

RESTAURO E CHIMICA SOSTENIBILE: UN'ANALISI CRITICA DELLA TECNOLOGIA SOL-GEL SULLA BASE DELLE GREEN CHEMISTRY METRICS

Michele Cecchin*, Claudia Bortolussi**

*Responsabile tecnico, SILTEA SRL, Via Carlo Goldoni, 18, 35131, Padova (PD), 049657350, michele.cecchin@siltea.eu

** Responsabile di laboratorio, SILTEA SRL, Via Carlo Goldoni, 18, 35131, Padova (PD), 049657350, claudia.bortolussi@siltea.eu

Abstract

Il concetto di sostenibilità è ormai imprescindibile anche nel settore del restauro. Aspetti quali la sicurezza per gli operatori, il rispetto per l'ambiente e l'efficienza energetica sono requisiti fondamentali in molti progetti (come testimoniato dai bandi PNRR) e saranno sempre più prioritari nella scelta di prodotti, tecnologie e metodi di intervento.

È infatti maturata una maggior consapevolezza sulla necessità di utilizzare materiali a più bassa tossicità per tutelare la salute degli operatori, prediligendo soluzioni a base acquosa o solventi meno pericolosi. La "tarda" ma urgente attenzione per l'ambiente orienta ad esempio verso prodotti minerali-naturali, limita o vieta l'uso di sostanze inquinanti e sottolinea l'importanza della gestione dei rifiuti, dalla loro produzione al loro riutilizzo/smaltimento. Dal punto di vista energetico, l'efficientamento può essere inteso sia nell'ottica del recupero di edifici storici, sia come ricorso a processi produttivi ed applicativi che richiedano un consumo minore di energia.

Orientarsi nelle proposte per soddisfare questi requisiti è spesso complicato perché il termine sostenibilità è molto ampio. Nell'ambito dei prodotti per il restauro si può sicuramente fare riferimento al concetto di chimica sostenibile. Attraverso i 12 principi della Green Chemistry, vengono forniti dei parametri di analisi oggettivi e quantificabili. Lo scopo è incoraggiare la ricerca verso soluzioni che riducano gli sprechi in termini energetici, produzioni che limitino la formazione di rifiuti e processi di sintesi che sostituiscano sostanze critiche con altre a più basso impatto.

Questo contributo vuole illustrare il punto di vista di un produttore di materiali per restauro, attraverso l'analisi dei propri processi. Nello specifico si presenta lo studio applicato alla tecnologia sol-gel, impiegata per la produzione di protettivi e consolidanti a base di silice. L'obiettivo è quello di stabilire quali aspetti siano in linea con i principi della chimica verde e quali possano essere eventualmente migliorati. Sono stati esaminati i 12 principi dal punto di vista qualitativo e quantitativo, suddivisi nelle tre macroaree: uso delle risorse, efficienza energetica e rischi per l'uomo e per l'ambiente. Grazie alle Green Chemistry Metrics è stato possibile assegnare un parametro numerico ad ogni principio. I dati ottenuti permettono di stabilire quali processi soddisfino i criteri della chimica verde e a che livello, fornendo utili spunti di riflessione e una base di partenza per un confronto oggettivo con sistemi e tecnologie alternative.

Sostenibilità e restauro

La definizione di sostenibilità prevede che il soddisfacimento delle esigenze del presente non pregiudichi le possibilità delle generazioni future di soddisfare le proprie (1). Un ruolo fondamentale in questa prospettiva è in primis legato alla tutela dell'ambiente, ma riguarda a livello più generale anche la salute dell'uomo e la gestione dell'energia. Si può notare come gli obiettivi della sostenibilità corrispondano anche a quelli della tutela dei beni culturali. Infatti il patrimonio è parte integrante dell'ambiente e del paesaggio e il concetto stesso di conservazione riguarda la trasmissione al futuro delle testimonianze materiali del passato (2). La filiera del restauro deve promuovere strumenti di intervento per contribuire agli obiettivi dell'European Green Deal di essere entro il 2050 il primo continente ad avere un impatto climatico neutro (3). Gli sforzi sono stati indirizzati principalmente al tema del cambiamento climatico, valutando la componente socio-economica e di sfruttamento del patrimonio culturale, ad esempio dal punto di vista turistico. Ma non solo: il raggiungimento dell'obiettivo europeo passa anche attraverso l'adeguamento di prodotti e pratiche del restauro. Per affrontare l'argomento con responsabilità non è sufficiente fare ricorso a valutazioni qualitative sul concetto di "green" (che è diverso da "origine naturale") ma bisogna individuare parametri oggettivi di quantificazione. Inoltre si opera in un sistema articolato, dove intercorrono più variabili a definire l'adeguatezza di una scelta operativa. Non si può infatti prescindere dalle prestazioni dei materiali e soprattutto dalla loro durabilità nel tempo. La dimensione temporale è un concetto chiave: ridurre la frequenza degli interventi è preferibile in linea di principio, consente di utilizzare meno prodotti e riduce

l'esposizione degli utilizzatori alle sostanze. Il concetto di ritrattabilità delle superfici al posto della reversibilità (che implica l'utilizzo di altri prodotti e la generazione di rifiuto) è un altro parametro da considerare nella stima costi-benefici.

Non si tratta quindi di escludere o eliminare a priori l'uso di prodotti e metodi, ma di farne ricorso con consapevolezza e responsabilità, con una valutazione che comprenda innanzitutto i dati scientifici e in seconda battuta gli interessi commerciali. Questo atteggiamento è anche coerente con l'agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile sottoscritta nel settembre 2015 dai governi dei 193 Paesi membri dell'ONU. Tra i 17 obiettivi, il 12 ha come titolo "Garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo". Non solo la politica ma anche le aziende sono chiamate a prendere iniziative per queste sfide comuni ed a sensibilizzare gli utilizzatori al consumo consapevole, e quelle appartenenti al settore della tutela non ne sono escluse (4).

La chimica verde

La chimica verde, che rientra nel più ampio tema dell'economia circolare, è uno degli strumenti di cui si può avvalere la filiera del restauro. Una modalità per adeguare le scelte operative a questi temi è la valutazione di soluzioni di intervento che abbiano un bilancio migliore in termini di caratteristiche di tossicità, sicurezza e impatto ambientale. E' importante precisare che questo esame è il risultato di una serie di informazioni di tipo comparativo e inserite in uno specifico contesto. Può risultare fuorviante considerare la questione in termini assoluti perché si rischia di sottovalutare fattori importanti: non è sempre vero che soluzioni a base acqua siano preferibili a solventi o prodotti di origine naturali siano più green di altri di sintesi (5). E' evidente quindi che si tratta di un tema complesso dove può risultare difficile orientarsi e identificare criteri oggettivi di confronto.

La Life Cycle Assessment (LCA) è sicuramente lo strumento più noto a supporto delle decisioni in ottica di sostenibilità. Tuttavia solo pochi tentativi sono stati portati a termine nel campo della conservazione, dimostrando la mancanza di database dedicati per un settore dove la specificità degli interventi è difficile da inserire in un contesto di dati generalizzati (6). Un possibile approccio alternativo e complementare alla LCA è quello di fare ricorso ai 12 principi della chimica verde (7) che attraverso i temi dell'uso delle risorse, dell'efficienza energetica e dei rischi per l'uomo e per l'ambiente, indicano gli scenari ideali per la progettazione e la produzione di nuovi formulati con l'ottica della prevenzione. Inoltre, ad un'analisi di tipo qualitativo è possibile correlare una quantificazione grazie alle Green Chemistry Metrics (GCM), che forniscono un metodo di valutazione comparativo tra processi. A differenza di sistemi complessi come la LCA, questo è uno strumento poco costoso, applicabile sfruttando i dati disponibili e in tempi brevi. Si possono così confrontare prodotti chimici alternativi per la stessa applicazione o processi produttivi/di sintesi di uno stesso prodotto.

La flessibilità di questo strumento risiede nella possibilità di scegliere il perimetro entro il quale confrontare gli elementi in esame e di considerare un certo numero di metriche significative per il processo specifico. Trattandosi di un sistema comparativo, una volta stabiliti i parametri, i risultati quantitativi avranno un valore relativo, ma immediato per operare delle scelte e di facile comunicazione. L'utilizzo di questo approccio è piuttosto recente e quasi del tutto nuovo per il settore del restauro se si fa eccezione per le linee guida per l'utilizzo dei solventi (5). Per questa ragione, il caso qui proposto riguarda l'applicazione qualitativa e quantitativa della chimica verde ad un singolo processo produttivo, ovvero la sintesi di silice funzionalizzata via sol-gel.

L'analisi del processo alla luce dei 12 principi costituisce il presupposto per un successivo confronto con altri cicli produttivi ed è utile per testare il sistema e stabilire il grado di affinità alla chimica verde, valutando punti di forza e spunti di miglioramento.

Il processo sol-gel

Il termine sol-gel indica un processo di sintesi di ossidi ceramici che parte da reazioni chimiche a temperatura ambiente in fase liquida anziché dalla cottura di materie prime minerali. Grazie al metodo sol-gel si possono ottenere ossidi con diverse strutture: nanofilm, nanoparticelle, fibre, etc.

Nello specifico, Siltea è specializzata nella sintesi di nano e micro-strati di silice amorfa attraverso un processo brevettato presso l'Università di Padova dal gruppo di ricerca in Chimica per i Beni Culturali (8), implementato nella fase di trasferimento tecnologico fino alla realizzazione di prodotti specifici. Il punto di partenza è il sol, una soluzione di precursori costituita da una sospensione stabile di nanoparticelle (dimensioni comprese tra 1 e 100 nanometri) che attraverso reazioni controllate di idrolisi e condensazione passa a uno stato di wet-gel, ovvero un corpo fluido pre-reticolato che può essere impiegato per il trattamento dei materiali, utilizzabile come consolidante, protettivo o legante pittorico. Applicando la soluzione alla superficie o impregnando una matrice porosa si formano strati di

rivestimento o cluster di xerogel. Per densificazione si intende la trasformazione da xerogel poroso a corpo solido e denso di silice amorfa, un passaggio che avviene a temperatura ambiente, in tempi rapidi, senza bisogno di atmosfere controllate o di trattamenti termici, rendendo questa tecnologia molto versatile, pratica ai fini cantieristici ed idonea al trattamento di ampie superfici poste in ambiente esterno. Questi materiali, grazie alla loro natura minerale, sono molto stabili nel tempo ed è possibile ritrattare le superfici.

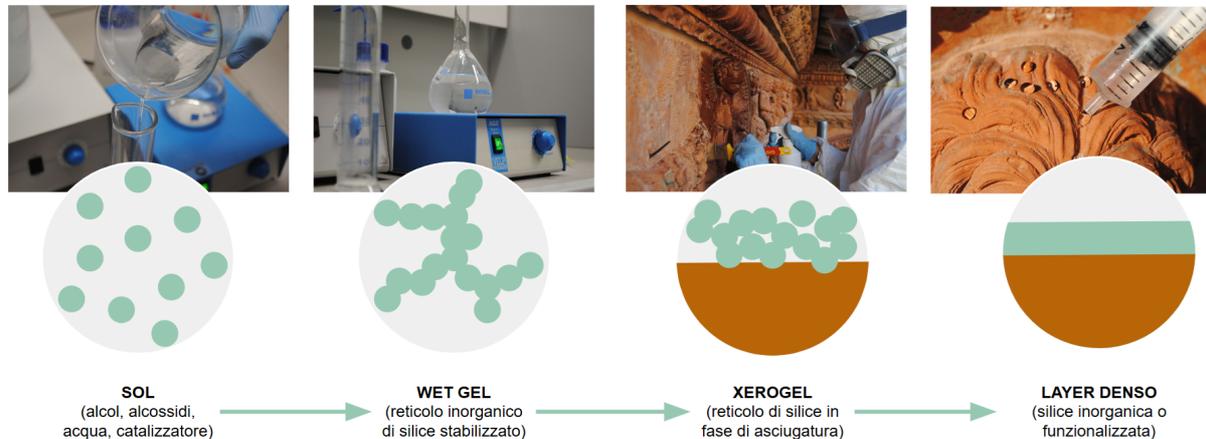


Figura 1. Schematizzazione del processo sol-gel per formazione di strati protettivi / consolidanti a base silice.

I 12 principi della Chimica Verde applicati al processo sol gel

In questa sezione si descrivono i dodici principi (9) illustrando per ognuno come il metodo sol-gel risponda ai contenuti in termini qualitativi.

- 1. Prevenzione degli sprechi:** evitare la formazione di rifiuti è meglio che trattarli successivamente. L'ottica della prevenzione del primo principio è dichiarata. È importante notare che non si fa riferimento solo ai rifiuti generati in produzione ma anche a quanto si può considerare come scarto nei processi di applicazione. La gestione del rifiuto, anche se non pericoloso, richiede dispendio di energia per la sua raccolta, per il trasporto e per il successivo trattamento. La sintesi sol-gel per sua natura è un processo chimico che non genera scarti di lavorazione. Il rifiuto è per la maggior parte alcol isopropilico utilizzato come soluzione di lavaggio di strumentazione e macchinari e rappresenta lo 0,1% in massa rispetto alla produzione. Lo stesso vale per l'applicazione dei prodotti finiti, che non richiedono impacchi o altre sostanze ausiliarie destinate a essere smaltite.
- 2. Atom Economy:** utilizzare reazioni chimiche in cui tutte le sostanze di partenza reagiscono in modo da incorporare quanto più possibile nel prodotto finale i materiali e gli intermedi utilizzati. Tutti o la maggior parte gli atomi dei reagenti di un composto dovrebbero far parte del formulato finale, in modo da ottimizzare l'impiego delle risorse e limitare la formazione di sottoprodotti non interessanti dal punto di vista commerciale o che devono essere smaltiti in un secondo momento. La sintesi sol-gel è perfettamente aderente a questo concetto: il 100% delle materie prime impiegate (alcoli, acqua e precursori della silice) si ritrova nel formulato finale e si trasforma in prodotto, senza generazione di rifiuti.
- 3. Processi meno tossici:** progettare sintesi che utilizzino o generino sostanze con tossicità minima o nulla per l'uomo o l'ambiente. La scelta di materiali e metodi di produzione deve essere effettuata quando possibile, nell'ottica di abbassare i rischi per la salute e l'impatto con l'ambiente. La sintesi sol-gel è versatile e permette di selezionare materie prime che non riportino i pittogrammi di pericolo CLP associati a grave pericolo per la salute, tossicità acuta, pericolo per l'ambiente.
- 4. Prodotti chimici più sicuri:** progettare i prodotti chimici per preservare l'efficacia della loro funzione riducendo al contempo la loro tossicità. Le sostanze chimiche altamente reattive sono spesso utilizzate per la fabbricazione di prodotti, perché sono molto efficaci, ma lo sono anche nell'interferenza con i sistemi biologici. Quando possibile, la pericolosità è da considerare già in fase di progettazione per selezionare i reagenti meno tossici. I prodotti sol-gel sono privi di sostanze PBT (Persistenti, Bioaccumulabili e Tossiche) come riportato nella sezione 2.3 e 12.5 delle schede di sicurezza. Le formulazioni sono elaborate a partire dal principio chiave di escludere a priori l'impiego di sostanze soggette a restrizioni. Così facendo si tutela la salute degli operatori sia in fase di

produzione che di applicazione, riducendo i rischi correlati alla movimentazione e allo stoccaggio di materie prime e prodotti finiti.

5. Solventi e ausiliari più sicuri: ridurre l'utilizzo di solventi o di altre sostanze ausiliarie non direttamente coinvolte nella reazione. Se non fosse possibile, sostituirli con sostanze sempre meno tossiche. I solventi sono spesso essenziali in un processo chimico e risulta difficile se non impossibile eliminarli. Tuttavia, si possono operare delle scelte volte ad abbassare i rischi connessi alla volatilità, all'infiammabilità e alla tossicità di questa classe di composti. Escludere a priori l'uso di solventi nel mondo del restauro non è possibile: a livello operativo spesso si ha necessità di prodotti con una certa forza di penetrazione (vedi i consolidanti) o di bagnabilità delle superfici o caratterizzati da specifiche velocità di evaporazione. Nel metodo sol-gel l'uso dei solventi garantisce le caratteristiche tecniche e la conservazione dei prodotti. In accordo con il quinto principio, la sintesi è veicolata da alcol etilico o isopropilico, solventi classificati a bassa tossicità e raccomandati secondo linee guida specifiche, come CHEM21 (10).

Recommended	Water, EtOH, <i>i</i> -PrOH, <i>n</i> -BuOH, EtOAc, <i>i</i> -PrOAc, <i>n</i> -BuOAc, anisole, sulfolane.
Recommended or problematic?	MeOH, <i>t</i> -BuOH, benzyl alcohol, ethylene glycol, acetone, MEK, MIBK, cyclohexanone, MeOAc, AcOH, Ac ₂ O.
Problematic	Me-THF, heptane, Me-cyclohexane, toluene, xylenes, chlorobenzene, acetonitrile, DMPU, DMSO.
Problematic or hazardous?	MTBE, THF, cyclohexane, DCM, formic acid, pyridine.
Hazardous	Diisopropyl ether, 1,4-dioxane, DME, pentane, hexane, DMF, DMAc, NMP, methoxy-ethanol, TEA.
Highly hazardous	Diethyl ether, benzene, chloroform, CCl ₄ , DCE, nitromethane, CS ₂ , HMPA.

Figura 2. Tabella riassuntiva della linea guida CHEM21 (10).

6. Efficienza energetica: i requisiti energetici dovrebbero essere riconosciuti per i loro impatti ambientali ed economici e dovrebbero essere ridotti al minimo. I metodi sintetici dovrebbero essere condotti a temperatura e pressione ambiente. Il risparmio energetico è un fattore vantaggioso da diversi punti di vista ed è possibile intervenire in alcuni processi chimici non ottimizzati. Infatti esistono prassi messe a punto a livello di ricerca senza considerare il parametro del consumo energetico come un fattore critico. Il processo sol-gel può prevedere una fase di trattamento termico se associato ad applicazioni di tipo industriale, ma nel caso specifico di produzione di protettivi e consolidanti a base silice per il restauro, il sistema innovativo è stato brevettato proprio per operare in condizioni di temperatura e pressione ambientale sia in fase di sintesi che di applicazione dei prodotti, minimizzando il consumo energetico.

7. Materie prime rinnovabili: una materia prima dovrebbe essere rinnovabile piuttosto che esaurirsi quando è tecnicamente ed economicamente fattibile. La consapevolezza della necessità di fare ricorso a materie prime rinnovabili sta diventando sempre più solida. La ricerca degli ultimi anni ha portato a progressi significativi ad esempio nel campo dei carburanti, per sostituire quanto più possibile le fonti di origine fossile. I risultati sono incoraggianti e trasversali a più settori anche se la produzione è ancora molto dipendente da materiali non facilmente sostituibili, soprattutto in termini di performance. Per quanto riguarda il processo sol-gel, vincoli normativi e tecnici lasciano poco spazio alla scelta delle materie prime, ma ove possibile, la scelta predilige quelli riciclabili e provenienti da fonti rinnovabili. Più facilmente il principio 7 può essere applicato nella selezione dei packaging.

8. Riduzione dei derivati: la derivatizzazione non necessaria (uso di gruppi bloccanti, protezione/deprotezione, modifica temporanea dei processi fisici/chimici) dovrebbe essere minimizzata o evitata se possibile, poiché tali passaggi richiedono reagenti aggiuntivi e possono generare rifiuti. Il ricorso a reazioni specifiche che permettano di ottenere il risultato desiderato senza reagenti o processi aggiuntivi è da preferire per contenere l'uso delle risorse materiali ed energetiche, per l'eventuale purificazione del prodotto e per limitare la generazione di scarti. La sintesi sol-gel non prevede l'utilizzo di intermedi di reazione, come visto nel principio 2 tutta la materia prima concorre alla composizione del prodotto finito, che è pronto all'uso.

9. Catalisi: i reagenti catalitici (quanto più possibile selettivi), necessari in piccole quantità, sono da preferire ai reagenti stechiometrici. Questo principio si collega al precedente ed al secondo per rendere le reazioni più efficienti. I catalizzatori agiscono sulla velocità di reazione senza essere modificati, abbassando l'energia di attivazione dei processi senza diventare rifiuto. Tutte queste proprietà li rendono candidati ideali per essere sfruttati nell'ottica del perfezionamento dei processi. Il metodo sol-gel è per sua natura una reazione catalizzata e risponde perfettamente a quanto indicato nel principio 9.

10. Progettare per la degradazione: i prodotti chimici dovrebbero essere progettati in modo tale che al termine della loro funzione si decompongano in prodotti di degradazione innocui e non persistano nell'ambiente. A differenza dei precedenti, questo principio si focalizza sul prodotto e non sul processo produttivo ed in particolare su quanto accade dopo l'uso. La degradazione mira a ridurre potenziali

danni da esposizione sia per la salute che per l'ambiente. I trattamenti superficiali sol-gel hanno natura minerale in quanto costituiti da una base di silice amorfa, materiale inerte e non pericoloso. A differenza di trattamenti organici, non generano residui e non è necessaria la loro rimozione per eseguire manutenzioni ordinarie e straordinarie. Inoltre l'apporto di materiale per proteggere o consolidare una superficie è minimo, con spessori compresi tra le centinaia di nanometri e qualche micron.

11. Analisi in tempo reale: effettuare monitoraggio e controllo in tempo reale dell'andamento delle reazioni durante le sintesi per minimizzare o eliminare la formazione di sottoprodotti o il rilascio nell'ambiente di sostanze pericolose. Il corretto andamento di un processo può essere verificato con analisi che permettano di individuare anomalie come variazioni di temperatura o pH. Il feedback in tempo reale consente di intervenire prima che una reazione vada fuori controllo con conseguenti rischi per la salute, ambiente e spreco di materiali ed energia. Il processo di sintesi sol-gel non genera sottoprodotti ed è realizzato in ambiente idoneo per il controllo delle emissioni in atmosfera. Al momento non sono previste analisi in tempo reale perché il processo è a singola fase e breve (qualche ora), tuttavia non si esclude di poterle inserire in futuro.

12. Prevenzione degli incidenti: le sostanze utilizzate in un processo chimico dovrebbero essere scelte per ridurre al minimo il rischio di incidenti chimici, inclusi rilasci, esplosioni e incendi. La sicurezza può essere definita come il controllo dei pericoli riconosciuti per raggiungere un livello di rischio accettabile. Questo principio mira a salvaguardare gli utilizzatori ma anche i lavoratori in produzione, che sono i primi soggetti esposti. L'attenzione per la riduzione degli incidenti ha ovviamente anche una valenza ambientale. I prodotti sol-gel sono soluzioni idroalcoliche e dunque presentano un certo grado di infiammabilità. La sintesi viene realizzata in laboratori idonei all'impiego di materie prime infiammabili, nel rispetto delle normative sulla sicurezza dei luoghi di lavoro. Come accennato nel punto 5, per ottenere specifiche caratteristiche tecniche, l'impiego dei solventi - anche quelli raccomandati come etanolo o isopropilico - non può essere sostituito e a livello applicativo l'operatore dovrà attenersi alle relative prescrizioni per lavorare in sicurezza.

Green Chemistry Metrics e processo sol gel

Dopo aver analizzato il processo sol-gel alla luce della chimica verde a livello concettuale, è opportuno quantificare questa descrizione ricorrendo alle Green Chemistry Metrics (11). I 12 principi sono stati raggruppati nei tre macro temi:

- migliore uso delle risorse(principi 1,2,7,8,9,11)
- migliore efficienza energetica (principio 6)
- riduzione dei rischi per uomo e ambiente (principi 3,4,5,10,12)

Per i calcoli si è fatto riferimento alla produzione di silice sol-gel relativa all'anno 2023 [1]. Per favorire la leggibilità dei risultati i dati sono stati riportati nella seguente tabella.

Principio	Formula	Commento	Punteggio sol-gel	
prevenzione degli sprechi	$P1 = \frac{\Sigma(\text{massa del rifiuto} \times \text{gravità del rifiuto})}{\text{massa del prodotto}}$	La quantità di rifiuti generata da un processo è data dalla differenza in massa tra il materiale impiegato e il prodotto finito	0.06 in una scala da 0 a 12. Punteggio desiderabile ottenuto grazie alla minima quantità di scarto del processo associato ad una pericolosità di facile gestione	Uso delle risorse
atom economy	$P2 = \frac{\text{reagenti e ausiliari kg} - \text{reagenti e ausiliari riciclati(kg)}}{\text{massa del prodotto kg} + \text{massa dei sottoprodotti (kg)}}$	La Process Mass Intensity (PMI) considera la percentuale di incorporazione della massa dei reagenti nella massa del prodotto e tiene conto anche dell'eccesso dei reagenti e degli additivi	1 Miglior risultato auspicabile poiché la massa dei reagenti è uguale alla massa del prodotto finito.	
materie prime rinnovabili	$P7 = \frac{\Sigma(\text{massa della materia prima} \times \% \text{ non rinnovabile})}{\text{massa del prodotto}}$	Una materia prima è definita rinnovabile quando la sua velocità di accumulo globale è maggiore della velocità con cui è consumata. La formula ne premia l'impiego	Al momento non calcolabile per difficoltà nel reperimento delle informazioni	

derivatizzazione	$P8 = \text{massa dello scarto dei derivati} / \text{massa del prodotto}$	I gruppi protettori sono impiegati per generare cambiamenti temporanei di proprietà chimiche/fisiche e sarebbero da evitare	0 in una scala da 0 a 1 Miglior punteggio possibile, non si ricorre a derivati	
catalisi	$P9 = 1 / 1 + \text{numero di step catalizzati}$	I processi catalizzati sono incoraggiati come processi efficienti	0,5 - auspicabile inferiore a 1 Sintesi a singolo step catalizzato	
analisi in tempo reale	$P11 = \text{no. di step senza mtg} / \sum(\text{no. di step con mtg} \times \text{rigore del mtg}) + \text{no. di step senza mtg}$	Il monitoraggio durante le reazioni serve a prevenire sprechi e a garantire la sicurezza	1 - auspicabile 0 Al momento non monitorato	
intensità energetica	$P6 = \sum (\text{FGT} + \text{FGP}) \times \text{tempo (h)} \times \text{massa di materia prima (kg)} / \text{massa del prodotto (kg)}$	Sarebbe approssimativo calcolare l'effettivo consumo energetico di una reazione in un processo di produzione. Si considera il tempo di reazione in cui le fasi di sintesi deviano dalla pressione e temperatura ambiente (1 bar, 25 °C).	6 -auspicabile valore più basso possibile Punteggio desiderabile, le reazioni avvengono a temperatura e pressione ambientale	Efficienza energetica
processi meno tossici	$P3 = \sum \text{punteggio H} \times \text{massa di materia prima (kg)} / \text{massa del prodotto (kg)}$	Considera le frasi H3xx delle schede di sicurezza delle materie prime	4.7 in una scala da 1 a 5. La pericolosità è legata al solvente (alcol isopropilico), rappresenta la scelta migliore in quanto raccomandato secondo CHEM21	Rischi uomo - ambiente
prodotti chimici sicuri	$P4 = \sum \text{punteggio H} \times \text{massa di prodotto (kg)} / \text{massa del prodotto (kg)}$	Considera le frasi H3xx delle schede di sicurezza dei prodotti	5 La pericolosità è legata al solvente (alcol isopropilico), rappresenta la scelta migliore in quanto raccomandato secondo CHEM21	
solventi	$P5 = \sum \text{punteggio H} \times \text{massa di solvente (kg)} / \text{massa del prodotto (kg)}$	Considera le frasi H3xx delle schede di sicurezza dei solventi	3.7 La pericolosità è legata al solvente (alcol isopropilico), rappresenta la scelta migliore in quanto raccomandato secondo CHEM21	
progettare per la degradazione	$P10 = \sum (\text{punteggio B} \times \text{massa di prodotto (kg)} / \text{massa del prodotto (kg)})$	Si analizzano le frasi H4xx	1 in una scala da 1 a 5 Punteggio migliore, le frasi H400 non sono presenti in SDS	
incidenti	$P12 = \sum (\text{punteggio P} \times \text{massa di prodotto (kg)} / \text{massa del prodotto (kg)})$	Si analizzano le frasi H2xx relative ai pericoli fisici	3.5 in una scala da 1 a 5 La pericolosità è legata al solvente (alcol isopropilico), rappresenta la scelta migliore in quanto raccomandato secondo CHEM21	

L'analisi del processo sol-gel attraverso i 12 principi e le metriche della chimica verde ha messo in luce il limite di un'analisi qualitativa rispetto ad una quantitativa. Se da un lato il metodo sol-gel può essere facilmente inserito come attinente a tutti i principi, le metriche hanno suggerito importanti spunti di riflessione e miglioramento.

Come descritto in precedenza, la flessibilità dello strumento consente di selezionare solo le metriche pertinenti e in questa fase si ritiene di non avere sufficienti informazioni per il calcolo delle materie prime rinnovabili che portino ad un risultato significativo. Le analisi in tempo reale, trattandosi di una reazione a singolo step che si completa in poche ore, non sono state ritenute fondamentali per questa prima valutazione.

Migliore uso delle risorse

1. Prevenzione degli sprechi

Trattamento rifiuto	Gravità rifiuto
Rifiuto tossico	12
Inceneritore	5
Discarica	3
Trattamento acque	1

11. Analisi in tempo reale

Scala	Monitoraggio	Rigore
Laboratorio, impianto pilota o produzione	Analogico	1
	Digitale	5

Migliore efficienza energetica

6. Intensità energetica

Range di P (atm)	Fattore di gravità (FG _P)	Range di T (°C)	Fattore di gravità (FG _T)
Alta P (200 atm)	7	<0	7
Pressione std (1 atm)	1	0-20	3
Vuoto (0 atm)	3	20-30	1
		30-100	3
		>100	7

Ridurre i rischi per l'uomo e per l'ambiente

10. Progettare per la degradazione

Punteggio danni ambientali (B, bioaccumulazione)	1	2	3	4	5
Pericoloso per l'ambiente acquatico		H413	H402 H412	H401 H411 H440 EUH450	H400 H410 EUH440 H451
Si accumula nell'ambiente				H440	EUH441 EUH420
Interferente endocrino				H431	H430
È rapidamente biodegradabile?	Sì	No			
Fattore di bioaccumulazione	<500	>500			
Log K _{ow} (fattore di partizione)	<4	>4			

Figura 3. Tabelle con parametri per il calcolo delle GCM (11).

I punti di forza del processo sol-gel sono molteplici e di primaria importanza:

- la prevenzione degli sprechi,
- il concetto di economia atomica,
- la semplicità delle reazioni che evita l'uso di additivi o derivati
- il basso consumo energetico grazie a condizioni ambientali di sintesi
- utilizzo di catalizzatori.
- bassa produzione di rifiuto
- l'utilizzo di solventi alcolici, a bassa pericolosità (raccomandati da CHEM21)
- basso impatto ambientale (rapida biodegradabilità del materiale).

Gli argomenti su cui focalizzare l'attenzione per incrementare la sostenibilità del processo che pur risulta molto virtuosa, riguardano:

- la ricerca di materie prime rinnovabili;
- la possibilità di introdurre soluzioni alternative a base acqua (ove possibile) per ridurre il rischio di incidenti legati all'infiammabilità;
- il monitoraggio della scelta dei solventi in base alle linee guida.

Conclusioni

L'applicazione delle Green Chemistry Metrics dimostra come il metodo sol-gel possa essere considerato un processo green per la sintesi di consolidanti, protettivi e leganti pittorici per la conservazione dei beni culturali.

Grazie a questo studio, si è compiuta un'analisi innovativa di un processo produttivo nel settore del restauro in ottica di sostenibilità. Questo approccio oggettivo è un primo passo per un successivo confronto con altri metodi o prodotti. Nonostante la complessità del tema, questo metodo ha permesso di raggiungere una maggiore consapevolezza sulla chimica sostenibile, a partire da dati disponibili e con calcoli relativamente semplici. Gli spunti emersi sono una spinta al miglioramento dell'efficienza, che si traduce anche in un vantaggio competitivo, ritenendo che la sostenibilità sia un criterio di differenziazione ormai imprescindibile anche nel settore del restauro.

NOTE

[1] Lavoro di project work nell'ambito del corso "La chimica sostenibile nella progettazione di processi, materiali e prodotti" cofinanziato dal programma Erasmus+ dell'Unione Europea ed organizzato da Unismart Fondazione Università di Padova.

BIBLIOGRAFIA

1. Brundtland G.H., "1988 - Introduzione". In: *Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo, Il futuro di tutti noi*. Bompiani, Milano, 15-22. Chambers R., 1997
2. Bordoni, P. "Il valore della sostenibilità per la conservazione del patrimonio. Riflessioni verso una definizione dei prodotti sostenibili del restauro" *Restauro Archeologico*, 30(1), 2023
3. Potts, A. "European Cultural Heritage Green Paper" Europa Nostra, The Hague & Brussels, 2021
4. <https://unric.org/it/agenda-2030/>
5. Gwendoline R. Fife "Greener Solvents in Conservation: An Introductory Guide": *Archetype-Sustainability in Conservation*, xi, 75 p., ill. ICCROM: XX H 6, Londra 2021
6. Elnaggar, A. "Nine principles of green heritage science: life cycle assessment as a tool enabling green transformation." *Herit Sci* 12, 7, 2024
7. Anastas Paul, Warner John, "Green Chemistry: Theory and Practice" Oxford University Press, 1998
8. Patent n. 0001370467 "Synthesis of silica protective films by tin-catalized sol-gel process" Università di Padova, 2006
9. <https://www.acs.org/greenchemistry/principles/12-principles-of-green-chemistry.html>
10. Prat, D., Wells, A., Hayler, J., Sneddon, H., McElroy, C. R., Abou-Shehada, S., & Dunn, P. J. "CHEM21 selection guide of classical- and less classical-solvents". *Green Chemistry*, 18(1), 2015 pp 288-296
11. DeVierno Kreuder Ashley et.al. , "A Method for Assessing Greener Alternatives between Chemical Products Following the 12 Principles of Green Chemistry", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5, 2927-2935