



Esame di fine corso

Cod. Progetto 4262/2/668/2015 - Cod. Intervento 4262/004/636/DEC/22
Titolo: Tecnico per la gestione di impianti di produzione della carta
Sede del corso: Verona - VR - 37138 - Via Don Giovanni Minzoni, 50

Produzione di carta ignifuga

di Bianchetto Luca



Scuola Interregionale
di tecnologia per tecnici Cartari

Istituto Salesiano «San Zeno» - Via Don Minzoni, 50 - 37138 Verona
fcs.istitutosalesianosanzeno.it - scuolacartaria@sanzeno.org

INDICE

1- INTRODUZIONE

1.1 – Evoluzione delle normative sulla sicurezza antincendio applicate alla carta

2- TEST DI INFIAMMABILITÀ

2.1 – Introduzione

2.2 – Normativa europea

2.3 – Germania Din 4102

2.4 – Francia M1-M4

2.5 – Regno Unito Bs 5852 / bs7676

2.6 – Stati Uniti California technical bulletins e Astm e84

2.7 – Conclusioni

3- DAL COMPORTAMENTO AL FUOCO AI MECCANISMI DELLA COMBUSTIONE

3.1 – Introduzione

3.2 – Norme e contesti applicativi

3.3 – Conclusione

4- IL MECCANISMO DELLA COMBUSTIONE

5- I MECCANISMI DI AZIONE DEI RITARDANTI DI FIAMMA

5.1 – Meccanismo dello sviluppo di calore

5.2 – Meccanismo gas phase

5.3 – Meccanismo char

5.4 – Meccanismo a intumescenza

6- ANTIFIAMMA PER LA CARTA

6.1 – Sali di ammonio

6.2 – Sali organici: azoto/potassio

7- PROBLEMATICHE NELLA GESTIONE DEI FOGLIACCI NELLA PRODUZIONE DI CARTA IGNIFUGA

8- LA PATINATURA DELLA CARTA IGNIFUGA

8.1 Introduzione

8.2 Composizione della patina e interazione con i ritardanti di fiamma

8.3 Effetti della patinatura sul comportamento al fuoco

8.4 Implicazioni industriali

8.5 Conclusione

9- CONCLUSIONI

10- BIBLIOGRAFIA

1. INTRODUZIONE

1.1 EVOLUZIONE DELLE NORMATIVE SULLA SICUREZZA ANTINCENDIO APPLICATE ALLA CARTA

Le prime regolamentazioni in materia di sicurezza antincendio dei materiali si sviluppano a partire dalla metà del XX secolo. Con la crescente industrializzazione e l'impiego sempre più diffuso di materiali combustibili, è emersa la necessità di definire criteri standard per la valutazione del rischio incendio. Con il passare degli anni, la diffusione di edifici pubblici, scuole, uffici e spazi commerciali ha reso evidente l'importanza di controllare la propagazione delle fiamme anche in materiali apparentemente innocui come la carta. La carta sia spesso considerata un materiale di uso comune, la sua natura a base di cellulosa, combinata con una struttura fibrosa e un'elevata superficie specifica, la rende facilmente infiammabile e capace di contribuire in modo significativo allo sviluppo di un incendio se non adeguatamente trattata

A livello europeo, l'esigenza di armonizzare le normative tra i diversi Paesi ha portato alla creazione di standard comuni. Tra questi, un ruolo fondamentale è svolto dalla classificazione EN 13501-1, che definisce le modalità di valutazione del comportamento al fuoco dei prodotti da costruzione, inclusi quelli a base di cellulosa. Questa norma stabilisce le classi di reazione al fuoco, indicando il contributo di un materiale alla diffusione delle fiamme, alla produzione di fumo e alla formazione di gocce o particelle incandescenti.

Prima dell'introduzione delle norme armonizzate, i test venivano effettuati secondo standard nazionali, come le norme DIN in Germania o UNI in Italia. Questa situazione rendeva complesso il confronto diretto tra i risultati delle prove e limitava la libera circolazione dei prodotti sul mercato europeo. L'unificazione a livello europeo ha permesso di confrontare direttamente i risultati delle prove, facilitando la produzione e la commercializzazione dei materiali ignifughi all'interno del mercato europeo e garantendo maggiore coerenza nei criteri di valutazione.

La carta, per le sue caratteristiche intrinseche, deve essere sottoposta a test specifici. La sua struttura fibrosa e l'ampia superficie esposta all'ossigeno la rendono infatti facilmente combustibile se non adeguatamente trattata con sostanze ritardanti di fiamma. Per questo motivo, la normativa impone che la carta destinata a determinati utilizzi venga testata e certificata.

I principali test includono prove di resistenza alla fiamma, prove sulla velocità di combustione e test relativi alla produzione di fumo e al gocciolamento. Il superamento di queste prove consente di classificare il materiale secondo i requisiti normativi applicabili e garantisce l' idoneità della carta ignifuga per l'impiego in contesti in cui la sicurezza antincendio rappresenta un requisito essenziale, sia in ambito civile sia industriale.

2. TEST DI INFIAMMABILITÀ PER TESSUTI D'ARREDAMENTO E RIVESTIMENTI

2.1 INTRODUZIONE

La sicurezza antincendio rappresenta uno degli aspetti più rilevanti nella progettazione e produzione di mobili imbottiti, pannelli rivestiti e tessuti per arredamento. Molti incendi che si sviluppano in ambienti chiusi hanno origine dall'accensione accidentale di sedute, divani, rivestimenti murali o pannelli decorativi. Per questo motivo, nel corso degli anni sono stati sviluppati numerosi test di laboratorio con l'obiettivo di valutare il comportamento dei materiali quando vengono esposti a diverse fonti di calore o di fiamma.

Le normative di reazione al fuoco non si limitano a verificare se un materiale prende fuoco, ma analizzano anche la velocità con cui la fiamma si propaga, la quantità di calore rilasciato, la produzione di fumo e l'eventuale presenza di gocciolamento infuocato. Tutti questi fattori incidono in modo determinante sulla sicurezza delle persone presenti in un edificio, poiché influenzano in modo diretto il tempo disponibile per l'evacuazione.

2.2 NORMATIVA EUROPEA – EN 1021

In ambito europeo, la norma EN 1021 costituisce il riferimento principale per la valutazione del comportamento all'accensione dei mobili imbottiti. La norma è articolata in due parti distinte, ciascuna pensata per simulare una diversa possibile fonte di innesco, tipicamente riscontrabile negli ambienti di utilizzo.

La Parte 1 della EN 1021 riproduce l'innesco provocato da una sigaretta accesa. Il materiale tessile viene montato su una struttura che simula una seduta con schienale, con i due elementi disposti a un angolo 90 gradi. La sigaretta viene posizionata nel punto più critico, ovvero l'angolo tra sedile e schienale, e lasciata bruciare completamente. Il materiale supera la prova se non si sviluppano fiamme visibili e se la combustione si estingue spontaneamente.

La Parte 2 prevede invece l'esposizione del campione a una piccola fiamma di butano, applicata per un tempo definito. Questo test simula l'effetto di un fiammifero acceso o di una piccola fiamma accidentale. Anche in questo caso, la valutazione del materiale si basa sull'osservazione della capacità di spegnersi spontaneamente una volta rimossa la fonte di accensione e sulla limitazione dell'eventuale propagazione della fiamma.

2.3 GERMANIA – DIN 4102

La normativa tedesca DIN 4102 prevede la classificazione dei materiali in base alla loro reazione al fuoco, distinguendo diversi livelli di prestazione. Il livello B2 rappresenta una classe di normale infiammabilità, mentre il livello B1 è riservato ai materiali classificati come difficilmente infiammabili.

Il test B1, noto come Brandschacht, è considerato particolarmente severo. I campioni vengono disposti verticalmente in una struttura a camino e sottoposti a una fiamma controllata per un periodo stabilito dalla norma. Durante la prova si misurano la temperatura dei fumi e la lunghezza residua del campione, parametri che permettono di valutare la capacità del materiale di limitare la propagazione dell'incendio.

2.4 FRANCIA – CLASSIFICAZIONE M1–M4

Il sistema francese si basa sulla classificazione da M1 a M4. Il test principale utilizza un radiatore elettrico come fonte di riscaldamento, combinato con una fiamma pilota, al fine di valutare il comportamento del materiale in condizioni di riscaldamento progressivo. Si analizzano la durata della combustione, l'estensione del danno e la presenza di gocciolamento infuocato, elementi determinanti per l'assegnazione della classe finale.

2.5 REGNO UNITO – BS 5852 E BS 7176

Nel Regno Unito la norma BS 5852 prevede diverse fonti di accensione, tra cui la sigaretta e la cosiddetta "Crib 5", una struttura in legno che genera una fonte di calore più intensa. I risultati della prova sono collegati alle categorie di rischio dell'ambiente di utilizzo attraverso la norma BS 7176, che definisce i requisiti in funzione del contesto applicativo.

2.6 ITALIA – SISTEMA CSE RF

In Italia la classificazione dei materiali ai fini della reazione al fuoco è regolata dal Ministero dell'Interno e si basa su una combinazione di prove denominate CSE RF.

I test valutano parametri come tempo di post-fiamma, post-luminescenza, entità del danno e gocciolamento.

I risultati vengono ponderati secondo fattori specifici e combinati per determinare una classe finale che varia da 1 (migliore comportamento al fuoco) a 5 (prestazione inferiore), secondo

criteri definiti nei decreti attuativi. Questo sistema consente una valutazione articolata e dettagliata delle prestazioni del materiale.

2.7 STATI UNITI – CALIFORNIA TECHNICAL BULLETINS E ASTM E84

Negli Stati Uniti, la California ha sviluppato i Technical Bulletins, tra cui il TB 117 e il TB 133. Il TB 133 è uno dei test più severi, poiché prevede l'esposizione dell'intero mobile a una fiamma all'interno di una camera di prova. Durante il test vengono misurati il rilascio di calore, la produzione di fumo e la concentrazione di monossido di carbonio.

Per i materiali architettonici viene utilizzato l'ASTM E84, noto come Steiner Tunnel Test. Questo test misura la velocità di propagazione della fiamma e lo sviluppo del fumo in un tunnel di prova, fornendo indici numerici utilizzati per la classificazione secondo il codice NFPA.

2.8 CONCLUSIONI

L'analisi delle diverse normative evidenzia come ogni Paese abbia sviluppato metodologie specifiche per valutare la reazione al fuoco dei materiali tessili e dei mobili imbottiti. Nonostante le differenze nei metodi di prova, l'obiettivo comune rimane quello di ridurre il rischio di propagazione dell'incendio e garantire un livello adeguato di sicurezza per gli occupanti degli edifici.

3 DAL COMPORTAMENTO AL FUOCO AI MECCANISMI DELLA COMBUSTIONE

3.1 INTRODUZIONE

Il capitolo dedicato ai test di infiammabilità per tessuti d'arredamento e rivestimenti ha mostrato come il comportamento al fuoco dei materiali venga valutato mediante prove standardizzate basate su parametri misurabili. Aspetti quali la propagazione della fiamma, la produzione di fumo, il rilascio di calore e il gocciolamento consentono di confrontare materiali differenti e di verificarne l'idoneità in relazione alle condizioni di utilizzo previste. Tali prove forniscono quindi una valutazione complessiva delle prestazioni al fuoco dei materiali, ma non descrivono direttamente i fenomeni che si sviluppano durante l'esposizione al calore o alla fiamma. Questo aspetto risulta particolarmente significativo nel caso dei materiali di natura organica e cellulosica, il cui comportamento al fuoco è strettamente legato a processi chimici e fisici che avvengono a livello strutturale.

3.2 NORME E CONTESTI APPLICATIVI

Le normative analizzate nel capitolo precedente mostrano come gli stessi principi di valutazione vengano applicati in contesti differenti. Nel settore dell'arredamento civile, i test di infiammabilità sono finalizzati a ridurre il rischio di innesco e di propagazione dell'incendio in ambienti abitativi o aperti al pubblico.

In ambiti caratterizzati da requisiti di sicurezza più stringenti, come il trasporto ferroviario, tali criteri vengono ulteriormente rafforzati.

La norma EN 45545 rappresenta in questo senso un riferimento significativo, poiché valuta il comportamento al fuoco dei materiali utilizzati negli interni dei veicoli ferroviari tenendo conto di condizioni operative complesse e di spazi confinati.

La norma introduce una classificazione basata sui livelli di pericolo (Hazard Levels, HL), che considerano il tipo di veicolo, le condizioni di esercizio e il grado di affollamento previsto.

Le prestazioni di reazione al fuoco dei materiali vengono valutate attraverso una serie di prove specifiche, finalizzate a misurare parametri quali la propagazione della fiamma, il rilascio di calore, la produzione di fumo e la tossicità dei gas sviluppati durante la

combustione. Anche in questo settore trovano impiego materiali a base cellulosica, utilizzati come rivestimenti, pannelli o componenti tecnici, per i quali è spesso necessario ricorrere a trattamenti ritardanti di fiamma al fine di soddisfare i requisiti normativi.

3.3 CONCLUSIONE

I risultati ottenuti dalle prove di infiammabilità rappresentano l'esito finale di una serie di processi che si sviluppano quando un materiale viene sottoposto a una sorgente di calore o a una fiamma. Nel caso dei materiali cellulosici, il comportamento osservato durante i test è strettamente legato alla struttura chimica della cellulosa e ai fenomeni di degradazione termica che precedono e accompagnano la combustione.

Per interpretare correttamente le prestazioni rilevate durante le prove e comprendere il ruolo dei trattamenti ignifughi applicati ai materiali cellulosici, è quindi necessario analizzare i meccanismi fisici e chimici alla base del processo di combustione. Il capitolo successivo è dedicato a tale analisi, fornendo gli elementi teorici necessari per comprendere il comportamento al fuoco dei materiali studiati e per collegare i risultati sperimentali alle caratteristiche intrinseche del materiale.

4. IL MECCANISMO DELLA COMBUSTIONE

4.1 INTRODUZIONE

I test di infiammabilità descritti nel capitolo precedente consentono di valutare il comportamento al fuoco dei materiali attraverso risultati sperimentali ottenuti in condizioni controllate. Parametri quali la propagazione della fiamma, la produzione di fumo, il rilascio di calore e la capacità di auto-estinzione rappresentano indicatori fondamentali per la classificazione dei materiali.

Tali risultati, tuttavia, non sono altro che la manifestazione finale di una serie di fenomeni fisici e chimici che avvengono quando un materiale viene esposto a una sorgente di calore o di fiamma. Nel caso dei materiali a base cellulosica, come tessuti naturali, carta e materiali derivati, il comportamento osservato durante le prove di infiammabilità è strettamente legato ai processi di degradazione termica della cellulosa e ai meccanismi che regolano l'innesco e lo sviluppo della combustione.

Per comprendere in modo corretto le prestazioni rilevate nei test e interpretare l'efficacia dei trattamenti ignifughi applicati ai materiali cellulosici, è quindi necessario analizzare il processo di combustione nei suoi aspetti fondamentali.

4.2 LA COMBUSTIONE

Il termine combustione indica una reazione chimica di ossido-riduzione che libera energia sotto forma di calore (quindi è una reazione esotermica). In questa reazione, una sostanza detta "combustibile" si ossida, mentre il "comburente" (nell'aria principalmente è l'ossigeno) si riduce. Durante la reazione si producono calore e radiazioni elettromagnetiche. La luce visibile, cioè la fiamma, non è sempre presente: spesso compare, ma non è una condizione indispensabile affinché avvenga la combustione.

La combustione può essere suddivisa in cinque fasi principali: una fase iniziale di riscaldamento del materiale; la fase di decomposizione termica con l'innesco; la propagazione della reazione; la fase di ramificazione, durante la quale la combustione si diffonde e accelera; infine la terminazione, in cui si formano sostanze stabili che non reagiscono più. Questo processo non avviene spontaneamente, ma necessita di un innesco, cioè di un apporto di energia iniziale (energia di attivazione) proveniente dall'esterno. Una

volta avviata, la reazione diventa autosufficiente. L'innesco è fondamentale perché le prime reazioni richiedono energia per partire.

Essendo una reazione chimica, la combustione coinvolge dei reagenti — il combustibile e il comburente — che nel nostro caso sono il polimero e l'ossigeno, e porta alla formazione di prodotti. Nel caso dei materiali organici e a base cellulosica, come carta e fibre naturali, la combustione porta principalmente alla formazione di anidride carbonica e acqua. Tuttavia, in funzione della composizione del materiale e delle condizioni di combustione, possono generarsi anche sottoprodotti indesiderati, quali monossido di carbonio, tipicamente associato a fenomeni di combustione incompleta. Tuttavia, se il polimero contiene anche altri elementi oltre a carbonio, idrogeno e ossigeno, si possono generare anche sottoprodotti, come ad esempio ossidi di azoto o altre sostanze. Inoltre, a seconda delle condizioni in cui avviene la combustione, possono formarsi ulteriori composti, come il monossido di carbonio (tipicamente in caso di combustione incompleta).

Il comportamento del materiale durante la combustione può essere descritto anche attraverso parametri caratteristici, tra cui il LOI (Limit Oxygen Index), un parametro importante che indica quanto un materiale è in grado di mantenere la combustione una volta avviata. Il LOI rappresenta la concentrazione minima di ossigeno necessaria per sostenere la combustione di un materiale. Considerando che nell'aria la percentuale di ossigeno è circa del 20%, valori di LOI superiori a 20 identificano materiali che tendono a spegnersi da soli, mentre valori inferiori indicano che l'ossigeno presente nell'aria è sufficiente a mantenere la combustione.

5. I MECCANISMI DI AZIONE DEGLI ADDITIVI FLAME RETARDANT

5.1 INTRODUZIONE

La combustione è un processo complesso che avviene sia in fase condensata, cioè nel solido, sia in fase gassosa. Questo significa che esistono diversi modi per interferire con la reazione di combustione e, di conseguenza, diversi possibili meccanismi di azione degli agenti *flame retardant*. In base alla modalità con cui questi additivi agiscono sul processo combustivo, è possibile individuare quattro meccanismi principali:

1. sviluppo di calore
2. gas phase
3. char *(formazione di strato carbonioso)
4. intumescenza

5.1 SVILUPPO DI CALORE

Quello a sviluppo di calore è un tipo di meccanismo fisico che agisce principalmente in fase condensata ma può avere effetti anche in fase vapore gassosa. In pratica, si basa su di additivi che riescono a raffreddare il materiale e a diluire i gas combustibili; il raffreddamento del materiale è dovuto al fatto che la degradazione di questi additivi richiede calore (è endotermica) e quindi porta al raffreddamento del substrato. Esso si basa sull'impiego di additivi che, durante il riscaldamento, subiscono una degradazione endotermica, cioè richiedono energia per avvenire, sottraendo così calore al materiale e rallentandone la decomposizione. La diluizione dei gas combustibili, invece, si verifica perché la degradazione dei composti produce vapore acqueo che si libera in fase gassosa e riduce la concentrazione dei vapori infiammabili. Oltre a ciò, questi additivi formano una patina di ossido che fornisce protezione al materiale. che contribuisce a creare una barriera protettiva sul materiale.

5.2 GAS PHASE

Gli additivi con azione prevalente in fase gas più noti sono i composti alogenati.

Questi additivi, quando riscaldati, generano dei composti in fase gas che catturano i radicali che altrimenti promuovrebbero la continuazione della combustione. Intervengono sulle reazioni radicaliche della combustione, rallentandone o interrompendone la propagazione.

In particolare, durante il riscaldamento, gli additivi alogenati liberano il corrispondente acido alogenidrico (quindi HCl per additivi a base cloro e HBr per additivi a base bromo).

Tali composti reagiscono con i radicali generati dalla combustione (per esempio OH•, H• e altri) formando radicali stabili come Cl• o Br•, quindi con reattività molto bassa.

È tuttavia importante sottolineare che durante la combustione incontrollata o l'incenerimento improprio, i materiali contenenti ritardanti alogenati possono favorire la formazione di composti altamente tossici come diossine e furani, noti per la loro tossicità e per i possibili effetti cancerogeni.

5.3 CHAR (FORMAZIONE DI STRATO CARBONIOSO)

Il meccanismo char si ottiene principalmente con l'impiego di composti a base di fosforo (P).

Il processo avviene in fase solida e si basa sia su reazioni chimiche, sia su fenomeni fisici.

In pratica, durante la combustione si forma uno strato carbonioso che viene creato con un processo endotermico (quindi che sottrae il calore) grazie alla disidratazione del materiale e quindi alla fuoriuscita di vapore acqueo. Ma non è solo il meccanismo di formazione della crosta a favorire l'effetto FR: infatti, la crosta, una volta formata, è completamente inerte rispetto alla combustione e inoltre limita fisicamente l'incontro tra l'ossigeno e il polimero combustibile situato al di sotto di essa, sottraendo uno dei reagenti fondamentali alla reazione di combustione.

5.4 INTUMESCENZA

Gli additivi intumescenti rappresentano un'evoluzione del meccanismo char, e sono generalmente costituiti da una combinazione di composti fosforati e agenti spumificanti, spesso a base di azoto (N)

Il meccanismo dell'intumescenza opera sia in fase solida sia in fase gassosa. L'azione in fase solida è molto simile a quella del meccanismo char, poiché si verifica una reazione endotermica che causa la formazione di uno strato carbonioso "protettivo" sulla superficie

del polimero, la differenza sostanziale rispetto al meccanismo char è dovuta ai composti azotati presenti nel ritardante di fiamma che, a seguito del riscaldamento, si decompongono liberando ammoniaca. L'ammoniaca reagisce ulteriormente formando azoto gassoso e vapore acqueo.

L'azoto gassoso agisce da agente spumifico e quindi tende a far rigonfiare il char, di conseguenza, aumenta lo spessore dello strato protettivo, che in alcuni casi può risultare fino a decine o centinaia di volte superiore allo spessore iniziale del materiale. Inoltre, l'azoto gassoso è inerte e quindi diluisce i vapori combustibili presenti in fase gas.

6 ANTIFIAMMA PER LA CARTA

I ritardanti di fiamma per la carta sono sostanze organiche o inorganiche progettate per ridurre la velocità di combustione e limitare la propagazione del fuoco in un materiale naturalmente molto infiammabile, la cui temperatura di inizio degradazione termica è generalmente intorno ai 220–250 °C. La loro azione non rende la carta non combustibile, ma ne modifica il percorso di degradazione termica favorendo meccanismi di carbonizzazione e riducendo la formazione di prodotti volatili infiammabili.

6.1 SALI DI AMMONIO

I sali di ammonio sono composti inorganici ampiamente utilizzati nella produzione di carta ignifuga grazie alla loro capacità di modificare il comportamento della cellulosa quando viene esposta al calore.

L'impiego dei sali di ammonio consente di rendere la carta meno suscettibile alla combustione attraverso una serie di reazioni chimiche. Quando la carta trattata viene riscaldata, questi sali si decompongono e rilasciano sostanze acide; nel caso dei fosfati di ammonio, la decomposizione genera acido fosforico.

Questo acido favorisce la disidratazione della cellulosa, cioè la perdita di molecole d'acqua dalla sua struttura molecolare.

Tale processo porta alla formazione di uno strato carbonioso superficiale, chiamato “char”, che agisce come barriera protettiva contro il calore e l'ossigeno, rallentando in modo significativo la propagazione della fiamma.

Un altro meccanismo fondamentale è il rilascio di gas inerti durante la decomposizione termica dei sali di ammonio. Tra questi gas vi sono ammoniaca e vapore acqueo, che contribuiscono a diluire la concentrazione di ossigeno nell'area circostante la carta. Poiché la combustione richiede una quantità minima di ossigeno, la diluizione del comburente rende più difficile il mantenimento della fiamma.

Tra i sali più comunemente utilizzati troviamo il fosfato monoammonico, il fosfato diammonico particolarmente efficace per la formazione di char e il solfato di ammonio (che può contribuire alla carbonizzazione della cellulosa a temperature di degradazione diverse).

I fosfati, risultano in genere i più efficaci–perché favoriscono in modo significativo la formazione dello strato carbonioso protettivo.

Dal punto di vista industriale, questi sali possono essere applicati alla carta attraverso due principali metodologie. La prima è l'impregnazione, in cui la carta viene immersa in una soluzione contenente i sali e successivamente essiccata. La seconda consiste nell'aggiunta dei sali direttamente alla pasta di cellulosa durante il processo produttivo, permettendo una distribuzione uniforme all'interno del materiale.

Il risultato finale è una carta che non prende fuoco facilmente, ma tende piuttosto a carbonizzarsi. In molti casi, la combustione si arresta spontaneamente dopo la rimozione della fonte di calore, conferendo al materiale proprietà autoestinguenti.

Nonostante i numerosi vantaggi, esistono anche alcuni limiti. I sali di ammonio possono essere igroscopici, cioè assorbire umidità dall'ambiente, compromettendo le proprietà meccaniche della carta. Inoltre, nel tempo, possono migrare all'interno del materiale o degradarsi, riducendo l'efficacia del trattamento ignifugo.

In conclusione, i sali di ammonio rappresentano una soluzione efficace per migliorare la resistenza al fuoco della carta, grazie alla loro azione combinata di formazione di uno strato protettivo e rilascio di gas che ostacolano la combustione, pur richiedendo un'attenta gestione dal punto di vista tecnologico.

6.2 SALI ORGANICI: AZOTO/ POTASSIO

I sali organici di potassio svolgono un ruolo fondamentale nella fase solida del materiale. Quando la carta trattata viene riscaldata, questi sali agiscono come catalizzatori delle reazioni di disidratazione della cellulosa. In condizioni normali, la cellulosa tende a decomporsi producendo sostanze volatili infiammabili; tuttavia, in presenza di potassio, il percorso di degradazione viene modificato e orientato verso la formazione di un residuo solido ricco di carbonio.

Questo materiale carbonioso è relativamente stabile dal punto di vista termico e aderisce alla superficie della carta, formando una barriera protettiva che limita sia il trasferimento di calore sia l'accesso dell'ossigeno. In questo modo, la combustione viene rallentata o, in alcuni casi, impedita.

Oltre a favorire la carbonizzazione, i sali di potassio influenzano anche la velocità e la temperatura delle reazioni di decomposizione. Essi abbassano la temperatura di inizio della degradazione, ma allo stesso tempo rendono il processo più controllato e meno pericoloso, riducendo la formazione di radicali liberi e di prodotti volatili altamente infiammabili. L'effetto complessivo è una trasformazione della combustione in un processo di degradazione controllata, in cui prevale la formazione di residui solidi piuttosto che di gas combustibili.

I composti azotati, come l'urea o i sali di ammonio organici, agiscono invece principalmente attraverso meccanismi che coinvolgono sia la fase gassosa sia quella condensata. Quando vengono sottoposti a riscaldamento, questi composti si decompongono liberando gas non infiammabili, tra cui ammoniaca, azoto molecolare e, in alcuni casi, anidride carbonica. La presenza di questi gas nell'ambiente circostante la carta ha un effetto diretto sulla combustione: essi diluiscono l'ossigeno disponibile e abbassano la concentrazione dei gas combustibili, rendendo più difficile il mantenimento della fiamma.

Un ulteriore contributo dei composti azotati è la formazione di strutture espanse, spesso descritte come schiume protettive o strati intumescenti. Durante il riscaldamento, il rilascio di gas provoca un'espansione del materiale superficiale, creando uno strato poroso che funge da isolante termico. Questo strato protegge la cellulosa sottostante, riducendo la velocità con cui il calore penetra nel materiale e rallentando ulteriormente la degradazione.

L'aspetto più interessante dell'impiego di questi additivi risiede nella loro azione sinergica. Quando i sali di potassio e i composti azotati sono presenti contemporaneamente, si verifica una combinazione di effetti che porta a una protezione molto più efficace rispetto all'uso dei singoli componenti. Il potassio favorisce la formazione del char, creando una base solida e compatta, mentre i composti azotati rilasciano gas che espandono questo strato carbonioso, rendendolo più spesso e poroso. Il risultato è una barriera protettiva altamente efficiente, capace di isolare termicamente il materiale e di ostacolare sia l'ingresso di ossigeno sia la fuoriuscita di gas infiammabili.

Durante l'esposizione al calore, i composti azotati iniziano a decomporsi per primi, producendo gas inerti che raffreddano localmente il sistema e riducono la disponibilità di ossigeno. Contemporaneamente, i sali di potassio accelerano la carbonizzazione della cellulosa, riducendo la formazione di prodotti volatili. I gas liberati contribuiscono inoltre a espandere il residuo carbonioso, formando una struttura protettiva ancora più efficace. Questa combinazione di effetti determina una drastica riduzione della velocità di combustione e, in molti casi, consente al materiale di auto estinguersi.

In conclusione, l'utilizzo combinato di sali organici di potassio e composti azotati rappresenta una strategia efficace per la produzione di carta ignifuga. I primi agiscono stabilizzando la fase solida e promuovendo la carbonizzazione, mentre i secondi intervengono principalmente in fase gassosa, inibendo la combustione e favorendo la formazione di strati isolanti. La loro sinergia consente di trasformare un materiale altamente infiammabile in uno molto più resistente al fuoco, migliorandone significativamente la sicurezza e le prestazioni in condizioni di elevata temperatura.

7. PROBLEMI NELLA GESTIONE DEI FOGLIACCI NELLA PRODUZIONE DI CARTA IGNIFUGA

Nel processo industriale di produzione e riciclo della carta, l'impiego di sostanze ignifughe come i sali di ammonio, i sali di potassio e più in generale i composti contenenti azoto rappresenta una soluzione efficace per ridurre la combustibilità del prodotto finito. Tuttavia, la presenza di questi composti introduce una serie di criticità significative, soprattutto all'interno del circuito dei fogliacci, dove acqua, fibre e additivi vengono continuamente recuperati e riutilizzati.

Uno dei principali problemi riguarda l'alterazione della chimica del sistema. I sali di ammonio, essendo altamente solubili, si dissolvono facilmente nell'acqua di processo, contribuendo ad aumentare la conducibilità e a modificare il pH. Analogamente, anche i sali di potassio e i composti azotati tendono ad accumularsi progressivamente in un circuito chiuso, incrementando la salinità complessiva.

Queste variazioni compromettono gli equilibri chimici necessari per un corretto funzionamento del processo produttivo, rendendo più difficile il controllo delle reazioni e la formazione uniforme del foglio di carta. La presenza di specie ioniche altera le interazioni elettrostatiche tra fibre, cariche minerali e polimeri di ritenzione, riducendo l'efficacia di questi ultimi. Di conseguenza, si osserva una minore ritenzione dei materiali fini e delle cariche, con perdite nelle acque di scarico e un peggioramento delle proprietà meccaniche e superficiali della carta. Anche i sali di ammonio possono interferire con i sistemi di ritenzione e con la collatura, compromettendo ulteriormente la qualità del prodotto finale.

Dal punto di vista impiantistico, l'accumulo di sali può favorire la formazione di deposito e incrostazione. Questi derivano da reazioni tra i sali e altri componenti presenti nel circuito, con conseguente formazione di precipitati che si depositano su tubazioni, feltri e superfici delle macchine. Tali fenomeni causano difetti visibili sulla carta e richiedono frequenti interventi di manutenzione, aumentando i costi operativi e i tempi di fermo degli impianti.

Le problematiche microbiologiche rappresentano un ulteriore elemento di criticità. I composti contenenti azoto costituiscono una fonte di nutrimento per i microrganismi, favorendo la formazione di biofilm e slime. Inoltre, durante alcune fasi del processo, in particolare l'essiccazione, i composti azotati possono liberare ammoniaca, generando cattivi

odori, potenziali rischi per la salute degli operatori, problemi di odore, sicurezza e impatto ambientale.

Anche sotto il profilo ambientale emergono criticità rilevanti. La presenza di azoto negli effluenti aumenta il carico inquinante delle acque di scarico, rendendo più complessi e costosi i processi di depurazione, che devono includere fasi di nitrificazione e denitrificazione. Inoltre, elevate concentrazioni di nutrienti possono contribuire a fenomeni di eutrofizzazione nei corpi idrici recettori. Le emissioni di ammoniaca rappresentano un ulteriore impatto ambientale da tenere sotto controllo.

Infine, la qualità del prodotto finito può risultare compromessa. L'accumulo e la distribuzione non uniforme dei sali nel materiale riciclato possono determinare variazioni nelle proprietà della carta, inclusa l'efficacia dell'ignifugazione. In alcuni casi, per mantenere adeguate prestazioni meccaniche, è necessario integrare fibre vergini o utilizzare additivi rinforzanti.

Per far fronte a queste problematiche, è necessario adottare un approccio integrato basato sul controllo costante dei parametri chimici, sulla gestione del circuito idrico mediante spurghi e trattamenti, sull'impiego di additivi più resistenti alle alte salinità e su un'attenta selezione e miscelazione delle materie prime. Parallelamente, risultano fondamentali il controllo microbiologico tramite biocidi e la gestione delle emissioni attraverso sistemi di abbattimento.

In conclusione, sebbene i sali utilizzati per conferire proprietà ignifughe alla carta siano efficaci, la loro presenza nel circuito dei fogliacci comporta una serie di problematiche complesse che coinvolgono aspetti chimici, tecnologici, ambientali e qualitativi. Solo attraverso una gestione attenta e coordinata è possibile garantire l'efficienza del processo produttivo e la sostenibilità complessiva del sistema.

8. LA PATINATURA DELLA CARTA IGNIFUGA.

8.1 INTRODUZIONE

La patinatura rappresenta una fase importante nella produzione di alcune tipologie di carta, in quanto consente di migliorare specifiche proprietà superficiali del materiale, come la stampabilità, l'aspetto estetico e le caratteristiche funzionali. Nel caso della carta ignifuga, la patinatura assume un ruolo ancora più delicato, poiché deve contribuire alle prestazioni del prodotto senza compromettere il comportamento al fuoco ottenuto attraverso l'impiego di additivi ritardanti di fiamma.

Essendo la carta un materiale a base cellulosica, qualsiasi trattamento superficiale interagisce direttamente con una struttura naturalmente combustibile. Per questo motivo, la formulazione e l'applicazione della patina devono essere attentamente progettate, tenendo conto sia degli aspetti funzionali sia delle implicazioni in termini di sicurezza antincendio.

8.2 COMPOSIZIONE DELLA PATINA E INTERAZIONE CON I RITARDANTI DI FIAMMA

La patina è generalmente costituita da una miscela di pigmenti (come caolino o carbonato di calcio), leganti polimerici, additivi e acqua. Nel caso della carta ignifuga, potrebbero essere introdotti anche componenti con funzione ritardante di fiamma o sostanze compatibili con i trattamenti presenti nella massa della carta.

Il principale punto critico risiede nella scelta del legante. Leganti organici troppo combustibili possono infatti peggiorare il comportamento al fuoco del prodotto finito, vanificando in parte l'effetto degli additivi inseriti nella carta base. Per questo motivo, nella patinatura di carte ignifughe si tende a limitare la quantità di componenti organici combustibili o a selezionare leganti con comportamento al fuoco migliorato.

Dal punto di vista chimico, la patina può influenzare i meccanismi di formazione del char. In presenza di additivi a base di fosforo o di sistemi intumescenti, lo strato superficiale può contribuire alla formazione di una barriera protettiva continua, migliorando l'isolamento termico e riducendo la diffusione dei gas infiammabili.

8.3 EFFETTI DELLA PATINATURA SUL COMPORTAMENTO AL FUOCO

La patinatura modifica principalmente il comportamento della carta nelle fasi iniziali dell'esposizione al calore. In alcuni casi, una patina ben formulata contribuisce a ridurre la velocità di propagazione della fiamma, migliorando i risultati nei test di reazione al fuoco.

Tuttavia, una patinatura non correttamente progettata può avere effetti opposti.

Un'elevata presenza di materiali organici o una scarsa adesione della patina possono favorire il distacco dello strato superficiale durante la combustione, esponendo rapidamente la carta base al calore e all'ossigeno. Questo aspetto è particolarmente critico in applicazioni regolate da normative stringenti, come quelle previste dalla EN 45545, dove il comportamento complessivo del materiale deve essere stabile e riproducibile.

8.4 IMPLICAZIONI INDUSTRIALI

Dal punto di vista industriale, la patinatura della carta ignifuga richiede un compromesso tra prestazioni superficiali, sicurezza antincendio e compatibilità con il processo produttivo.

Inoltre, la presenza di sali e composti ignifughi può accentuare problematiche già riscontrate nel circuito dei fogliacci, come l'aumento della salinità o l'interferenza con i sistemi di ritenzione. Per questo motivo, la progettazione della patina deve essere integrata con una gestione attenta del processo e delle acque di riciclo.

8.5 CONCLUSIONE

In conclusione, la patinatura rappresenta un ulteriore elemento critico nella produzione di carta ignifuga. Se correttamente formulata, può contribuire a migliorare le prestazioni complessive del materiale, sia dal punto di vista funzionale sia in termini di comportamento al fuoco. Al contrario, una progettazione non adeguata può compromettere i benefici ottenuti con i trattamenti ignifughi applicati alla massa della carta. Ciò rende fondamentale un approccio integrato alla progettazione del prodotto.

9 CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha analizzato la produzione di carta ignifuga affrontando il tema da diversi punti di vista: normativo, chimico, tecnologico e industriale. Attraverso l'analisi dei test di infiammabilità e delle principali normative di riferimento, è stato possibile comprendere come il comportamento al fuoco dei materiali venga valutato in funzione di contesti applicativi differenti e sempre più esigenti in termini di sicurezza.

Lo studio del meccanismo della combustione ha permesso di chiarire i processi fisici e chimici alla base del comportamento dei materiali cellulosici sottoposti a calore, fornendo le basi per comprendere l'azione degli additivi ritardanti di fiamma. I meccanismi di sottrazione di calore, azione in fase gas, formazione di char e intumescenza rappresentano strategie fondamentali per modificare il percorso di degradazione della cellulosa e ridurre la propagazione dell'incendio.

L'analisi specifica degli antifiamma per la carta, come i sali di ammonio, i sali di potassio e i composti azotati, ha evidenziato l'efficacia di questi sistemi, ma anche le criticità legate alla loro gestione nei processi industriali, in particolare nel riciclo e nel circuito dei fogliacci. A questi aspetti si aggiunge il ruolo della patinatura, che può influenzare in modo significativo il comportamento al fuoco del prodotto finito e richiede un'attenta integrazione con i trattamenti ignifughi della carta base.

In conclusione, la produzione di carta ignifuga non può essere considerata come la semplice applicazione di un additivo, ma come il risultato di un insieme di scelte progettuali che coinvolgono la materia prima, la chimica degli additivi, il processo produttivo e il contesto normativo di riferimento. Solo attraverso una visione integrata è possibile ottenere materiali cellulosici che coniughino prestazioni funzionali, sicurezza antincendio e sostenibilità industriale.

8. BIBLIOGRAFIA

- **Alessandro Gigli, Giuseppe Rosace** : Finissaggi tessili e ritardanti di fiamma.
Università degli studi di Bergamo
- **Quan Yuan, Shaodong Wang, Liping He, Shiwei Xu**: Advances in the study of flame- retardand cellulose and its application in polymers