

## **Bonifica da amianto: analisi critica e proposta di integrazione al DM 6.9.94 relativamente alle normative e metodologie tecniche di esecuzione**

Autori:

Ing. Paolo Fargione - Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione Industriale - Università di Roma  
“La Sapienza” – C.so Vittorio Emanuele II, 244 – 00186 ROMA

Ing. Luisa Ferroni - Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione Industriale - Università di Roma  
“La Sapienza” C.so Vittorio Emanuele II, 244 – 00186 ROMA

### **SOMMARIO**

Durante la bonifica degli edifici da MCA (materiali contenenti amianto), devono essere osservate scrupolosamente diverse misure di sicurezza, fra cui quelle relative al confinamento statico e dinamico degli ambienti, per evitare la dispersione di fibre di amianto: tali misure sono indicate nel DM del 6 settembre 1994.

Nel corso di un importante intervento di bonifica, presso la Biblioteca Nazionale Centrale di Roma, è stata svolta una analisi dettagliata di questi criteri di sicurezza e delle relative modalità di applicazione, con il supporto di una campagna di misure e di un codice di calcolo per la simulazione delle condizioni di confinamento dinamico.

Sulla base dei risultati ottenuti e delle successive elaborazioni, sono stati individuati, sia all'interno del disposto di legge che nell'ambito delle modalità operative, elementi critici che conducono ad una definizione più circostanziata dei requisiti di sicurezza.

### **1. INTRODUZIONE**

La messa al bando dei materiali contenenti amianto (MCA), a seguito del riconoscimento oggettivo della loro elevata nocività, e la identificazione dei criteri tecnici, amministrativi e gestionali per la bonifica nelle differenti applicazioni – in particolare nell'edilizia – sono stati affrontati, dal 1991 ad oggi, attraverso una serie articolata di disposti di legge.

Sotto il profilo squisitamente tecnico, la criticità dei MCA per l'organismo umano ha portato il legislatore ad una definizione estremamente circostanziata dei criteri di sicurezza da osservare durante tutte le fasi del cantiere, da quella preliminare del censimento dei MCA fino a quella conclusiva della riconsegna delle aree a bonifica avvenuta.

Particolarmente stringenti sono gli accorgimenti imposti nel corso delle fasi operative della bonifica, allo scopo di predisporre margini fisici e operativi a fronte della possibile fuoriuscita di fibre di amianto delle aree cosiddette “rosse” verso l'esterno.

Viene, infatti, richiesto che:

- le aree in bonifica siano rivestite interamente da un doppio strato di teli di polietilene, opportunamente sigillati mediante nastro adesivo;
- le stesse siano costantemente mantenute in depressione rispetto agli altri ambienti mediante estrattori d'aria equipaggiati con opportuni filtri;
- l'ingresso/uscita degli operatori e l'uscita dei materiali avvenga attraverso un elemento definito “unità di decontaminazione” (UD), che garantisce il disaccoppiamento fisico fra aree sporche e aree pulite.

In figura 1 viene mostrato un tipico allestimento. La figura 2 illustra schematicamente la configurazione tipica di un'area in bonifica.



Fig. 1 – Allestimento tipico di un locale in bonifica

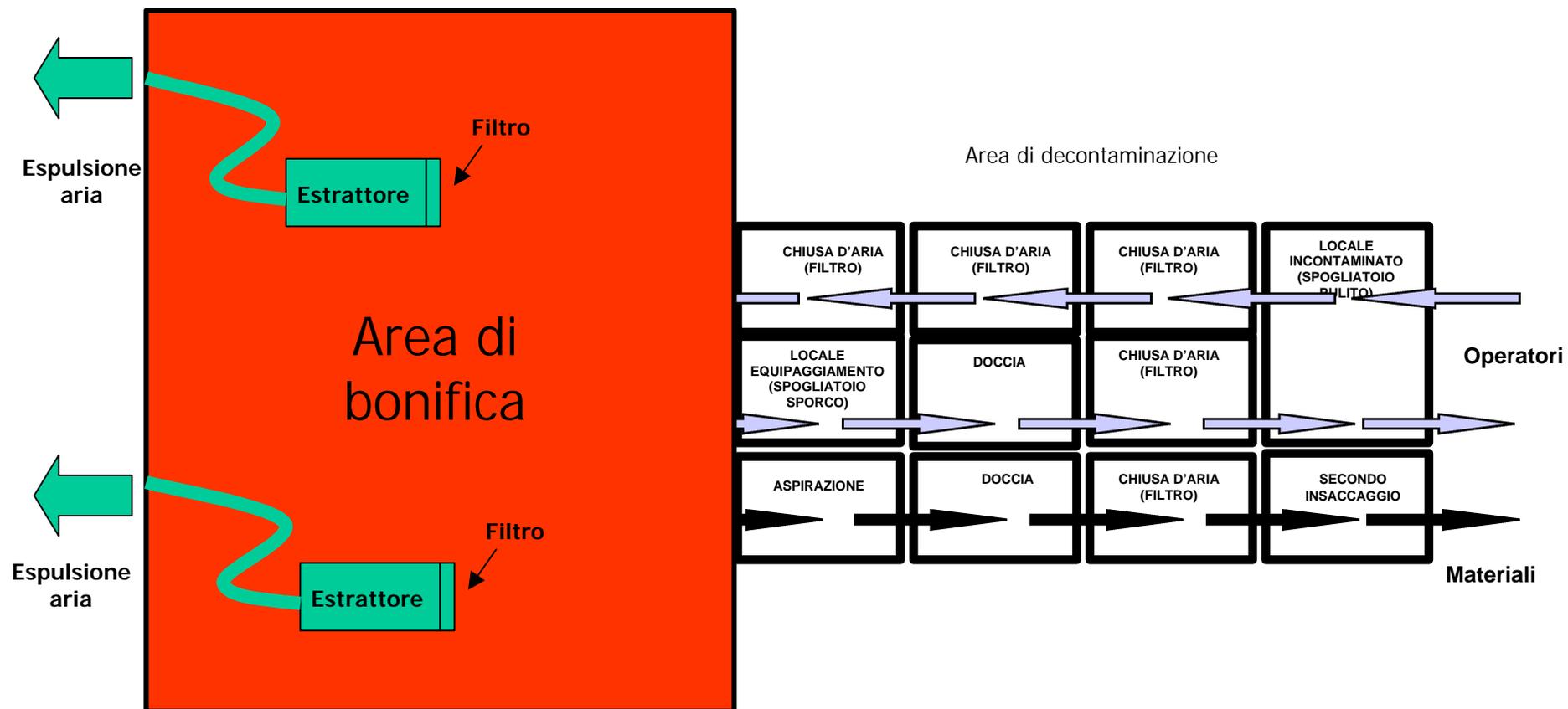


Figura 2 - Configurazione tipica di un'area in bonifica.

## 2. REQUISITI DI LEGGE - DETTAGLIO

### 2.1 Il confinamento

Nell'allegato al D.M. Sanità 6 settembre 1994 "Normative e metodologie tecniche di applicazione dell'art. 6, comma 3, e dell'art. 12, comma 2, della legge 27 marzo 1992, n. 257, relativa alla cessazione dell'impiego dell'amianto" vengono individuati i criteri da seguire per il confinamento degli ambienti da sottoporre a bonifica.

Il confinamento è sia statico, attraverso la realizzazione di un involucro di polietilene, sia dinamico, realizzando e mantenendo una depressione fra ambiente in bonifica e ambienti esterni.

La bontà della esecuzione dei due confinamenti viene verificata in accordo a quanto di seguito riportato.

[...]

#### 2 - COLLAUDO DEL CANTIERE

Dopo che è stato completato l'allestimento del cantiere, compresa l'installazione dell'unità di decontaminazione e prima dell'inizio di qualsiasi operazione che comporti la manomissione dell'amianto, i sistemi di confinamento devono essere collaudati mediante prove di tenuta.

##### a) Prova della tenuta con fumogeni

Ad estrattori spenti l'area di lavoro viene saturata con un fumogeno e si osservano, dall'esterno del cantiere, le eventuali fuoriuscite di fumo. Occorre ispezionare, a seconda delle situazioni le barriere di confinamento, il perimetro esterno dell'edificio, il piano sovrastante. Tutte le falle individuate vanno sigillate dall'interno.

##### b) Collaudo della depressione

Si accendono gli estrattori uno alla volta e si osservano i teli di plastica delle barriere di confinamento: questi devono rigonfiarsi leggermente formando un ventre rivolto verso l'interno dell'area di lavoro. La direzione del flusso dell'aria viene verificata utilizzando fiammole fumogene. Il test deve essere effettuato, in particolare, all'esterno del cantiere, in prossimità delle eventuali aperture per l'immissione passiva di aria e nei locali dell'unità di decontaminazione, in condizioni di quiete e durante l'apertura delle porte. Si deve osservare che il fumo venga sempre richiamato verso l'interno dell'area di lavoro. La misura della depressione può essere effettuata con un manometro differenziale munito di due sonde che vengono collocate una all'interno e l'altra all'esterno dell'area di lavoro.

In primo luogo, va messo in evidenza come il legislatore abbia voluto imporre una doppia garanzia alla possibile fuoriuscita di fibre dall'area di intervento: il confinamento statico e quello dinamico, trasferendo così al settore dell'amianto criteri di sicurezza originari di settori ad alto livello tecnologico quali quelli nucleare e farmaceutico. La "prova fumo", peraltro, costituisce certamente un punto di verifica molto restrittivo.

Per quanto riguarda il confinamento dinamico, vale a dire la condizione fluidodinamica stazionaria per la quale si stabilisce una depressione all'interno dell'ambiente in bonifica, esso è determinato quantitativamente da due grandezze: la portata imposta dagli estrattori e l'entità dei rientri d'aria o – per meglio dire – la geometria di riferimento. A sua volta, quest'ultima risulta dipendente dalle dimensioni del locale in bonifica e da dimensioni e forma delle aree delle superfici di comunicazione fra interno (area in bonifica) ed esterno (area "pulita").

### 2.2 I rientri d'aria

Nel D.M. 6/9/94 il problema dei rientri d'aria viene affrontato in due punti.

Nel primo, al capitolo 1 "Allestimento del cantiere" si afferma che

"[...] Il sistema di estrazione deve garantire un gradiente di pressione tale che, attraverso i percorsi di accesso al cantiere e le inevitabili imperfezioni nelle barriere di sconfinamento, si verifichi un flusso d'aria dall'esterno verso l'interno del cantiere in modo da evitare qualsiasi fuoriuscita di fibre".

Nel secondo, al capitolo 2, riferendosi alla verifica mediante fumogeni della direzione del flusso d'aria, si dice testualmente:

"Il test deve essere effettuato, in particolare, all'esterno del cantiere, in prossimità delle eventuali aperture per l'immissione passiva di aria e nei locali dell'unità di decontaminazione, in condizioni di quiete e durante l'apertura delle porte".

Viene, quindi, da una parte ammessa la possibilità dell'esistenza di imperfezioni, dall'altra viene accordata la possibilità di praticare - nel confinamento statico - aperture specificamente volte al reintegro d'aria. Va evidenziato, anche se è ovvio, che in assenza di tali aperture il reintegro avviene esclusivamente attraverso l'unità di decontaminazione, la quale - anche in presenza di "inevitabili imperfezioni", per definizione

caratterizzate da una modestissima area di efflusso - costituisce la via preferenziale (cioè a minima perdita di carico) per l'ingresso dell'aria di reintegro. Questo, almeno, vale – come dettagliato nel seguito – per tipologie realizzative delle UD simili a quelle assunte a riferimento nel presente studio.

### 3. PRESCRIZIONI CORRENTI E PRATICHE CONSOLIDATE: I RICAMBI D'ARIA

#### 3.1 La realizzazione della depressione

E' sufficiente svolgere una analisi bibliografica, breve e finalizzata, su un certo numero di testi riguardanti la bonifica da amianto (e in particolare i commenti all'applicazione del D.M. 6/9/94) per poter apprezzare lo sforzo interpretativo del "rigonfiamento" che svariati autori hanno cercato di produrre: la maggior parte degli autori traduce quantitativamente il requisito del "rigonfiamento" suggerendo un numero di ricambi orari nell'area di intervento compreso, a seconda dei testi fra 4 e 5, 4 e 6, 5 e 8.

L'unica origine di una tale interpretazione può essere rintracciata nel D.M. 26 ottobre 1995 – "Normative e metodologie tecniche per la valutazione del rischio, il controllo, la manutenzione e la bonifica dei materiali contenenti amianto presenti nei mezzi rotabili" in cui, all'art. 4a, viene prescritto un numero minimo di 5 ricambi orari. Si tratta però, come è evidente, di una situazione del tutto diversa da quella della bonifica di edifici. In particolare, si può osservare che il volume del locale di bonifica è sempre, nel caso dei mezzi rotabili (carrozze ferroviarie), quantitativamente abbastanza ben identificato.

Scorrendo un campione significativo di Piani di Lavoro si riscontra in modo immediato come tali suggerimenti siano ormai divenuti pratica corrente.

#### 3.2 Ricadute operative

L'unità di decontaminazione costituisce, nelle condizioni esaminate, la principale – se non l'unica – via di rientro dell'aria.

La situazione cui si fa riferimento è quella – realizzata in Biblioteca Nazionale ma analoga ad altre – di unità di decontaminazione costituite da strutture portanti in legno e "tamponature" in polietilene, quindi con chiusure dei diversi "box" dell'unità consistenti in teli di polietilene.

Quello che si evince – e che è stato verificato, come illustrato nel seguito, nei locali della biblioteca – è che nel caso di grandi volumi e anche con un numero di ricambi orari basso, nell'unità di decontaminazione il flusso d'aria assume le proporzioni di una brezza. Anche in questo caso, la soluzione realizzativa scelta risulta determinante, in quanto unità prefabbricate a tenuta forniscono, sotto lo stretto profilo microclimatico, una garanzia completa. Si tratta, comunque, di soluzioni impiegate relativamente di rado, soprattutto a causa del loro elevato costo.

Riferendosi al caso – ben più frequente – di UD il cui la separazione tra i moduli sia realizzata con tende in polietilene, si verifica facilmente l'instaurarsi di condizioni microclimatiche penalizzanti per i lavoratori, tanto più in considerazione del fatto che all'interno dell'UD gli operatori si spogliano e si sottopongono a doccia.

Tale stato di cose va, peraltro, analizzato alla luce del D.L. 626 del 19 settembre 1994, di cui si riporta di seguito uno stralcio significativo ai fini del presente studio.

DECRETO LEGISLATIVO 19 settembre 1994 "Attuazione delle direttive 89/391/CEE, 89/654/CEE, 89/655/CEE, 89/656/CEE, 89/269/CEE, 89/270/CEE, 90/394/CEE e 90/679/CEE riguardanti il miglioramento della sicurezza e della salute dei lavoratori sul luogo di lavoro"

Pubblicato nel s.o. della G.U. n. 141 del 12 novembre 1994

[...]

TITOLO II – LUOGHI DI LAVORO

Art. 33 – Adeguamenti di norme

[...]

6. L'art 9 del DPR 19 marzo 1956, n. 303, è sostituito dal seguente:

“Art. 9 (Areazione dei luoghi di lavoro chiusi). – 1. Nei luoghi di lavoro chiusi, è necessario far sì che tenendo conto dei metodi di lavoro e degli sforzi fisici ai quali sono sottoposti i lavoratori, essi dispongano di aria salubre in quantità sufficiente.”

[...]

7. L'art 11 del DPR 19 marzo 1956, n. 303, è sostituito dal seguente:

“Art. 11 (Temperatura dei locali). – 1. La temperatura nei locali di lavoro deve essere adeguata all'organismo umano durante il tempo di lavoro, tenuto conto dei metodi di lavoro applicati e degli sforzi fisici imposti ai lavoratori.

2. Nel giudizio sulla temperatura adeguata per i lavoratori si deve tener conto della influenza che possono esercitare sopra di essa il grado di umidità ed il movimento dell'aria concomitanti.

3. La temperatura dei locali di riposo, dei locali per il personale di sorveglianza, dei servizi igienici e delle mense e dei locali di pronto soccorso deve essere conforme alla destinazione specifica di questi locali”

Fra i diversi elementi, quello evidenziato al comma 2 dell'Art. 11 del DPR del 19/3/56 appare particolarmente critico. In termini pratici, si consideri che nella zona della doccia dell'UD installata durante la bonifica della sala lettura generale, con 6 ricambi/ora, si registrava un “vento” di circa 0.6 m/s.

#### 4. CAMPAGNA DI MISURA

##### 4.1 Strumentazione

Le misure sono state effettuate per mezzo di un manometro differenziale avente le seguenti caratteristiche principali: Campo di misura 0 ÷ 90 Pa; Precisione ± 5% f.s.; Canali di misurazione 2. Si ritiene opportuno sottolineare l'elevata sensibilità dello strumento utilizzato (v. fig. 3), in grado di apprezzare differenze di pressioni di 1 Pa.



Figura 3 – Strumento per la misura, la registrazione e la stampa delle depressioni differenziali

##### 4.2 Modalità di esecuzione delle operazioni di misura e risultati

Vengono riportate, a titolo esemplificativo, le misure svolte in uno dei locali in bonifica, la Sala Lettura Generale.

Le misure effettuate al variare del numero di estrattori attivi hanno fornito valori uguali, a meno di 1 Pa, in diversi punti della sala: il livello di depressione, determinato dagli estrattori attivi, è risultato sostanzialmente uniforme. La tabella 1 sintetizza i risultati delle misure.

TOT. ESTRATTORI POTENZA MAX	DEPRESSIONE
5	11 / 12 Pa
6	14 / 15 Pa
7	16 / 17 Pa
8	19 / 20 Pa
9	22 / 23 Pa
10	25 / 26 Pa
12	29 / 30 Pa
14	36 / 38 Pa

Tabella 1 – Risultati delle misure

Poiché l'obiettivo era quello di tarare un modello di simulazione, è stata anche tentata una misura della portata in ingresso, allo scopo di eseguire una verifica indipendente della portata nominale degli estrattori.

La valutazione è stata svolta eseguendo una “meshatura” dell'area di ingresso dell'UD, misurando le velocità dell'aria al centro delle singole maglie e imputando tale velocità all'intera maglia.

Tale misura ha condotto a risultati non gestibili, in quanto affetti dagli errori dovuti a fenomeni importanti di turbolenza. Tali fenomeni sono stati ulteriormente indagati con l'ausilio di fialette fumogene: si è verificato che, pur non registrandosi flussi indesiderati (in particolare, diretti verso l'esterno del locale) in prossimità dell'UD si verificano turbolenze locali, tanto più importanti quanto più le portate sono elevate, cioè quanto

più ci si allontana da un regime di flusso laminare. Tale situazione emerge con chiarezza anche dalla mappatura delle portate (v. figura 4).

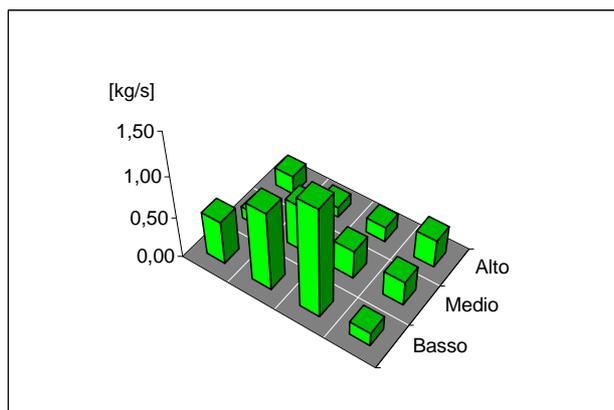


Figura 4 – Mappa delle portate (5 estrattori in funzione)

#### 4. ANALISI DI PRIMO LIVELLO DEI RISULTATI OTTENUTI

Già in questa fase del lavoro – prima, cioè, di passare all’esecuzione delle simulazioni - sono emerse alcune importanti indicazioni.

Va evidenziato che il dimensionamento degli estrattori è stato anche in questo caso specifico impostato sul numero di ricambi orari.

La prima osservazione che si può proporre ad un esame della tabella 1 è che già con 8 estrattori si registra una depressione intorno a 20 Pa la quale, oltre ad essere significativa in valore assoluto, corrisponde al valore di depressione che viene indicato – per i cantieri di bonifica da MCA - dalla normativa tedesca.

Un ulteriore elemento emerso in modo oggettivo durante le misure è il cedimento delle sigillature all’aumentare della depressione. Tale fenomeno è risultato così importante all’aumentare del numero di estrattori accesi che si sono dovute eseguire le letture alle depressioni più alte molto velocemente, per evitare danni significativi alla politenatura.

La figura 5 mostra come già a 24 Pa il rivestimento di polietilene evidenzia anche sul pavimento un rigonfiamento che lascia comprendere l’entità delle sollecitazioni nei punti di sigillatura.

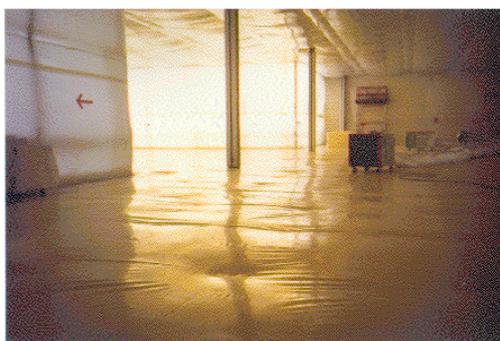


Figura 5 – Rigonfiamento dei teli di polietilene con  $p = 24 \text{ Pa}$

Volendo fornire una valutazione quantitativa – anche se di massima– si può facilmente calcolare la forza equivalente con cui il telo viene sollecitato. Facendo riferimento a una porzione di telo lunga 20 m e alta 5 m, si ha

(1)

$$F = p \times A = p \times l \times h = 24 \times 5 \times 20 = 2400 \text{ N} \cong 240 \text{ kg}$$

Per la porzione di telo coinvolta si può anche calcolare la tensione lineare sull’adesivo, che vale

$$T = \frac{F}{2(l+h)} = \frac{2400}{2(5+20)} = 48 \text{ N/m} \cong 4,8 \text{ kg/m}$$

(2)

Si può osservare che la tensione  $T$  è funzione delle dimensioni del telo secondo la relazione

$$T = p \frac{l \times h}{2(l + h)} \quad (3)$$

e che pertanto, all'aumentare delle dimensioni del telo, cresce - a parità di  $p$ , cioè di depressione - la sollecitazione sul rivestimento.

Sul possibile danneggiamento della politenatura si possono svolgere diverse considerazioni.

Anzitutto, come verificato sperimentalmente, tale evento si verifica in maniera molto evidente (con "schiocchi" e "strappi" prima, e con evidenti aperture poi) solo alle più alte pressioni, ma è del tutto verosimile ipotizzare che il fenomeno possa prodursi anche in modo graduale e non rilevabile. Quello che va evidenziato - in un caso o nell'altro - è che viene perso il confinamento statico, invalidando quindi la prova fumo precedentemente eseguita.

D'altra parte va anche detto che l'apertura della sigillatura consente al sistema di portarsi in una nuova configurazione di equilibrio, ad una depressione in valore assoluto minore. Non si tratta, comunque, di "aperture passive controllate", per cui si finisce con il produrre una situazione di contrasto con la normativa vigente, per giunta non controllabile.

Un altro elemento da porre in evidenza è che, se ad esempio si fissasse come requisito un valore minimo di depressione, si potrebbe con tutta probabilità far ricorso all'utilizzo di un numero di estrattori notevolmente più basso, che si abbasserebbe ulteriormente in presenza di unità di decontaminazione stagne (o, per meglio dire, "più stagne").

Per locali di grandi dimensioni, come quelli oggetto delle misure svolte, si potrebbe conseguire anche un risparmio sia di costi di investimento (immobilizzo di attrezzature) che di costi di esercizio (corrente elettrica, materiale di consumo) non trascurabile.

## 5. SIMULAZIONE ESEGUITA MEDIANTE IL CODICE DI CALCOLO FLUSH

La simulazione della situazione fluidodinamica che si stabilisce nella zona in bonifica durante l'intervento, a seguito della attivazione degli estrattori, è stata articolata nelle seguenti fasi:

- messa a punto del modello di simulazione.
- fase preliminare di calcolo, di messa a punto dell'input e di verifica in situazione di equilibrio di pressione;
- fase di calcolo vera e propria, mirata alla esecuzione di una analisi di sensibilità al variare del volume del locale e del numero di ricambi orari.

Tale fasi vengono illustrate nei successivi paragrafi.

### 5.1 Breve descrizione del codice di calcolo FLUSH

Il programma, scritto in linguaggio Fortran, è stato interamente sviluppato nell'ambito della Scuola di Specializzazione in Sicurezza e Protezione Industriale, e largamente utilizzato per analisi di transitori incidentali (rilasci) in impianti a rischio rilevante di incidente.

FLUSH consente la simulazione di transitori termoidraulici, anche con efflusso bifase e con passaggio di stato, e permette di simulare un massimo di sette volumi di controllo (cioè volumi di cui si vuole studiare il comportamento) a ciascuno dei quali possono essere collegati tre volumi a condizioni termodinamiche imposte; possono altresì essere introdotti pozzi e sorgenti termiche e diverse strutture (come capacità termiche) per ogni volume di controllo. Le caratteristiche geometriche e fluidodinamiche delle sezioni di collegamento fra i diversi volumi (siano essi di controllo o a condizioni imposte) possono essere fissate dall'utente. FLUSH è dotato di librerie di stato di diverse fluidi, fra cui cloro, ammoniaca, propano, butano, idrogeno. E' quindi possibile, tramite FLUSH, riprodurre evoluzioni complesse (inclusi i transitori in efflusso critico) e situazioni geometriche particolari. Sotto il profilo numerico, il programma consente di scegliere il passo di integrazione, ma è anche in grado di modificarlo qualora ciò sia reso necessario a seguito di verifiche di convergenza. In aggiunta, è possibile attivare una ulteriore iterazione interna, che - con un aggravio dei tempi di calcolo - consente una maggiore precisione nella simulazione del transitorio.

E' possibile impostare sia il tempo di simulazione che il tempo di calcolo. E' possibile selezionare le grandezze di cui si desidera conoscere l'evoluzione e il relativo passo di stampa sui files di output.

In appendice sono riportati un file di input e uno di output relativi ad uno dei transitori analizzati.

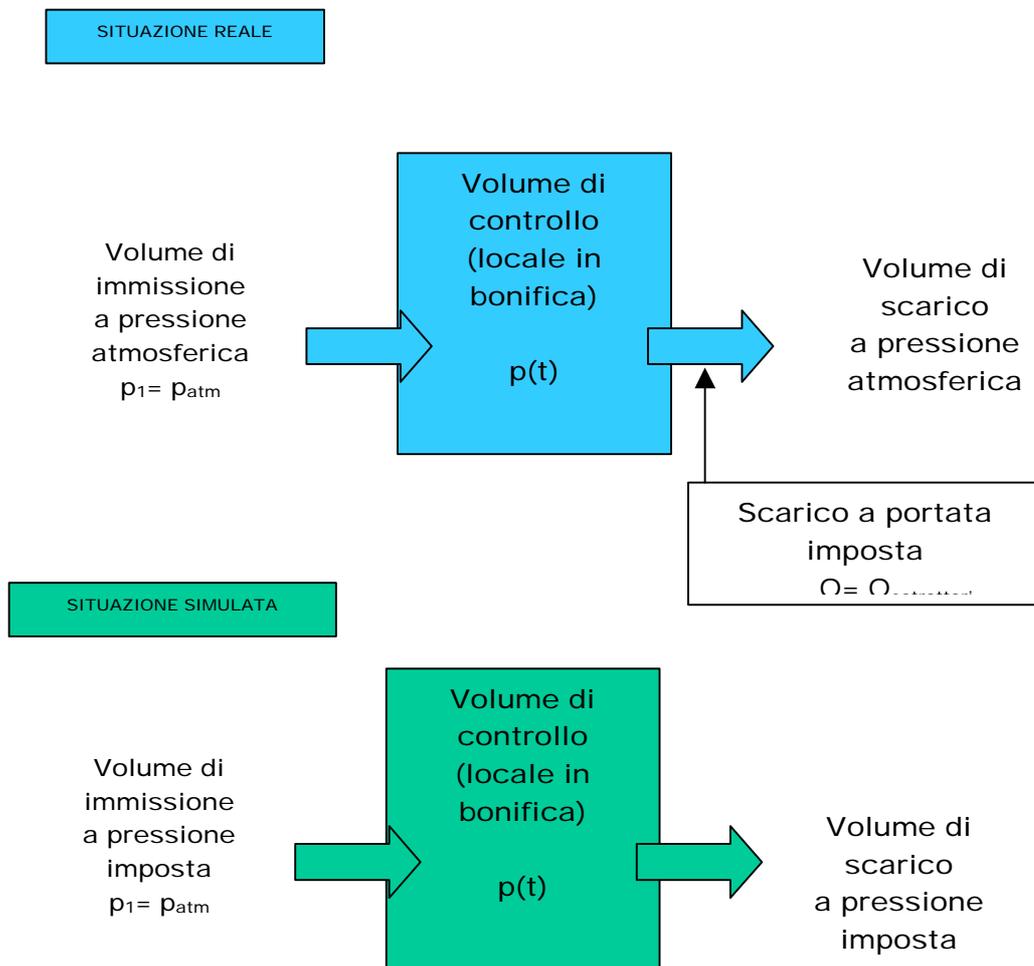
## 5.2 Modello

La figura 5.1 illustra la situazione reale e il modo in cui essa è stata modellizzata mediante il codice di calcolo FLUSH.

La situazione reale è stata riprodotta con assoluta fedeltà per quanto riguarda il "Volume di controllo" (cioè il locale in bonifica) e la parte a monte di esso. Sono state infatti impostate in assoluta analogia alla realtà le dimensioni del locale, quelle della superficie di immissione aria (UD), nonché la pressione, che all'istante iniziale è evidentemente pari a quella atmosferica.

Per la parte a valle, o zona di estrazione, si è invece dovuto far ricorso a un artificio, in quanto non è possibile, da programma, imporre la portata di estrazione.

Si è pertanto scelto di riprodurre la portata di estrazione abbassando artificialmente la pressione di scarico al di sotto del valore della pressione atmosferica, fino ad ottenere, eseguendo poi altri e più fini aggiustamenti sull'area di espulsione e sul relativo coefficiente di perdita di carico "k" (anche questi "fittizi" come la depressione a valle), fino ad ottenere esattamente i valori di portata di estrazione misurati.



## 5.3 Prima taratura del modello in stazionario

E' stato necessario eseguire una taratura precisa in stazionario in quanto il programma non consente, giustamente, di imporre la pressione iniziale nel volume di controllo se non indirettamente: la pressione iniziale scaturisce infatti dalla risoluzione dell'equazione di stato relativa alla sostanza contenuta nel volume di controllo (nel caso specifico: aria), una volta impostate le altre variabili cioè volume, temperatura e massa. La correttezza delle impostazioni introdotte è stata verificata imponendo pari alla pressione atmosferica anche le pressioni dei volumi di immissione e di scarico (definiti "volumi a condizioni imposte") e verificando la assenza di scambi di massa fra volume di controllo e ciascuno dei due volumi a condizioni imposte.

#### 5.4 Casi test di simulazione

Sono state simulate le situazioni rilevate sperimentalmente, con riferimento a diverse portate in ingresso, vale a dire a un diverso numero di estrattori accesi. Si illustra, a titolo di esempio, il caso relativo a sei estrattori accesi. Le grandezze rilevate erano, nel caso di riferimento di cui sono riportati in appendice l'input e l'output, le seguenti:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 15 \text{ Pa} \\ &\text{vale a dire} \\ p &= 101325 - 15 = 101310 \text{ Pa} \\ Q_{\text{tot estr}} &= 3800 \times 6 = 22\,800 \text{ m}^3/\text{h} \\ &\text{corrispondenti a} \\ \Gamma_{\text{tot estr}} &= 8,48 \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Quale primo commento a tali risultati, si può osservare, confrontando tali dati con quelli riportati in appendice, oltre al buon andamento delle grandezze fisiche e alla assenza di problemi legati alla convergenza del calcolo, la ottima aderenza della situazione simulata a quella reale, in particolare in relazione alla rapidità del transitorio. Nel corso delle misure, infatti - come già evidenziato -, si è verificato come, all'accensione degli estrattori, il deprimometro differenziale si portasse a regime con una costante di tempo molto grande, tale da determinare una situazione di regime nel giro di uno o due secondi.

Come già accennato, il programma FLUSH, pur accettando in input il passo di integrazione per l'esecuzione del calcolo, è in grado di eseguire - su richiesta dell'utente - una ottimizzazione dello stesso al suo interno, sulla base dei risultati di una verifica interna su specifici parametri di convergenza. Tale opzione è stata attivata, in quanto il transitorio è molto veloce e le differenze di pressione in gioco molto piccole.

Un aspetto interessante che è stato affrontato è stato quello del "coefficiente K" delle perdite di carico. Per la sezione di uscita K rimane costante per qualsiasi valore di portata, in quanto l'unico obiettivo è quello di riprodurre la portata estratta, per cui - fissata una depressione nell'ambiente di scarico esterno - è sufficiente agire sull'area di efflusso.

Diversamente accade per la sezione di ingresso, per la quale si è notato che esso doveva variare sensibilmente con la portata. Ciò è ragionevole se si considera il fatto che l'uscita nell'unità di decontaminazione (entrata del locale in bonifica) la funzione di "porta" è svolta da una tenda di polietilene opportunamente sagomata, che fa variare la configurazione geometrica del sistema ogni qual volta si verifica una variazione di portata. Come si può notare dal grafico successivo il valore del parametro diminuisce all'aumentare della portata.

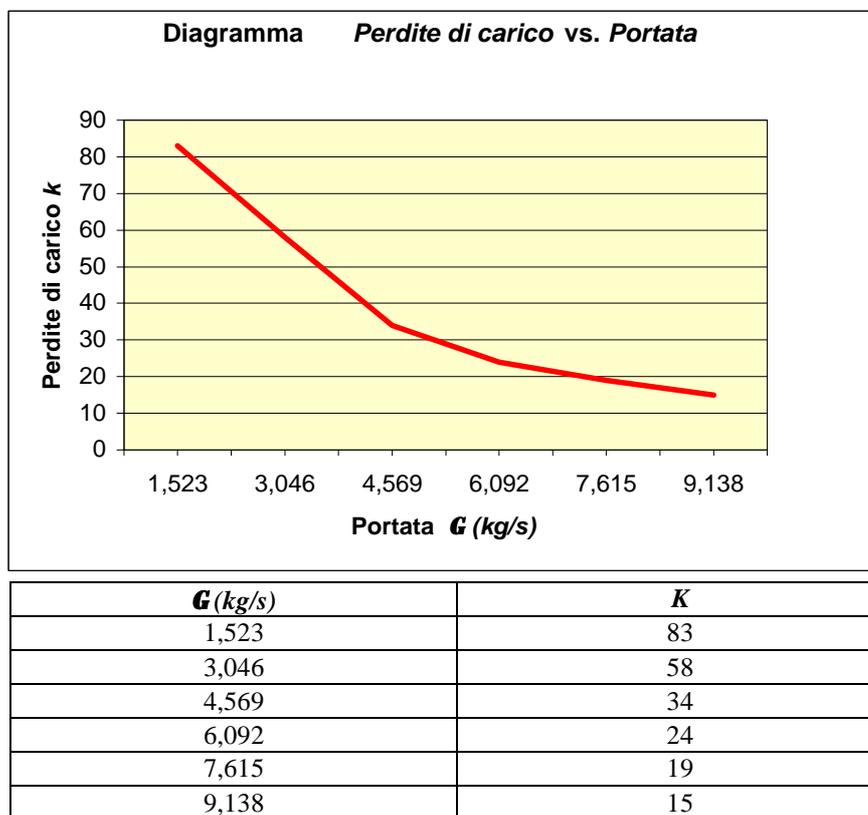


Fig. 7 – Andamento del coefficiente di perdite di carico al variare della portata (sezione di ingresso)

Di conseguenza ci trova nella situazione particolare in cui il coefficiente delle perdite di carico è esso stesso funzione della portata, per cui la perdita di carico risulta espressa dalla relazione

$$\Delta p = K (\Gamma) \frac{\mathbf{r} v^2}{2} = K (\Gamma) \frac{\Gamma^2}{2 \mathbf{r} A^2} \quad (4)$$

### 5.5 Ulteriori sviluppi di calcolo

Messi a punto i parametri del programma di calcolo, è stata svolta una analisi di sensibilità, facendo variare il volume del locale (Volume di Controllo) e ipotizzando i ricambi orari di aria variabili entro un certo intervallo. I risultati dell'analisi sono riportati in tabella 2.

Volume locale (m <sup>3</sup> )	Ricambi orari	Depressioni (Pa)	Volume locale (m <sup>3</sup> )	Ricambi orari	Depressioni (Pa)
250	2	0.9	5000	2	6.2
	4	1.6		4	12.6
	8	4.2		8	14.6
500	2	1	10000	2	5.1
	4	1.8		4	13.3
	8	5.1		8	20.7
1000	2	1.9	100000	2	63
	4	5.6		4	250
	8	19.8		-	-

Tabella 2 – Risultati delle simulazioni

Va ricordato ancora che, nella taratura del modello, sono state impostate le caratteristiche geometriche e fluidodinamiche della sezione di ingresso (area di efflusso e coefficiente delle perdite di carico concentrate “K”) e che, pertanto, i risultati hanno un riferimento diretto alla situazione di riferimento, che è quella di unità di decontaminazione realizzate in legno e teli di polietilene. Va però altresì evidenziato che i risultati ottenuti contengono indicazioni che in termini fluidodinamici sono, evidentemente, valide in senso generale. In altre parole, è comunque vero che, a parità di unità di decontaminazione, bonificando ambienti più grandi e facendo affidamento sul parametro dei numeri di ricambi d’aria, si realizzano condizioni di depressione più spinta, con i rischi che si sono evidenziati per la tenuta della politenatura. In accordo con le ipotesi precedenti sul coefficiente di perdita di carico (tabella 3), si nota come lo stesso decresca al crescere delle portate fino al caso limite di un volume estremamente ampio di 100000 m<sup>3</sup> dove lo stesso è stato posto pari a zero.

Portate indicative [kg/s]	Valori numerici del coefficiente K	Portate indicative [kg/s]	Valori numerici del coefficiente K
0-1	600	5-7	24
1-3	190	7-9	18
3-4	50	9-14	7
4-5	34	14-30	2
		Oltre 30	0

Tabella 3 – Scelta indicativa dei valori di K nelle simulazioni

Inoltre dalle successive tabelle, si evidenzia come a parità di ricambi orari i valori di depressione crescano all’aumentare delle dimensioni degli ambienti fino a valori inconciliabili con la tenuta del nastro adesivo sul rivestimento di polietilene.

Volumi [m <sup>3</sup> ]	Valore di depressione (Pa)
250	0.9
500	1.0
1000	1.9
5000	6.2
10000	5.1
100000	63

Tabella 4 - Depressioni in relazione al volume per 2 ricambi orari

Volumi [m <sup>3</sup> ]	Valore di depressione (Pa)
250	1.6
500	1.8
1000	5.6
5000	12.6
10000	13.3
100000	250

Tabella 5 - Depressioni in relazione al volume per 4 ricambi orari

## 5.6 Discussione dei risultati

I risultati dell'analisi di sensibilità svolta confermano le indicazioni emerse da una prima fase di valutazione dei dati sperimentali: all'aumentare del volume e a parità di configurazione della sezione di ingresso (o di reintegro) e di portata estratta, il sistema presenta una crescente difficoltà a reintegrare l'aria estratta.

Tale difficoltà si traduce nell'instaurarsi di condizioni di depressione molto spinte, le quali costituiscono un rischio elevato per la tenuta della politenatura. Si osserva che, nell'ipotesi di dover eseguire una bonifica da MCA in locali delle dimensioni di quelli simulati, per garantire la tenuta del confinamento statico si dovrebbe lavorare a un numero di ricambi orari più basso di quello normalmente indicato sui Piani di Lavoro, derogando – in definitiva – dallo stesso, con possibili conseguenze in termini di autorizzazione da parte dell'autorità di controllo (ASL).

Si può pertanto concludere che la prescrizione basata sul numero di ricambi d'aria, ai puri fini del confinamento dinamico, risulta tanto più inadeguata quanto più sono elevati i volumi dei locali in bonifica.

## 6 PROPOSTE DI INTEGRAZIONE ALLA NORMATIVA

Sulla base di quanto emerso dallo studio svolto, in particolare dalle risultanze delle misure sperimentali e dalle successive elaborazioni di calcolo, si ritiene che le nuove prescrizioni per il mantenimento della depressione negli ambienti in fase di bonifica da MCA debbano vertere sui punti nel seguito dettagliati:

1. identificazione a priori della tipologia di unità di decontaminazione utilizzata: nel Piano di Lavoro deve essere specificato, in particolare, qual è il comportamento atteso da parte dell'UD in relazione ai rientri d'aria;
2. sulla base del punto precedente, valutazione qualitativa delle superfici di rientro dell'aria e – in relazione a queste – indicazione:
  - del valore di depressione atteso nell'area di bonifica;
  - del numero degli estrattori;
  - dei dati caratteristici degli estrattori;
3. introduzione di un valore minimo e di un valore massimo (per garantire la tenuta dei teli e condizioni accettabili all'interno dell'UD, in osservanza alle prescrizioni normative relative alla sicurezza sui luoghi di lavoro) di depressione da mantenere nell'ambiente in bonifica rispetto agli ambienti esterni "puliti"; predisposizione di segnalazione di allarme a fronte del superamento delle soglie fissate;
4. richiesta di una valutazione, da proporre sempre nell'ambito del Piano di Lavoro, relativamente alle dimensioni dei teli di polietilene utilizzati e al possibile danneggiamento della sigillatura;
5. soppressione delle aperture passive o, in subordine, definizione di criteri vincolanti per la introduzione delle medesime, quali l'esecuzione di un dimensionamento di massima delle stesse all'interno del Piano di Lavoro.
6. soppressione del concetto degli "inevitabili danneggiamenti" della politenatura.

## RINGRAZIAMENTI

Si desidera ringraziare: il Ministero del Lavoro e della Previdenza Sociale, Direzione Generale della Previdenza e Assistenza Sociale, che ha reso possibile la realizzazione della ricerca nell'ambito della quale è stato svolto il presente studio; l'ing. Claudio Demofonti della Nucleco S.p.A. per il cortese e utile supporto fornito in tutte le fasi dell'attività.

## Appendice – Input e output tipici del codice FLUSH

### INPUT

```

$ Number of volumes type of first and second fluid
1 13 14
$ Molecular weight other uncondensable gas
$ DATI PER VOLUME SALA CATALOGHI
$ Volume Transv. Area Temperature Minimum mass percentage
$ [m3] [m2] [K] [%]
5082 923 300. 2.
$ fl.1 mass fl.2 mass Air mass Uncond. mass
$ [kg] [kg] [kg] [kg]
0. 0. 5975.8 0.
$ Heat source for volume 1
$ itipo tica [s]
1 0.
$ Wmax [W] t1 [s] t2 [s]
0. 0. 100.
$ Number of fixed condition volumes (IATM)
2
$ FIXED CONDITION VOLUME 1 (ATM) IN
$ ifluido xout iapo IAPK dhj dez
3 1 1 0 0 0
$ temp [K] press [Pa] tit [-]
300. 1.01325E+05 1.
$ kappa
15
$ dprot trot iprot tein perm
0. 0. 0 0. 0
$ amax(m2) t1 t2
6. 0. 0.
$ FIXED CONDITION VOLUME 2 (ATM) OUT
$ ifluido xout iapo IAPK dhj dez
1 1 1 0 0 0
$ temp [K] press [Pa] tit [-]
300. 1.E+05 1.
$ kappa
55
$ dprot trot iprot tein perm
0. 0. 0 0. 0
$ amax(m2) t1 t2

```

```

1.1 0. 0.
$ STRUCTURES INPUT FOR VOLUME 2
$ Number of masses (IMAS)
$ CALCULATION PARAMETERS
$ Time step[s] Simul Time[s] %Err Max Dt %var Min Dt %var
.02 2 .1E-05 .01 .1E-04
$ Max Temp [K] Max Pre [Pa] Elab time [s] Prt step ictmax
.1E+07 .1E+09 30. 2 2
$ Internal iter. Min time step [s] Max time step [s]
0 .02 .04
$ PLOTTING VARIABLES LIST
1 7 1 2 13 12 3 10 20
$ ***** END OF INPUT FILE *****

```

### OUTPUT

Time [s]	Out flow [kg/s]	In flow [kg/s]	Pressure [Pa]	Air mass [kg]	time step [s]
0.000	0.4133E+01	0.2394E+01	101325.7	0.5976E+04	0.020
0.040	0.5921E+01	0.4096E+01	101319.3	0.5976E+04	0.020
0.094	0.8257E+01	0.6299E+01	101316.5	0.5975E+04	0.031
0,11	0.8251E+01	0.7104E+01	101314.9	0.5975E+04	0.030
0,15	0.8247E+01	0.7652E+01	101314.1	0.5975E+04	0.030
0,19	0.8245E+01	0.7917E+01	101313.6	0.5975E+04	0.030
0,23	0.8243E+01	0.8058E+01	101313.3	0.5975E+04	0.030
0,27	0.8243E+01	0.8138E+01	101313.2	0.5975E+04	0.030
0,32	0.8242E+01	0.8183E+01	101313.1	0.5975E+04	0.030
0,36	0.8242E+01	0.8209E+01	101313.0	0.5975E+04	0.030
0,40	0.8242E+01	0.8223E+01	101313.0	0.5975E+04	0.030
0,44	0.8242E+01	0.8229E+01	101313.0	0.5975E+04	0.030
0,48	0.8242E+01	0.8234E+01	101313.0	0.5975E+04	0.020
0,51	0.8242E+01	0.8237E+01	101313.0	0.5975E+04	0.020
0,54	0.8242E+01	0.8238E+01	101313.0	0.5975E+04	0.020
0,57	0.8242E+01	0.8238E+01	101313.0	0.5975E+04	0.030
0,60	0.8242E+01	0.8238E+01	101313.0	0.5975E+04	0.020
0,63	0.8242E+01	0.8238E+01	101313.0	0.5975E+04	0.020
0,66	0.8242E+01	0.8237E+01	101313.0	0.5975E+04	0.030
0,69	0.8242E+01	0.8236E+01	101313.0	0.5975E+04	0.020