

Dalla bakelite al solfodiene di Primo Levi: tra chimica, letteratura e vita

Vincenzo Villani

Dipartimento di Scienze di Base e Applicate dell'Università della Basilicata

e-mail: vincenzo.villani@unibas.it

Abstract. In 1907, Leo Baekeland obtained bakelite (phenol-formaldehyde resin), the first synthetic polymer, destined to replace shellac (a natural biopolymer) in the components of the nascent electrical industry. The synthesis took place in a specially designed reactor, the bakelizer, where controlled temperature and reduced pressure allow the removal of condensation water: by exploiting Le Châtelier's principle, the reaction equilibrium is shifted toward polymer formation, making the process irreversible and kinetically controlled. The preparation of phenol-formaldehyde resin represented a milestone in chemistry and chemical engineering, laying the foundations for the subsequent development of synthetic polymers. From this perspective, it constitutes a classic example of polymerization logic, valuable both from a historical and didactic standpoint. A significant echo of this discovery can be found in Primo Levi's *The Periodic Table*, in the story Sulfur.

Starting in 1936, Italy adopted an autarkic economy in response to the sanctions imposed by the League of Nations. In that context, polysulfide rubber, with its modest properties, was produced. Levi recounts the misadventure of a worker named Lanza, dealing with a bakelizer to obtain the prepolymer for the elastomer. With his extraordinary ability to merge science and literature, Levi transforms chemistry into poetic prose and a metaphor for the values of life.

Keywords: bakelite; resina fenolo-formaldeide; gommalacca; gomma polisolforata; Primo Levi

1. Prima della bakelite: la gommalacca

La gommalacca è il biopolimero prodotto dalla *Kerria lacca*, una cocciniglia parassita degli alberi delle foreste indo-tailandesi [1]. L'insetto utilizza questa secrezione per aderire alla corteccia e costruire un nido rigido e impermeabile all'acqua. Si tratta di un polimero termoplastico dalla composizione complessa e non completamente caratterizzata, a base di poliesteri, acidi grassi e sesquiterpeni (questi ultimi costituiti da tre unità isopreniche, lineari o cicliche). La gommalacca può essere modellata per estrusione in manufatti dalle forme più varie. Grazie alle sue proprietà dielettriche, fu largamente impiegata per le prime componenti elettrotecniche. Tuttavia, con il tumultuoso sviluppo dell'industria elettrica agli inizi del Novecento, il suo fabbisogno divenne insufficiente, stimolando la ricerca di un materiale alternativo come la bakelite. Oggi è ancora ampiamente utilizzata come vernice per il legno e nel restauro, sotto forma di soluzioni in acetone o etanolo (Figura 1).

Primo Levi, in *Lilit e altri racconti* (1981) [2], descrive la gommalacca in questo modo:

La gommalacca è una resina nobile; è trasparente, resiste agli urti e alla luce solare, ha odore gradevole, è lucida, e presenta inoltre un'altra virtù curiosa e unica, certo utile al suo inventore-insetto: se esposta all'umidità, la sua permeabilità all'acqua diminuisce invece di aumentare come fa quella di quasi tutti gli altri materiali organici; si comporta insomma, in scala molecolare, come un ombrello che si apra spontaneamente all'inizio di un acquazzone.



Figura 1. La gommialacca fissata su un ramo dalla cocciniglia *Kerria lacca* (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kerria-lacca.jpg>).

Questo comportamento idrorepellente è dovuto al carattere anfifilico delle catene di poliestere in presenza di acqua, analogo a quello di un tensioattivo: si forma un'emulsione acqua-in-olio in cui l'acqua resta intrappolata in gocce, mentre la parte idrofoba delle catene rimane all'esterno, creando un'interfaccia con la matrice terpenica apolare. Il risultato è una superficie idrofoba, che riduce l'affinità con l'acqua, caratteristica sfruttata proprio nell'impiego della gommialacca come vernice per il legno.

Levi descrive anche l'originale metodo di lavorazione tradizionale in India:

Per lo più erano giovanissime stenditrici: dall'alba al tramonto esse si accovacciavano a terra, afferravano il blocco in cinque punti, con le mani, i denti e le dita dei piedi, e si raddrizzavano rapide allargando le braccia; il blocco così veniva disteso in un foglio di contorno pentagonale, alto come la stenditrice, trasparente e fragile come il vetro.

La gommialacca è una miscela polimerica amorfa con una temperatura di transizione vetrosa (T_g) di circa 35°C. Accovacciandosi sul blocco, le stenditrici lo riscaldano al di sopra della T_g , rendendolo malleabile e permettendo di stenderlo in un sottile foglio. Questo foglio, ridotto in scaglie, si scioglie facilmente in soluzioni alcoliche, o in solventi che hanno affinità sia per la componente polare che per quella apolare, come etanolo, acetone o cloroformio. Il più comune e innocuo tra questi è l'etanolo. Levi sottolinea sia la straordinaria abilità delle stenditrici che la loro umile condizione di lavoro.

2. Il primo polimero di sintesi: la bakelite

Nel 1907 Leo Baekeland (1863–1944) preparò il primo polimero di sintesi, la bakelite, a partire dai suoi monomeri [3]. Trasferitosi dal Belgio negli Stati Uniti, investì nella ricerca di un materiale che potesse sostituire la gommialacca, la lacca indiana, allora utilizzata nella nascente industria elettrica. La bakelite non solo sostituì la gommialacca, ma si rivelò un eccellente materiale rigido e dielettrico, ideale nelle applicazioni elettrotecniche come telefoni, radio e interruttori; inoltre, era facile da modellare e colorare, trovando impiego in oggetti di uso comune, quali penne stilografiche, bottoni e manici di pentole (Figura 2).



Figura 2. Antichi bottoni in resina fenolo-formaldeide (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bakelite_Buttons_2007.068_%2866948%29.jpg)

Per condurre con successo la reazione di policondensazione tra fenolo e formaldeide, Baekeland ideò uno specifico reattore d'acciaio dalla forma ovoidale, dotato di tutte le componenti necessarie come l'agitazione meccanica, il controllo della temperatura e della pressione, valvole di sicurezza e boccaporti, detto *bakelizer* (Figura 3).

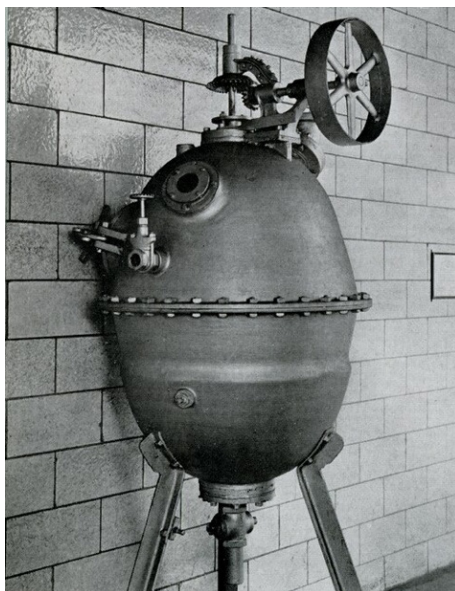


Figura 3. Il *bakelizer* per la produzione industriale della bakelite (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bakelite>)

A differenza della gommalacca, che è un termoplastico in cui le macromolecole lineari solidificano in una morfologia amorfa e reversibile nel trattamento termico, la resina fenolo-formaldeide è un termoindurente: le sue catene formano una rete macromolecolare covalente, amorfa e irreversibile. Questa resina fenolica reticolata si ottiene appunto dalla polimerizzazione per condensazione di fenolo e formaldeide (Figura 4).

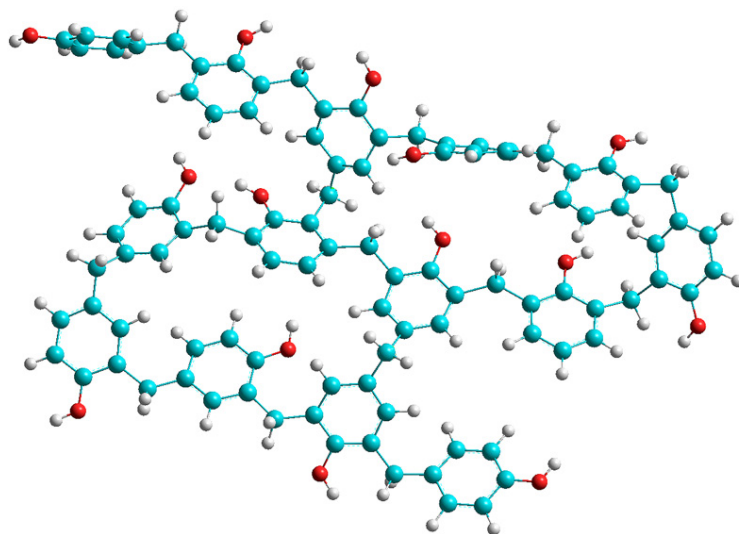


Figura 4. Una possibile struttura molecolare della bakelite, resina fenolo-formaldeide (<https://en.wikipedia.org/wiki/Bakelite>)

La reazione di policondensazione può essere schematizzata in due stadi.

Nel primo stadio, il gruppo *metilolico* $-\text{CH}_2\text{OH}$ entra in posizione *orto* o *para* sull'anello fenolico mediante una sostituzione elettrofila aromatica, mentre il secondo stadio, esotermico, porta alla formazione dei ponti *metilenici* $-\text{CH}_2-$.

Il fenolo è, quindi, un monomero trifunzionale (con posizioni reattive in *orto* e *para*), al contrario della formaldeide che, invece, è bifunzionale; di conseguenza, il polimero risultante può essere un termoindurente reticolato; infatti, per ottenere la reticolazione è necessario che almeno uno dei monomeri sia trifunzionale (Figura 5).

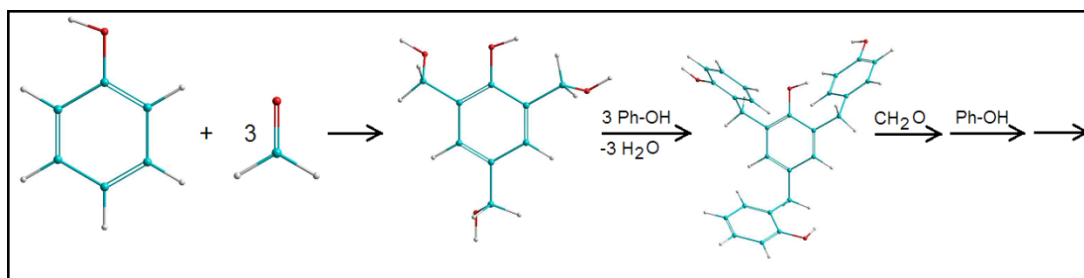


Figura 5. La reazione di policondensazione di fenolo e formaldeide in resina fenolo-formaldeide

L'andamento della polimerizzazione è regolato dal rapporto molare tra fenolo e formaldeide. Dal punto di vista tecnologico, si prepara inizialmente un polimero a basso peso molecolare e bassa viscosità, detto *prepolimero*, che viene successivamente reticolato direttamente nello stampo. I prepolimeri si dividono in due categorie: novolacche e resoli.

2.1 Novolacche

Le novolacche si ottengono utilizzando un rapporto molare fenolo/formaldeide > 1 (eccesso di fenolo), in ambiente acquoso a pH acido e a $100\text{ }^\circ\text{C}$. La miscela di reazione viene portata a secco e la novolacca è recuperata. A causa dell'eccesso di fenolo, non vi sono gruppi metilolici liberi; pertanto, le novolacche non reticolano per semplice riscaldamento: il prepolimero solido viene macinato

e mescolato con un agente reticolante (*curing agent*), che forma i legami covalenti (*cross-link*) tra le posizioni attive *orto* e *para* degli anelli aromatici (Figura 6).

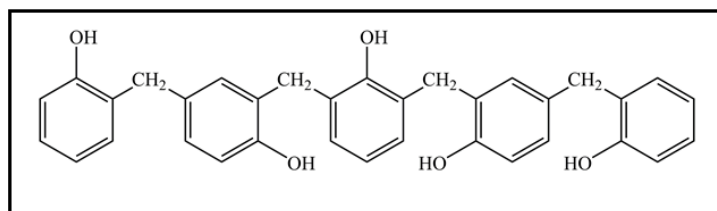


Figura 6. Una possibile formula di struttura molecolare della novolacca, prepolimero della resina fenolo-formaldeide ottenuto in eccesso di fenolo

2.2 Resoli

I resoli, invece, si ottengono con un rapporto molare fenolo/formaldeide < 1 (eccesso di formaldeide). In questo caso si forma un prepolimero a basso peso molecolare con molti gruppi reattivi metilolici per catena. La soluzione acquosa contenente il resolo viene concentrata ed è pronta all'uso. Viene impiegata come impregnante per tessuti o carta (dando origine ai *pre-preg*), utilizzati per preparare compositi laminati multistrato, costituiti da molti strati sovrapposti con vari orientamenti. Il successivo trattamento termico favorisce l'avanzamento della reticolazione attraverso i gruppi metilolici liberi sugli anelli fenolici. Il resolo può anche essere sciolto in solvente (generalmente alcol etilico) per ottenere vernici (Figura 7).

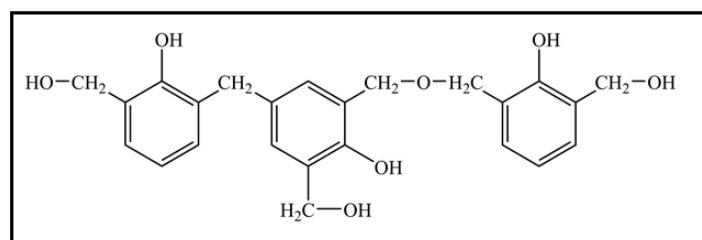


Figura 7. Una possibile formula di struttura molecolare del resolo, prepolimero della resina fenolo-formaldeide ottenuto in eccesso di formaldeide

3. La polimerizzazione nel bakelizer

A livello industriale, il *bakelizer* opera a temperatura controllata (70 °C) e pressione ridotta (0,1 atm). In queste condizioni viene eliminata l'acqua di condensazione, spostando l'equilibrio reagenti-prodotto verso la formazione del polimero, in accordo con il principio di Le Châtelier.

La sintesi della resina fenolo-formaldeide avviene secondo la seguente reazione d'equilibrio:



per la quale, in base alla legge d'azione di massa, si ottiene:

$$K = \frac{[\text{Polimero}] \times [\text{Acqua}]}{[\text{Fenolo}] \times [\text{Formaldeide}]}$$

Quindi, eliminando l'acqua, poiché il rapporto d'equilibrio è costante, le concentrazioni al denominatore debbono diminuire e l'equilibrio risulta spostato verso l'aumento di concentrazione del polimero, come atteso.

In generale, la formazione di un polimero ad alto peso molecolare è un processo entropicamente sfavorito, poiché si passa da un elevato numero di monomeri indipendenti a poche macromolecole indipendenti, in cui i monomeri sono legati. Affinché la reazione sia possibile, è necessario realizzare condizioni sperimentali in cui l'energia libera di Gibbs ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$) risulti negativa.

Nel caso specifico, la reazione di policondensazione è esotermica ($\Delta H < 0$) e il controllo dell'apparecchiatura permette di condurre un blando riscaldamento prolungato a pressione ridotta. Inoltre, la rimozione dell'acqua di condensazione comporta un aumento dell'entropia del processo ($\Delta S > 0$), poiché l'acqua passa dalla fase liquida a quella di vapore (entropia di vaporizzazione) e questo contribuisce a rendere negativo il ΔG complessivo, favorendo termodinamicamente la formazione del polimero ad alto peso molecolare. Quindi, grazie all'uso del *bakelizer*, che rimuove l'acqua di condensazione operando alla temperatura più bassa possibile (comunque, sufficiente a garantire l'attivazione cinetica a una velocità di reazione accettabile), la reazione diventa termodinamicamente favorita ($\Delta G < 0$). Infatti, alla variazione di energia libera del sistema reagenti-prodotti va aggiunto il contributo dell'energia libera di vaporizzazione dell'acqua e la sua rimozione dal sistema. La vaporizzazione dell'acqua comporta una variazione entalpica (ΔH) trascurabile, poiché non coinvolge la rottura di legami chimici e l'energia necessaria è fornita dal riscaldamento, e da una variazione entropica (ΔS) positiva, dato che l'acqua passa dallo stato liquido a quello gassoso, con un conseguente aumento del disordine molecolare. In questo modo, il ΔG totale della reazione con eliminazione dell'acqua (a pressione ridotta nel *bakelizer*) diventa negativo, consentendo alla polimerizzazione di procedere efficientemente dai monomeri fino ad alti pesi molecolari (Box 1).

Reazione 1: polimerizzazione
 Fenolo + Formaldeide \rightarrow Δ Polimero + Acqua (liquida)
 $\Delta G_1 > 0$

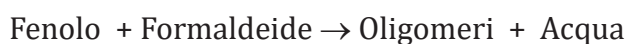
Reazione 2: rimozione dell'acqua
 Acqua (liquida) \rightarrow Δ Acqua (vapore)
 $\Delta G_2 \ll 0$

Reazione totale
 Fenolo + Formaldeide \rightarrow Polimero + Acqua (vapore)
 $\Delta G_{\text{totale}} = \Delta G_1 + \Delta G_2 = \Delta G_1 (> 0) + \Delta G_2 (\ll 0) < 0$

Box 1. Schema della termodinamica complessiva della policondensazione fenolo-formaldeide: tenendo conto della vaporizzazione dell'acqua rimossa dal reattore a pressione ridotta, la polimerizzazione diventa termodinamicamente favorita

Dunque, nelle condizioni di reazione del *bakelizer*, la polimerizzazione diventa un processo irreversibile e cineticamente controllato.

Per quanto riguarda la cinetica della polimerizzazione si può assumere che essa avvenga nei due seguenti step:



Considerando che la concentrazione dell'acqua tende a zero, essendo rimossa a pressione ridotta, e indicando [Fenolo] = Ph , [Formaldeide] = F , [Oligomeri] = Oli , [Polimero] = Pol , si possono scrivere le equazioni cinetiche per la policondensazione fenolo-formaldeide sotto riportate:

$$\begin{aligned}\frac{dPh}{dt} &= -k_1 Ph \times F \\ \frac{dF}{dt} &= -k_1 Ph \times F - k_2 F \times Oli \\ \frac{dOli}{dt} &= k_1 Ph \times F - k_2 F \times Oli \\ \frac{dPol}{dt} &= k_2 \times F \times Oli\end{aligned}$$

Il sistema di equazioni accoppiate è non-lineare e non ammette una soluzione analitica, però, assumendo costante la concentrazione della formaldeide (che è in largo eccesso) al suo valore iniziale pari a F_0 , il sistema si linearizza e ammette una soluzione analitica:

$$\begin{aligned}\frac{dPh}{dt} &= -k_1 Ph \times F_0 \\ \frac{dOli}{dt} &= k_1 Ph \times F_0 - k_2 F_0 \times Oli \\ \frac{dPol}{dt} &= k_2 Ph \times F_0 \times Oli\end{aligned}$$

Per $k_1 \neq k_2$, si ottiene:

$$Ph(t) = Ph_0 \exp(-k_1 F_0 \times t)$$

Il modello semplificato è didatticamente utile e mostra in modo chiaro gli andamenti delle concentrazioni di reagenti e prodotti durante la reazione.

Assumendo $k_1 = 0,15 \text{ M}^{-1} \text{ h}^{-1}$, $k_2 = 0,08 \text{ M}^{-1} \text{ h}^{-1}$, e $Ph_0 = 1 \text{ M}$, si ottengono gli andamenti delle concentrazioni durante la polimerizzazione riportati in figura 8.

La concentrazione del fenolo decresce in modo esponenziale a partire dalla concentrazione iniziale Ph_0 , infatti, la velocità di consumo è proporzionale ai reagenti; la concentrazione degli oligomeri, inizialmente zero, aumenta con il consumo del fenolo, raggiunge un massimo, poi decade a seguito della conversione in polimero; la posizione e l'ampiezza del picco dipendono dal rapporto k_2/k_1 . La concentrazione del polimero cresce in modo sigmoidale: all'inizio la crescita è lenta (fase di accumulo degli oligomeri), poi accelera e, infine, rallenta avvicinandosi asintoticamente alla concentrazione finale.

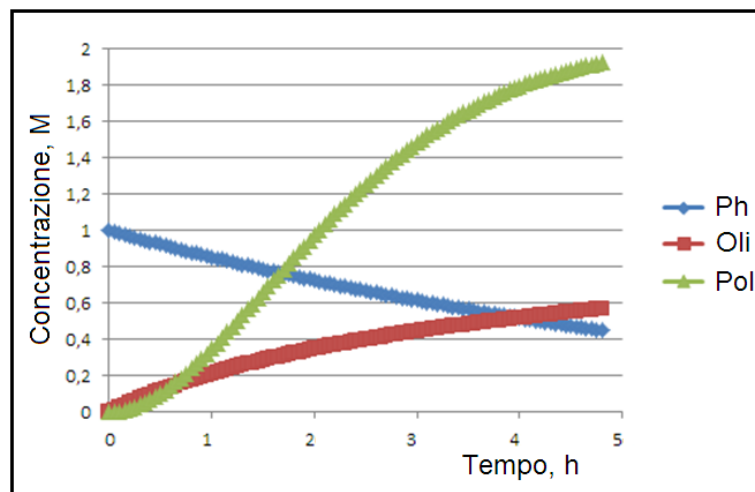


Figura 8. Andamento nel tempo delle concentrazioni dei reagenti (fenolo e oligomeri) e del polimero prodotto secondo la cinetica assumendo costante la concentrazione della formaldeide al suo valore iniziale pari a F_0

La formaldeide viene consumata in entrambi gli stadi, ma essendo in largo eccesso rimane costante; la rimozione efficiente dell'acqua, sposta l'equilibrio verso i prodotti, impedisce l'idrolisi inversa dei legami estere o altri intermedi, permette di modellare la cinetica come irreversibile, ottimizzando il processo. Baekeland usava tipicamente rapporti stechiometrici bilanciati o un eccesso di formaldeide, cosa che garantiva una polimerizzazione efficiente.

4. Il sistema periodico di Primo Levi: il racconto Zolfo

Come è noto, Primo Levi (1919 - 1987) in *Il sistema periodico* (1975) [4] scrive ventuno capitoli ognuno dedicato a un elemento chimico. Naturalmente, si tratta di capitoli dal forte significato simbolico in cui le caratteristiche chimiche degli elementi vengono messi a confronto con i valori umani, in un gioco di specchi tra chimica e vita [5]. Levi era un chimico macromolecolare, grande conoscitore della sintesi e delle proprietà dei materiali polimerici, in particolare delle vernici. Quindi, nei suoi scritti molti sono i riferimenti al mondo delle macromolecole.

Sulle pagine di CnS mi sono già occupato di chimica delle macromolecole e letteratura in Primo Levi, analizzando alcuni brani di *La chiave a stella* (1978) [6, 7]. Anche in *Il sistema periodico* parecchi capitoli si occupano di problematiche polimeriche, come in *Cromo*, dove con grande maestria letteraria si racconta dell' indesiderata gelificazione delle vernici, in *Vanadio*, dove si parla con disappunto dell'incapacità della vernice a formare la pellicola solida e resistente, e poi le storie della preparazione dell'olio di lino cotto, della solubilizzazione delle resine fossili, della preparazione delle vernici alchidiche e, infine, della gomma polisolforata nel capitolo *Zolfo*.

4.1 La gomma polisolforata

Il racconto *Zolfo* è ambientato nel secondo dopoguerra, in un paese disastroso dagli eventi bellici e a dircelo è lo stesso Lanza, l'operaio protagonista della storia:

È una gran buffonata dover continuare a chiamarlo B41 quando tutta la fabbrica sa che è zolfo, e in tempo di guerra, quando tutto mancava, parecchi se lo portavano a casa e lo vendevano in borsa nera ai contadini che lo spargevano sulle viti.

Quindi, la guerra è finita da poco e perdurano ancora le lavorazioni del periodo autarchico (1936 - 1943). Levi racconta la sintesi di un polimero solforato, attraverso un intermedio di reazione a cui dà il nome di *solfo diene*, si tratta di una sintesi a due stadi a 100 °C e 200 °C, in un reattore (tipo *bakelizer*) a pressione ridotta, utilizzando nel secondo stadio lo zolfo: questo processo è quello della gomma polisolforata prodotta come sostituto della gomma naturale, usando materie prime disponibili come lo zolfo di Sicilia, cloruro di etilene e carbonato di sodio.

La gomma polisolforata corrisponde alla *Thiokol* americana, il primo elastomero sintetico a base di polisolfuri scoperto nel 1926 [8]. Probabilmente, in analogia con la *gomma butadiene*, Levi nel racconto introduce il neologismo *solfo diene*, come espediente letterario, o come un'ipotesi personale di un intermedio di reazione dienico; Levi, infatti, amava mescolare nei romanzi scienza e immaginazione in modo originale (Figura 9).

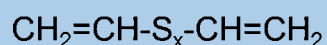


Figura 9. Il divinilpolisolfuro, l'ipotetico intermedio di reazione della polimerizzazione della gomma polisolforata, a cui fa riferimento Levi con il neologismo *solfo diene*

Gli operai del racconto simboleggiano il paese sconvolto, uomini stanchi ma risoluti, forti, coraggiosi e intelligenti proprio di chi conosce la realtà concreta delle piccole cose del mondo rurale, colto sul

punto, ahimè, di essere spazzato via dal progresso. Ma proprio questo mondo di operai e borghesia laboriosa è il fulcro della rinascita, i protagonisti della ricostruzione sono i lavoratori, come Lanza e i dirigenti, come Levi che con grande intelligenza e coraggio riavviarono il progresso del paese.

Dunque, Lanza è preposto alla preparazione di un polimero solforato mediante un reattore che somiglia al *bakelizer* di Baekeland; infatti, lo scopo è analogo, svolgere la polimerizzazione in condizioni termodinamiche favorevoli e irreversibili, controllando la temperatura e la pressione ridotta.

Quello di Lanza è il turno di notte:

Lanza agganciò la bicicletta al telaio, bollò la cartolina, andò alla caldaia, mise in marcia l'agitatore e diede il fuoco. Era ancora pieno di sonno, e del freddo dei risvegli improvvisi; rimase accovacciato di fronte al focolare, la cui vampa rossa, in un succedersi di rapidi bagliori, faceva ballare la sua ombra enorme e stravolta sulla parete di dietro, come in un cinematografo primitivo.

In un'atmosfera, oserei dire, rustica, l'operaio avvia la lavorazione con lo stesso spirito con il quale accudisce le mucche nella stalla, con amorevole responsabilità, consapevole che quel lavoro è la fonte di sostentamento della sua famiglia:

Dopo una mezz'ora il termometro cominciò a muoversi, come doveva: la lancetta d'acciaio andò a fermarsi sui 95 °C. Lanza sorvegliava il termometro: con un solfodiene non si sa mai, ma per il momento tutto andava regolarmente.

L'Italia nel 1935 aveva invaso l'Etiopia, unico regno indipendente nel mezzo del vasto Impero britannico, ed era stata pesantemente sanzionata dalla Società delle Nazioni (diventata ONU), sull'importazione delle materie prime. Allora il Regime aveva avviato la tanto decantata economia autarchica di autonomia nazionale e la gomma naturale d'importazione fu sostituita da ingegnosi prodotti di mediocre qualità, come la gomma polisolfurata, ottenuta a partire da reagenti nostrani, ma dalla scarsa resistenza meccanica, dall'elevata permeabilità ai gas e dalla ridotta resistenza all'abrasione (Figura 10).

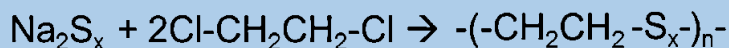


Figura 10. Il primo stadio a 100 °C della policondensazione del polisolfuro di zolfo con il dicloroetilene per dare il polisolfuro di etilene

Il lavoro di Lanza continua:

Arrivati a 180 °C bisogna sbullonare il boccaporto e buttare dentro lo zolfo: spense il fuoco, rallentò l'agitatore, sbullonò il boccaporto, mise la maschera di protezione. Lo zolfo era già pesato, in tre scatole di cartone: lo introdusse cautamente.

Completato il primo stadio della reazione con la preparazione del polisolfuro di etilene, a temperatura più alta viene aggiunto lo zolfo per introdurre in catena i gruppi tioli e disolfuri necessari per la reticolazione finale. Tutto va come al solito e la polimerizzazione procede a pressione ridotta (Figura 11):

Quando ebbe finito, affrancò di nuovo il boccaporto e rimise tutto in moto. Alle tre di notte, il termometro era a 200 °C: bisognava dare il vuoto. Alzò la manetta nera, e lo strepito alto ed aspro della pompa centrifuga si sovrappose al tuono profondo del bruciatore. L'ago del vuotometro, che stava verticale sullo zero, cominciò a declinare strisciando verso sinistra.

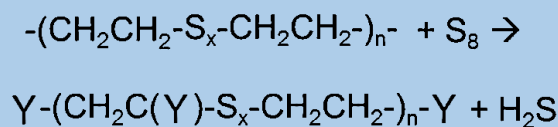


Figura 11. Il secondo stadio a 200 °C della polimerizzazione: il polisolfuro di etilene reagisce con zolfo per dare il prepolimero, contenente ai terminali e in catena i gruppi reattivi $\text{Y} = -\text{SH}/-\text{SSH}$, necessario per ottenere in stampo la gomma polisolforata reticolata

A un tratto, però, si verifica il temutissimo incidente:

Il fracasso della pompa si era fatto di colpo più lento e più impastato, come sforzato: e infatti, l'ago del vuotometro risaliva sullo zero, ed ecco, grado dopo grado, cominciava a pendere sulla destra. Poco da fare, la caldaia stava andando in pressione. Lanza andava farneticando di scoperchiare il boccaporto per lasciare sfogare la pressione; cominciò ad allentare i bulloni, ed ecco schizzare friggendo dalla fenditura una bava giallastra con soffi di fumo impastato: la caldaia doveva essere piena di schiuma. Richiuse precipitosamente.

La reazione è fuori controllo (*runaway*) senza una causa apparente: la temperatura e la pressione salgono rapidamente e la catastrofe è imminente. Il *runaway* che si è innescato è un ciclo autocatalitico termico basato sulla reazione di Claus [9]: l'acqua funziona da iniziatore e la temperatura aumenta in modo esponenziale provocando l'innalzamento della pressione e la degradazione dei reattivi nel *bakelizer* (Figura 12).

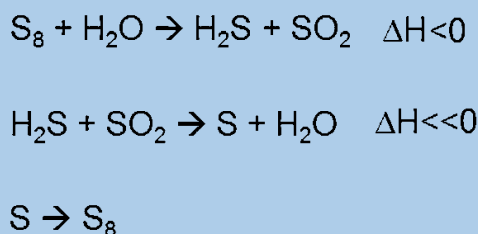


Figura 12. Il ciclo del *runaway* della reazione: l'idrolisi dello zolfo reattivo è una reazione esotermica che genera idrogeno solforato e anidride solforata; la reazione di Claus tra idrogeno solforato e anidride solforata è fortemente esotermica e genera zolfo elementare e acqua; lo zolfo elementare ad alta temperatura si converte immediatamente in zolfo reattivo e il ciclo riprende

Nella mente di Lanza erano ancora vive le bombe della guerra, le esplosioni devastanti e quel reattore dalla forma a uovo sembrava proprio una bomba sul punto di esplodere. Tuttavia, dopo il panico iniziale riprende il controllo di sé: l'Uomo meglio delle macchine può riprendere il controllo delle variabili impazzite:

Aprì la valvola della ventola d'aspirazione, mise questa in moto, chiuse il rompivuoto e fermò la pompa. Con sollievo e con fierezza, vide l'ago risalire fino a zero. Lanza spense il fuoco, fermò l'agitazione e la ventola, ed aprì il rompivuoto: si sentì un lungo fischio rabbioso. In mezzo a fumi bianchi e all'aspro odore consueto, il getto denso della resina andò a placarsi nella bacinella di raccolta in un nero specchio lucente.

La reazione era andata fuori controllo “senza una causa apparente”, ma c’è sempre una causa dietro un effetto, dietro ciò che accade, una causa semplice, o un groviglio di concause che mettono in moto “l’effetto valanga”. Talvolta, la causa di tutto risulta banale, ma bisogna scoprirla e soprattutto, saperla evitare.

Levi nei suoi racconti ricorre spesso al sogno premonitore, in cui allentate le remore razionali, l’immaginazione fa capolino. In questo caso, il sogno è un espediente letterario e come in *La chiave a stella* suggerisce che a inquinare la vernice erano state le fibrille degli stracci logori usati in laboratorio per le pulizie (maniacali), qui rivela che è stata l’acqua infiltrata dai tetti logori a inquinare i reattivi e lo zolfo umido è il responsabile del disastro sfiorato:

Lanza gustava il soave riposo, e si abbandonava alla danza di pensieri e d’immagini che prelude al sonno, pur evitando di lasciarsene sopraffare. Faceva caldo, e Lanza vedeva il suo paese: la moglie, il figlio, il suo campo, l’osteria. Il fiato caldo dell’osteria, il fiato pesante della stalla. Nella stalla filtrava acqua ad ogni temporale, acqua che veniva dal di sopra, dal fienile: forse da una crepa del muro...

Nel sogno Lanza confonde la cascina, l’osteria e la fabbrica, con gli stessi problemi, dove l’acqua si infila dalle crepe, sono le crepe lasciate dalla guerra nelle cose e negli animi umani che ancora faticano a rimarginarsi, ma con la forza di volontà, con il lavoro si rimargineranno:

Lanza si avviò al cancello, ed incontrò Carmine che stava entrando. Gli disse che tutto andava bene, gli lasciò le consegne e si mise a gonfiare le gomme della bicicletta.

È un messaggio ottimistico quello che Levi ci trasmette, e alla fine questa storia, per tanti versi drammatica, ci fa sorridere, con Lanza che al mattino tranquillo gonfia gli pneumatici sgonfi della bici, fatti di mediocre gomma nazionale.

Riferimenti bibliografici

- [1] V. Villani, *Lezioni di Scienza dei Materiali Polimerici*, Aracne Editrice, Roma, 2020.
- [2] P. Levi, *Lilit e altri racconti*, Einaudi, Torino, 1981.
- [3] V. Villani, *Lezioni di Chimica e Tecnologia dei Polimeri*, Aracne Editrice, Roma, 2021.
- [4] P. Levi, *Il sistema periodico*, Einaudi, Torino, 1975.
- [5] A. Di Meo, *Primo Levi e la scienza come metafora*, Rubbettino Editore, Soveria Mannelli, 2010.
- [6] P. Levi, *La chiave a stella*, Einaudi, Torino, 1987.
- [7] V. Villani, La Chimica delle macromolecole e la complessità nei racconti di Primo Levi: La chiave a stella, *CnS*, 2025, **2**, 47–56.
- [8] J. C. Patrick, Composition of matter and process of producing it, *U.S. Patent 2,206,642*, Jul. 2, 1940.
- [9] W. D. Monnery, W. Y. Svrcek, Simulation of the Claus reaction furnace, *Chemical Engineering Science*, 1990, **45**(8), 2251–2258.

