliimmidi monocomponenti appartengono alla classe degli adesivi reattivi resistenti alle alte temperature. I legami ottenuti possono resistere a temperature costanti fino a circa 320° C e, per brevi intervalli, addirittura a temperature fino a 500° C. Le poliimmidi sono quindi gli adesivi privilegiati se si vogliono ottenere incollaggi di metalli di alta qualità e resistenti al calore nelle applicazioni aeronautiche e aerospaziali. I legami ottenuti con le poliimmidi hanno una forza adesiva elevata e una bassa flessibilità. Risultano tuttavia sensibili all'umidità.

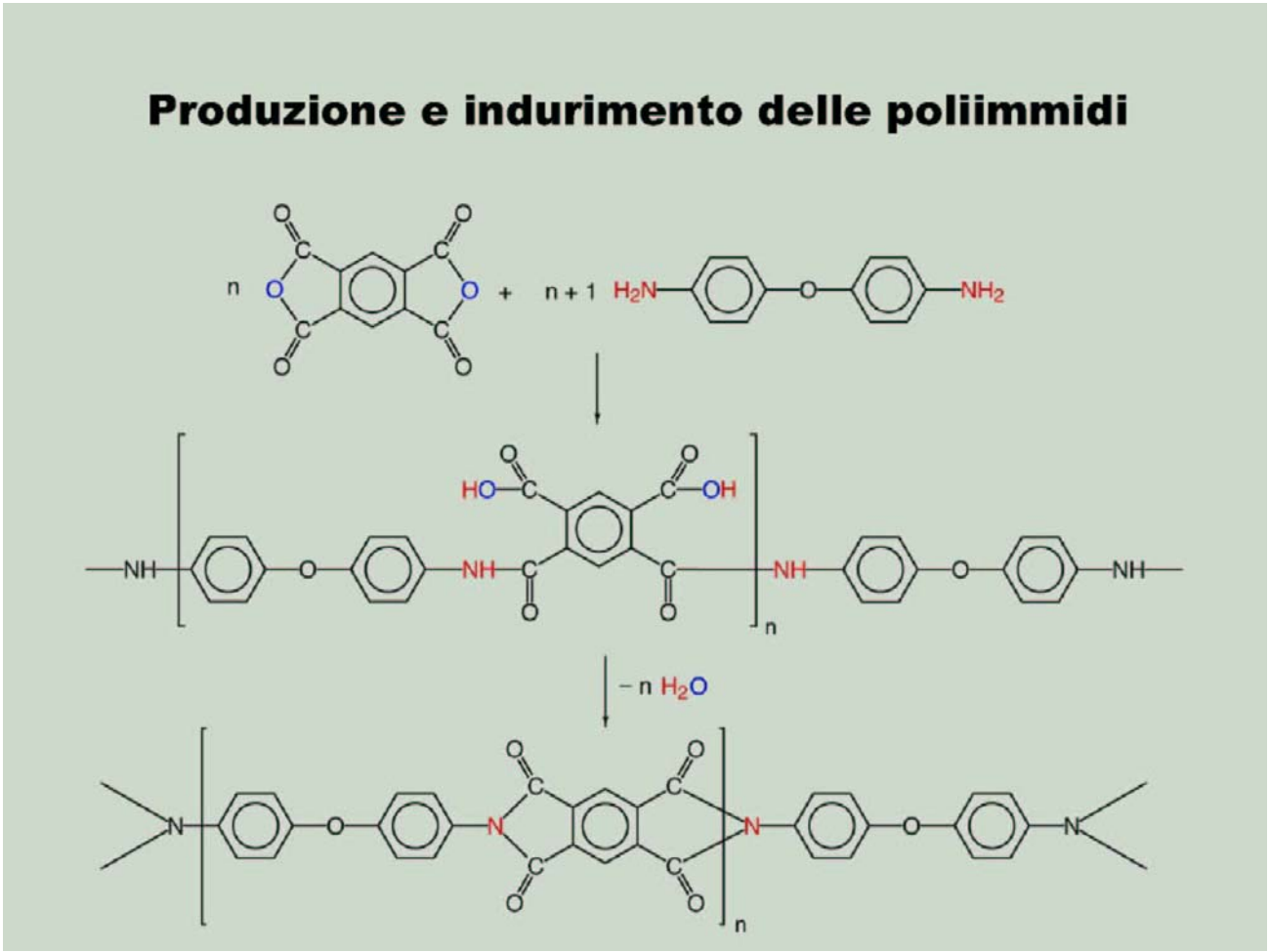


Figura 37

Adesivi che polimerizzano tramite poliaddizione

Resine epossidiche

Le resine epossidiche sono ampiamente utilizzate e sono presenti sotto forma di una serie di sistemi di incollaggio: monocomponenti con polimerizzazione a caldo, bicomponenti con polimerizzazione a temperatura ambiente e adesivi termofusibili reattivi. Vengono qui illustrati i sistemi bicomponenti a base di resina epossidica con polimerizzazione a freddo. I due componenti sono la resina (prepolimero ottenuto per reazione di bisfenolo-A e/o bisfenolo-F con epicloridrina) e l'indurente

(poliammine o poliammidoammine). Questi sistemi polimerizzano a temperatura ambiente entro un intervallo che può durare da poche ore fino ad alcuni giorni *(Figura 38)*.

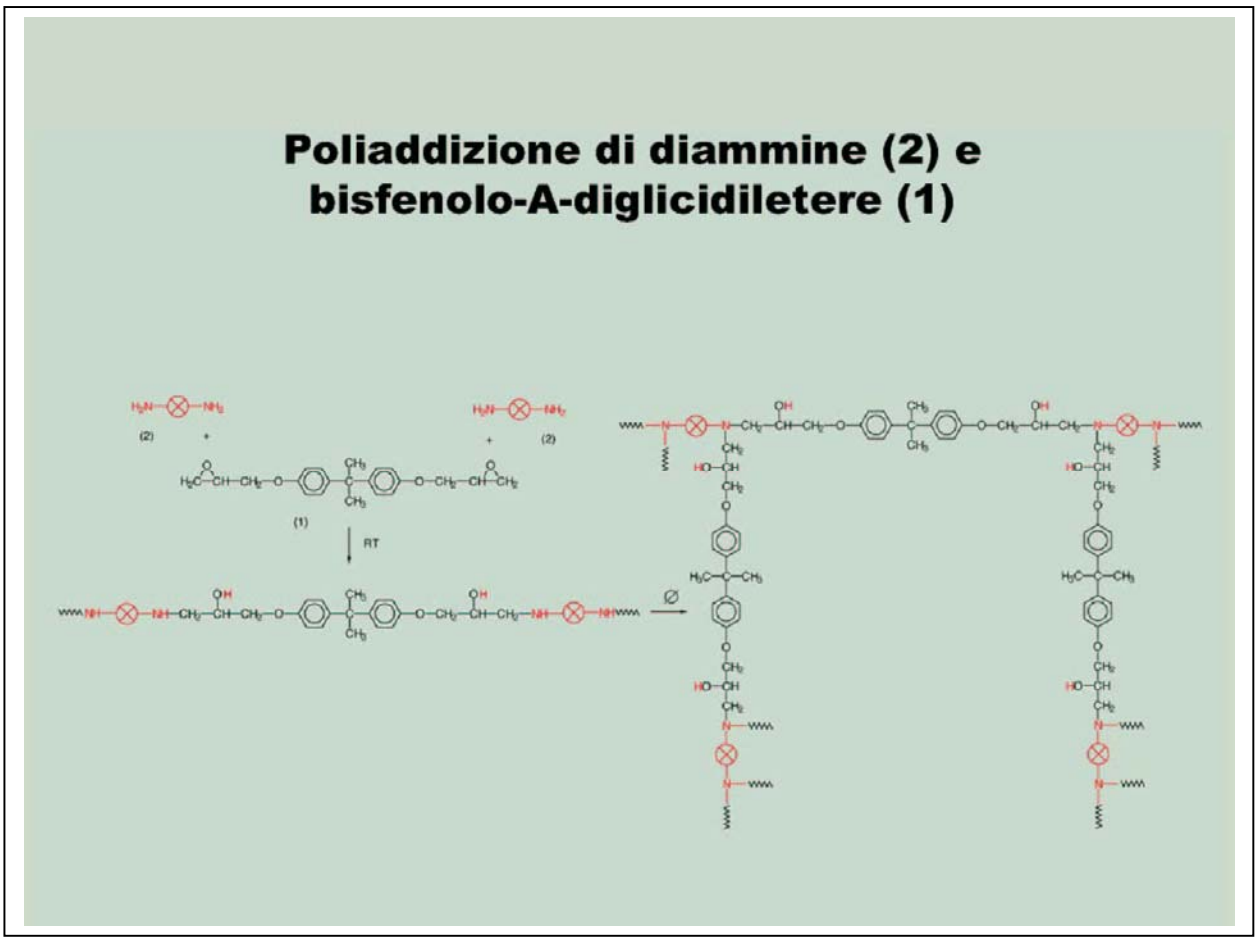


Figura 38

Il tempo di polimerizzazione può essere ridotto con l'apporto di calore che, tra l'altro, fa aumentare la forza e la stabilità del legame. Il processo di polimerizzazione ha inizio non appena i due componenti vengono uniti e miscelati. Questi sistemi bicomponenti sono, però, relativamente sensibili a errori di miscelazione. Un criterio di particolare rilevanza per gli adesivi bicomponenti è il cosiddetto "tempo limite di lavorabilità" o tempo d'utilizzo, che definisce l'intervallo, dopo che i componenti adesivi sono stati uniti e miscelati, entro il quale l'adesivo miscelato può essere lavorato e applicato. Questo tempo dipende dalla velocità con cui procede la reazione di polimerizzazione.

Il tempo limite di lavorabilità finisce quando l'adesivo è divenuto troppo viscoso e non è più in grado di bagnare efficacemente la superficie del substrato. Una volta trascorso questo tempo, l'adesivo non può più essere utilizzato perché la forza di adesione non riesce più ad esplicare la sua efficacia in modo ottimale. Più la temperatura è elevata, più la reazione di polimerizzazione è veloce e quindi più breve sarà la durata limite di lavorabilità. In questo caso, la regola empirica insegna che una variazione di temperatura di +10° C raddoppia la velocità di reazione mentre una variazione di –10° C dimezza la velocità di reazione (in base all'equazione di Arrhenius). Tutte le reazioni di polimerizzazione sono esotermiche. Il polimero che si ottiene ha una scarsa conducibilità termica, per cui, quando il materiale preparato è in grande quantità, il calore prodotto non può dissiparsi velocemente nell'ambiente a differenza di quanto si verifica con quantitativi più esigui di adesivo.

La miscela nel “contenitore” può quindi riscaldarsi molto, riducendo in questo modo il tempo limite di lavorabilità. Il tempo limite di lavorabilità dipende quindi dai seguenti fattori:

1. velocità intrinseca di polimerizzazione dell’adesivo;

2. temperatura dell’ambiente;

3. quantità di adesivo preparata.

Per quanto riguarda l’intero decorso della reazione di polimerizzazione, è rilevabile un punto di flesso al “punto di gelificazione” dell’adesivo *(Figura 39)*.

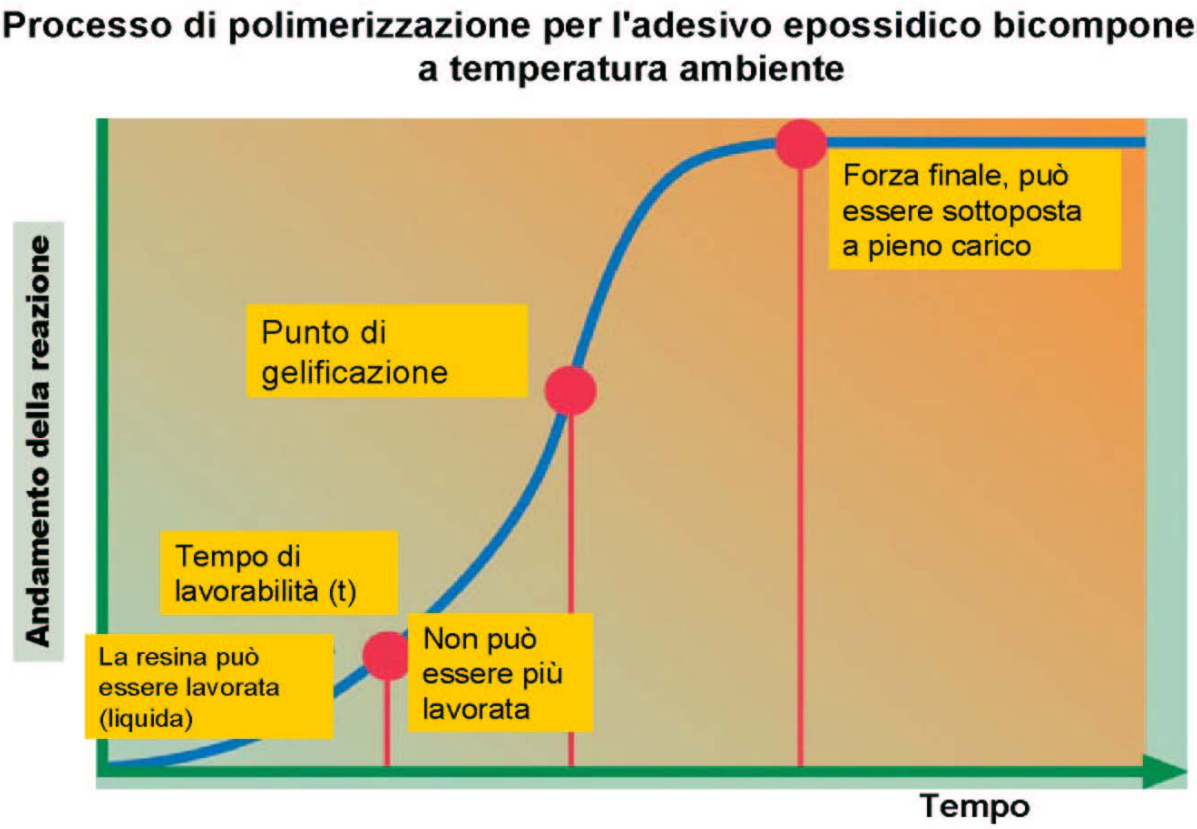


Figura 39

Si tratta del punto in cui l’adesivo già viscoso diventa infine solido. Tuttavia, la sua forza finale viene raggiunta soltanto parecchio tempo dopo e solo allora il sistema può essere sottoposto a pieno carico. Se si aumenta a questo punto la temperatura, la forza finale viene raggiunta prima e risulta leggermente più elevata. Ciò è dovuto al fatto che la maggiore mobilità delle particelle favorisce le reazioni di reticolazione e si ottiene una maggiore densità della stessa. A temperature più basse accade il contrario e si può raggiungere uno stadio in cui le reazioni diventano troppo lente perché possa avere luogo la polimerizzazione. I sistemi a base di resina epossidica sono gli adesivi strutturali più largamente diffusi. Si possono incontrare ovunque – nell’industria automobilistica, nella produzione di aeromobili, in edilizia e in casa. Nella microelettronica si utilizzano con additivi (polvere di Ag) come adesivi elettricamente conduttivi.
Trovano impiego anche come resina matrice per preparare materie plastiche rinforzate con fibre. Ad esempio, se si aggiunge la polvere di ossido di alluminio (Al_2O_3), saranno ignifughi. Il vantaggio

principale che presentano le resine epossidiche è la loro capacità di incollare i metalli e anche di garantire una buona adesione su molte materie plastiche. In generale, denotano un'elevata resistenza ad agenti chimici e fisici oltre ad avere una notevole stabilità nel tempo grazie alla scarsa tendenza a subire deformazioni permanenti. A seconda del tipo, possono resistere a temperature costanti di 100°C fino ad un massimo di 200°C. Tutte le resine epossidiche polimerizzano come termoindurenti e ciò giustifica la flessibilità relativamente bassa e elevato carico di rottura. Se si utilizzano speciali adesivi monocomponenti a base di resina epossidica con indurimento a caldo e ad alta resistenza è addirittura possibile incollare strutturalmente lamiere metalliche grasse e non pretrattate (costruzione di carrozzerie) rendendole autoportanti – un'applicazione della tecnologia di incollaggio che oggi non è ancora possibile con nessun altro tipo di adesivo, ad eccezione degli adesivi poliuretanici monocomponenti con polimerizzazione a caldo.

Poliuretani

Come nel caso degli adesivi epossidici, gli utenti possono scegliere tra diversi sistemi poliuretanici reattivi. Gli adesivi poliuretanici (PUR) sono disponibili sotto forma di sistemi bicomponenti con polimerizzazione a temperatura ambiente, sistemi monocomponenti con polimerizzazione a caldo e sistemi monocomponenti con polimerizzazione per effetto dell'umidità (in cui si verifica una reazione di policondensazione nella prima parte del processo di polimerizzazione e la reazione di addizione ha luogo in una seconda fase) e adesivi termofusibili PUR monocomponenti reattivi (nei quali vi è un secondo stadio di reticolazione indotto dall'umidità, dal calore o da una combinazione di entrambi). Questi sistemi possono polimerizzare fino a formare elastomeri o termoindurenti. Il grado di reticolazione, e quindi la forza di adesione, sono determinati dalle diverse materie prime contenute nell'adesivo.

Nei **sistemi bicomponenti** il processo di polimerizzazione si innesca quando la resina (poliglicoli o prepolimeri PUR con gruppi OH terminali) e l'indurente (isocianato modificato) vengono uniti e miscelati *(Figura 40, 41)*.

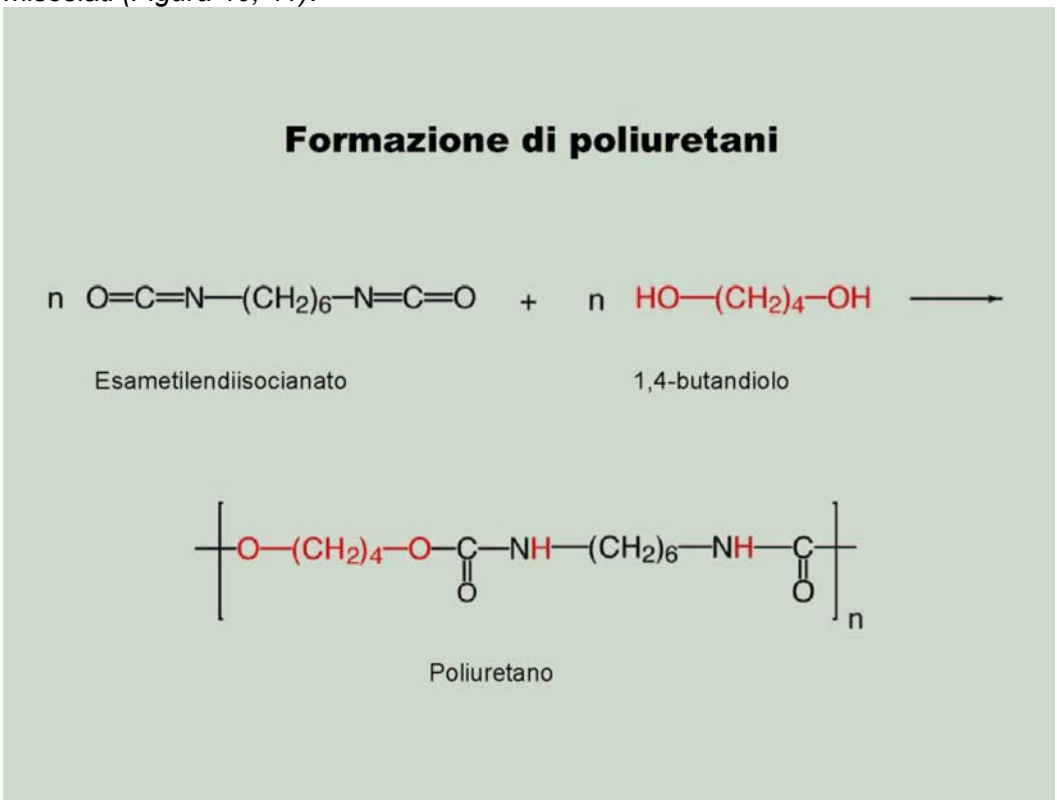


Figura 40

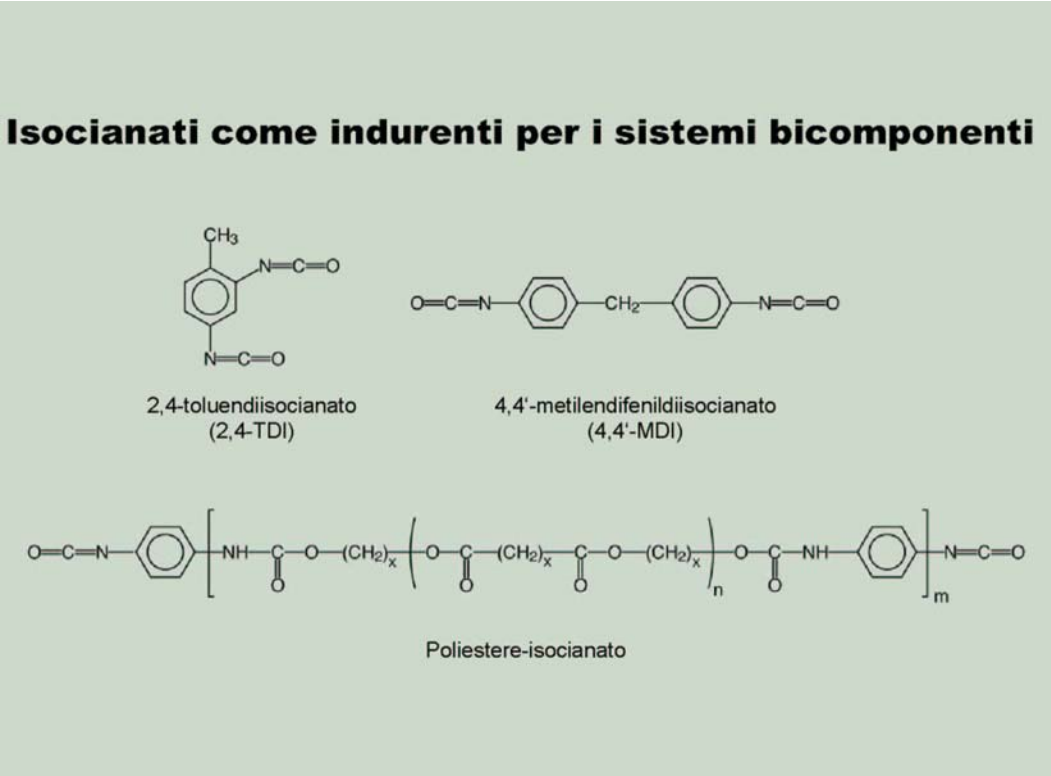


Figura 41

A temperatura ambiente la polimerizzazione può impiegare da alcuni minuti fino a diversi giorni. Questo processo può tuttavia essere accelerato con il calore che fa aumentare, tra l'altro, la forza del legame. Dopo la polimerizzazione, lo strato di adesivo dei sistemi bicomponenti può essere tenace e duro o variare fino ad essere gommoso e flessibile, a seconda delle materie prime impiegate.

I **sistemi monocomponenti con polimerizzazione a caldo** sono costituiti da prepolimeri PUR con gruppi terminali ossidrile e, come indurenti, isocianati bloccati chimicamente. I gruppi isocianici sono bloccati con fenoli *(Figura 42)* e formano esteri fenolici carbammici. La temperatura richiesta per sbloccare l'isocianato può essere ridotta ricorrendo ad adeguati catalizzatori. Ad esempio, per un prepolimero TDI (toluendiisocianato) dimerico la dissociazione avviene a 120° C ma se si utilizza fosfina come catalizzatore avverrà a temperatura ambiente. I sistemi monocomponenti con polimerizzazione a caldo richiedono una temperatura variabile da 100° a 200° C e la durata della polimerizzazione varia da pochi minuti a diverse ore a seconda della effettiva temperatura impiegata. I legami che si formano utilizzando adesivi PUR sono generalmente tenaci, duri e molto forti seppur ancora elastici. Il calore impiegato per la polimerizzazione degli adesivi PUR monocomponenti rilascia dal sistema degli isocianati, alcuni dei quali possono essere nocivi per la salute. Di qui, la necessità di ricorrere ad un adeguato sistema di aspirazione.

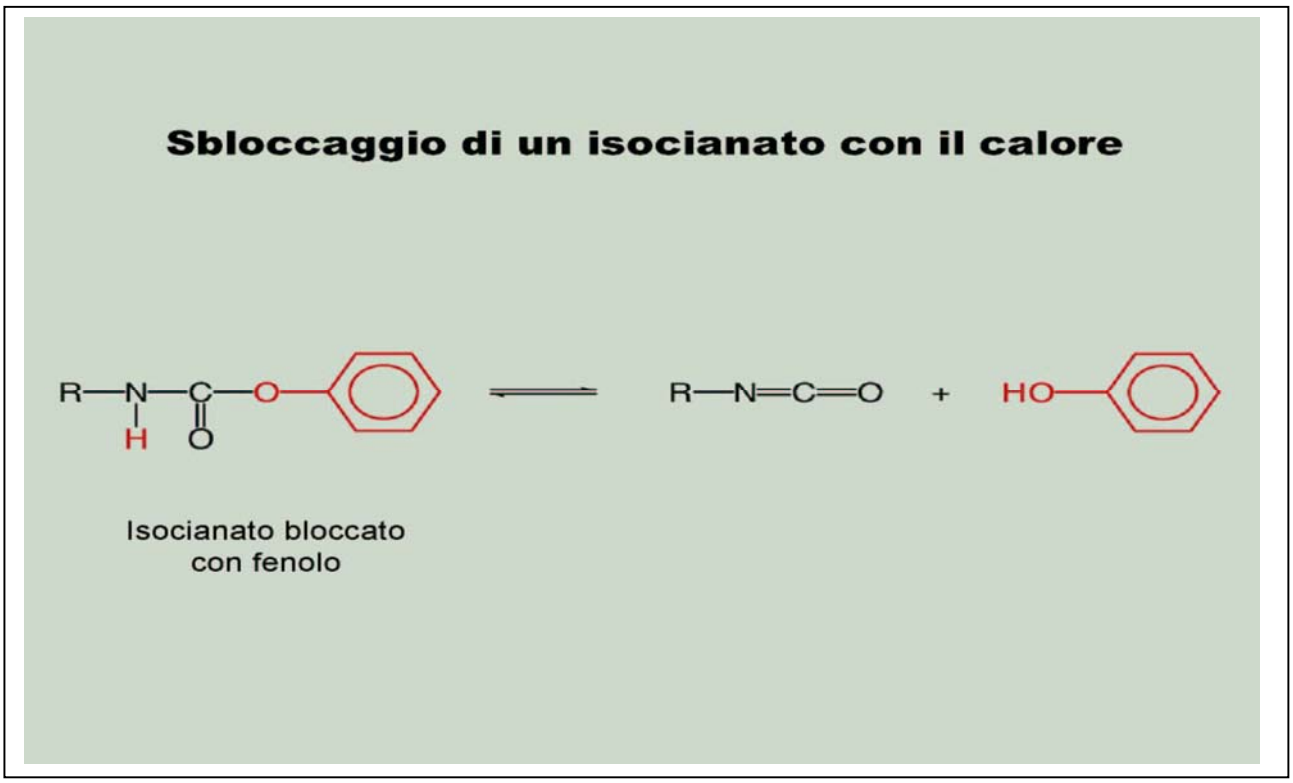


Figura 42

I **sistemi monocomponenti con polimerizzazione per esposizione all'umidità** sono adesivi composti da prepolimeri PUR non volatili con gruppi terminali isocianici. Questi sistemi hanno bisogno dell'umidità per innescare la reazione di polimerizzazione. Una parte di gruppi di isocianato sul prepolimero sono convertiti in gruppi amminici. Viene liberata una piccola quantità di anidride carbonica, la quale però non sortisce alcun effetto sul processo di incollaggio. I gruppi amminici reagiscono poi con i gruppi di isocianato restanti, e causano così l'indurimento del sistema adesivo *(Figura 43)*. Questa reazione può verificarsi se l'intervallo di temperatura è compreso tra 5° e 40° C e l'umidità relativa è variabile dal 40% al 100%. Esistono in commercio anche i cosiddetti sistemi coadiuvanti sotto forma di gel contenente umidità. Questi favoriscono la polimerizzazione che diventa, in tal modo, indipendente dal livello di umidità presente nell'aria. Con i sistemi monocomponenti la polimerizzazione dello strato di adesivo (basata in questo caso sulla formazione di legami ureici), dipendente dall'umidità, avviene dall'esterno verso l'interno a una velocità di alcuni millimetri al giorno. Quando si usano gli adesivi, si deve tenere conto del cosiddetto "tempo di formazione di pelle", cioè il tempo trascorso il quale l'adesivo solidifica in superficie (forma una "pelle") rendendo impossibile la bagnatura del secondo substrato. Una volta avvenuto questo fenomeno, le interazioni di adesione non possono più avvenire. L'adesivo allo stato polimerizzato è elastico e flessibile ed è questa la ragione per cui i sistemi PUR monocomponenti che polimerizzano per effetto dell'umidità sono impiegati quando si devono congiungere materiali che subiscono allungamenti molto variabili per effetto dei carichi e hanno un comportamento di dilatazione termica incostante. Un esempio è dato dall'incollaggio di materie plastiche rinforzate con fibre di vetro su acciaio e di rivestimenti per pareti e pavimenti in alluminio su supporti di acciaio. La *figura 44* illustra una nave-traghetto in cui i finestrini di policarbonato sono stati incollati alla struttura di alluminio dell'imbarcazione utilizzando questi adesivi.

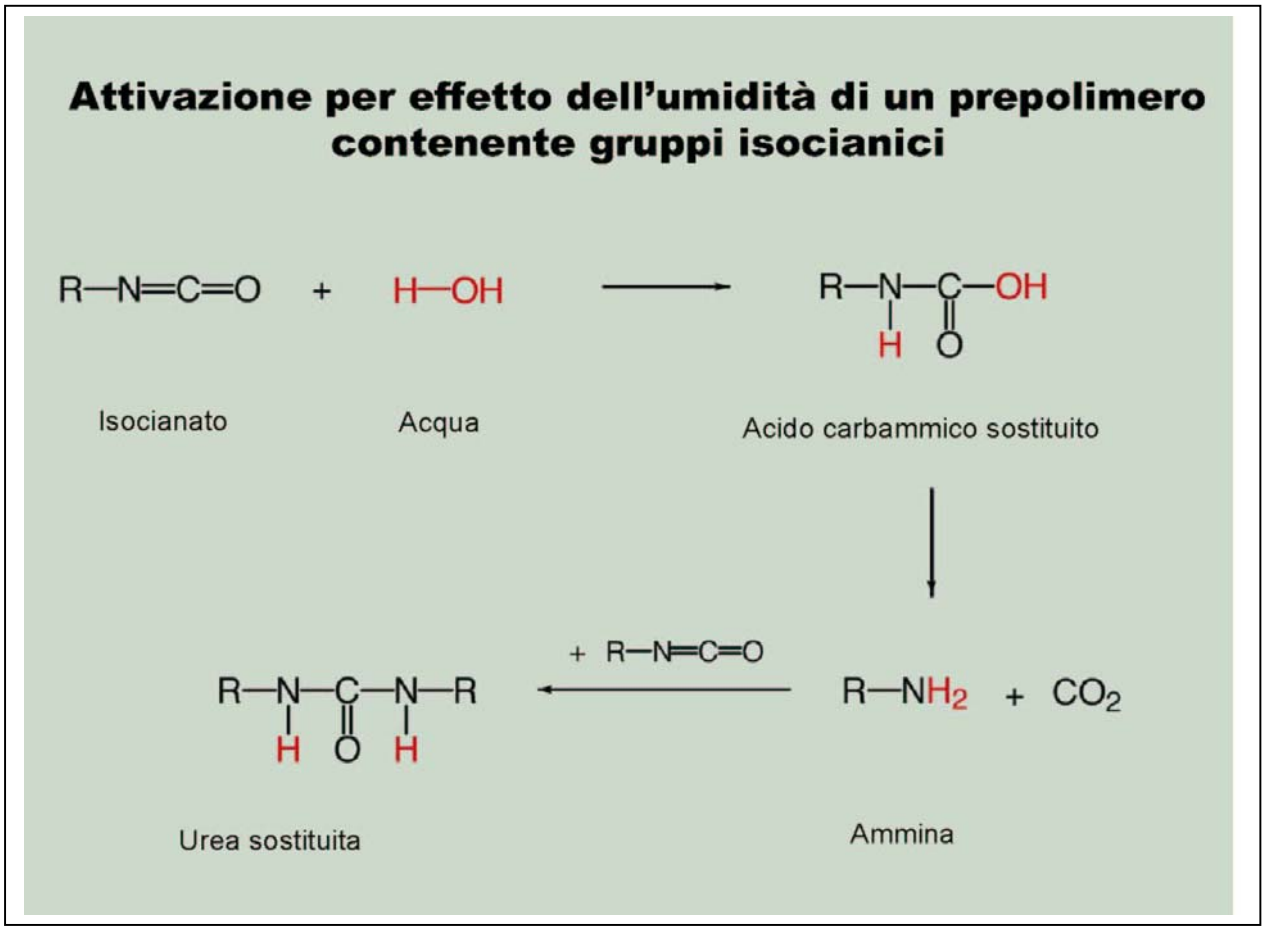


Figura 43

Gli adesivi **termofusibili PUR reattivi** agiscono tramite una combinazione di processi chimici e fisici (Figura 45). La reticolazione chimica viene innescata dall'umidità. I sistemi in cui l'umidità induce la reticolazione secondaria sono costituiti da poliuretani fusibili ad alto peso molecolare contenenti gruppi terminali isocianici che possono essere attivati dall'umidità. Gli adesivi termofusibili PUR reattivi possono essere applicati a temperature variabili tra i 50° e i 180° C (tipico 130°C). Durante la lavorazione l'adesivo PUR è termoplastico. Raffreddandosi solidifica e così si sviluppa rapidamente la forza adesiva iniziale, il che significa che i substrati possono essere fissati velocemente per l'ulteriore lavorazione. La forza finale viene raggiunta allo stadio successivo.

Figura 44

Le proprietà dei poliuretani allo stato polimerizzato variano in funzione del loro grado di reticolazione. Con sistemi gommosi e flessibili è possibile raggiungere deformazioni elastiche estremamente elevate. Con un allungamento alla rottura massimo oltre il 600% sono superati soltanto dai siliconi *(cfr. pagina 38, Siliconi)*. Questi adesivi consentono di applicare strati di adesivo spessi che, contrariamente ai siliconi, possono essere verniciati. La bassa resistenza al taglio a trazione, inferiore a 6 MPa, viene compensata dal punto di vista costruttivo utilizzando ampie superfici di incollaggio. Sono resistenti agli effetti dell'umidità e alle radiazioni UV e l'utilizzo costante a temperature comprese tra i 40 e 100°C non rappresenta un problema.

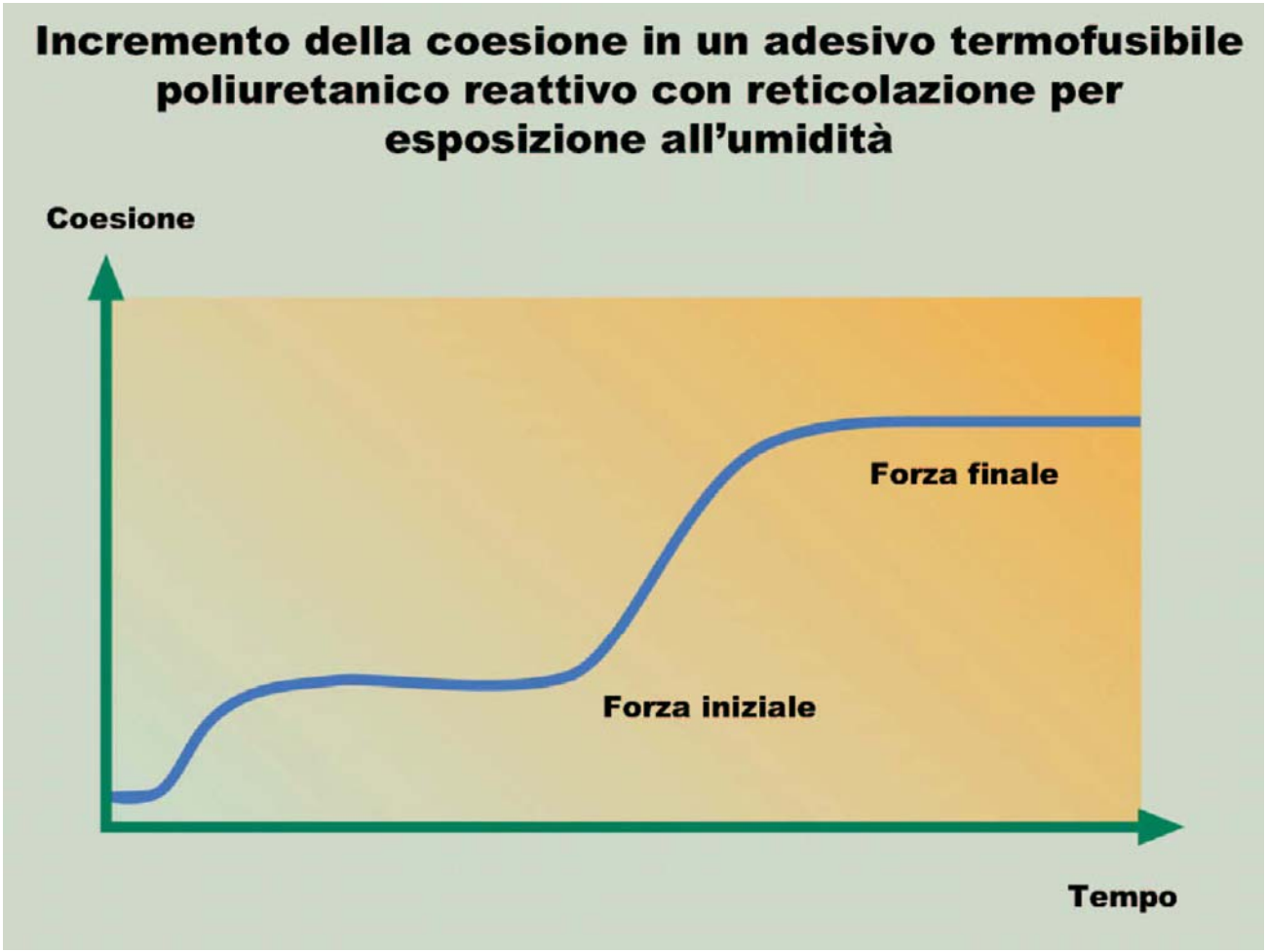


Figura 45

Prospettive

La gamma di adesivi qui descritti ne rappresenta solo una parte, in grado di aumentare ulteriormente in ragione del fatto che le proprietà dei diversi tipi di adesivi possono variare se si modificano i componenti degli stessi. Abbiamo visto che vengono preparati persino adesivi che presentano contemporaneamente più meccanismi di polimerizzazione come, ad esempio, gli adesivi termofusibili reattivi che sono applicati in un primo stadio come normali adesivi termofusibili termoplastici e subiscono poi reticolazione attraverso reazioni chimiche fino a formare elastomeri o termoindurenti. Lo stesso vale per gli adesivi reattivi in dispersione, gli adesivi reattivi per nastri e i cianoacrilati che polimerizzano per effetto dei raggi UV. Anche questi ultimi polimerizzano con formazione di un materiale termoplastico in un primo stadio indotto dall'umidità per poi reticolare fino a formare un materiale termoindurente in un secondo stadio indotto dalla radiazione UV. Questi sviluppi dimostrano come i confini tra le varie classi di adesivi siano sempre più indistinti. La forza propulsiva dello sviluppo è semplicemente la crescente domanda di nuove applicazioni come, per esempio, quella di incollaggi con migliore stabilità termica o di nuove funzioni aggiuntive (conduttività elettrica, elasticità, ecc.). In tutti i più recenti sviluppi delle tecnologie di incollaggio si assiste ad una transizione sempre più crescente dagli adesivi a base solvente a quelli privi di solvente. Esattamente come per tutte le altre materie plastiche, l'emissione di sostanze nocive derivate dagli adesivi viene costantemente ridotta.

2.3 Fondamenti per la progettazione del giunto

La tecnologia dell'incollaggio è una tecnica di giunzione fondata su svariati processi correlati tra di loro a formare un unico sistema. Oltre alle proprietà dello strato di adesivo, ai materiali che costituiscono il substrato e alle sollecitazioni e carichi sul giunto, l'aspetto di fondamentale importanza affinché un legame sia efficace è il progetto geometrico. I difetti nelle strutture incollate sono ricorrenti perché sono stati trascurati i principi di base fondamentali della progettazione del giunto. Anche nella fase progettuale di un componente, occorre tenere in considerazione particolari relazioni. Il requisito principale per un incollaggio è di trasmettere le forze ed essere in grado di resistere alle sollecitazioni causate da queste forze per un lungo periodo di tempo. Quando si progettano i giunti devono essere osservati due requisiti fondamentali al fine di creare un legame che abbia una stabilità nel tempo: in primo luogo, deve essere presente una superficie sufficientemente grande per l'incollaggio e, in secondo luogo, devono essere adottate misure atte a impedire ai carichi meccanici di provocare picchi di sollecitazioni sul legame.

Gli incollaggi possono essere sottoposti prevalentemente alle seguenti sollecitazioni *(Figura 46)*:

(a) pelatura;
(b) scorrimento: taglio a compressione;
(c) scorrimento: taglio a trazione;
(d) trazione;
(e) compressione;
(f) torsione.

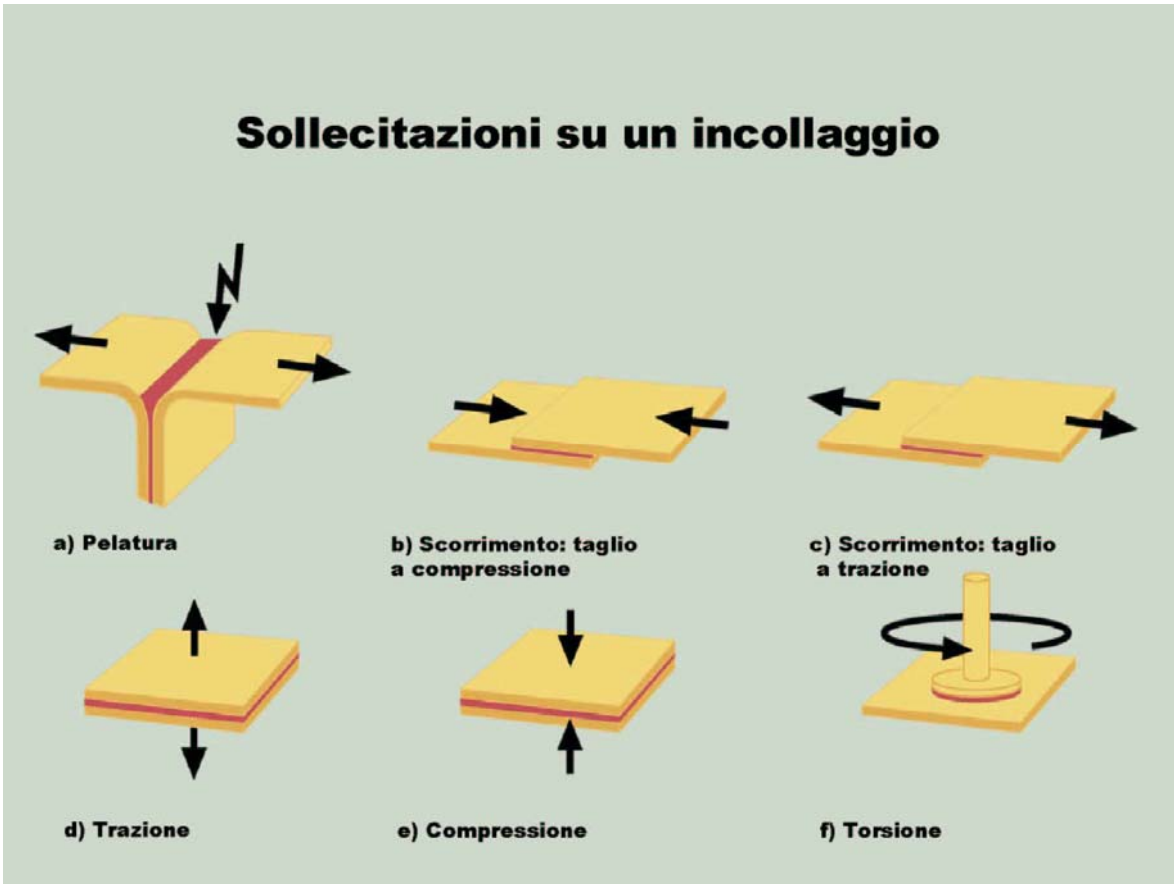


Figura 46

La pelatura esercita un'elevata sollecitazione quasi "lineiforme" sull'adesivo del giunto incollato. Spesso questa sollecitazione supera di gran lunga la forza di tenuta finale della maggior parte degli adesivi.

L'incollaggio è una tecnica di giunzione planare, quindi gli incollaggi devono essere progettati per resistere anche allo scorrimento (taglio a trazione o a compressione). I substrati vengono allontanati in linea parallela rispetto alla superficie di incollaggio e l'intera superficie di incollaggio risulta quindi sottoposta a sollecitazione. In generale, si può aumentare la superficie di incollaggio dei giunti incollati in modo da distribuire le sollecitazioni su una superficie così grande che il carico di rottura non viene raggiunto.

La trazione agisce verticalmente rispetto al piano di incollaggio. Dal punto di vista progettuale viene presa in considerazione soltanto in casi eccezionali perché spesso non è possibile aumentare la superficie di incollaggio all'aumentare dei carichi meccanici che possono essere tollerati, cosa invece relativamente semplice per gli incollaggi soggetti alla sollecitazione di scorrimento.

I giunti incollati non sono sensibili alla compressione.

Il comportamento dei giunti incollati in caso di torsione è analogo al comportamento riscontrato in caso di taglio a trazione.

2.4 Prove su giunti incollati

La scelta del metodo di prova dipende dalle proprietà del relativo giunto incollato. La forza di adesione viene determinata eseguendo una prova di taglio a trazione, la resistenza alla pelatura utilizzando una prova di pelatura con rullo mobile o una prova di pelatura T *(cfr. Glossario, "Sollecitazione alla pelatura")*, mentre il tipo di adesione si determina eseguendo, ad esempio, il test con il cuneo. Al fine di ricavare i dati sulla stabilità nel tempo degli incollaggi, i campioni vengono condizionati sulla scorta delle possibili caratteristiche dell'ambiente reale (condizioni calde e umide, prova di trasudamento, prova di corrosione in nebbia salina, prova con tampone imbevuto, prova di stabilità in condizioni climatiche variabili) e sono poi sottoposti a test di tipo meccanico.

Nei test meccanici i giunti incollati sono caricati fino al punto di rottura. La natura della rottura (frattura adesiva, frattura coesiva, frattura del substrato o una combinazione di queste) rivela la qualità del legame e ogni eventuale errore di produzione. Per quanto attiene le prove condotte su campioni condizionati in ambienti controllati, una frattura coesiva indica che l'adesione è rimasta stabile nonostante le influenze esercitate sugli incollaggi (es.: umidità). Al contrario, una frattura adesiva indica che il legame non è stato efficace nella sua proprietà più importante: l'adesione. Ciò potrebbe denotare un'incompatibilità tra il materiale del substrato e l'adesivo, un pretrattamento superficiale inadeguato e/o errori di processo/applicazione o, ancora, una forza di coesione superiore a quella di adesione.
Possibili errori di processo/applicazione sono:

- Tempo limite di lavorabilità/ tempo di formazione della pelle superati;
- Superficie troppo fredda;
- Adesivo troppo freddo;
- Adesivo in giacenza per troppo tempo;
- Errori di miscelazione.

Prova di taglio a trazione ai sensi della norma EN 1465
La prova di taglio a trazione è la prova standard usata più comunemente per determinare la tenuta di legami con forza medio-alta. La forza di adesione dei singoli giunti sovrapposti, sottoponendo il substrato a carichi, si determina con la forza di taglio a trazione nella direzione del giunto incollato. In base a questa norma, l'area sovrapposta deve avere una larghezza di 25 mm e a una lunghezza di 12,5 mm. Ogni campione deve essere misurato singolarmente. Per fare ciò, il campione viene bloccato nelle ganasce autocentranti dell'unità di prova (dinamometro) in modo tale che la forza agisca al centro dello strato incollato *(Figura 47).*

In conformità a questa norma, la prova viene condotta in modo tale che l'intervallo di tempo per la separazione dei substrati sia 65 ± 20 s a una velocità di movimento costante delle ganasce. La forza massima F_{max} che agisce può quindi essere letta sul dinamometro e annotata. La forza di adesione τ_β espressa in N/mm^2 (MPa) viene calcolata con la seguente equazione:

$$\tau_\beta = \frac{F_{max}}{A} = \frac{F_{max}}{L_Ü \cdot b}$$

ove:
F_{max} = forza massima in N
$L_Ü$ = lunghezza della sovrapposizione in mm.
b = larghezza media del campione in mm.
A = superficie incollata in mm^2

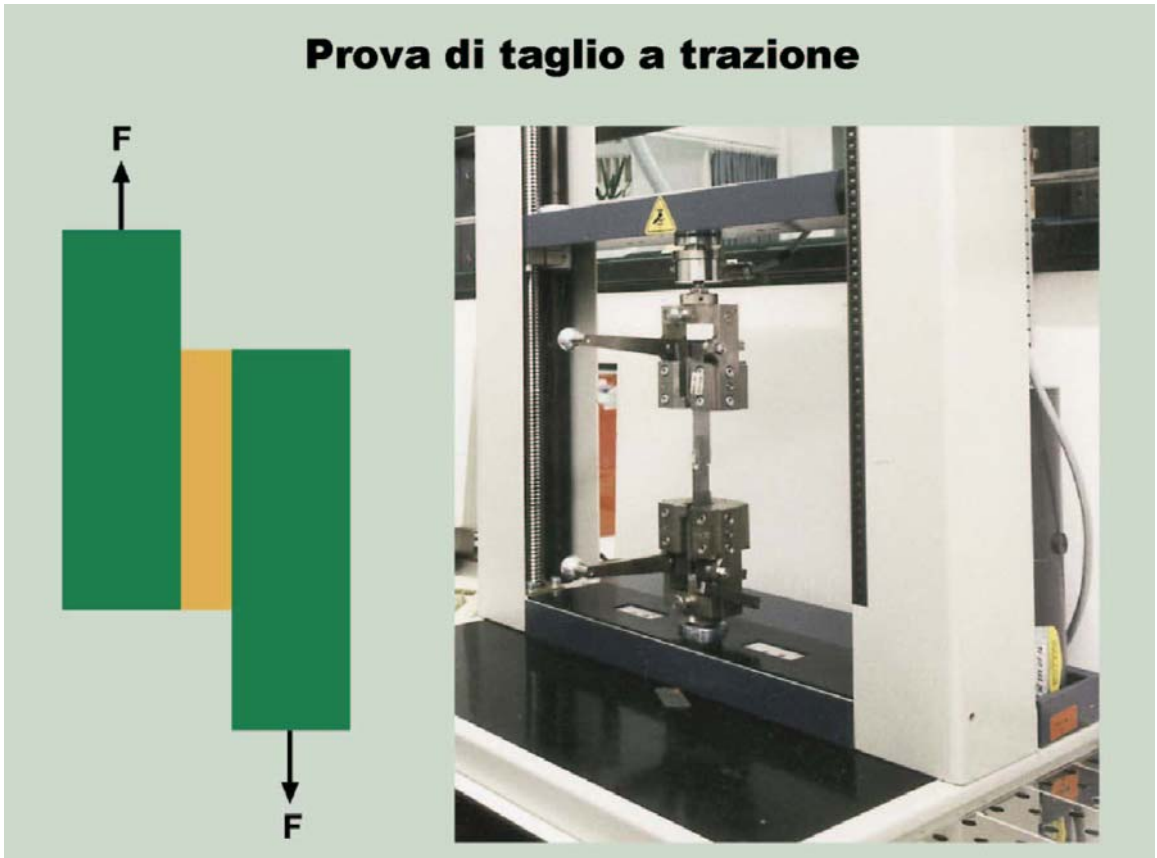


Figura 47

Prova con cuneo ai sensi della norma ISO 65448
La prova con il cuneo è uno dei pochi metodi di prova che consentono di valutare la qualità dei legami sotto l'effetto di influenze meccaniche, chimiche e di agenti atmosferici. Al fine di eseguire questa prova vengono incollate due lamiere di spessore predefinito e pretrattate in condizioni di produzione reali. Un cuneo viene sospinto all'interno del giunto e viene segnata la parte terminale della fessura prodottasi. Indi, il campione preparato viene condizionato in ambiente umido e caldo (ad esempio, 75 minuti a 50° C e 95% di umidità) o in acqua. Il giunto che è esposto a sollecitazione del cuneo può essere compenetrato ulteriormente. Dopo questa fase, l'avanzamento della fessura viene segnato e misurato, viene separata la superficie incollata e valutata la superficie della frattura. Il vantaggio che questa prova presenta rispetto alla prova di taglio a trazione è la celerità con cui si ottengono i risultati e inoltre si ricavano dati diretti sull'effetto delle condizioni di invecchiamento sullo strato di adesivo se esposto a carichi meccanici. *(Figura 48)*.

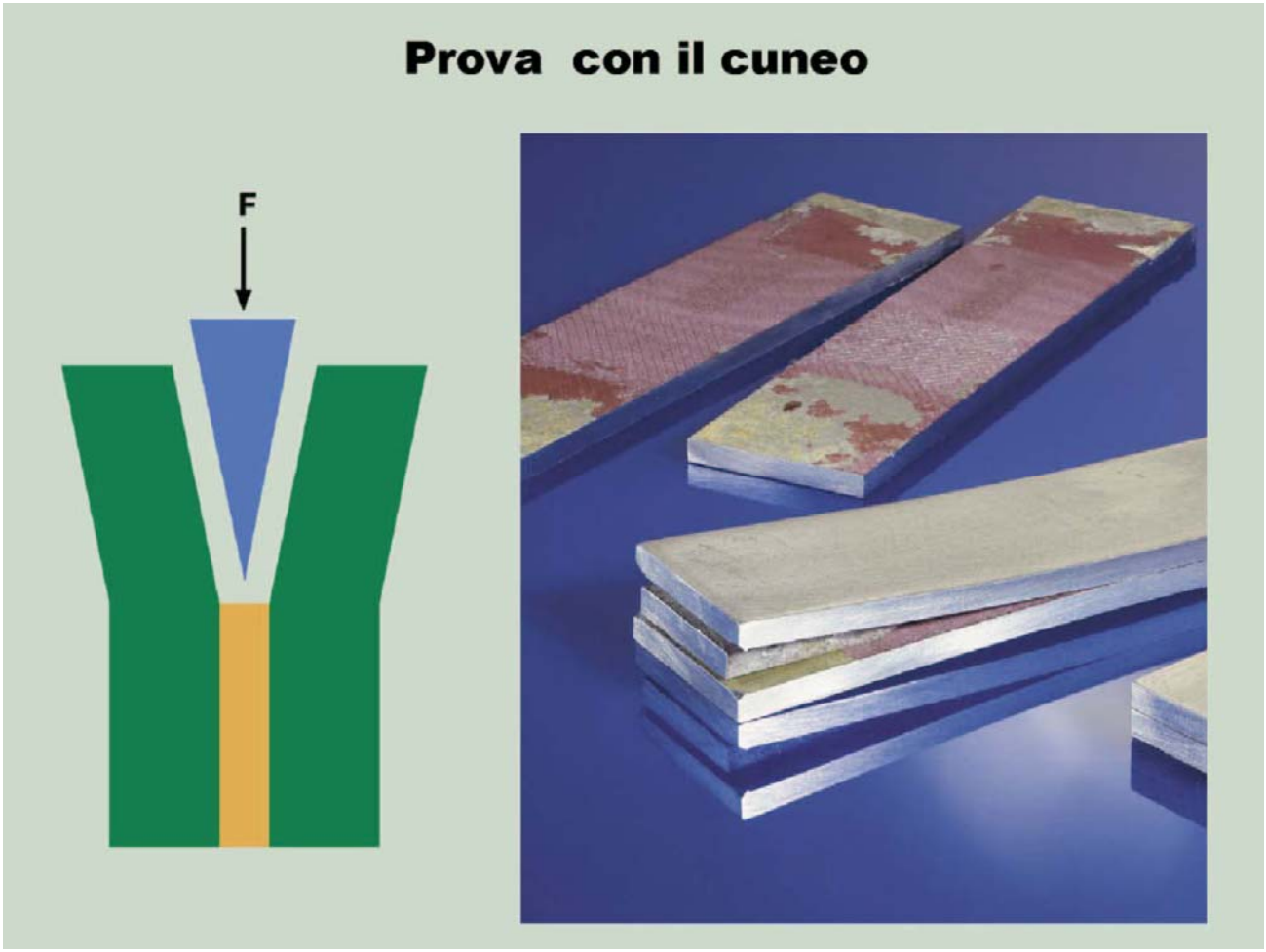


Figura 48

Prova di "pelatura"
Le prove di pelatura determinano la resistenza dei giunti incollati alle forze di pelatura. Sono utilizzate principalmente per la valutazione comparativa degli adesivi e dei metodi di trattamento superficiale in quanto sono molto sensibili nel distinguere le differenze del comportamento di adesione e coesione nello strato di adesivo. Per svolgere queste prove, i campioni vengono sottoposti a forze di trazione sui lati non incollati finché lo strato di adesivo si lacera e le due metà del campione sono separate.

La forza necessaria per compiere questa operazione viene registrata così come la variazione della distanza tra le pinze di serraggio. Il risultato di una prova di pelatura è visibile nel diagramma di pelatura. Le caratteristiche della frattura offrono indicazioni sulle caratteristiche dell'adesione *(Figura 49)*.

Figura 49

3 Esempi di tecnologia di incollaggio all'avanguardia

3.1 Incollaggio del legno

Nella lavorazione del legno e, in particolar modo, nell'industria del mobile la dispersione di acetato di polivinile ha, da molto tempo, sostituito gli adesivi da carpenteria a base di proteine animali utilizzati per migliaia di anni. Le resine di condensazione (urea, melammina, resine fenoliche e di resorcina-formaldeide) hanno permesso lo sviluppo di nuovi materiali derivati dal legno come il compensato, il legno truciolare e i materiali compositi laminati (resine di resorcina/fenolo-formaldeide) per l'edilizia *(Figura 50)*. Le resine di melammina-formaldeide vengono impiegate per l'impregnazione di carte speciali per la produzione di pannelli decorativi per la nobilitazione del legno nell'industria del mobile.

Gli adesivi poliuretanici che polimerizzano per esposizione all'umidità (igroindurenti) sono attualmente sempre più importanti nella produzione di truciolare in quanto rappresentano soluzioni alternative prive di formaldeide rispetto alle resine di policondensazione menzionate sopra. Inoltre, trovano sempre più largo impiego nell'incollaggio di elementi costruttivi in legno. Insieme agli adesivi di molti altri settori tecnologici, anche gli adesivi per il legno stanno diventando veri e propri sistemi di assemblaggio; combinano la semplice applicazione alla rapida polimerizzazione. Gli adesivi termofusibili si sono dimostrati particolarmente utili come adesivi per i lavori di assemblaggio e per l'incollaggio di profilati decorativi. Gli adesivi termofusibili PUR che polimerizzano per effetto dell'umidità trovano sempre più largo impiego e applicazione nell'incollaggio strutturale del legno e nell'accoppiamento del legno con una vasta serie di altri materiali. Questo tipo di adesivo implica due diversi meccanismi di indurimento: la solidificazione dell'adesivo termofusibile quando si raffredda fa sì che i componenti siano fissati rapidamente. La polimerizzazione chimica seguente, con la reticolazione delle molecole, crea legami ad alta tenuta.

Figura 50

3.2 Incollaggio di lamiere metalliche nella costruzione di carrozzerie per autoveicoli

Le carrozzerie delle auto sono composte per la maggior parte da lamiere di acciaio aventi uno spessore compreso tra 0,6 e 0,8 mm. La tendenza delle moderne carrozzerie per auto è quella di offrire un design più piatto che abbia una resistenza al vento il più possibile ridotta, poco peso e

consenta quindi un minor consumo di carburante. I componenti piatti come il cofano e il bagagliaio e anche le fiancate e il tetto sono fissati a montanti sporgenti e quindi rinforzati. Il sistema più comune per unire i componenti della carrozzeria è la saldatura a punti, che non può essere impiegata sui lati piatti visibili perché si avrebbero dei punti esteticamente sgradevoli e occorrerebbe una lavorazione eccessivamente lunga (riempimento). L'uso di adesivi per risolvere questo inconveniente fu introdotto 40 anni fa. Gli adesivi vengono utilizzati per unire i componenti, mentre i punti saldati sono stati ridotti a un numero esiguo sui lati. Il processo di incollaggio è stato introdotto nella catena di montaggio *(Figura 51)*.

Figura 51

Le esigenze richieste alla tecnologia di incollaggio strutturale dalla costruzione delle carrozzerie per auto sono estremamente rigorose. Lo speciale pre-trattamento superficiale delle lamiere metalliche, che è fondamentale per creare incollaggi molto forti e altamente stabili, non è possibile su una linea di produzione in grande serie. Inoltre, i substrati vengono ancora rivestiti con oli per la protezione anticorrosione durante il processo produttivo e possono essere asportati solo prima della fase di lavorazione finale.

I requisiti principali che devono possedere gli adesivi impiegati nella costruzione di carrozzerie per autoveicoli sono i seguenti:

- Capacità di creare legami strutturali per tutta la durata di vita del veicolo;
- Stabilità a 170 - 230° C per circa 30 minuti durante il processo di verniciatura/laccatura;
- Resistenza a movimentazione del veicolo e lavaggio allo stato non completamente polimerizzato;

- Capacità di essere applicati automaticamente;
- Capacità di penetrare come riempitivo delle microfessure nelle saldature a punti.

Soltanto gli adesivi che polimerizzano per effetto del calore soddisfano i requisiti di cui sopra. Gli adesivi appositamente studiati per queste applicazioni (polimerizzano a 180 – 230° C) sono formulati in modo tale che allo stato non polimerizzato possano asportare ed assorbire fino al 20% in peso di olio. Tuttavia, nella prassi, quando si utilizzano gli adesivi, gran parte dell'olio viene asportata meccanicamente dall'adesivo in modo da garantire quasi sempre un buon incollaggio iniziale. L'olio residuo viene comunque assorbito dall'adesivo andando a far parte dello strato di colla.

Le elevate temperature accelerano la dissoluzione dell'olio da parte dell'adesivo. Fondamentalmente, l'olio è distribuito uniformemente nello strato di adesivo polimerizzato e non migra in superficie.

I crash test dimostrano che la resistenza allo sforzo variabile e l'assorbimento di energia anche dopo l'invecchiamento possono essere notevolmente migliori utilizzando gli adesivi in alcuni giunti rispetto a quanto avviene con le costruzioni interamente saldate a punti. L'attuale stato dell'arte prevede una combinazione di incollaggio e saldatura a punti, il cosiddetto "saldoincollaggio" che viene impiegato su vasta scala per la costruzione di carrozzerie per autoveicoli.

Vengono utilizzati i seguenti adesivi per incollare lamiere metalliche nella costruzione di carrozzerie per autoveicoli: gli adesivi di plastisol, impasti di stucco comprendenti PVC in polvere, plastificanti e promotori di adesione. Per applicazioni speciali si utilizzano adesivi epossidici monocomponenti che polimerizzano per effetto del calore.

Esempi di applicazione: rinforzo e saldature flangiate su cofani e bagagliai, portiere e tetti.

3.3 Incollaggio di lastre di vetro nelle carrozzerie – montaggio diretto

Le lastre di vetro vengono montate dopo la verniciatura della carrozzeria. In passato, i parabrezza anteriori e posteriori venivano montati nella carrozzeria con un profilo di elastomero intorno al vetro. Per migliorare la tenuta veniva poi applicato un cordolo di sigillante adesivo elastomerico.

Sin dall'inizio degli anni '70, il montaggio diretto è stato utilizzato in modo sempre più sistematico *(Figura 52)*. Gli adesivi poliuretanici monocomponenti che polimerizzano per effetto dell'umidità o, in alternativa, i polimeri MS (silossani modificati) vengono impiegati a questo scopo. Oltre ad offrire una tenuta eccellente, questa tecnologia offre il vantaggio di poter utilizzare lastre di vetro più grandi riducendo il peso totale della carrozzeria. Questo è possibile perché le lastre di vetro diventano un tutt'uno con la struttura grazie all'adesivo polimerizzato. In questo modo, la rigidità della struttura aumenta consentendo di utilizzare lamiere metalliche più sottili.

Figura 52

3.4 Fabbricazione di aerei e veicoli ferroviari alleggeriti e di container e carri frigoriferi

Costruzione di aerei
Da diversi decenni fino ad oggi, l’incollaggio rappresenta una delle tecniche di accoppiamento più importanti nella fabbricazione di aeromobili per il fatto che le giunzioni hanno una durata fino a 30 anni, sono molto resistenti ai carichi dinamici, agli agenti atmosferici e chimici e alle variazioni termiche estreme, talvolta molto brusche, dalle temperature sotto lo zero nella stratosfera alle temperature dei climi desertici a livello del suolo.

L’applicazione della tecnologia di incollaggio nella fabbricazione di aeromobili consente di sviluppare costruzioni estremamente leggere grazie al possibile uso di leghe metalliche leggere, materie plastiche rinforzate con fibre e grazie ai cosiddetti pannelli a sandwich. L’incollaggio viene utilizzato per le strutture interne e per fabbricare pannelli a nido d’ape con lamiere leggere *(Figura 53)*. Viene altresì impiegato per creare giunti sottoposti ad elevate sollecitazioni, le cosiddette strutture primarie, ad esempio per il rinforzo esterno delle lamiere metalliche di diversa misura, per le strutture a sandwich con nido d’ape di alluminio o plastica impiallacciate e per la formazione di strutture multistrato. La coda verticale dell’airbus ne è un mirabile esempio. E’ composta da un telaio reticolare di alluminio e impiallacciature composte da adesivo epossidico rinforzato con fibre di carbonio. I singoli componenti delle impiallacciature sono prepolimerizzati e l’intera struttura viene incollata in autoclave.

Nell’industria degli aeromobili sono soprattutto gli adesivi epossidici ad essere utilizzati per incollare lamiere e componenti a sandwich. La resistenza al taglio a trazione che si può raggiungere è di circa 20 MPa (statica) e 1 MPa (dinamica). La minor resistenza alla sollecitazione alla pelatura viene scongiurata da scelte di tipo progettuale. Tuttavia, per ragioni di sicurezza, si richiede una resistenza alla pelatura di almeno 4 N/mm.

Figura 53

Fabbricazione di veicoli ferroviari

Nella fabbricazione di veicoli ferroviari i nuovi componenti, come le plastiche rinforzate con fibra di vetro (GFRP), hanno comportato un'enorme riduzione del peso e trasformato il processo produttivo. Alcuni treni di nuova costruzione *(Figura 54)* sono stati progettati con una struttura a telaio costituita da montanti di compressione e trazione disposti in forma triangolare. Si tratta delle strutture portanti più leggere finora realizzate. Grazie alla struttura a telaio, non è necessaria la saldatura sulle lamiere metalliche per assorbire le sollecitazioni di scorrimento. Nei montanti ci sono soltanto le forze di compressione e trazione. Per chiudere il telaio si incollano grandi elementi di rivestimento esterno alla struttura metallica portante ricorrendo ad adesivi poliuretanici monocomponenti che polimerizzano per effetto dell'umidità. Inoltre, non serve nessun lavoro di raddrizzatura e riempimento a differenza di quando si utilizza la saldatura per congiungere gli elementi del rivestimento metallico esterno. Gli elementi in GFRP utilizzati per il rivestimento esterno presentano una struttura a sandwich e offrono quindi un buon isolamento termico e ottime proprietà acustiche. Considerato che non si verifica nessuna deformazione dovuta al calore - a differenza, invece, della saldatura – il rivestimento esterno garantisce al veicolo ferroviario una superficie esterna già verniciata, livellata, liscia e piana senza che sia necessario ricorrere ad ulteriori interventi.

Figura 54

L'accoppiamento di una struttura metallica a telaio con plastica composita rinforzata con fibre può avvenire in modo affidabile ed economico se si utilizza la tecnologia dell'incollaggio. Per ovviare alle diverse deformazioni lineari della struttura e del rivestimento esterno derivanti dall'esposizione al calore si utilizza uno strato spesso di adesivo molto elastico. I legami che ne risultano sono molto forti anche se esposti a ripetute variazioni di temperatura comprese tra –40° C e +80° C e a condizioni di sollecitazione simili all'urto. Presentano una resistenza molto buona all'invecchiamento anche in ambienti umidi. Lo spessore del giunto incollato varia tra i 4 e 18 mm. Ciò dipende dalle dimensioni dei componenti che possono raggiungere gli 8,5 metri di lunghezza sottoponendo quindi il giunto incollato a un'elevatissima deformazione di taglio. Un altro vantaggio che offre questo tipo di struttura è l'elevato smorzamento delle vibrazioni con conseguenze positive sulle caratteristiche di esercizio dinamiche e sul confort di marcia. Nel complesso, questi treni sono più leggeri per il 25% rispetto ai treni tradizionali e offrono una migliore qualità di marcia, costi produttivi inferiori e un minor consumo energetico per il funzionamento.

Costruzione di container e carri frigo

I pannelli a sandwich trovano largo impiego nella costruzione di container e carri frigo. Sono costruiti incollando materiali di riempimento quali schiume polimeriche, lastre prodotte con materiali minerali e pannelli a nido d'ape ricoperti da fogli di alluminio o di plastica rinforzata con fibra di vetro. A questo scopo vengono impiegati adesivi epossidici a viscosità medio-bassa. Ultimamente anche i polimeri MS trovano sempre più largo impiego in questo settore. Garantiscono una buona adesione senza

preventiva applicazione del primer (anche su superfici verniciate) e sono universali per la loro buona elasticità e l'elevata stabilità ai raggi UV *(Figura 55)*.

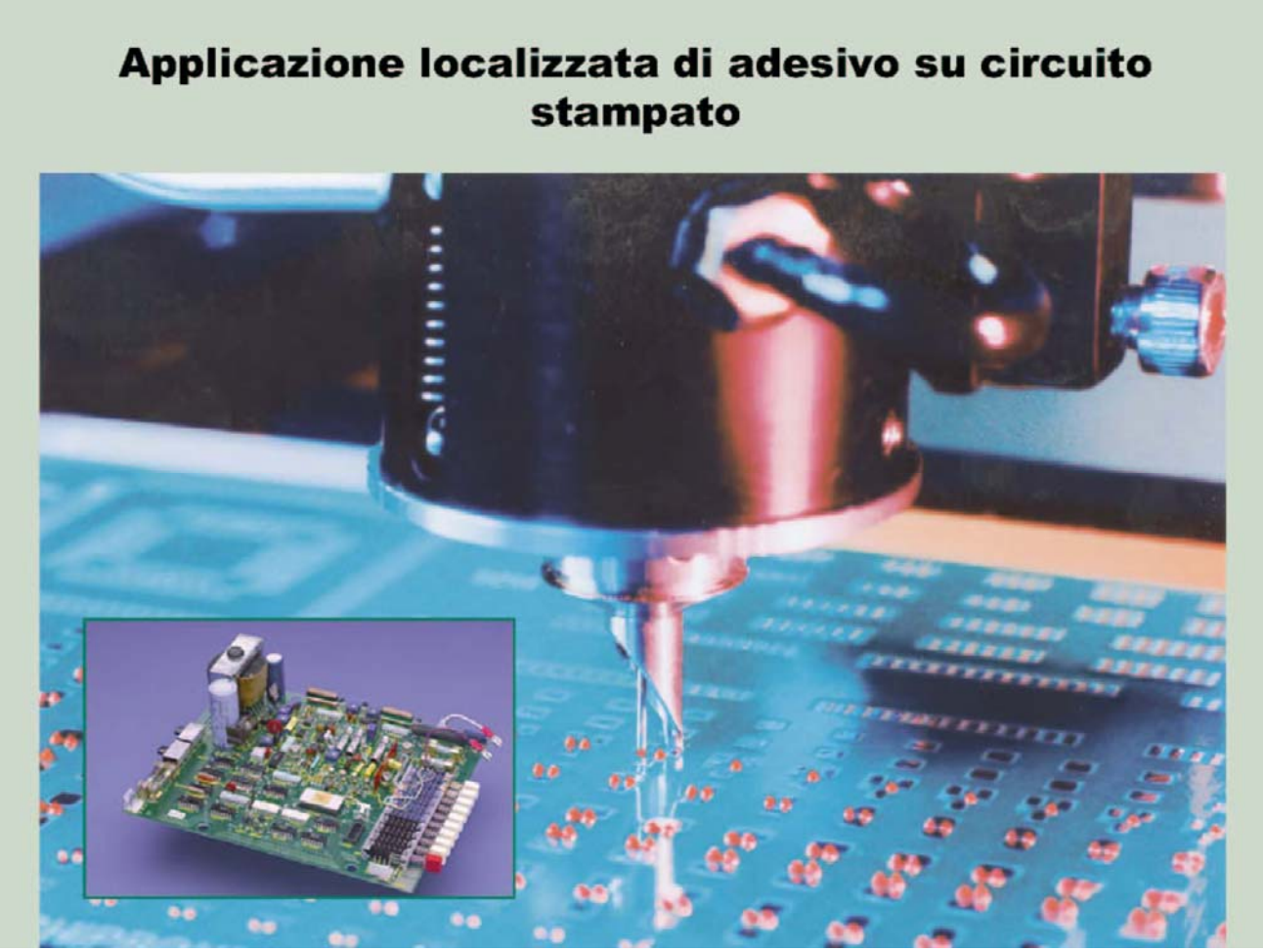
Figura 55

3.5 Elettronica/ingegneria elettrica

Circuiti elettronici

A partire dai primissimi esordi, i progressi registrati nel campo dell'elettronica hanno interessato componenti sempre più minuscoli e circuiti sempre più complessi. La continua miniaturizzazione ha generato componenti di dimensioni più ridotte ma anche più sensibili al calore. Per ragioni anche di costo è stato necessario riconsiderare i metodi utilizzati per assemblare le schede del circuito stampato. La soluzione a queste problematiche è venuta dalla tecnologia dell'incollaggio. Gli adesivi svolgono ormai molti compiti nell'assemblaggio di circuiti elettronici. Oltre ad essere utilizzati per accoppiamenti meccanici fungono, ad esempio, anche come conduttori elettrici e isolanti. Oggi, molti componenti elettronici sono fissati nelle sedi previste con gli adesivi prima della saldatura *(Figura 56)*.

Figura 56



Per questo impiego si utilizzano gli adesivi epossidici monocomponenti in pasta. Questi adesivi aderiscono in 3 minuti a 120° C. Gli adesivi acrilici sono invece meno utilizzati e vengono prepolimerizzati per effetto dei raggi UV per consentirne un rapido fissaggio. L'indurimento finale viene quindi raggiunto fornendo calore.

Gli adesivi elettricamente conduttivi sono in genere epossidici e contengono una piccola quantità di contaminanti ionici. In misura minore vengono utilizzati anche adesivi speciali di poliimmide. In entrambi i casi questi adesivi contengono polvere d'argento finissima per il 70-80% di peso percentuale. Vengono utilizzati quando i componenti non possono essere saldati a causa della sensibilità al calore, soprattutto quando si devono effettuare delle riparazioni. Gli adesivi che hanno proprietà di conduzione termica (es.: adesivi contenenti grandi quantità di ossido d'alluminio) stanno, inoltre, assumendo un'importanza sempre maggiore in ragione della pressante necessità di smaltire il calore nei circuiti.

Produzione di Digital Versatile Disc (DVD)
A differenza del compact disc (CD), il DVD ha una costruzione a sandwich ed è, in effetti, un oggetto incollato. Sono disponibili diversi modelli con capacità di memorizzazione dei dati su uno o due lati. Gli adesivi acrilici che polimerizzano per effetto dei raggi UV vengono utilizzati per incollare i componenti del DVD. Questi adesivi aderiscono in pochi secondi grazie all'effetto dei raggi UV e, oltre ad avere un'ottima purezza ottica, i legami presentano un'ottima stabilità nel tempo in condizioni di caldo umido.

Speciali adesivi termofusibili a base di elastomeri termoplastici stanno assumendo una certa rilevanza in questo settore *(Figura 57)*.

Figura 57

Motori elettrici

Una svariata serie di dispositivi elettrici, dagli elettrodomestici da cucina ai lettori CD e videocamere sono provvisti di motori elettrici. Questi motori prodotti in grande serie devono possedere una precisa sincronizzazione e avere una lunga durata. Gli adesivi sono oggi indispensabili nell'assemblaggio dei motori, ad esempio per connettere il rotore all'albero, per collegare il commutatore all'albero, per attaccare i cuscinetti a sfera e per fissare le viti in posizione *(Figura 58)*. Il tipo di adesivo prescelto in questo caso è l'adesivo anaerobico, vale a dire un adesivo acrilico che polimerizza in assenza di ossigeno.

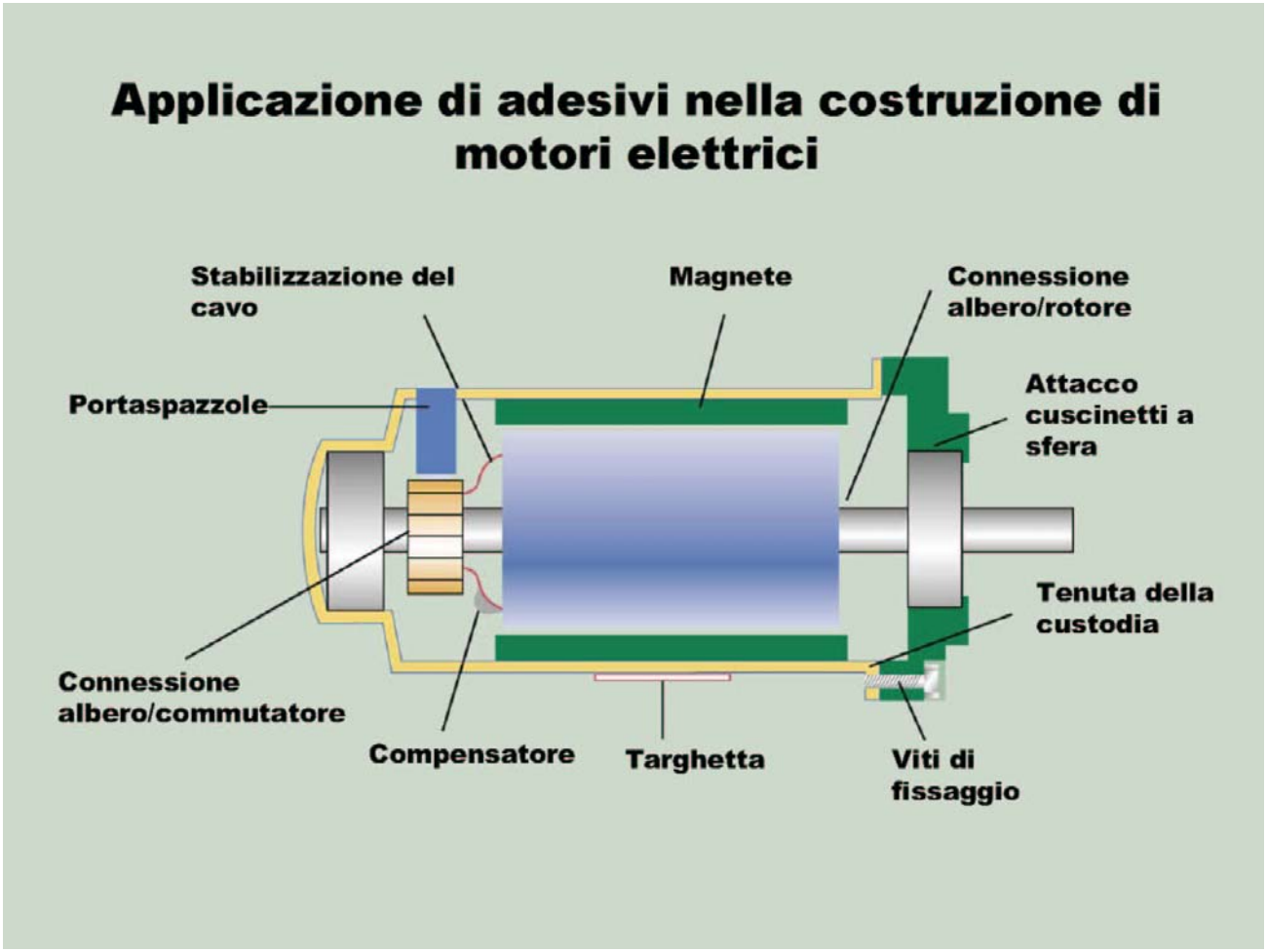


Figura 58

3.6 Adesivi per imballaggio

La stragrande maggioranza di tutti i prodotti industriali viene venduta confezionata per una questione di stabilità durante l'immagazzinaggio e trasporto o per ragioni estetiche. Anche se le normali buste e i sacchetti di carta sono costituiti semplicemente da un solo strato di materiale, la maggior parte dei materiali di imballaggio utilizzati oggi sono costituiti da diversi materiali accoppiati *(Figura 59)*.

Figura 59

L'accoppiamento del cartone con la carta, in particolare la carta plastificata, consente di inserire sul cartone informazioni sul prodotto e conferire una veste commercialmente invitante. A questo scopo, vengono utilizzate principalmente dispersioni di acetato di polivinile.

Importanti requisititi che devono possedere i materiali da imballaggio sovrastampati, in particolare i diversi tipi di materiale utilizzato per i generi alimentari, sono la resistenza, la stabilità al calore e l'impermeabilità all'umidità, all'ossigeno e agli aromi. Queste qualità, insieme alla veste desiderata, si possono raggiungere combinando diversi materiali. I film accoppiati possono essere fabbricati in poliestere (PETP, PBTP), poliammidi, polietilene, polipropilene, cellofan, carta, cloruro di polivinile, fluoruro di polivinilidene, poliimmidi, alluminio e altri materiali. Si usano frequentemente anche i film metallici. Per accoppiare gli strati vengono utilizzati adesivi poliuretanici contenenti solventi. Le ultime innovazioni registrate in questo campo riguardano, tuttavia, sistemi privi di solventi, adesivi termofusibili oppure adesivi a base di dispersioni acquose acriliche o poliuretaniche.
Per le applicazioni che prevedono l'utilizzo di confezionatrici automatiche è quanto mai richiesta una costanza delle qualità dell'adesivo, specialmente per quanto riguarda la stabilità della viscosità. Gli adesivi in dispersione e gli adesivi termofusibili vengono impiegati per chiudere le confezioni (scatole pieghevoli, pacchetti).
Per la formazione di sacchi e sacchetti è fondamentale l'impiego degli adesivi. Generalmente per questi settori venivano utilizzati adesivi a base amido o dispersioni acquose di polivinilacetato. A causa della sempre crescente necessità di nuovi materiali (carte verniciate, plastificate) e di sempre più elevate velocità di macchina l'impiego di adesivi termofusibili e di dispersioni di copolimeri è entrato nell'uso comune anche in questo settore.

Per l'etichettaggio e il confezionamento di liquidi vengono impiegati adesivi a base caseina, amidi o dispersioni sintetiche e adesivi termofusibili che negli anni si sono evoluti per adattarsi alle esigenze produttive e alle velocità di confezionamento (oltre 100.000 pezzi/ora).

3.7 Adesivi per legatoria

I libri, una volta solo cuciti, oggi vengono, nella stragrande maggioranza dei casi, prodotti mediante incollaggio con adesivi di varia natura.
Partendo dalla formazione del volume vero e proprio, sul dorso del libro vengono applicati uno o più strati di adesivo di diversa natura, che, penetrando nelle pagine del libro stesso, provocano il consolidamento del manufatto.
Questa operazione si chiama incollaggio del dorso ed è quella che garantisce la struttura del volume, impedendo il distacco delle pagine ed evitando la rottura del volume durante l'uso.
A questo scopo per i libri ancora cuciti o garzati vengono normalmente utilizzati adesivi acetovinilici omo o copolimeri , mentre per i libri di minor pregio (tascabili, elenchi telefonici , cataloghi, etc.) sul dorso, dopo opportuna fresatura, vengono applicate una o due mani di adesivo termofusibile.
L'adesivo per l'incollaggio del dorso deve quindi essere coesivo ed estremamente flessibile per sopportare gli stress meccanici a cui è giornalmente sottoposto; deve inoltre resistere agli inchiostri e alla migrazione dei componenti degli stessi per garantire la resistenza del libro nel tempo.
A questo scopo, l'ultimo ritrovato della tecnologia sono gli adesivi termofusibili poliuretanici reattivi, igroindurenti o reticolabili alla luce ultravioletta, che, pur presentando la facilità e la rapidità di applicazione di un normale adesivo termofusibile, presentano le stesse caratteristiche di resistenza e durabilità dei libri cuciti e incollati con dispersioni.
Pertanto quest'ultima tecnologia viene normalmente utilizzata nella produzione di libri di pregio.
Il libro viene poi spesso ricoperto da una copertina che viene formata con colle animali o ricoperta di un film plastico con emulsioni acriliche; la stessa è poi incollata al libro con adesivi acquosi naturali o sintetici (colle animali, adesivi acetovinilici con o senza amidi).
Molti libri vengono poi consolidati mediante incollaggio laterale tra la copertina e il risguardo (prima e ultima pagina del volume). Questa operazione viene normalmente eseguita mediante adesivi termofusibili autoadesivi.
In legatoria vengono inoltre usate lacche adesive per ottenere i più svariati effetti cromatici e tridimensionali sulle pagine dei libri stessi.
Questi ultimi prodotti si posizionano a metà fra le vernici, gli inchiostri e gli adesivi propriamente detti e sono normalmente di natura acrilica a reticolazione ultravioletta. Gli effetti con essi ottenuti sono durevoli e presentano un'elevata resistenza agli stress meccanici e atmosferici.

3.8 Adesivi per applicazioni medicali

In passato, l'uso di adesivi nelle applicazioni medicali era limitato alla produzione di cerotti *(Figura 60)*.
I primi autoadesivi utilizzati a questo scopo erano a base di gomma naturale, in seguito soppiantata dalle gomme sintetiche (es.: poli-isoprene, poli-isobutilene, policloroprene). A metà del XX secolo, gli autoadesivi a base di esteri di acido poliacrilico hanno assunto sempre maggiore importanza, sia per usi generici che per i materiali di fasciatura.

Figura 60

Gli adesivi vengono oggi impiegati in vari campi della medicina, sostituendo i metodi tradizionali con processi più “gradevoli”. In molti casi, per esempio, i punti di sutura possono essere evitati applicando speciali adesivi di cianoacrilato che chiudono rapidamente le ferite. Si ha così il vantaggio di coprire tutta la ferita bloccando l’emorragia secondaria e il rischio di infezione. In genere si preferisce l’estere butilico dell’acido cianoacrilico rispetto agli esteri etilici e metilici perché indurisce più lentamente e la polimerizzazione produce meno calore, oltre a irritare meno i tessuti. In verità, questo adesivo viene utilizzato soltanto per ferite relativamente piccole e talvolta nella chirurgia vascolare. Nella chirurgia cardiaca la fibrina (ottenuta da fibrinogeno), una proteina solubile recuperata dal sangue, è un sigillante fondamentale in quanto vanta proprietà emostatiche. Rispetto ai cianoacrilati, la fibrina è meno aggressiva nei confronti dei tessuti anche se prima dell’uso deve essere sottoposta a uno speciale trattamento per evitare che i germi si diffondano. L’uso degli adesivi a base di metacrilato ha trionfato in ortopedia per l’ancoraggio degli impianti di protesi d’anca all’osso. Attualmente non esistono altri tipi di adesivo utilizzati per queste applicazioni. Questi adesivi comprendono a) una polvere (miscela di polimetilmetacrilato e una sostanza che innesca la polimerizzazione) e b) un liquido (i cui principali componenti sono il metilmetacrilato e un acceleratore di polimerizzazione). Anche se questo tipo di adesivo costituisce una sollecitazione non trascurabile sull’osso e sui tessuti per il forte sviluppo di calore, gli impianti d’anca e ginocchio ancorati con questo adesivo risultano funzionali nel 90% dei casi per circa 15 anni *(Figura 61)*.

In odontoiatria, i materiali tradizionali per le otturazioni, come le amalgame, sono stati soppiantati dai materiali a base di acrilati con polimerizzazione a raggi UV. I prodotti hanno un lungo “tempo aperto”

(l'intervallo entro il quale possono essere utilizzati dopo la miscelazione) e aderiscono in un minuto circa se esposti ai raggi UV.

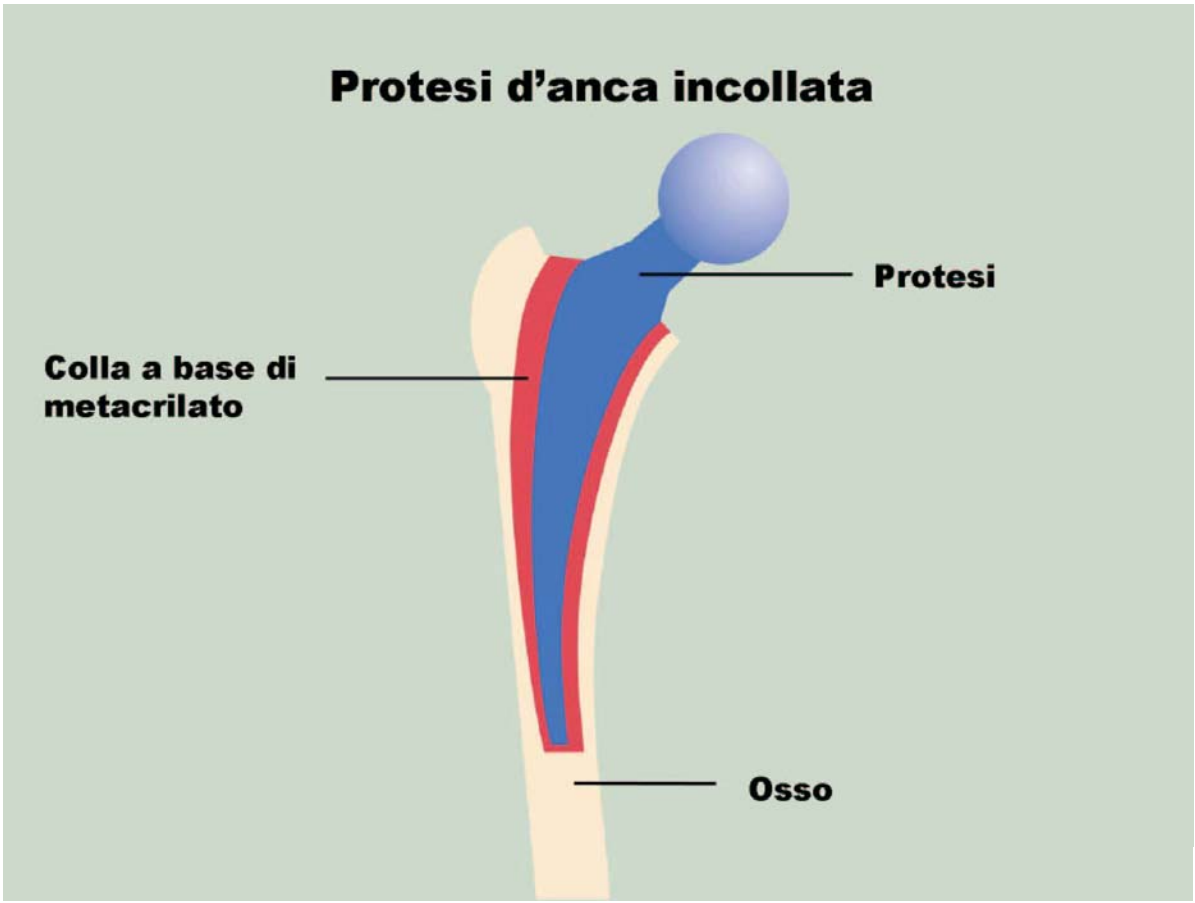


Figura 61

3.9 Adesivi per l'industria delle costruzioni

Lo sviluppo del mercato delle costruzioni, sempre più caratterizzato da tempi e prestazioni certe, ha fatto sì che in particolari applicazioni si passasse da prodotti tradizionali a base cementizia, all'utilizzo di adesivi a base di resine sintetiche.

Le resine attualmente sul mercato, per la maggior parte epossidiche, sono commercializzate come prodotti bicomponenti con fattori di viscosità, deformabilità e resistenza, studiati a seconda del processo applicativo per cui sono state progettate.

Già da alcuni decenni questi prodotti sono utilizzati in edilizia per riprese di getto, ancoraggi di ferri d'armatura, rinforzi strutturali eseguiti mediante incollaggio di placche metalliche ("Beton plaqué"). Oggi i nuovi materiali compositi FRP (acronimo di Fiber reinforced Polymer, ossia, "Materiale polimerico fibrorinforzato"), prestati all'edilizia da mercati più evoluti come quello aerospaziale ed automobilistico, hanno ulteriormente contribuito allo sviluppo di questi particolari adesivi, che risultano insostituibili per queste specifiche applicazioni.

Gli FRP sono commercializzati in forma di tessuti, barre e lamine, da utilizzarsi a seconda dello specifico obiettivo progettuale. L'ingegneria civile, sensibilizzata dal mercato ed obbligata dalle nuove

normative vigenti, sta lentamente abbandonando le tecniche tradizionali di adeguamento e restauro statico, come il Beton plaqué o l'aumento della sezione di travi e pilastri con calcestruzzo, per rivolgersi sempre più a materiali compositi evoluti. Si utilizzano a questo scopo fibre di carbonio o di vetro, che oltre ad avere elevatissime prestazioni meccaniche e tempi rapidi di applicazione, non aggiungono ulteriori masse sollecitabili da fenomeni sismici.

Questi materiali vengono resi solidali al supporto mediante incollaggio con resine epossidiche. Solo questo tipo di adesivo può garantire prestazioni meccaniche compatibili con i nuovi materiali compositi.

Il processo consiste in una preliminare applicazione di primer epossidico allo scopo di consolidare la superficie degli elementi di calcestruzzo da rinforzare, seguita da una spalmatura di stucco epossidico per regolarizzare la superficie. Si applica poi uno strato di adesivo epossidico più fluido, sul quale viene posato un tessuto in fibra di carbonio o vetro idoneo ai criteri di progettazione, che viene ulteriormente impregnato con un altro strato dello stesso adesivo (Figura 62) .

Tipici valori delle prestazioni delle resine utilizzate per queste applicazioni "a secco" dei tessuti in fibra di carbonio sono riportate in tabella.

Adesione al calcestruzzo (N/mm^2)	>3(dopo 7 giorni, rottura del cls)
Resistenza a trazione (ASTM D638) (N/mm^2)	40
Resistenza a compressione (ASTM D695) (N/mm^2)	70
Modulo elastico a compressione (ASTM D695) (N/mm^2)	1400
Modulo elastico a flessione (ISO 178) (N/mm^2)	3000

Applicazione tessuto in fibra di carbonio

Figura 62

4. Sicurezza, salute e tutela ambientale nel campo degli adesivi

La gestione responsabile di materie prime e prodotti durante tutto il ciclo di vita, ovvero dalla produzione all'uso finale, direttamente fino al riciclaggio e smaltimento rappresenta oggi un principio generalmente riconosciuto. Lo sviluppo e la produzione di adesivi in Italia rispondono pienamente alle direttive europee in materia di sicurezza dei prodotti. In più, l'industria italiana degli adesivi si è conformata al programma "Responsible Care" che riguarda un impegno volontario delle industrie chimiche che lo sottoscrivono a favore dello "sviluppo sostenibile" *(Figura 63),* coniugando insieme lo sviluppo tecnologico, sociale e la sostenibilità ambientale. Nella fattispecie, ciò significa che la tutela della salute il benessere sociale e la compatibilità ambientale sono argomenti di cui si tiene conto quando si formulano e producono nuovi adesivi e questo atteggiamento si riflette nella composizione degli stessi, nel progetto del prodotto, nelle avvertenze d'uso e nella finalità d'impiego, nel riciclaggio del prodotto dopo l'uso.

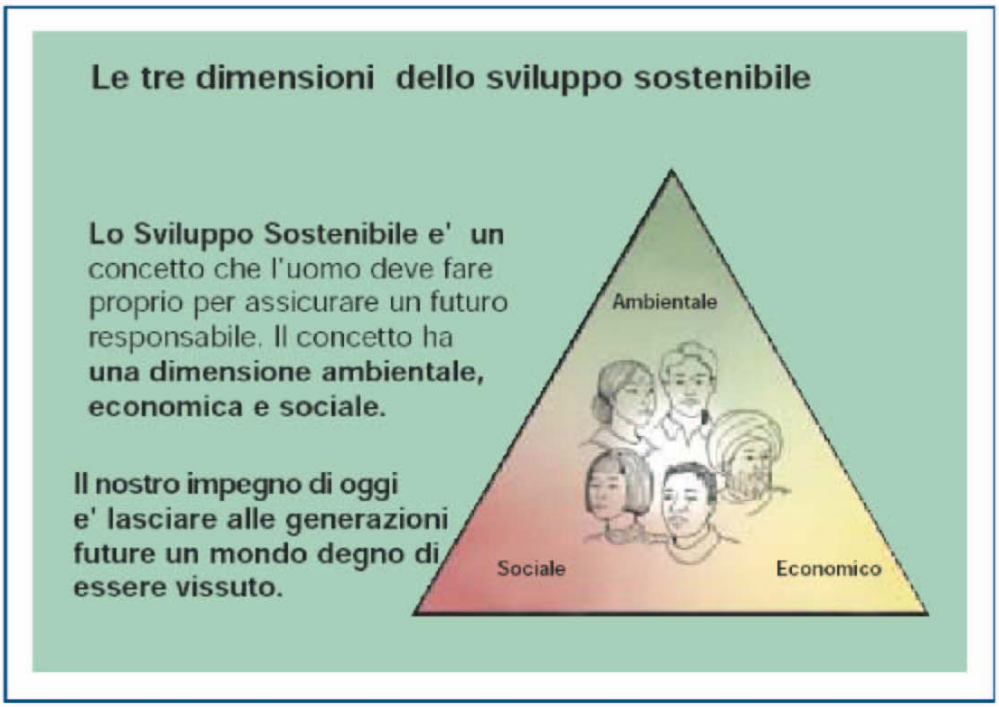


Figura 63

4.1 Tutela della salute

L'obiettivo della tutela della salute è proteggere le persone da rischi e condizioni pericolose. Col termine "sicurezza sul lavoro" si intende la tutela dei lavoratori negli ambienti artigianali e industriali mentre la "tutela del consumatore" si riferisce agli utenti privati.

4.1.1 Sicurezza sul lavoro

Gli utilizzatori professionali e industriali di adesivi necessitano di una particolare protezione in quanto lavorano ogni giorno, spesso per molte ore, a diretto contatto con gli adesivi. Oltre ai pericoli legati alle proprietà fisiche degli adesivi come l'infiammabilità, l'esplosività e le ustioni - se si usano adesivi termofusibili - sono soprattutto gli effetti chimici come la tossicità, l'irritazione cutanea e le allergie che devono essere evitate. Ciò è possibile dotando il luogo di lavoro di sistemi di rigenerazione dell'aria ed estrattori nei locali, di dispositivi di protezione personale come tute, guanti e occhiali di sicurezza e facendo in modo che le norme igieniche vengano rispettate (ad esempio accurato lavaggio prima delle pause e al termine del lavoro e divieto di magiare, bere e fumare nel luogo di lavoro) . Gli addetti alla sicurezza sul lavoro devono monitorare l'osservanza di queste misure di sicurezza. Il personale che lavora a diretto contatto con gli adesivi deve seguire regolarmente corsi di formazione su problematiche legate alla sicurezza sul lavoro e alla tutela dell'ambiente. Se sussistono rischi particolari, il personale viene sottoposto regolarmente a visita medica.

4.1.2 Tutela del consumatore

In un ambiente lavorativo i possibili rischi possono essere gestiti in modo efficiente - persino in quelle situazioni dove l'uso è prolungato - adottando misure di protezione idonee. La situazione, invece, cambia nel caso dei privati che utilizzano gli adesivi in ambito domestico senza adottare misure di protezione particolari. Pertanto, i requisiti che questi adesivi devono avere sono diversi anche in ragione del fatto che gli utenti privati – a differenza degli utilizzatori in ambito professionale o industriale – non conoscono le proprietà e i potenziali rischi dei prodotti. Alla luce di ciò, soltanto alcuni tipi di adesivi tra tutti quelli conosciuti sono accessibili agli utenti privati e solamente in piccole quantità disponibili in tubo, cartucce e barattoli. Del resto, gli utenti privati non utilizzano gli adesivi ogni giorno, ma solo sporadicamente e anche in quei casi solo in quantità limitate e per limitati periodi di tempo. In queste condizioni le misure di protezione descritte per gli utilizzatori in ambito industriale non sono né praticabili né necessarie. È tuttavia fondamentale rispettare le avvertenze di sicurezza riportate sulla confezione e anche i principi di base di sicurezza e igiene per la manipolazione.

4.1.3 Rischi per la salute

La tossicologia *(cfr. Glossario)* studia gli effetti dei composti chimici e delle miscele di sostanze chimiche. La valutazione del rischio sulla salute è un processo a più stadi. Il primo stadio comprende l'accurata valutazione di eventuali proprietà indesiderate delle sostanze *(Pericolo potenziale, cfr. Glossario)* sulla base dei dati raccolti. Il secondo stadio prevede la determinazione della quantità di materiale presente nell'ambiente e della natura e grado di un eventuale contatto *(Esposizione, cfr. Glossario)*. Quindi si analizza la possibilità che si verifichi un effetto indesiderato prodotto da un certo materiale in seguito al contatto. Non sussiste alcun pericolo per la salute delle persone qualora non avvenga alcun contatto con il materiale nocivo. La valutazione dei rischi stabilisce se e in quale misura possa sussistere un rischio per la salute delle persone in seguito al pericolo potenziale della sostanza, alla natura e al grado dell'esposizione *(Figura 64)*. Nonostante l'esposizione possa, ad esempio, essere ridotta ricorrendo a processi automatizzati (es.: robot) o adottando misure protettive idonee (es.: guanti, captazione di vapori, occhiali di sicurezza, ecc.), il pericolo potenziale è una proprietà intrinseca di una sostanza o preparato (miscela di sostanze).

Il pericolo potenziale diminuisce generalmente al diminuire della frazione di materiale pericoloso presente. Piccole quantità di una sostanza pericolosa possono essere spesso presenti senza che vi sia necessità di indicazione sull'etichetta *(Classificazione, cfr. Glossario)*. Le proprietà chimico-fisiche della sostanza, la natura e il grado di esposizione, la capacità della sostanza di penetrare nell'organismo determinano la relativa quantità e la conseguente dose che può essere assunta dall'organismo. In generale, non si verificano effetti indesiderati al di sotto di una certa dose. Il livello di dose determina se e in quale misura una sostanza possa nuocere alla salute. Il rischio per la salute umana è determinato dal pericolo potenziale della sostanza e dal tempo e dalle modalità di esposizione (possibilità di contatto).

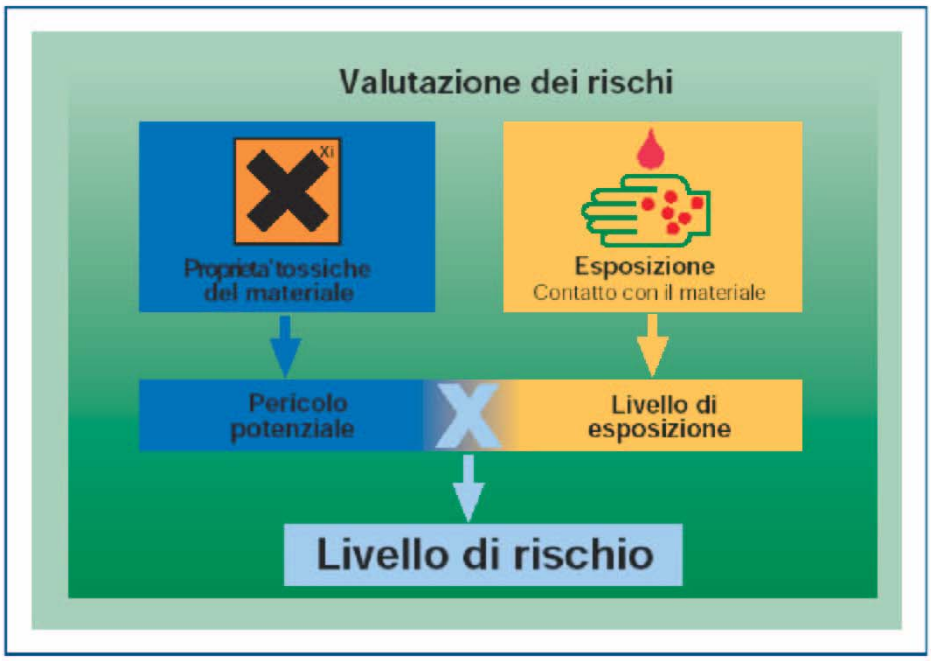


Figura 64

4.1.4 Tutela della salute in caso di uso di adesivi - esempi di valutazione tossicologica

Tra i diversissimi tipi di adesivo, quelli di seguito illustrati sono utilizzati comunemente anche in ambito domestico:

4.1.4.1 Adesivi che induriscono per processo fisico

I componenti attivi sono prevalentemente polimeri solidi e resine. In caso di applicazione, devono essere convertiti allo stato liquido. Questa operazione può essere effettuata dagli utilizzatori per mezzo del calore (adesivi termofusibili) o può essere eseguita dai produttori di adesivo con la dissoluzione dei componenti in solventi organici o con la dispersione dei componenti in acqua. L'adesivo asciutto, lasciato completamente all'aria non è generalmente reattivo ed è biologicamente inerte. Pertanto, non sussiste alcun pericolo per la salute.

Al contrario, il potenziale rischio per la salute è generato dai componenti ausiliari come i solventi organici che sono presenti in alcuni di questi adesivi e possono costituire ben l'80% del peso dell'adesivo.

Adesivi termofusibili
Questi adesivi contengono per la maggior parte polimeri e resine e solo una piccola quantità di materiali ausiliari. In teoria, non sussiste mai alcun pericolo per la salute. Quando si applicano questi adesivi a mano, può presentarsi il rischio di ustione e gli utilizzatori devono proteggersi contro questa eventualità. Durante il riscaldamento, possono essere liberate piccole quantità di materiali volatili, ma sono irrilevanti se le quantità manipolate sono esigue. In un ambiente industriale o artigianale si raccomanda di utilizzare un impianto di aspirazione a causa della maggior quantità di adesivo utilizzata e dei tempi di lavoro più lunghi.

Adesivi contenenti solventi
(es.: adesivi a contatto)
In questi adesivi i polimeri e le resine sono disciolti nei solventi organici. Il pericolo potenziale viene determinato dalla natura del solvente (es.: infiammabilità, potenziale di irritazione). A causa dell'elevata volatilità dei solventi, il più grande problema è rappresentato dall'esposizione per inalazione dei vapori. Per la maggior parte dei solventi viene imposta una concentrazione massima nel luogo di lavoro (valore limite sul luogo di lavoro, cfr. Glossario). Questi valori limite in genere non vengono raggiunti dagli utilizzatori privati o vengono superati soltanto per brevissimo tempo poiché la quantità di adesivo impiegata è esigua.

Adesivi in dispersione
(es.: adesivo per il legno /PVA)
In questi adesivi i solventi organici sono sostituiti dall'acqua e particolari polimeri vengono dispersi in acqua. Non esistono quindi potenziali rischi per la salute derivanti da solventi organici. Tuttavia, gli adesivi a base acqua sono sensibili all'attacco di microrganismi (ad es.: formazione di muffa). Per questa ragione gli adesivi in dispersione contengono piccole quantità di conservanti antifermentativi a fini protettivi. Il potenziale rischio per la salute è rappresentato dall'insorgenza di reazioni allergiche cutanee, ad esempio reazioni allergiche provocate dai polimeri naturali come la gomma naturale e le resine di colofonia non modificate. Il rischio di sensibilizzazione in persone non allergiche è, in genere, molto basso perché gli antifermentativi sono presenti nell'adesivo in piccolissime quantità. Il problema dell'esposizione è qui rappresentato dal contatto con la pelle. A seconda della modalità di applicazione, il contatto con la pelle potrebbe essere inevitabile, come, ad esempio, se si usano gli adesivi per le carte da parati. Tuttavia, la concentrazione dei conservanti è, in questo caso, ridotta perché miscelati con l'acqua. Anche indossare i guanti protettivi per molto tempo può provocare un'irritazione cutanea (a causa del sudore), pertanto vale la pena valutare quanto il bassissimo rischio di contatto diretto con la pelle e la possibilità di reazione allergica possa giustificare l'utilizzo di guanti protettivi.

Autoadesivi
Solo gli utilizzatori privati utilizzano questi adesivi sotto forma di articoli autoadesivi come etichette, nastri adesivi, ecc. Di per sé, questi adesivi non rappresentano dunque un pericolo per gli utilizzatori privati. Questi articoli vengono prodotti industrialmente utilizzando adesivi sotto forma di soluzioni, dispersioni acquose e adesivi termofusibili.

4.1.4.2 Adesivi che polimerizzano chimicamente
I monomeri/oligomeri chimicamente reattivi e gli indurenti e reticolanti costituiscono il potenziale pericolo di questi prodotti per la salute. Una volta completata la polimerizzazione, i polimeri dell'adesivo non sono generalmente nocivi. L'esposizione e il rischio sono fattori da considerare solo nell'intervallo in cui gli adesivi non sono completamente polimerizzati.

Cianoacrilati
Questa categoria di adesivi reagisce con l'acqua presente nell'ambiente o contenuta nel substrato. Poiché i privati utilizzano di solito solo poche gocce durante l'applicazione, il potenziale rischio per la salute è costituito dal fatto che se l'adesivo viene a contatto con gli occhi o schizzi di adesivo penetrano negli occhi, questi possono incollarsi (possono dissolversi gradualmente con una soluzione di sapone). Se utilizzati su scala industriale o commerciale occorre tenere in considerazione la possibile irritazione causata dai monomeri di cianoacrilato, gli effetti termici e la rapida reazione di polimerizzazione. Aumentare il livello di umidità ambientale previene l'irritazione a carico dell'apparato respiratorio. I cianoacrilati devono essere provvisti di apposita etichetta con istruzioni di sicurezza. Quando si eseguono i principali lavori di incollaggio, si raccomanda non soltanto di regolare l'umidità dell'aria, ma anche di indossare occhiali di sicurezza e guanti protettivi.

Sigillanti e adesivi siliconici
I siliconi reagiscono con l'acqua. A seconda del tipo di silicone, questa reazione libera piccole quantità di acido acetico, alcool o altre sostanze volatili. L'acido acetico può essere facilmente avvertito con l'olfatto prima che possa dar luogo a qualsiasi irritazione. In generale, le quantità, liberate lentamente, sono così esigue da non rappresentare un rischio per la salute, soprattutto per gli utilizzatori privati. Le vecchie composizioni di siliconi neutri che liberano ossime richiedono indicazioni di pericolo sull'etichetta, ma oggi vengono ormai utilizzate solo per applicazioni specifiche.

Adesivi epossidici
Gli adesivi epossidici sono ampiamente utilizzati dagli hobbysti e per il fai-da-te domestico perché presentano buone proprietà di adesione, ad esempio per incollare il vetro, la ceramica o i metalli, oltre al fatto che il contenitore fornito di due beccucci consente di erogare e quindi miscelare quantità piccolissime. Le resine epossidiche liquide e anche i reticolanti irritano la pelle e gli occhi e causano ipersensibilità cutanea. Per questa ragione, gli hobbysti devono evitare che la pelle venga a contatto con gli adesivi epossidici. Per l'applicazione industriale delle resine epossidiche occorre indossare occhiali di sicurezza e guanti adeguati.

4.1.5 Scelta dell'adesivo

Per uso privato la scelta di un adesivo viene lasciata per lo più all'esperienza degli utenti e ai consigli dei produttori. Per gli utenti professionali e, in particolare, nel settore industriale, la scelta di un sistema adesivo appropriato per una certa applicazione deve basarsi sui requisiti tecnici e sul potenziale rischio per la salute. In una situazione in cui due adesivi sono tecnicamente equivalenti, la scelta dovrebbe ricadere su quello che rappresenta un potenziale rischio minore per la salute. Se non si può fare a meno di utilizzare un adesivo che rappresenta un rischio potenziale per la salute, l'esposizione deve essere limitata adottando adatte misure che possono includere anche il ricorso all'automazione del processo in modo da prevenire il rischio per la salute. Lavorare in condizioni di sicurezza è possibile se si rispettano queste norme e altre descritte nel presente capitolo. I produttori di adesivi vengono, in questo caso, in aiuto fornendo informazioni sotto forma di schede tecniche e schede in materia di sicurezza. Se occorre, gli utenti possono contattare direttamente i produttori di adesivi. Come ribadito in questo capitolo, risulta evidente che i produttori di adesivi si impegnano con molto rigore per proteggere la salute sia degli utenti privati che degli utenti professionali che utilizzano i loro prodotti. E' opportuno evidenziare in questo caso che dal punto di vista quantitativo solo un piccolo numero di adesivi deve classificarsi come prodotto pericoloso.

Il rispetto, da parte degli utenti privati, delle istruzioni di sicurezza riportate sulle confezioni e il rispetto, da parte degli operatori industriali, delle norme aziendali in materia vigenti all'interno degli impianti produttivi servono a proteggere le persone in perfetta armonia con la massima "Prevenire è meglio che curare".

4.2 Tutela ambientale nella tecnologia dell'incollaggio

Negli ultimi decenni, le problematiche ambientali stanno assumendo un'importanza sempre più grande. Quanto segue è un esempio di un contributo positivo all'ambiente: l'industria automobilistica utilizza fino a 40 kg di sigillanti e adesivi per ogni veicolo prodotto. L'obiettivo è quello di risparmiare energia sotto forma di carburante per mezzo del cosiddetto "modello costruttivo leggero", in modo da movimentare il minor peso possibile durante il ciclo di vita dell'auto con conseguente risparmio delle risorse. Per contro, gli adesivi possono avere un impatto negativo sull'ambiente se rimangono dei residui dall'applicazione e non viene effettuata alcuna pulizia. Al termine del ciclo di vita dell'auto, l'adesivo utilizzato non deve incidere negativamente sul processo di riciclaggio e deve essere smaltito nel pieno rispetto delle normative vigenti. Al fine di stimare l'impatto sull'ambiente, viene condotta una valutazione ambientale. La concentrazione prevista nell'ambiente viene calcolata sulla base di un modello. Al contempo, si determina la concentrazione in presenza della quale non sussiste alcun danno per gli organismi che vivono nell'ambiente. I modelli di calcolo e i metodi di determinazione sono stabiliti da norme internazionali. Un impatto negativo o un danno all'ambiente possono essere esclusi con certezza se la Concentrazione Ambientale Prevista (PEC) è inferiore alla concentrazione prevista in presenza della quale non si cagiona alcun danno agli organismi che vivono nell'ambiente (Concentrazione Prevista priva di Effetti – PNEC) (Figura 65).

Figura 65

4.2.1 Aria

L'emissione di solventi organici è nociva per la qualità dell'aria. Per questa ragione, nel corso di molti anni l'industria degli adesivi ha fatto innumerevoli sforzi allo scopo di passare ad adesivi a basso contenuto di solventi e, ove possibile, ad adesivi privi di solventi. Il grande successo che questi adesivi hanno conosciuto è andato anche a vantaggio della tutela della salute. L'incollaggio, oggi, è responsabile soltanto del 3% di tutte le emissioni di solventi in Europa. Le poche applicazioni su vasta scala nel settore industriale operano con impianti di recupero dei solventi.

4.2.2 Acqua

Con gli adesivi in dispersione acquosa esiste il particolare rischio di contaminazione delle acque superficiali. I polimeri organici e i prepolimeri, benché difficilmente biodegradabili, possono essere eliminati negli impianti di depurazione. L'uso di adesivi nell'artigianato, in ambito domestico e per il fai-da-te produce soltanto quantità relativamente piccole di adesivo che finiscono nelle acque reflue (impianto di depurazione comunale). Poiché i polimeri presentano una bassa tossicità per gli organismi che vivono nelle acque e in considerazione del fatto che bassissime concentrazioni di adesivo finiscono nelle acque reflue, non è previsto in questo caso un impatto negativo sull'impianto di trattamento e sulle acque superficiali vicine (punto di scarico). Nell'industria l'adesivo residuo e le acque di lavaggio devono essere trattati e/o smaltiti in ottemperanza alla legislazione sui rifiuti.

4.2.3 Suolo

Se l'utilizzo è da parte dei privati, i residui di adesivo liquido vengono in genere raccolti nelle pattumiere e sono spesso smaltiti insieme agli altri rifiuti domestici. La quantità è però in questo caso esigua. Per gli utilizzatori professoniali e industriali, lo smaltimento deve avvenire in ottemperanza ai cosiddetti codici rifiuti (riportati sulle schede di sicurezza) che indicano come il rifiuto deve essere smaltito. I residui di adesivo sono generalmente smaltiti in discarica o inceneriti. In quest'ultimo caso, non è prevista alcuna contaminazione dell'aria prodotta dagli impianti di incenerimento. L'energia utilizzata nella produzione di adesivi può essere, quindi, in parte recuperata nella fase di smaltimento.

4.2.4 Prospettive

Gli adesivi, nel complesso, non rappresentano un grosso problema ambientale. Ciononostante, i residui polimerizzati non riciclabili, l'adesivo in eccesso risultante dalle applicazioni sono rifiuti. Questi materiali non solo devono essere smaltiti ma rappresentano anche un inutile spreco di materiali e risorse. Il principio della formula "totalmente riciclabile", verrà reso possibile dai giunti incollati ristaccabili e rivestirà un'importanza non trascurabile per il futuro. Oltre alle tecnologie di separazione dei materiali incollati, un'altra sfida della tecnologia dell'incollaggio sarà l'ottimizzazione dei processi produttivi e applicativi in un'ottica di rispetto delle risorse (fonti rinnovabili). Sarà inoltre necessario introdurre nella progettazione di adesivi del futuro l'idea che l'adesivo da utilizzare per la produzione di un componente dovrà essere perfettamente adattato alle necessità del processo di riciclaggio al termine del suo ciclo di vita.

5 Esperimenti

Esperimento 1: La maggior parte degli adesivi sono costituiti da materie prime organiche (rivelazione della presenza di carbonio)

Apparecchiatura: occhiali di sicurezza, provette, gorgogliatore con acqua di calce, pinze per provetta, spatola, becco Bunsen.

Sostanze chimiche/materiali: Campioni di adesivo come: adesivo per legno, es.: Vinavil®; adesivo per carta da parati, es.: Metylan®; adesivo termofusibile, es.: cartucce Pattex®; ossido di rame (II); acqua di calce.

Avvertenze di sicurezza: Non usare adesivi contenenti solventi sulla cui etichetta è riportata una "F" "facilmente infiammabile"! Assicurarsi che ci sia una buona ventilazione nel luogo di lavoro! Non inalare i vapori! I vapori prodotti possono infiammarsi! Indossare occhiali di sicurezza!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

I campioni di adesivo da testare vengono immessi in ciascuna provetta fino all'altezza di 1/2 cm. L'adesivo viene riscaldato intensamente con la fiamma del becco Bunsen. Notare la formazione di residui carboniosi.

Ulteriore esperimento: Mescolare l'adesivo solido con ossido di rame (II) e immettere questa miscela in una provetta. Riscaldare intensamente, quindi far gorgogliare i vapori liberatisi (anidride carbonica, CO_2) in acqua di calce (soluzione satura di $Ca(OH)_2$ in acqua). Notare l'intorbidamento dovuto a formazione di carbonato di calcio ($CaCO_3$) insolubile. **Nota:** Fare attenzione che durante il raffreddamento l'acqua di calce non venga risucchiata nella provetta di combustione. Prima togliere l'acqua di calce, poi interrompere il riscaldamento.

Esperimento 2: Gli adesivi sono costituiti da macromolecole (effetto Tyndall)

Apparecchiatura: 2 bicchieri di vetro (250 ml, alti), due bacchette di vetro, torcia, 1 foglio di cartoncino nero, forbici, spatola.

Sostanze chimiche/materiali: adesivo in emulsione acquosa es.: Vinavil®; adesivo multiuso Pritt® stick; adesivo per carta da parati, es.: Metylan® ; acqua.

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Riempire un bicchiere di vetro con l'acqua fino a circa 1 cm dall'orlo. Aggiungere quindi 5 punte di spatola di adesivo per carta da parati e agitare con cura. Lasciare sciogliere il tutto per alcuni minuti. Arrotolare il cartoncino a forma di imbuto e incollarlo con l'adesivo multiuso lasciando un'apertura di circa 1 cm di diametro. Oscurare la stanza e illuminare con la torcia l'apertura dell'imbuto. Posizionare il bicchiere di vetro con l'adesivo per carta da parati sotto il fascio luminoso della torcia. Notare la diffrazione del raggio luminoso.

Come prova in bianco, l'esperimento viene ripetuto con un bicchiere pieno d'acqua.

Esperimento 3: Come agiscono gli adesivi (principio di adesione)

Apparecchiatura: 2 lastre di vetro liscio molato (spessore circa 1,0 cm) ciascuna con un manico posto al centro della lastra, due lastre di vetro con superficie ruvida, bicchiere di vetro (250 ml), pipetta.

Sostanze chimiche/materiali: acqua, olio.

Nota: Le superfici delle lastre di vetro non devono essere toccate con le dita o le mani. Le superfici non devono essere contaminate!

Procedura: Il bicchiere di vetro viene riempito di acqua. L'intera superficie di una lastra liscia viene bagnata con acqua con la pipetta. La seconda lastra liscia viene appoggiata sopra con cura. Ora cercare di separare le lastre tirando in direzione verticale. Notare lo sforzo necessario.

Esperimento 3a: Una delle lastre lisce viene ricoperta di olio. L'altra lastra liscia viene bagnata con acqua. Unire con cura le lastre. Ora cercare di separare le lastre tirando in direzione verticale. Notare lo sforzo necessario.

Esperimento 3b: Ripetere l'esperimento 3 utilizzando lastre di vetro ruvido. Notare lo sforzo necessario.

Esperimento 4: Bagnabilità delle superfici dei materiali (tensione superficiale)

Apparecchiatura: bicchiere di vetro (250 ml), pipetta, lamiera di alluminio (superficie non sgrassata), lamiera di alluminio (superficie sgrassata e irruvidita), foglio in PVC (polivinilcloruro), foglio in PE.

Sostanze chimiche/materiali: Acqua.

Nota: Non toccare le superfici con le dita o le mani.

Procedura: Il bicchiere di vetro viene riempito con acqua. Con la pipetta fare sgocciolare con cautela l'acqua sulle superfici dei diversi materiali. Notare la forma delle gocce d'acqua sulle superfici.

Esperimento 5: Produzione di un adesivo a base di caseina

Apparecchiatura: Occhiali di sicurezza, guanti protettivi, bicchiere di vetro (250 ml), bacchetta di vetro, bilancia, cilindro graduato, mollette per panni, pennello.

Sostanze chimiche/materiali: Caseina (caseina acida), soluzione di idrossido di sodio diluita (circa al 4%), pezzo di legno compensato o simile (circa 10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm).

Avvertenze di sicurezza: L'idrossido di sodio provoca ustioni! Indossare occhiali di sicurezza e guanti protettivi!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Versare nel bicchiere di vetro 25 ml di idrossido di sodio diluito e sciogliere 10 g di caseina mescolando. Lasciare rigonfiare il tutto per qualche minuto! Prima dell'applicazione, l'adesivo può

essere reso più fluido aggiungendo acqua, se necessario. Eseguire le prove di incollaggio utilizzando pezzi di legno. I punti incollati possono essere fissati con mollette per panni finché l'adesivo non ha fatto presa.

Esperimento 6: Produzione di adesivo d'amido (I)

Apparecchiatura: 2 bicchieri di vetro (250 ml, bassi), bacchetta di vetro, becco Bunsen, cavalletto, reticella metallica, cilindro graduato, spatola, pennello, bilancia.

Sostanze chimiche/materiali: Amido di mais o simili, acido salicilico, carta da scrivere.

Procedura: Stemperare 20 g di amido in 30 ml d'acqua. Riscaldare 120 ml d'acqua fino al punto di ebollizione ed aggiungere lentamente l'impasto precedentemente preparato, mescolando fino a completa dissoluzione. Aggiungere con la spatola una punta di acido salicilico. Ora si possono eseguire diversi esperimenti utilizzando la carta da scrivere.

Esperimento 7: Produzione di adesivo d'amido (II)

Apparecchiatura: Occhiali di sicurezza, guanti protettivi, bicchiere di vetro (250 ml), bacchetta in vetro, cilindro graduato, bilancia, pennello.

Sostanze chimiche/materiali: Soluzione di idrossido di sodio (circa 7%), acido cloridrico (10%), polvere d'amido, acqua, cartina indicatore universale di pH, carta da scrivere, adesivo per carta, es.: Pritt® stick.

Avvertenze di sicurezza: Gli acidi e le basi possono provocare ustioni! Indossare occhiali di sicurezza e guanti protettivi!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Innanzitutto, preparare una sospensione con amido al 20% (20 g in 80 ml d'acqua). Aggiungere l'idrossido di sodio diluito agitando fino a ottenere una soluzione viscosa. Neutralizzare (fino a pH 7/8) con acido cloridrico, controllando con la cartina indicatore universale di pH. Impiegare l'adesivo d'amido per eseguire prove di incollaggio sulla carta. Ripetere queste prove con adesivi prodotti industrialmente (es.: stick indicato sopra). Confrontare i dati ottenuti.

Esperimento 8: Produzione di una soluzione di metilcellulosa

Apparecchiatura: 3 bicchieri di vetro (100 ml), 3 bacchette in vetro, spatola.

Sostanze chimiche/materiali: Metilcellulosa, es.: Metylan® , acqua, acetone, acetato di etile.

Avvertenze di sicurezza: L'acetone e l'acetato di etile sono altamente infiammabili! Spegnere tutte le fiamme!
Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Riempire un bicchiere con acqua per 1/3. Aggiungere 5 punte di spatola di metilcellulosa e agitare accuratamente la miscela. Attendere 15-20 minuti. Ripetere quindi l'esperimento con gli altri solventi. Notare la diversa solubilità.

Esperimento 9: Adesivi termofusibili (proprietà e applicazione)

Apparecchiatura: Pistola per colla termofusibile, es.: Pattex® , termometro (scala fino a 250° C).

Sostanze chimiche/materiali: pellicola d'alluminio sottile, pezzi di legno (circa 10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm), cartuccia di adesivo termofusibile,.es.: Pattex®.

Avvertenze di sicurezza: Non toccare l'adesivo liquido con le dita! Pericolo di ustione!

Procedura: Rivestire con cura il bulbo del termometro con la pellicola di alluminio (per proteggere il termometro). Inserire le cartucce di adesivo termofusibile nelle pistole per la fusione. **Nota:** Seguire le istruzioni per l'esecuzione!

Misurare la temperatura dell'adesivo dopo la fuoriuscita dal beccuccio. L'adesivo liquido viene applicato su un pezzo di legno che viene congiunto a un altro pezzo di legno. In sequenza, applicare diverse quantità di adesivo sui pezzi di legno e tenere sotto controllo il processo di raffreddamento con un termometro. Se occorre, riscaldare di nuovo l'adesivo per un breve intervallo in modo da potere togliere il termometro dalla massa fusa. Provare con la mano la forza dei legami (prova di separazione).

Esperimento 9a: applicare l'adesivo termofusibile liquido sui pezzi di legno e rispettare intervalli di attesa di 20, 60, 90, 120 secondi prima di congiungere gli altri pezzi di legno. Dopo circa 30 minuti provare la tenuta dei legami con le mani.

Esperimento 10: Gli adesivi possono contenere solventi organici

Apparecchiatura: vetro d'orologio, provetta, pinza per provetta, becco Bunsen.

Sostanze chimiche/materiali: adesivo contenente solventi, es.: Pattex® o Bostik®.

Avvertenze di sicurezza: Assicurarsi che ci sia una buona ventilazione nel luogo di lavoro! Lavorare con una cappa da laboratorio!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

a) Versare un po' di adesivo contenente solventi (circa 3 g.) sul vetro d'orologio tenendo esposto quest'ultimo, con l'ausilio di una pinza, alla fiamma prodotta col becco Bunsen, al fine di accendere l'adesivo.

b) Versare un po' di adesivo (circa 3 g) nella provetta tenendo esposta quest'ultima alla fiamma prodotta con il becco Bunsen per riscaldarla delicatamente. Lo scopo è quello di cercare di accendere i vapori che fuoriescono.

Esperimento 11: Materie plastiche disciolte come colle

Apparecchiatura: 4 provette, portaprovette, 4 etichette piccole, matita o simile, 4 tappi, 2 lastre di vetro, coltello o pinze, pennello.

Sostanze chimiche/materiali: polistirolo (PS), polimetilmetacrilato (PMMA), acetone o acetato di butile.

Avvertenze di sicurezza: L'acetone e l'acetato di butile sono altamente infiammabili! Spegnere tutte le fiamme! Effettuare l'esperimento sotto una cappa da laboratorio!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro.

1. Produzione della colla
Versare solvente in ognuna delle quattro provette fino a circa 2 cm d'altezza. Aggiungere circa 3 pezzi di plastica grandi come un pisello in ciascuna provetta. Due provette vengono impiegate per il polistirolo, le altre due per il polimetilmetacrilato. Attaccare le relative etichette. Chiuderle con i tappi fino al giorno successivo. Agitarle un poco e, se necessario, diluirle con il relativo solvente. Versare i due diversi adesivi contenuti in due delle provette sulle lastre di vetro e lasciare evaporare il solvente nella cappa da laboratorio. Tenere le altre due provette di riserva per la fase successiva.

2. Incollaggio
Staccare dalle lastre di vetro i film di plastica rimasti dopo l'evaporazione del solvente , tagliarli a pezzi e incollarli con l'adesivo tenuto di riserva.
Prima di eliminarlo, versare l'adesivo in eccedenza sulle lastre di vetro e fare evaporare il solvente nella cappa da laboratorio.

Esperimento 12: Produzione di un semplice adesivo multiuso ("attaccatutto")

Apparecchiatura: bicchiere di vetro (100 ml), bacchetta in vetro, bilancia, cilindro graduato.

Sostanze chimiche/materiali: acetato di polivinile (PVAC), acetato di etile, carta, cartone, materiali di scarto:
pezzi di plastica, circa 10 cm x 2 cm x 0,08 cm
pezzi di legno, circa 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm
pezzi di metallo, circa 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm

Avvertenze di sicurezza: L'acetato di etile è altamente infiammabile! Spegnere tutte le fiamme!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Versare 30 ml di acetato di etile nel bicchiere di vetro e discioglierci 8 g di acetato di polivinile mescolando. Può essere necessario, prima di proseguire, lasciare rigonfiare il tutto per un certo tempo. Condurre l'esperimento di incollaggio con vari materiali.

Esperimento 13: Rivelazione dell'acetato di polivinile nell'adesivo per legno

Apparecchiatura: occhiali di sicurezza, 3 provette, pinza per provetta, portaprovette, becco Bunsen, spatola, granuli ebollitori.

Sostanze chimiche/materiali: adesivo per legno Vinavil®, polvere di acetato di polivinile (PVAC), soluzione diluita di idrossido di sodio (circa 1%), cloruro di ferro (III), acqua distillata.

Avvertenze di sicurezza: L'idrossido di sodio provoca ustioni! Indossare occhiali di sicurezza! Rischio di ustione! Utilizzare granuli ebollitori per evitare la formazione di schizzi!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Riempire la prima provetta per circa 1/3 con acqua distillata. Aggiungere una punta di spatola di adesivo per legno e scioglierla delicatamente mescolandola. Aggiungere con la spatola una punta di cloruro di ferro (III) e agitare ancora la miscela per un breve intervallo.

Riempire la seconda provetta per circa 1/3 con la soluzione diluita di idrossido di sodio. Aggiungere con la spatola l'adesivo per legno e i granuli ebollitori. Agitare delicatamente la miscela e riscaldarla per un breve intervallo con la fiamma prodotta con il becco Bunsen. Dopo che si è raffreddata, miscelarla con una puntina di cloruro di ferro (III).

Ripetere l'esperimento con l'acetato di polivinile in polvere. Notare le differenze di colore.

Esperimento 14: Preparazione e prove con l'adesivo a base di alcool polivinilico

Apparecchiatura: bicchiere di vetro (250 ml), bacchetta in vetro, cavalletto, becco Bunsen, reticella metallica, termometro (fino a 100° C), cilindro graduato, bilancia, pennello.

Sostanze chimiche/materiali: alcool polivinilico (PVA), nastri di carta, acqua.

Procedura: riscaldare 150 ml di acqua nel bicchiere a 85° C. Aggiungere mescolando circa 15 g di alcool polivinilico. Applicare l'adesivo ottenuto in strato sottile sulla carta ed eseguire diverse prove.

Esperimento 15: Meccanismo e proprietà dei cianoacrilati

Apparecchiatura: Coltello.

Sostanze chimiche/materiali: cianoacrilati, es.: Attack® Loctite® , pezzettini di plastica piatta (PVC*, PMMA* o ABS*) di circa 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm, pezzi di gomma, es.: ritagli di cordoncino di gomma, piccole lastre metalliche (Al, Fe) non sgrassate di circa 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm, piccole lastre metalliche (Al, Fe) sgrassate (dimensioni come sopra), acetone.

Avvertenze di sicurezza: Fare attenzione quando si utilizzano i cianoacrilati! La pelle può incollarsi! Seguire le istruzioni riportate sulla confezione! Tenere l'acetone a portata di mano! Assicurarsi che ci sia una buona ventilazione nel luogo di lavoro! Nota: Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Applicare 1 goccia di cianoacrilato su un pezzo di plastica e attaccare un altro pezzo di plastica premendo saldamente le due parti. Ripetere l'operazione con i pezzi di gomma e di metallo.

Provare la forza dei giunti: in particolare osservare la differenza tra i pezzi metallici sgrassati e quelli non sgrassati. Provare la forza di incollaggio dopo 1, 3, 10 e 30 minuti e dopo 24 ore.

* PVC = cloruro di polivinile
PMMA = polimetilmetacrilato (plexiglas®)
ABS = copolimero acrilonitrile-butadiene-stirene

Esperimento 16: Meccanismo e applicazione di adesivi epossidici

Apparecchiatura: occhiali di sicurezza, guanti protettivi, bacinella, cartone o foglio spesso di polietilene, bacchetta , mollette per panni.

Sostanze chimiche/materiali: adesivo epossidico, es.: Pattex® Saldatutto (parte A e B), pezzettini di plastica (ma non polietilene o polipropilene!) di circa 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm, piccole lastre metalliche di circa 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm, carta vetrata, acetone (per sgrassare).

Avvertenze di sicurezza: Seguire le istruzioni del produttore! Evitare il contatto con la pelle! Assicurarsi che ci sia una buona ventilazione nel luogo di lavoro! Non inalare i vapori! L'acetone è altamente infiammabile! Spegnere tutte le fiamme! Nota: Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Innanzitutto, irruvidire e sgrassare le superfici dei materiali. Quindi miscelare con cura le quantità indicate sulla confezione di resina epossidica e indurente nella bacinella appoggiata sul cartone o sul foglio spesso di polietilene. Applicare uno strato sottile di adesivo ai substrati e unirli per una lunghezza di sovrapposizione di 1 o 2 cm. Fissare le superfici incollate nella loro posizione usando, per esempio, le mollette per panni. Rispettare i tempi di polimerizzazione! Dopo la polimerizzazione provare a mano la forza dei legami. **Nota:** Proteggere le mani con i guanti durante tutto l'esperimento.

Esperimento 17: Preparazione e prova degli adesivi poliuretanici

Apparecchiatura: occhiali di sicurezza, guanti protettivi, bicchiere di carta, bacchetta in vetro, pellicola di alluminio o di polietilene, bilancia, cronometro, mollette per panni**.**

Sostanze chimiche/materiali: adesivo poliuretanico bicomponente es.: Pattex® PU Duo (parte A e B), pezzettini di plastica piatta con superficie ruvida (non polietilene o polipropilene!) di circa 10 cm x 2,5 cm x 0,08 cm, carta vetrata.
Avvertenze di sicurezza: gli adesivi poliuretanici bicomponenti contengono diisocianati. Seguire le istruzioni del produttore! Evitare il contatto con gli occhi, le mucose e la pelle! Tenere fuori dalla portata dei bambini. In caso di contatto con gli occhi, lavare abbondantemente con acqua e rivolgersi a un medico. In caso di contatto con la pelle, lavare con abbondante acqua. Nota: Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Miscelare la resina e l'indurente nelle proporzioni indicate (2:1) sull'apposita superficie (alluminio o polietilene) e agitare con cura. Applicare uno strato sottile di adesivo sulle superfici dei due pezzi di plastica, unirli (lunghezza di sovrapposizione: 1 o 2 cm) e premere saldamente per un breve intervallo. Se necessario, utilizzare le mollette per panni per tenere in posizione i pezzi. Lasciare polimerizzare l'adesivo. La durata limite di lavorabilità della miscela di resina/indurente è di 8-10 minuti. I tempi di polimerizzazione sono di circa 5 ore. Dopo la polimerizzazione cercare di separare a mano i substrati. **Nota:** Proteggere le mani con i guanti durante tutto l'esperimento.

Esperimento 18: Adesivo di resina melamminica

Apparecchiatura: occhiali di sicurezza, guanti protettivi, provetta, pinza per provetta, portaprovette, becco Bunsen, minipressa o ferro da stiro , stufa, cilindro graduato, bilancia, bacchetta in vetro.

Sostanze chimiche/materiali: melammina (2,4,6-triammino-1,3,5-triazina), soluzione di formaldeide (35%), soluzione diluita di idrossido di sodio (circa 4%), acido solforico diluito (circa 2%), cartina indicatore universale di pH, listelli di impiallacciatura di legno.

Avvertenze di sicurezza: Indossare occhiali di sicurezza e guanti protettivi quando si manipola l'idrossido di sodio, l'acido solforico e la formaldeide! La formaldeide è presumibilmente cancerogena! Operare sotto la cappa da laboratorio!
Nota**:** Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Versare 5 ml della soluzione leggermente alcalina di formaldeide (pH 7-8) in una provetta e aggiungere 2,5 g. di melammina. Riscaldare piano sulla fiamma fino a sciogliere la melammina e ad ottenere una miscela leggermente viscosa. Quando si è raffreddata, la miscela viene acidificata con l'acido solforico diluito (pH 6 circa) e riscaldata di nuovo per un breve intervallo fino a ottenere una miscela viscosa. Rivestire i listelli di impiallacciatura con la colla, unirli, posizionarli nella pressa e pressarli accuratamente. Fare polimerizzare l'adesivo a 130° C nella stufa. La pressatura e la polimerizzazione possono essere eseguite utilizzando anche un ferro da stiro caldo (utilizzare l'impostazione per il lino).

Esperimento 19: Adesivo di resina ureica

Apparecchiatura: occhiali di sicurezza, guanti di sicurezza, cilindro graduato, bilancia, provetta, pinza per provetta, portaprovette, bacchetta in vetro, pennello, pipetta, becco Bunsen, granuli ebollitori, minipressa o ferro da stiro, bicchiere di vetro (400 o 500 ml), stufa.

Sostanze chimiche/materiali: urea, soluzione di formaldeide (35%), soluzione di idrossido di sodio diluita (circa 4%), soluzione satura di cloruro d'ammonio), listelli di impiallacciatura di legno, pezzettini di legno piatti.

Avvertenze di sicurezza: Indossare occhiali di sicurezza e guanti protettivi quando si manipolano le soluzioni di idrossido di sodio e formaldeide! La formaldeide è presumibilmente cancerogena! Operare sotto una cappa da laboratorio! Fare attenzione quando si effettua il riscaldamento! Possibile ustione! Utilizzare i granuli ebollitori per evitare la formazione di schizzi! Nota: Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Versare 3 g di urea nella provetta e aggiungere 3 ml di soluzione a base di formaldeide. Sciogliere l'urea per riscaldamento. Aggiungere 1 o 2 granuli ebollitori e circa 15-20 gocce di soluzione di idrossido di sodio diluita. Riscaldare piano la miscela e, al contempo, mescolare fino a ottenere un liquido viscoso. Rivestire di adesivo un listello di impiallacciatura. Immergere un altro pezzo di legno nella soluzione di cloruro di ammonio. Mettere i due substrati nella pressa con i lati da incollare congiunti e attivare la pressa. Lasciare polimerizzare l'adesivo a 120°-130° C nella stufa. La pressatura e la polimerizzazione possono essere eseguite anche utilizzando un ferro da stiro caldo (utilizzare l'impostazione per il lino).

Esperimento 20: Determinazione del "tempo aperto" degli adesivi a contatto

Apparecchiatura: spatola dentata fine, forbici, riga, matita, cronometro, peso (1 Kg).

Materiali: adesivo a contatto, es.: Pattex®, Bostik®, cartoncino da disegno, pezzettini di gomma piatta.

Avvertenze di sicurezza: Spegnere tutte le fiamme! Aerare accuratamente il luogo di lavoro!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Con la riga e la matita dividere il cartoncino da disegno in strisce da 5 mm di larghezza. Applicare un sottile strato di adesivo (spessore circa 300 µm) con la spatola dentata fine. Dopo l'evaporazione del solvente (10-15 minuti), togliere una striscia alla volta a intervalli di 15 minuti e dimezzarla. Sovrapporre le due metà e porre per 10 secondi un peso di 1 Kg sul giunto. Cercare di separare le due metà. Il "tempo aperto" dell'adesivo a contatto termina non appena è possibile separare le metà senza lacerare il materiale.

Esperimento 21: Prove per determinare la forza iniziale degli adesivi a contatto

Apparecchiatura: spatola dentata fine, rullo per carta da parati, scalpello, morsa.

Materiali: pannello laminato di circa 12 cm x 12 cm, truciolare di circa 12 cm x 12 cm, le superfici devono essere prive di polvere e grasso.
Adesivo a contatto, es.: Pattex®t, Pattex® trasparente, Bostik®, adesivo multiuso ("attaccatutto").

Avvertenze di sicurezza: Spegnere tutte le fiamme! Aerare accuratamente il luogo di lavoro! Fare attenzione quando si utilizza lo scalpello! Nota: Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Applicare l'adesivo a contatto con una spatola dentata sul rovescio del pannello laminato e del truciolare. Lasciare all'aria per 15 minuti, quindi unire i substrati e premerli passando il rullo sul pannello laminato incollato, esercitando la pressione più alta possibile. Le parti incollate vengono inserite in una morsa. Cercare di separare le parti con l'ausilio dello scalpello. Ripetere l'esperimento con un adesivo multiuso ("attaccatutto").

Esperimento 22: Forza degli adesivi in dispersione acquosa per legno in funzione del tempo di polimerizzazione

Apparecchiatura: pennello, mollette per panni, riga, cronometro, dispositivo per prove di trazione (dinamometro).

Materiali: adesivo per legno, es.: Vinavil®, adesivo multiuso ("attaccatutto"), pezzettini di legno piatti di circa 10 cm x 2,5 cm x 0,5 cm.

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Applicare l'adesivo per legno su tre pezzettini di legno nei punti di incollaggio previsti (lunghezza di sovrapposizione: 1 o 2 cm) e quindi unirli ad altri pezzettini di legno. Dopo questa operazione tenerli in pressione con delle mollette per panni. Misurare, a mano e con un dispositivo di trazione (dinamometro) dopo 10-20-30 minuti, dopo 3 ore e dopo 1 giorno la forza di ciascun incollaggio. Ripetere l'esperimento con un adesivo multiuso ("attaccatutto") e confrontare i risultati ottenuti.

Esperimento 23: Adesivi reattivi (tempo limite di lavorabilità, calore di reazione)

Apparecchiatura: termometro (fino a 250° C), bacchetta in vetro, cronometro, bacinella, guanti.

Materiali: Pattex® Saldatutto (parte A e B), pellicola di alluminio, salviette di carta.

Avvertenze di sicurezza: Seguire le istruzioni del produttore e i simboli di pericolo riportati sulla confezione! Eseguire l'esperimento solo con piccole quantità di adesivo a causa dell'elevata velocità di reazione ad alte temperature! **Nota:** Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Avvolgere la punta del termometro con la pellicola di alluminio. Versare nella bacinella una confezione di adesivo (parte A e B) (Pattex® Saldatutto). Agitare con cura fino a ottenere una miscela omogenea. Inserire il termometro nella miscela e, dopo circa 1 minuto, effettuare la lettura. Per stabilire per quanto tempo la miscela può essere utilizzata dopo la miscelazione, inserire la bacchetta in vetro nella miscela a intervalli di 1 minuto e quindi toglierla. Tra un'operazione e l'altra pulire la bacchetta con una salvietta di carta. Prima che la miscela si indurisca misurare di nuovo la temperatura (dopo circa 10 minuti).

Esperimento 24: Fissaggio delle viti con l'adesivo anaerobico

Apparecchiatura: occhiali di sicurezza, guanti protettivi.

Sostanze chimiche/materiali: adesivo anaerobico (forza media), es.: Loctite® Professional frenante media resistenza, viti e bulloni di acciaio di diversa misura, viti e bulloni di acciaio inossidabile di diversa misura, chiave dinamometrica, acetato di etile (per sgrassare).

Avvertenze di sicurezza: Seguire le istruzioni del produttore! Evitare il contatto con la pelle! Aerare accuratamente il luogo di lavoro! I vapori sono infiammabili! Spegnere tutte le fiamme! **Nota:** Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Sgrassare innanzitutto le viti e i bulloni con l'acetato di etile. Versare 2 o 3 gocce di adesivo nella filettatura e avvitare i rispettivi bulloni di alcuni giri. Trascorsi 5 minuti, verificare manualmente con cura, a intervalli regolari, se l'adesivo ha iniziato a fissare il bullone. Lasciare polimerizzare almeno una di ciascuna combinazione di colla/materiale per 24 ore e controllare il legame utilizzando l'apposita chiave dinamometrica.

Esperimento 25: Adesivi poliuretanici monocomponenti (igroindurenti) che polimerizzano per effetto dell'umidità

Apparecchiatura: Occhiali di sicurezza, guanti protettivi, superficie di plastica, coltello.

Sostanze chimiche/materiali: adesivo poliuretanico monocomponente che polimerizza per effetto dell'umidità,es.: Pattex® Construction, Pattex® PU Universal, Sista® PU 198, pistola per cartuccia (manuale), superficie di plastica (es.: 50 x 50 cm).

Avvertenze di sicurezza: Seguire le istruzioni del produttore! Evitare il contatto con la pelle! Aerare accuratamente il luogo di lavoro! **Nota:** Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Porre sulla superficie 4 cordoli di adesivo (1 cm di altezza, circa 2 cm. di larghezza) e ciascuno con una lunghezza di circa 20 cm. In fase di polimerizzazione, tagliare ad intervalli di tempo regolari i cordoli con un coltello al fine di stabilire il tempo di formazione della pelle e l'avanzamento della polimerizzazione. Annotare la temperatura ambiente e la relativa umidità dell'aria.

Esperimento 26: Siliconi monocomponenti che polimerizzano per effetto dell'umidità

Apparecchiatura: Occhiali di sicurezza, guanti protettivi, lamiere di acciaio, lamiere di acciaio inossidabile, lastre di vetro o plastica trasparente, superficie di plastica.

Sostanze chimiche/materiali: silicone monocomponente (a reticolazione acetica, es.: Mapesil® AC, Silicon 5®, Sista Silicon 5®). Silicone monocomponente (a reticolazione neutra, es.: Sista Silicon 5® Neutro Inodoro; Mapesil® BM), lamiere di acciaio (circa 20 x 100 mm), lamiere di acciaio inossidabile (circa 20 x 100 mm), lastre di vetro o plastica trasparente (circa 200 x 100 mm), acetato butilico (per sgrassare/pulire), inchiostri di prova.

Avvertenze di sicurezza: Seguire le istruzioni del produttore! Evitare il contatto con la pelle! Aerare accuratamente il luogo di lavoro! Nota: Non eseguire l'esperimento con alunni di età inferiore ai 12 anni!

Procedura: Trascrivere le indicazioni dei simboli di pericolo e le avvertenze sui rischi (Frasi R) nonché le avvertenze di sicurezza (Frasi S) dalla confezione alle schede di lavoro!

Applicare un sottile cordolo di silicone che libera acido acetico sulle due lamiere di acciaio e di acciaio inossidabile e unirle alle lastre trasparenti. Applicare il silicone alle altre lamiere inossidabili e lasciare polimerizzare all'aria. Con l'inchiostro di prova verificare la capacità di rivestire il silicone polimerizzato e annotare i risultati ottenuti. Ripetere l'esperimento con il silicone ad articolazione neutra.

Informazioni sugli esperimenti

Esperimento 1: Il carbonio presente nella maggior parte degli adesivi viene liberato sotto forma di anidride carbonica e può essere individuato dall'intorbidamento dell'acqua di calce (formazione di carbonato di calcio altamente insolubile). Ciò dimostra che gli adesivi contengono composti organici.

Esperimento 2: Quando gli adesivi vengono dispersi nei solventi (in questo caso l'acqua), le macromolecole possono essere individuate con la diffrazione della luce. Questo fenomeno, noto

anche con il nome di Effetto Tyndall, si verifica solo con le macromolecole che hanno un peso molecolare superiore a 104.

Esperimento 3: Le lastre di vetro lisce possono essere separate solo esercitando molta forza. Sono "incollate" con l'acqua come "adesivo". L'acqua ovviamente non contiene macromolecole. Ci sono forze di attrazione considerevoli tra le molecole di acqua (cfr. esperimento 4: Tensione superficiale) anche se hanno soltanto una forza limitata. La libera movimentazione delle piccole molecole d'acqua indica che le due lastre possono essere mosse con una certa facilità in una direzione parallela al piano di contatto e possono, infine, essere separate.

Esperimento 4: Tra tutti i materiali, il polietilene possiede l'energia superficiale più bassa e difficilmente aderisce senza pretrattamento.

Esperimento 5: La caseina si rigonfia velocemente in una soluzione alcalina. Si forma una massa viscosa: la colla. Aggiungendo, per esempio, il solfato di alluminio, è possibile aumentare la resistenza all'acqua dopo asciugamento.

Esperimento 6: L'amido si rigonfia nell'acqua calda. Ne risulta un adesivo che si addensa ulteriormente quando si raffredda e deve essere eventualmente diluito con l'acqua. L'acido salicilico viene utilizzato come conservante.

Esperimento 7: Un effetto simile è stato rilevato nell'esperimento 6. Un eccesso di alcali può, come la temperatura nell'esperimento 6, rigonfiare l'amido fino a formare una salda omogenea. La miscela deve essere, tuttavia, successivamente neutralizzata per non influire negativamente sul substrato.

Esperimento 8: La metilcellulosa è un etere. Viene prodotta con la parziale metilazione dei gruppi idrossile (OH) della cellulosa. La metilcellulosa si scioglie in acqua ma non negli altri solventi organici qui utilizzati.

Esperimento 9: Gli adesivi termofusibili sono costituiti da polimeri termoplastici che diventano liquidi se scaldati e di nuovo solidi quando si raffreddano, senza subire alcuna alterazione chimica. Trascorso il "tempo aperto" la forza di adesione diminuisce fino a diventare nulla (9 a).

Esperimento 10: Innanzi tutto brucia il solvente volatile (fiamma blu-giallastra) e poi la materia prima (fiamma gialla, fuligginosa).

Esperimento 11: Evaporando il solvente, la relativa plastica si congiunge. L'adesivo aderisce.

Esperimento 12: L'acetato di polivinile è una materia prima di base per gli adesivi multiuso prodotti industrialmente. Le miscele di acetato di etile, acetone e talvolta etanolo vengono normalmente usate per sciogliere l'acetato di polivinile.

Esperimento 13: Il colore marrone-beige dell'adesivo per legno PVAC e del complesso esa-aquo-ferro da stiro (III) è visibile dalla provetta. Questo esperimento funge da controllo. L'acetato di polivinile viene saponificato con la soluzione di idrossido di sodio. Si sviluppa un'intensa colorazione marrone-rossastra nelle provette 2 e 3 in quanto è presente il complesso acetato - ferro da stiro (III).

Esperimento 14: L'alcool polivinilico è un polimero termoplastico prodotto dalla saponificazione dell'acetato di polivinile.

Esperimento 15: L'indurimento di adesivi cianoacrilati è dovuto alla polimerizzazione che viene innescata dagli ioni di idrossido o dalle sostanze basiche. Occorre qui sottolineare l'importanza di manipolare questi adesivi in modo corretto: evitare il contatto con la pelle, asportare le parti di adesivo

fresco con l'acetone. Togliere l'adesivo polimerizzato con una soluzione di acqua e sapone. Non inalare i vapori.

Esperimento 16: Le resine epossidiche sono prodotte dalla reazione di composti aromatici ossidrilati ed epicloridrina. Si ottiene, così, per poliaddizione un prepolimero viscoso con struttura lineare (componente A). Con l'aggiunta di ammine o di poliammidoammine o di polimercaptani (componente B), le resine vengono reticolate tramite ulteriori reazioni di poliaddizione e quindi induriscono.

Esperimento 17: Anche questo adesivo polimerizza tramite reazione di poliaddizione.

Esperimento 18: L'intera reazione avviene per gradi: la esametilol-melammina si forma come uno dei prodotti intermedi. La pressione e il calore inducono la formazione di ponti di etere (con eliminazione di acqua) e la conseguente condensazione genera una resina melamminica reticolata che indurisce.

Esperimento 19: Anche questa reazione avviene per gradi: prima si formano le metilol-uree. Poi si formano macromolecole di resina ureica reticolate e lineari con eliminazione d'acqua. Il cloruro di ammonio accelera la reazione; il cloruro di ammonio è acido in una soluzione acquosa. Gli ioni di idrogeno catalizzano la fase di polimerizzazione.

Esperimento 23: Si assiste a un aumento di temperatura durante la polimerizzazione, ovvero la reazione è esotermica.

Esperimento 24: Gli adesivi anaerobici polimerizzano a contatto con gli ioni di metallo in assenza di ossigeno. Le viti favoriscono una perfetta reazione di polimerizzazione. La polimerizzazione sull'acciaio inossidabile è più lenta e/o incompleta a causa dello strato superficiale chiuso di ossido di cromo (strato di passivazione). In questo caso non si verifica il necessario contatto con gli ioni di metallo (Fe^{2+}/Fe^{3+}) o si verifica in modo insufficiente. Se necessario, riscaldare (20 minuti / 120°C). Se non è possibile svitare a temperatura ambiente la vite fissata, bisogna riscaldare oltre 200°C e poi staccare (l'adesivo si ammorbidisce).

Esperimento 25: L'umidità nell'aria provoca la conversione dei gruppi terminali di isocianato in gruppi amminici i quali reagiscono con i rimanenti gruppi di isocianato e polimerizzano l'adesivo come un elastomero. La polimerizzazione è anisotropa, ovvero avviene dall'esterno verso l'interno e ciò è dimostrabile tagliando i cordoli di colla. Variando la temperatura e l'umidità dell'aria, è possibile regolare la polimerizzazione e la velocità di polimerizzazione.

Esperimento 26: Il silicone che libera acido acetico provoca la corrosione sulla lamiera di acciaio. Il silicone non è facile da verniciare e rivestire a causa della bassa tensione superficiale.

Glossario

Adesivo monocompomente
Adesivo pronto all'uso (norma UNI EN 923). Gli adesivi monocomponenti non devono essere miscelati prima dell'applicazione e quindi sono forniti in un unico contenitore.

Adesivo bicomponente
Adesivo costituito da due componenti reattivi separati che sono mescolati prima dell'utilizzo (norma UNI EN 923).

Adesione
Condizione in cui due superfici sono tenute insieme da forze di legami interfacciali (norma UNI EN 923).
Insieme di interazioni tra la superficie del substrato e lo strato adesivo. Queste interazioni superficiali sono determinanti per la resistenza del legame, unitamente alle forze interne del legame (coesione).

Applicazione
Fase di impiego di un adesivo durante l'operazione di incollaggio.

Attacco chimico
Tecnica di trattamento superficiale prevalentemente per metalli: i substrati vengono trattati con acidi non ossidanti (acido cloridrico, acido solforico diluito) che provocano l'asportazione di un eventuale strato superficiale esistente e, in alcuni casi, anche dello strato della materia prima di base qualora l'attacco chimico dovesse essere prolungato. La superficie del substrato si irruvidisce e diventa attiva.

Classificazione/identificazione
I metodi di prova prescritti, le procedure descritte, la valutazione dei dati e la classificazione e identificazione del potenziale di pericolo sono imposti dalla legislazione. Nell'Unione Europea, la classificazione e identificazione, le informazioni che devono essere fornite agli utenti i dettagli delle procedure di manipolazione sono stabilite in seno alle Direttive. Molte sostanze sono state classificate dalla normativa UE e devono essere opportunamente contrassegnate. Le Direttive sono recepite dagli Stati Membri e convertite in leggi nazionali. Le sostanze e i preparati che rappresentano un potenziale di pericolo devono recare simboli di pericolo a seconda della gravità e della natura del pericolo *(Figura 66)*.

Figura 66

Inoltre, devono essere riportate le relative avvertenze sui rischi (Frasi R) e le avvertenze di sicurezza (Frasi S) *(Figura 67 A e B).* Schede di sicurezza devono essere predisposte per le sostanze e i preparati pericolosi e devono essere messe a disposizione degli utenti professionali, industriali e nei punti vendita.

Figura 67 A

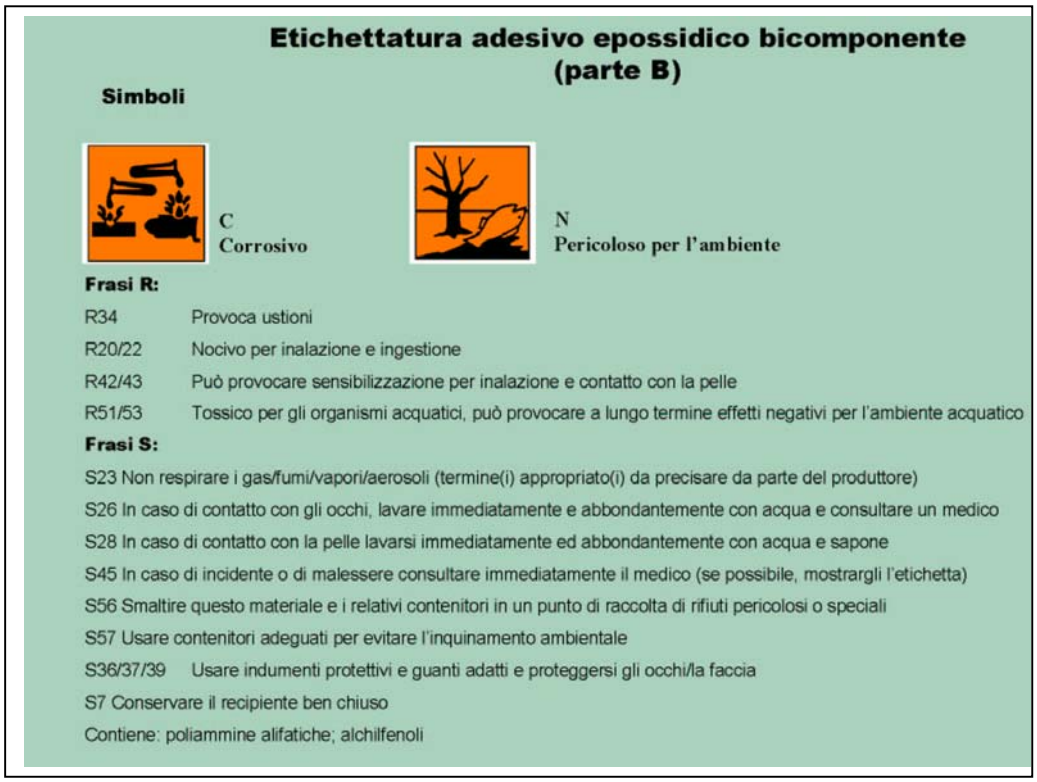


Figura 67 B

Coesione
Condizione in cui le particelle sono tenute insieme da forze di valenza primarie o secondarie (norma UNI EN 923).
Insieme di forze che mantengono l'integrità interna dell'adesivo. La coesione è la forza per cui le molecole dell'adesivo rimangono unite. Queste forze sono forze di attrazione e garantiscono l'adesione meccanica (intreccio) di molecole e catene macromolecolari di polimeri.

Compositi laminati in legno
Vengono incollati diversi strati di legno (compensati). A causa della bassa densità dei singoli strati, possono essere piegati e laminati sotto questa forma. Ciò consente nuovi modelli costruttivi.

Eliminazione di discontinuità
Capacità di un adesivo di riempire spazi vuoti di grandi dimensioni (> 0,2 mm). Una volta completata la polimerizzazione, l'adesivo ha eliminato completamente la discontinuità.

Esposizione
Una sostanza può penetrare nell'organismo per varie vie, tramite ingestione, tramite contatto con la pelle (via cutanea) o le mucose (es.: occhi) e tramite inalazione *(figura 68)*. Il rischio di contatto dipende dalle proprietà chimico-fisiche della sostanza o del preparato oltre che dalle condizioni di lavorazione e applicazione. Il tipo di contatto più comune è quello con l'epidermide. I gas, i vapori (liquidi disciolti nell'aria) e le nebulizzazioni (particelle liquide e solide sospese nell'aria) possono altresì venire a contatto con la pelle tramite l'aria. I gas, i vapori, le particelle liquide e solide (polvere) nell'aria possono essere assorbite anche tramite inalazione.

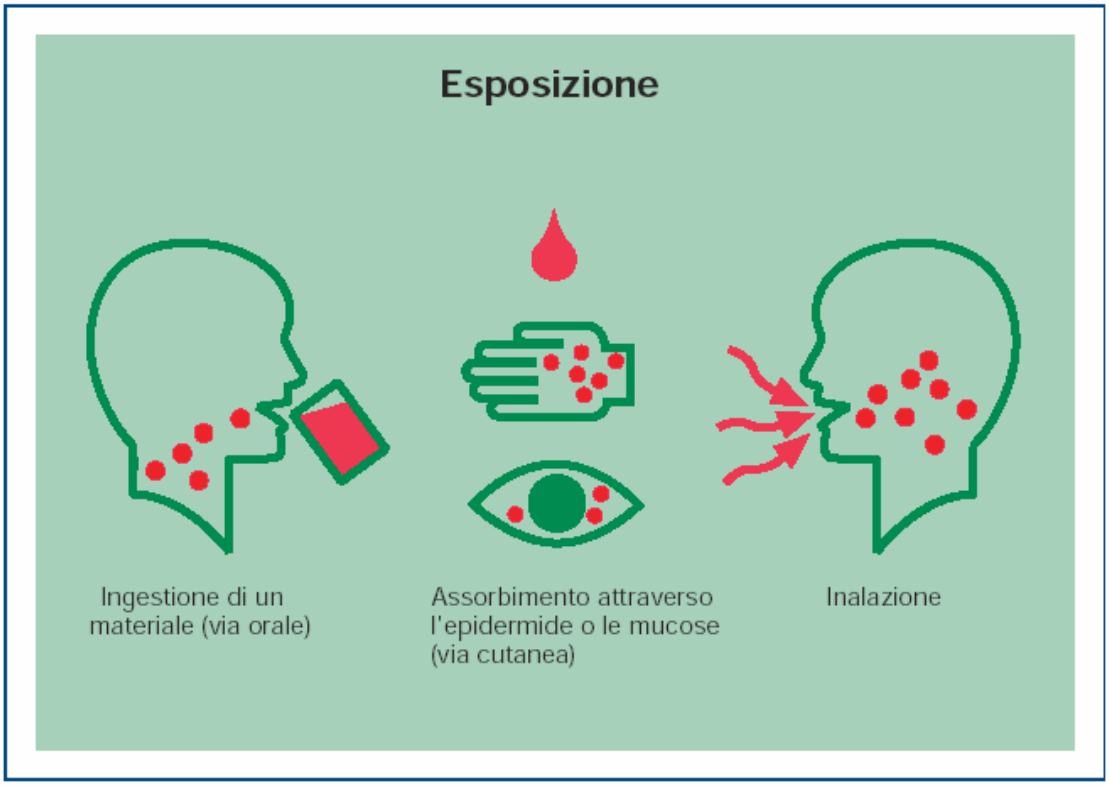


Figura 68

Fluorurazione allo stato gassoso
Metodo di trattamento superficiale per le materie plastiche che migliora la bagnabilità delle materie plastiche e ne attiva le superfici. I substrati sono trattati con una miscela di gas di fluoro/azoto (da circa 0,1 al 5% di fluoro nell'azoto) che consente agli atomi di fluoro di essere inglobati sulla superficie della plastica senza alterare la struttura macromolecolare interna.

Laminazione
Accoppiamento di strati generalmente di grandi dimensioni, di substrati flessibili (es.: lamine, tessuti, film plastici) per mezzo di adesivo allo scopo di formare un laminato.

Metodi di prova
I metodi di prova sono selezionati in funzione delle proprietà del giunto incollato in esame: la forza di adesione iniziale si determina unicamente con prove meccaniche (es.: prova di taglio a trazione, prova di pelatura, prova con cuneo). Se si intende, invece, verificare la stabilità nel tempo del giunto incollato, occorre effettuare l'immagazzinaggio (in condizioni ambiente simulate) seguito da prove meccaniche.

Pericolo potenziale
Le proprietà indesiderate delle sostanze (pericoli potenziali) sono definite in base a prove tossicologiche:
• Tossicità acuta, dose letale (LD50);
• Sintomi di avvelenamento dopo ripetuto assorbimento;
• Proprietà cancerogene;
• Danni genetici / difetti ereditari;
• Ridotta fertilità, disturbi a carico dello sviluppo fetale in gravidanza;
• Irritazioni cutanee, ustioni;
• Irritazione delle membrane, es.: occhi e apparato respiratorio;
• Capacità di provocare allergie (sensibilizzazione) e insorgenza di reazioni allergiche;
• Effetti dannosi per l'ambiente.

Plasma a bassa pressione.
Vedere tecniche con plasma.

Plastificanti
Sostanza non reattiva, incorporata nell'adesivo, per migliorare la flessibilità e la resilienza dell'incollaggio (norma UNI EN 923).
Termine per indicare sostanze inerti allo stato liquido o sostanze solide organiche con una bassa pressione di vapore. Dal punto di vista chimico, spesso si tratta di esteri organici. Interagiscono fisicamente con i polimeri (ma non si verifica una reazione chimica), in ragione soprattutto della loro attitudine a sciogliersi e rigonfiarsi. I plastificanti consentono di modificare le proprietà fisiche dei polimeri: ad esempio il comportamento a bassa temperatura, la lavorabilità, le proprietà elastiche, la durezza e la flessibilità. Il plastificante ideale deve essere inodore, incolore, resistente alla luce, al freddo, al calore, non volatile se possibile, in grado di essere miscelato a polimeri e materiali ausiliari oltre a non essere nocivo. Un'altra qualità dei plastificanti, che merita di essere tenuta in considerazione, è la loro possibilità di migrare dall'adesivo nel substrato. Di importanza fondamentale per la sicurezza fisiologica degli imballaggi per alimenti è la limitata migrazione dei plastificanti.

Plastificazione
Significa portare il campo di comportamento termoplastico di un polimero a una temperatura più bassa – o tramite copolimerizzazione (plastificazione interna) o aggiungendo plastificanti (plastificazione esterna). Quest'ultimo metodo è quello più largamente diffuso. Le molecole del plastificante più piccole si inseriscono tra le lunghe catene polimeriche, rendendole più mobili.

Al contempo, aumenta la morbidezza e la capacità di allungamento del materiale. Gli atomi di ossigeno, soprattutto quelli dei gruppi COOR, hanno un effetto polare (formano dipoli) e pertanto gli esteri di acido bicarbossilico sono particolarmente indicati come plastificanti. Anche gli atomi di fosforo e zolfo sono presenti in alcuni plastificanti.

Plastisol
Adesivo in cui polvere di PVC è dispersa in un plastificante liquido. L'adesivo deve essere riscaldato a circa 150-160° C per indurire. La polvere di PVC sciogliendosi nel plastificante forma un gel che, per raffreddamento, indurisce completamente.

Polimeri MS
Silossani modificati che si formano a seguito della polimerizzazione per effetto dell'umidità di polipropilenglicoli modificati con alcossisilani, accompagnata da eliminazione di alcool.

Primer
Composizioni speciali (nel caso più semplice, soluzioni con una considerevole diluizione del 10-20% dell'adesivo da utilizzare successivamente) che possono essere applicate a superfici che hanno già subito un trattamento primario. Possono ritardare i processi di invecchiamento del giunto incollato.

Prova con cataplasma
Per questa prova il campione viene collocato in un'atmosfera chiusa in modo tale che i prodotti della corrosione che si formano non possano essere rimossi. Il campione incollato viene avvolto in una pellicola di alluminio e viene applicato sullo stesso un tampone di ovatta imbevuto d'acqua, sigillato poi ermeticamente in una pellicola di polietilene. Il campione viene sottoposto al seguente ciclo di prova:
21 giorni di deposito a 70°C;
16 giorni di deposito a -30°C.
La forza del legame viene determinata dopo due ore dalla fine del ciclo di prova.

Prova di taglio a trazione
La resistenza al taglio a trazione di giunti sovrapposti incollati si determina tramite un carico di trazione posto su un singolo elemento e applicando una forza di trazione che agisce in direzione parallela rispetto alla superficie incollata e parallelamente all'asse principale del campione (EN 1465). Il risultato ottenuto è la forza misurata o il carico di rottura. La forza massima espressa in N viene divisa per la superficie di incollaggio espressa in $mm^{2.}$.

Tipiche forze di adesione nell'applicazione pratica (resistenza al taglio a trazione):

• Aeronautica e settore aerospaziale	da 30 a 40 MPa
• Industria, costruzioni	da 15 a 25 MPa
• Industria (escluse costruzioni)	da 5 a 10 MPa
• Sigillanti	< 5 MPa

PUR
Abbreviazione di poliuretano.

Reometro
Dispositivo per determinare la reologia dei fluidi. La *figura 69* illustra diversi modelli di reometro.

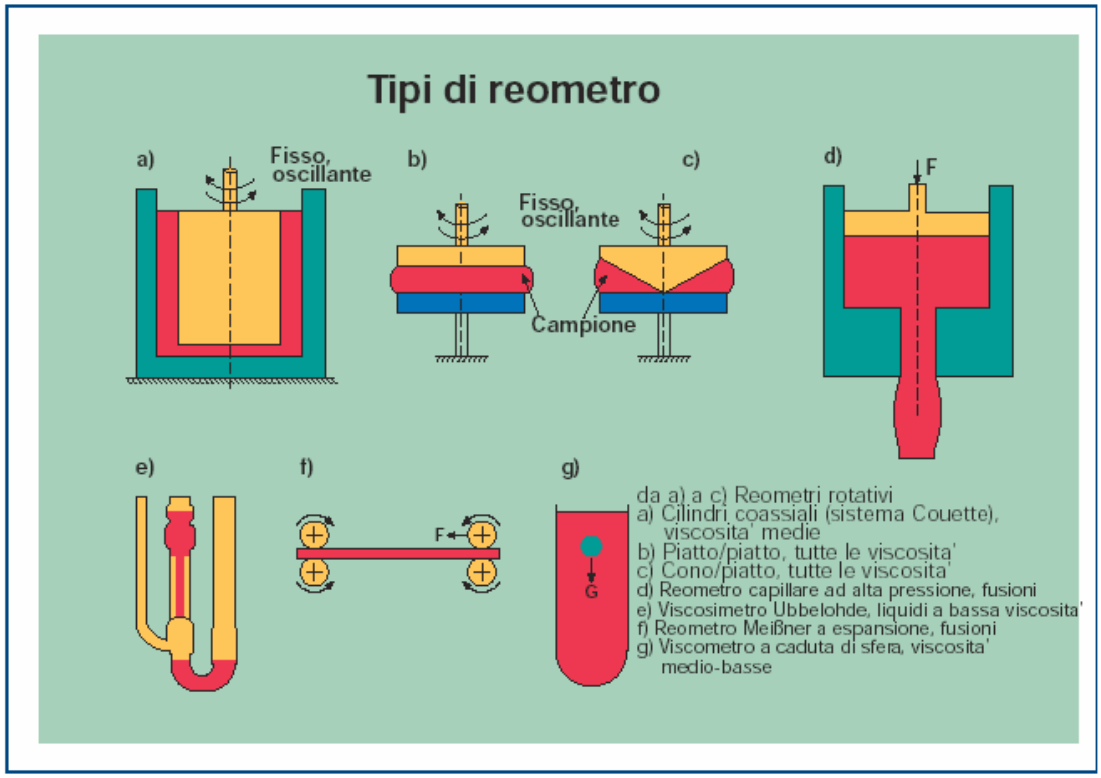


Figura 69

Resistenza al carico statico
Indica la sollecitazione cui un legame, soggetto ad un carico statico, può essere sottoposto senza che si generino alterazioni a carico dello stesso.

Resistenza alla deformazione permanente
Capacità dell'adesivo di non subire deformazioni, se non lievissime, nel caso in cui venga sottoposto a forze esterne per un periodo molto prolungato.

Resistenza alla trazione
Forza per unità di superficie necessaria per portare un giunto adesivo al punto di rottura per mezzo di uno sforzo fondamentalmente uniforme, impresso perpendicolarmente al piano della giunzione (norma UNI EN 923).

Resistenza allo scorrimento/allo sforzo di taglio
Massima sollecitazione allo scorrimento, ovvero lo sforzo di taglio per unità di superficie che un legame può sopportare. Si ottiene dividendo la forza massima espressa in N (carico alla frattura) per la superficie incollata. Si determina ai sensi della norma EN 1465.

Saldatura a punti
Metodo di saldatura ad arco elettrico. Nella saldatura ad arco si utilizza il calore generato dal passaggio di corrente elettrica attraverso una resistenza (passaggio di corrente tra due lamiere). Nella saldatura a punti, vengono saldati singoli punti e non l'intero cordolo come invece avviene nella saldatura tradizionale.

Saldoincollatura
La saldoincollatura è la tecnica di accoppiamento standard, utilizzata nella costruzione di carrozzerie per auto. Dapprima si applica un adesivo epossidico monocomponente, quindi il materiale viene saldato a punti e l'adesivo, assieme alla vernice, polimerizza alla fine del processo produttivo.

Silicone
Termine coniato da F.S. Kipping, chimico americano, per i polimeri in cui gli atomi di silicio sono legati attraverso atomi di ossigeno (a catena o a rete); altri atomi di silicio possono essere saturati con residui idrocarburici. A seconda del grado di reticolazione, si distingue tra oli siliconici (lineari), gomme siliconiche (leggermente reticolate) e resine siliconiche (molto reticolate).

Silossani
Termine generale per i composti ossigenati del silicio. I poliorganosilossani sono generalmente chiamati siliconi in campo tecnico.

Sollecitazione alla pelatura ("peeling")
Pelatura: metodo di applicazione di una forza ad un giunto in cui uno o entrambi gli aderendi sono flessibili e lo sforzo è concentrato su di una linea di delimitazione. (norma UNI EN 923).
La resistenza dei giunti incollati alle forze di pelatura si determina con la prova di pelatura a rullo mobile o con la prova di pelatura T ai sensi della norma EN 1464. Nella prova di pelatura a rullo deve essere utilizzato un substrato rigido e uno flessibile, nella prova di pelatura T sono invece necessari due substrati flessibili. Le prove vengono condotte principalmente per comparare gli adesivi e i legami oltre che per monitorare l'idoneità dei metodi di trattamento superficiale (analisi delle modalità di frattura).

Substrato
Materiale sulla cui superficie un adesivo viene steso a scopo di incollaggio (norma UNI EN 923) .

Tecniche con il plasma
Il plasma è un gas allo stato ionizzato, prodotto apportando costantemente energia al gas. In questo stato, parti delle molecole di gas vengono scisse in particelle caricate positivamente e negativamente. Il numero di particelle caricate positivamente e negativamente in un plasma è lo stesso, cioè un plasma è elettricamente neutro. Un campo a frequenza variabile accelera le particelle. Se l'accelerazione risulta sufficiente, i legami del gas si rompono quando colpiscono la superficie da trattare modificandola chimicamente. A seconda del tipo di metodo utilizzato con il plasma (gas, pressione, energia), le superfici possono essere pulite (pulitura al plasma), attivate (attivazione al plasma) o rivestite (polimerizzazione al plasma). Il trattamento con il plasma viene normalmente eseguito su materiali polimerici ma può anche essere impiegato sui metalli per la pulitura al plasma e il rivestimento polimerico al plasma. In genere si distingue tra metodi non termici (plasma a bassa pressione e a bassa temperatura) e metodi termici (plasma ad alte temperature). I metodi con il plasma a bassa pressione sono usati prevalentemente per il trattamento superficiale. Le temperature di applicazione sono in genere comprese tra i 30° C e i 100° C. Il trattamento al plasma interessa la zona superficiale fino a una profondità di alcuni nanometri.

Temperatura di applicazione
Temperatura dell'adesivo e temperatura dell'ambiente circostante quando viene applicato l'adesivo.

Tempo di vita utile ("pot life")
Periodo di tempo durante il quale un adesivo pluricomponente può essere utilizzato dopo aver mescolato i componenti. Il tempo di vita utile varia con il volume e la temperatura dell'adesivo mescolato e con la temperatura dell'ambiente. Il termine "tempo di vita utile" viene anche utilizzato nell'ambito dell'applicazione degli adesivi termofusibili per il periodo durante il quale un adesivo, pronto per l'uso, rimane utilizzabile quando viene conservato alla normale temperatura di esercizio (norma UNI EN 923).
Per ottenere dei legami efficaci, il tempo di vita utile non deve essere superato. Una volta trascorso il tempo di vita utile, l'adesivo è troppo viscoso e perde la sua qualità di bagnabilità ottimale.

Tixotropia
Diminuzione della viscosità apparente sotto sforzo di taglio, seguita da un graduale recupero quando viene tolta la sollecitazione. Questo effetto è dipendente dal tempo. Nelle condizioni pratiche di utilizzazione, un adesivo è denominato tissotropico se, una volta applicato ad una superficie, presenta un flusso limitato accettabile (norma UNI EN 923).
Fenomeno attraverso il quale i gel diventano liquidi se si applicano forze meccaniche (es.: agitazione, scuotimento, ultrasuoni) per poi riacquistare la forma originale quando le forze non agiscono più. Ad esempio le moderne vernici antisgocciolamento sono tixotropiche: si applicano facilmente e sono subito liquide quando si applica la vernice col pennello. Tuttavia, quando sono a riposo, sono molto più viscose e quindi non sgocciolano né colano. Ciò è possibile grazie ai cosiddetti agenti tixotropici (come bentonite, caolino, alginati e soprattutto silice pirogenica).

Tossicologia
Benché le proprietà fisiche dei materiali (es.: infiammabilità, esplosività, autoignizione) possano costituire dei pericoli specifici (incendio, deflagrazione, esplosione), è compito della tossicologia studiare, riconoscere e valutare gli effetti nocivi per la vita umana prodotti da sostanze chimiche o miscele di sostanze chimiche. La prima fase prevede una valutazione esaustiva dei possibili effetti indesiderati.
Solamente una dose sufficientemente elevata di una sostanza produce effetti nell'organismo. La dose minima che può scatenare effetti viene definita valore di soglia. La maggior parte degli effetti dipende dai valori di soglia. Per i pochi effetti che non dipendono dai valori di soglia occorre adottare misure specifiche atte a ridurre al minimo i rischi. La seconda fase consiste nel considerare il livello di contatto che ci sarà con i prodotti prendendo dunque in considerazione le condizioni di applicazione previste e anche eventuali usi impropri. Tutti i dati vengono poi raccolti al fine di predisporre una valutazione di sicurezza. Se sussiste un sufficiente margine di sicurezza tra il valore di soglia e il livello di contatto, il prodotto può definirsi sicuro.

Trattamento "corona" (*figura 70*)
Metodo di trattamento per le superfici di materie plastiche: gli elettroni emessi dagli elettrodi, "visibili" attraverso un arco voltaico, ionizzano le molecole del gas. Sulla superficie della plastica si generano strutture polari per effetto dell'incorporazione di questi atomi di gas attivato. Queste strutture polari migliorano le proprietà di adesione e bagnabilità.

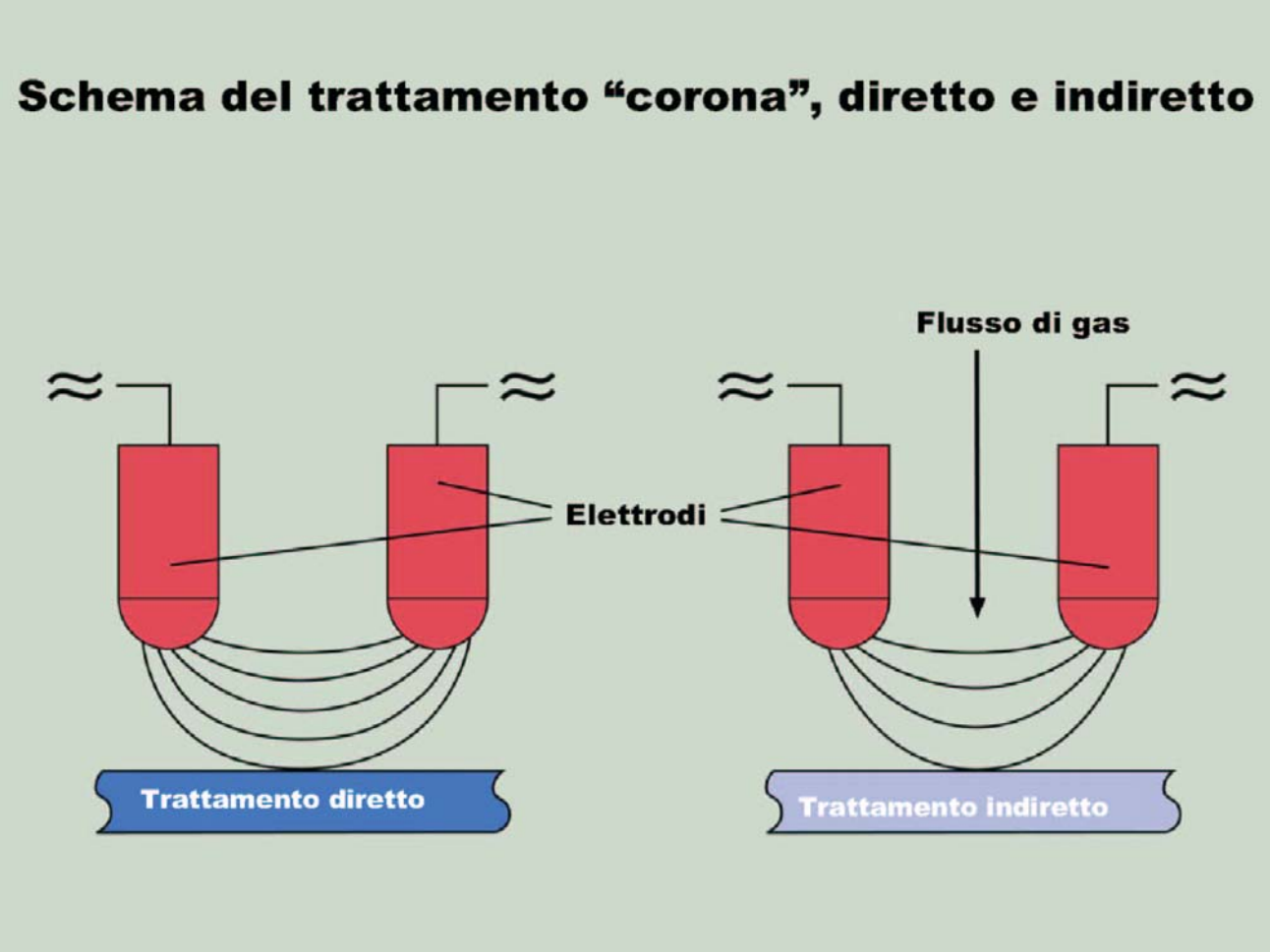


Figura 70

Valore C_w
Il valore di resistenza adimensionale (C_w) indica la resistenza all’aria di un oggetto e dipende dalla forma dell’oggetto.

Valori limite di esposizione sul luogo di lavoro
Gruppi autonomi di esperti hanno stabilito i limiti massimi di esposizione a una serie di sostanze sul luogo di lavoro (concentrazione massima sul luogo di lavoro). Questi limiti riguardano soprattutto gas, sostanze volatili (presenti sotto forma di vapori nell’aria ambiente), nebulizzazioni e polveri. Questi limiti di concentrazione sono stati fissati ad un livello tale che il rispetto dei valori limite esclude con certezza qualsiasi rischio per la salute. Le concentrazioni massime sul luogo di lavoro sono diventate valori limite obbligatori anche per le legislazioni nazionali. Per questi valori l’Italia fa riferimento a quanto stabilito da ACGIH (Treshold Limit Value TLV). Per alcune sostanze l’Unione Europea ha stabilito dei limiti di concentrazione comunitari chiamati OEL (Occupational Exposure Limit).

Viscosità
Proprietà di un materiale di resistere sempre di più alla deformazione con l’aumentare della velocità di deformazione. Questa proprietà, dal punto di vista qualitativo, viene definita come viscosità dinamica o coefficiente di viscosità, e viene spesso utilizzata come sinonimo di viscosità apparente (norma UNI EN 923).
La viscosità viene espressa in mPa s. Un valore basso indica un liquido fluido, a bassa viscosità (es.: acqua). Un valore elevato indica un liquido ad alta viscosità (es.: miele).

Elenco delle figure e tabelle

Figure (scaricabili dal CD-ROM come file PowerPoint™)

Pagina

Fig. 1 Materiali e sviluppo tecnologico: la ruota 6
Fig. 2 Sintesi delle tecniche di giunzione 7
Fig. 3 Incollaggio: la tecnologia del futuro 8
Fig. 4 Etichettaggio bottiglie 9
Fig. 5 Ascia risalente al Neolitico, incollaggio nell'antico Egitto, strutture edificate dagli Aztechi 12
Fig. 6 Ostriche di carena (balani) 15
Fig. 7 Sezione di un giunto 16
Fig. 8 Influenze sulla forza di coesione dell'adesivo 18
Fig. 9 Tecniche di trattamento superficiale 22
Fig. 10 Classificazione degli adesivi su base chimica 23
Fig. 11 Classificazione degli adesivi organici e dei siliconi in base al meccanismo di incollaggio 23
Fig. 12 Adesivi che induriscono per processo fisico 24
Fig. 13 Materiali di base per i polimeri degli adesivi termofusibili 25
Fig. 14 Applicazione con pistole per adesivi termofusibili 26
Fig. 15 Materiali di base per gli adesivi a solvente 27
Fig. 16 Stabilizzazione delle particelle di adesivo per mezzo di colloidi protettori ed emulsionanti 29
Fig. 17 Formazione del film nel giunto incollato per una dispersione di poliacrilato 30
Fig. 18 Gomme impiegate negli autoadesivi 32
Fig. 19 Struttura dei nastri adesivi 33
Fig. 20 Meccanismo di incollaggio per plastisol 34
Fig. 21 Adesivi che induriscono per reazione chimica 35
Fig. 22 Diversi esteri dell'acido α-cianoacrilico 36
Fig. 23 Indurimento tramite polimerizzazione anionica 37
Fig. 24 Idrolisi dei cianoacrilati 38
Fig. 25 Polimerizzazione di MMA tramite polimerizzazione radicalica 39
Fig. 26 Polimerizzazione radicalica del TEGMA 40
Fig. 27 Meccanismi di indurimento per adesivi anaerobici 41
Fig. 28 Fissaggio di viti con adesivi anaerobici 42
Fig. 29 Realizzazione di articoli in vetro e strutture di vetro 43
Fig. 30 Precondensazione di fenolo e formaldeide 44
Fig. 31 Reazione di reticolazione per una resina fenolica 45
Fig. 32 Rivestimenti di freni 46
Fig. 33 Elevata mobilità della catena nei siliconi dovuta all'angolo di legame altamente variabile 47
Fig. 34 Prereazione del silossano con l'agente reticolante 48
Fig. 35 Idrolisi e policondensazione dei silossani 49
Fig. 36 Reticolazione di siliconi bicomponenti a temperatura ambiente per condensazione 50
Fig. 37 Produzione e indurimento delle poliimmidi 52
Fig. 38 Poliaddizione di diammine (2) e bisfenolo-A-diglicidiletere (1) 53
Fig. 39 Processo di polimerizzazione per l'adesivo epossidico bicomponente a temperatura ambiente 54
Fig. 40 Formazione di poliuretani 55
Fig. 41 Isocianati come indurenti per i sistemi bicomponenti 56
Fig. 42 Sbloccaggio di un isocianato con il calore 57
Fig. 43 Attivazione per effetto dell'umidità di un prepolimero contenente gruppi isocianici 58
Fig. 44 Nave traghetto ad alta velocità 59
Fig. 45 Incremento della coesione di un adesivo termofusibile poliuretanico reattivo con reticolazione per esposizione all'umidità 60

Pagina

Fig. 46 Sollecitazioni su un incollaggio 61
Fig. 47 Prova di taglio a trazione 63
Fig. 48 Prova con il cuneo 64
Fig. 49 Prova di “pelatura” 65
Fig. 50 Costruzione del tetto con materiali compositi laminati in legno 66
Fig. 51 Applicazione di adesivi nella costruzione di carrozzerie per autoveicoli 67
Fig. 52 Montaggio diretto del parabrezza “direct glazing” 69
Fig. 53 Incollaggio nella costruzione di aeromobili 70
Fig. 54 Modello costruttivo di un treno leggero 71
Fig. 55 Applicazione di adesivi nella costruzione di un container 72
Fig. 56 Applicazione localizzata di adesivo su circuito stampato 73
Fig. 57 Incollaggio di Digital Versatile Disc (DVD) 74
Fig. 58 Applicazione di adesivi nella costruzione di motori elettrici 75
Fig. 59 Esempi di adesivi nell’imballaggio flessibile 76
Fig. 60 Esempi di cerotti 78
Fig. 61 Protesi d’anca incollata 79
Fig. 62 Applicazione tessuto in fibra di carbonio 80
Fig. 63 Le tre dimensioni dello sviluppo sostenibile 81
Fig. 64 Valutazione dei rischi 83
Fig. 65 Gli adesivi e il consumatore finale 86
Fig. 66 Simboli di pericolo e descrizione 101
Fig. 67 A e B Etichettatura di adesivo epossidico bicomponente (parte A; parte B) 102
Fig. 68 Esposizione 103
Fig. 69 Tipi di reometro 106
Fig. 70 Schema del trattamento “corona”, diretto e indiretto 109

Tabelle

Pagina

Tabella 1 Storia dell’incollaggio 14
Tabella 2 Forze di adesione 17
Tabella 3 Valori tipici della viscosità 20
Tabella 4 Adesivi in dispersione 28
Tabella 5 Altri adesivi a base acqua 31
Tabella 6 Effetto della struttura molecolare sull’intervallo di fusione 51

Bibliografia

Gerd Habenicht,
Kleben – Grundlagen, Technologie, Anwendungen,
Springer Verlag, Berlin 3/1997

Stefanie Wellmann,
Anaerobe Klebstoffe – Härtungsmechanismen und Eigenschaften,
Dissertation, Universität Bielefeld 1993

Andreas Groß,
Modellreaktionen zum Härtungsverhalten von Epoxidharz-Klebstoffen,
Dissertation, Universität Bielefeld 1987

O.-D. Hennemann, W. Brockmann, H. Kollek (Hrsg.),
Handbuch Fertigungstechnologie Kleben,
Carl Hanser Verlag, München 1992

O.-D. Hennemann, A. Groß, M. Bauer,
Innovationen durch vielseitige Fügetechnik,
In: Spektrum der Wissenschaft, 9/1993, S. 84–89

Ansgar van Halteren
Economic Significance of the European and Global Adhesives Industry,
Ullmann´s Encyclopedia of Industrial Chemistry, 6th edition, 2000 Electronic release;
WILEY-VCH, Weinheim 2000

A. J. Kinloch,
Adhesion and Adhesives, Science and Technology,
Chapman and Hall, London 1987

Wilhelm Endlich,
Fertigungstechnik mit Kleb- und Dichtstoffen, Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft,
Braunschweig/Wiesbaden 1995

A. Groß, O.-D. Hennemann, H. R. Meyer,
Kleben als innovative Verbindungstechnik für die Montage,
In: H.-J. Warnecke, R. D. Schraft (Hrsg.), Handbuch Handhabungs-, Montage- und
Industrierobotertechnik, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech 1996, S. 4/1 - 4/34

Norma UNI EN 923 “Adesivi – Termini e Definizioni“, Marzo 2002

Indice dei nomi

A
Acceleratore 78
Acetato di polivinile (PVAC) 14,65,92
Adesione 10,11,12,15
Adesione, micromeccanica 17
Adesivi, a base acqua 30
Adesivi a base amido 76
Adesivi a base di gomma 33
Adesivi a contatto 27
Adesivi a base di caseina 30
Adesivi anaerobici 40
Adesivi epossidici 85
Adesivi di resina fenolica 45
Adesivo, frattura 62
Adesivi in dispersione 28
Adesivi per imballaggio 75
Adesivi poliuretanici (PUR) 55
Adesivi PVAL 30
Adesivi reattivi 34
Adesivi strutturali 54
Adesivi termofusibili 24
Adesivi termofusibili poliuretanici, reattivi 77
Adesivi termofusibili, reattivi 60
Adesivo, polimerizzazione chimica 66
Agente disperdente 13
Ambiente, aspetti 86
Ammine 36
Assenza di ossigeno 40
Autoadesivi 31,84

B
Bagnabilità 19
Bicomponenti, adesivi 34,40,53
Bicomponenti, resine epossidiche (polimerizzazione a freddo) 52
Bicomponenti, adesivi poliuretanici (polimerizzazione a freddo) 55
Bicomponenti, adesivi reattivi 39
Bicomponenti, adesivi siliconici 50
Bisfenolo-A 52
Bloccato, chimicamente 49

C
Caseina 31

Cataplasma 105

Cianoacrilato, idrolisi 37

Cianoacrilato, idrolisi 37
Cianoacrilato, polimero 36
Cloruro di polivinile (PVC) 14
Coesione 15,103
Coesione, forza 18
Coesione, zona 17
Colla di pelle 14
Colle a umido, contenenti solventi 27
Compositi laminati in legno 103
Cottura, adesivi 12
Cuneo, carico 62

D
Deformazione permanente 106
Diffusione 11
Diammine, aromatiche 51
Dimetacrilato di tetraetilenglicole (TEGMA) 40

E
Eliminazione di discontinuità 103
Emulsionanti 29
Errori di miscelazione 53
Esposizione 83
Esposizione, valutazione 86
Estere dell'acido silicico 48

F
Fenolo 44
Fibrina 78
Formaldeide 44
Formazione di radicali 39
Formazione della pelle 62
Formazione della pelle, tempo 62
Forza iniziale 26
Forza finale 26
Forza di adesione 18
Fotoiniziatori 43
Frattura coesiva 62

G
Gelificazione, punto 54
Giunto incollato 16
Gomme 13

I
Idroperossido di rumene 41
Idrossipolisilossani 48
Incollaggio a strato spesso 11

Indurenti 56,84
Intervallo di fusione
(intervallo di rammollimento) 25
Isocianato 14
Isocianato,
bloccato chimicamente 56

L
Legante 14

M
Meccanismo di polimerizzazione 22
Misure di protezione 82
Monocomponenti, Adesivi 14,33,35
Monocomponenti, resine epossidiche
(polimerizzazione a caldo) 52,73
Monocomponenti, poliimmidi 51
Monocomponenti, adesivi poliuretanici
(polimerizzazione a caldo) 55
Monocomponenti,
adesivi siliconici 48

N
N,N-dimetil-p-toluidina 41

O

P
Pelatura, resistenza 33
Pelatura, prova 64
Pelatura, sollecitazione 107

Pericolo potenziale 82
Perossido di dibenzoile 39
Plastificanti 104
Plastisol, adesivi plastisol 33
Poliaddizione, adesivi 52
Poliammidoammine 53
Poliammine 53
Policondensazione 44
Policondensazione, adesivi 44
Poliglicoli, polioli 55
Poliammidi 76
Polimeri di silicone 47
Polimeri MS 105
Polimerizzazione radicalica 39
Polimetilmetacrilato (PMMA) 14
Poliorganosilossani (cfr. Siliconi) 107
Polistirolo 11
Prepolimeri di poliuretano
con gruppi terminali idrossile 56
Prepolimeri di poliuretano
con gruppi terminali isocianici 57

Pressione di contatto 52
Primer 105
Promotori di adesione 19
Proprietà, reologiche 20
Prova con cuneo 64
Prova di pelatura con rullo 62
Prova di pelatura T 62
Prova di corrosione in nebbia salina 62
Prova di taglio a trazione 63
Prova di trasudamento 62
Prove, metodi 62
Prove su giunti incollati 62

Q
R
Radicali, attivi 41
Radicali di perossido TEGMA 41
Radicali TEGMA 41
Reazione di condensazione 44
Reologia 19
Resina 14,34,40
Resine fenolo-formaldeide 44
Resine poliestere, insature 14
Resistenza al carico statico 106
Resistenza allo scorrimento 106
Resistenza al taglio a trazione 105
Resistenza all'umidità 17
Resolo 44
Resorcina (m-diidrossibenzene) 45
Resorcina-formaldeide, resine 45

S
Saldatura a freddo 11

Saldatura di solubilizzazione 27
Saldoincollatura 107
Schede di sicurezza 87,102
Schede tecniche 26,85
Sigillante 14
Siliconi 47
Silossani 107
Silossani, reticolazione 48
Sol-gel 33
Solventi 26
Stabilità nel tempo 62
Strato di adesivo 10,21,28
Strato limite, adesivo 19
Strato superficiale 21
Substrato 11
Supercolle 35
Superficie 19

T
Tecniche di giunzione 7
“Tempo aperto” 26
Tempo di essiccamento minimo 26
Tempo di evaporazione 28
Tempo di polimerizzazione 39
Tempo di vita utile 108
Tensione superficiale 19
Tixotropia 108
V
Valutazione dei rischi 82
Van der Waal, forze 28
Viscosità 20
Vulcanizzazione 12,14

Z
Zona di adesione 16
Tossicologia 82,108
Trattamento superficiale 21
Transizione, zona 17

U
Umidità 8
Urea-formaldeide, resina 14

Versione tedesca prodotta da:
Industrieverband Klebstoffe e. V.,
Völklinger Str. 4, 40219 Düsseldorf, Germany

Fonds der Chemischen Industrie im Verband der Chemischen Industrie e. V.,
Karlstraße 21, 60329 Frankfurt, Germany

Tutti i diritti sono riservati.

Autori e consulenti della versione tedesca
Dr. Norbert Banduhn, Henkel KGaA, Düsseldorf
Beate Brede, Fraunhofer IFAM - Center for Bonding Technology, Brema
Dr. Gerhard Gierenz, Solingen
Prof. Dr. Andreas Groß, Fraunhofer IFAM - Center for Bonding Technology, Brema
Dr. Axel Heßland, Industrieverband Klebstoffe e.V., Düsseldorf
Dr. Irene Janssen, TU Dresden, Dresda
Prof. Dr. Heinz Wambach, Bezirksregierung Köln, Colonia
Dr. Wolfgang Weber, FCI, Francoforte

Traduzione e revisione italiana a cura di:

AVISA
Associazione Vernici Inchiostri Sigillanti Adesivi
Via Giovanni da Procida 11
20149 MILANO MI
Tel.: +39.02. 34.565.341
Fax: +39.02.34.565.350
e-mail: avisa@federchimica.it

Prima edizione italiana: Marzo 2006

Consulenti della versione italiana
Dr. Dario Cavalli – Henkel Loctite Adesivi S.r.l.
Dr. Roberto Leoni – Mapei S.p.A.
Dr. Assunta Tralongo – AVISA Federchimica
Dr. Roberto Viganò – National Starch & Chemical S.r.l.

Il presente manuale “Materiali Didattici - Incollaggio/Adesivi” viene fornito unitamente al CD-ROM.
Il CD-ROM contiene il manuale in formato PDF e le 70 figure in formato Microsoft PowerPoint™.
E’, inoltre, disponibile sul sito http://avisa.federchimica.it

Fotografie
Le foto inserite nelle figure e le decalcomanie sono una gentile concessione delle seguenti aziende e istituti:

3 M Deutschland GmbH (Figura 14)
Ciba Speciality Chemicals PLC (Figure 55, 57)
DELO Industrieklebstoffe GmbH & Co. KG (Figure 28, 29)
Fauner/Endlich, Angewandte Klebtechnik (Figura 5)
Fraunhofer IFAM (Figure 4, 6, 8, 32, 47, 48, 49, 50, 53, 60)
Henkel KGaA (Figure 4, 51, 52, 54, 56, 59)
Lürssen Werft Bremen (Figura 44)
Mapei S.p.A. (Figura 62)
Südtiroler Archäologiemuseum (Figura 5)
VANTICO Ltd. (Figura 53, 54)

Stampa
SIGNUM s.r.l., Bollate (Milano)