

1. La mitigazione degli eventi incidentali connessi al rilascio di nubi pesanti, tossiche e/o infiammabili tramite l'utilizzo di Barriere Idriche.

1.1 Introduzione

Lo studio si propone di evidenziare in termini sintetici le possibilità e le limitazioni di impiego attuali di particolari sistemi di protezione attiva, costituiti dalle “Barriere (Cortine e Spray) ad Acqua o a Vapor d'acqua”, d'ora in poi chiamati per comodità semplicemente “Barriere Idriche”.

I citati sistemi intervengono ai fini della protezione antincendio per diluire le concentrazioni gassose di sostanze particolari liberatesi nell'atmosfera.

Lo Stato dell'Arte, per quanto concerne la determinazione dei parametri progettuali e di calcolo delle Barriere – configurazione spaziale di distribuzione geometrica e di erogazione idrica, caratteristiche idrauliche di portate e pressioni, caratteristiche spaziali di copertura idrica – non offre soluzioni unitarie applicabili direttamente per ogni tipologia di rilascio, bensì molteplici modelli parziali che richiedono comunque una sensibilità ai dati sperimentali di supporto, vuoi per la complessità dei fenomeni chimico-fisici coinvolti, vuoi per la mancanza di una diffusa antologia di esperienze costruttive, tanto più sentita a livello nazionale, ove sono per altro assenti carenze di fonti bibliografiche di carattere generale sull'argomento.

1.2 La mitigazione del rilascio di sostanze

Una volta valutata la fattibilità/opportunità di un sistema di protezione attiva tramite Barriere Idriche, e dopo aver analizzato rischi e pericoli associati ai rilasci accidentali di sostanze pericolose, è possibile esaminare le modalità di applicazione. Le Barriere Idriche, come ogni altra contromisura per l'evenienza rilascio di sostanze, necessitano di analisi di efficacia e affidabilità relate al particolare tipo di processo.

L'affidabilità del rifornimento di una Barriera Idrica riguarda sia la riserva disponibile che il sistema idraulico e di controllo sia la tempestività di attivazione.

Il successo dell'intervento ovviamente dipende in maniera significativa anche dalla presenza e dalla preparazione del personale addetto presente in sito al momento del rilascio. Il tutto va inquadrato in una strategia generale della sicurezza, che prevederà probabilmente l'utilizzo delle contromisure in oggetto allorché non si riesca a prevenire il rilascio dal sistema mediante l'impiego di valvole di sezionamento, di sistemi di trasferimento o di sequenze di blocco. Le tipologie di rilascio di cui trattasi sono quelle di sostanze pericolose può avvenire in fase gassosa (rilascio di vapori o di gas), in fase liquida (perdite liquide) come misura di diluizione, o mista.

Lo studio delle Barriere Idriche è indirizzato principalmente alla mitigazione del rilascio di vapori-gas di sostanze più pesanti dell'aria, aventi maggior pericolo di stratificazione ed accumulo alle basse quote ed in risacche. Non mancano tuttavia in letteratura (precipuaemente per rilasci di LNG) riferimenti alla possibilità di applicazione per la mitigazione di rilasci di *sostanze in fase liquida che danno origine alla emissione di vapori leggeri*: in tal caso le barriere, con getto indirizzato sulla pozza di rilascio sono deputate a trasferire calore sensibile per la accelerazione dei fenomeni di evaporazione. (compatibilmente con l'accettabilità o meno dell'incremento dell'evaporazione stessa).

1.4 Tipologie

Si analizzano nel seguito le tipologie di Barriere più diffusamente utilizzate per la mitigazione del rilascio di vapori-gas. Ciascuna contromisura è sintetizzata tramite una maschera nella quale poter specificare taluni parametri significativi e ripetibili, utili anche per una analisi comparata di contromisure diverse, ove sono riportate indicazioni relative a: caratteristiche generali, condizioni di operabilità, limiti e proprietà di ciascuna. Le tipologie sono:

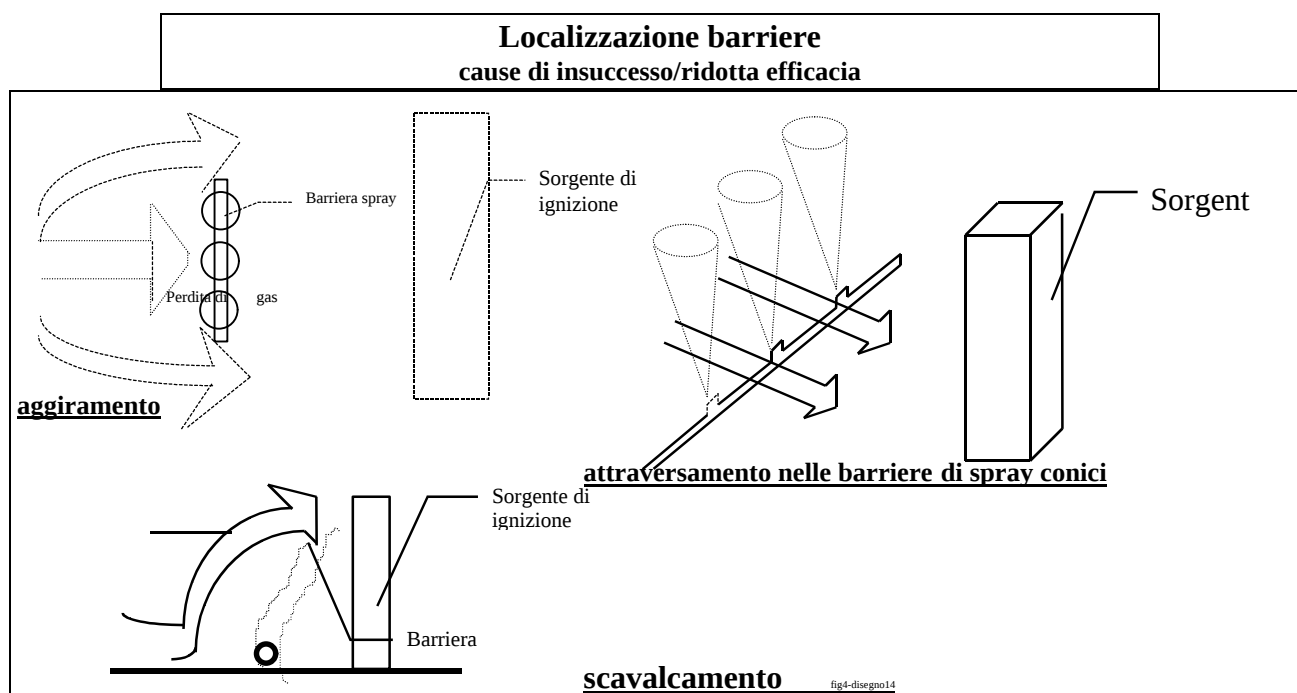
- spray ad acqua, costituite da uno o più ombrelli d'acqua opportunamente sagomati ed affiancati;
- cortine ad acqua, costituite da uno schermo pressoché continuo di acqua erogata;
- cortine a vapore, costituite da uno o più getti affiancati oppure schermi di vapor d'acqua.

Laddove ciò sia passibile di generalizzazione il termine cortina verrà impiegato sia nel caso di una serie di ombrelli idrici affiancati (spray) possono costituire, di fatto, quasi uno schermo continuo (cortina).

La differenza tra il termine “frazionata” e “nebulizzata” riferita all'acqua erogata, è legata al tipo di suddivisione del liquido in minute goccioline, ove la nebulizzazione (a volte detta “atomizzazione”) è associata ad un maggiore impiego di energia e di pressione del sistema rispetto al frazionamento, oltre che ad una diversa realizzazione costruttiva degli ugelli erogatori.

La direzione di erogazione idrica può essere verticale (verso il basso o verso l'alto) o inclinata.

E' stata ipotizzata la disposizione di cortine in modo da formare uno spazio poligonale chiuso o parzialmente chiuso a confinare la zona del rilascio, accoppiando eventualmente alle cortine altri sistemi di confinamento fisico quali ad esempio trincee.



1.4.1 Spray e Cortine ad Acqua

Generalità

I meccanismi di intervento basilari consistono nella diluizione di infiammabili, direttamente collegata al richiamo di aria ambiente e nella dispersione di tossici e/o all'assorbimento del gas da parte dell'acqua. L'inclinazione della Barriera può essere di vario tipo, verticale o inclinata e diretta verso l'alto o verso il basso, ma in ogni caso deve garantire una distribuzione uniforme.

Caratteristica:	<u>Sprays</u>: ombrello/i, sottile ad alta portata, posto preferibilmente sopravento rispetto ad eventuali punti di ignizione; utilizzo di opportuni ugelli erogatori. <u>Cortine</u>: il mezzo disperdente fuoriesce da una tubazione attraverso ugelli erogatori opportunamente ravvicinati o attraverso fessure sagomate;
Condizioni di operabilità:	risposta manuale o automatica a rivelatori di vapore-gas o a rapporto del personale d' area.
Limiti :	-l'acqua abbatte soltanto una frazione dei vapori; l'assorbimento totale dei vapori solubili in acqua è impossibile in pratica causa la velocità dei tempi di miscela; -dipendenza dal posizionamento; -i vapori possono spostarsi sottovento al di fuori del campo di azione dello spray ad acqua prima che lo stesso possa essere utilizzato. -presenza di una distanza limite, tra il vapore e la sorgente della perdita, per garantire l'efficacia della diluizione della nuvola di vapore da parte della cortina; - progettazione comunque, basata sull'esperienza, (es.: ,modellazione della quantità d'aria che deve essere richiamata - vedi oltre)
Proprietà:	-diluizione delle nuvole di vapore tramite il mescolamento dei vapori con l'aria trascinata dallo spray di goccioline d'acqua; -rimozione per trascinamento della nuvola di vapore pericoloso dalle sorgenti di ignizione -<u>Cortine</u> : possibilità di installazione di cortine ad acqua tramite anello singolo, doppio o multiplo.

La progettazione di una Barriera ad Acqua può seguire diverse prassi con diverso livello di semplificazione e ricorso a più o meno dettagliato supporto analitico-numerico, ma in tutti i casi la parte sperimentale ha un ruolo non trascurabile. La parte sperimentale può essere limitata alla caratterizzazione idraulica degli erogatori ed a qualche altro parametro significativo, ma può anche costituire parte essenziale del metodo di calcolo.

Vengono oggettivati taluni parametri di valutazione delle Barriere ad Acqua e a Vapore tramite le definizioni, ricorrenti in letteratura, di :

“efficacia”=(concentrazione in presenza barriera) / (concentrazione senza barriera) ”;

“efficienza” = (portata d'aria circostante richiamata) / (portata volumetrica di acqua o di vapore)”.

Tali parametri hanno significato sia per gli approcci in assorbimento (chimici) sia per quello in dispersione (fisici). Per l'illustrazione dettagliata di alcuni dei principali modelli sviluppati si rimanda all'apposita sezione.¹

1.4.2. Cortine a Vapore d'Acqua

Anche per l'utilizzo delle Barriere al Vapore possono prevedersi le due configurazioni di Barriera verticale dal basso verso l'alto e Barriera verticale dall'alto verso il basso.

Semplificando i meccanismi di interazione che differenziano le due configurazioni sono:

- la Barriera al Vapore con erogazione *dal basso verso l'alto* cattura *prima il gas e poi l'aria*,
- la Barriera al Vapore con erogazione *dall'alto verso il basso* cattura *prima l'aria e poi il gas*.

<i>Caratteristica:</i>	-getto di vapor d'acqua fuoriuscente da una tubazione tramite fori o ugelli appositi; - utilizzato per diluire la nuvola di vapore-gas pericoloso al di sotto del suo limite inferiore di infiammabilità.
<i>Condizioni di operabilità:</i>	-operabilità simile a quella delle cortine ad acqua (liquida), eccezion fatta per l'effetto di assorbimento che ora è minimo e per l'energia richiesta al sistema per il funzionamento, spesso maggiore di quella richiesta per le cortine ad acqua, il che riduce il campo di impiego a poche situazioni reali nelle quali si disponga di vapor d'acqua associato a processi e lavorazioni particolari.
<i>Limiti :</i>	-richiesta considerevole di vapor d'acqua; - sistemi di rifornimento e distribuzione pratici solo per aree limitate (per esempio stazioni pompe); -generazione di elettricità statica da parte della cortina a vapore (per esempio nel caso in cui i componenti impiantistici non siano dotati di messa a terra ed equipotenzialità ovvero nel caso di contatto del vapore con particolari nubi infiammabili). -pericoli per gli operatori connessi all'alta temperatura del vapor d'acqua stesso. - interferenza con le condizioni atmosferiche ambientali, dato che l'utilità della Barriera al Vapore diminuisce all'aumentare della velocità del vento.
<i>Proprietà:</i>	-la temperatura del fluido operante (acqua), aumenta la galleggiabilità dei vapori-gas pericolosi che possono così attraversare la stessa cortina a vapore; - necessità di inserire valvole individuali di controllo in opportune sezioni delle tubazioni del sistema a cortina per direzionare il vapore nel modo più efficace.

1.5 Osservazioni

Le seguenti osservazioni si riferiscono, salvo diversa indicazione, alle Barriere sia ad Acqua che a Vapore.

Per quanto concerne il parametro di efficacia, legato alle concentrazioni del rilascio pericoloso, le Barriere ad Acqua sembrano permettere una migliore miscelazione rispetto a quelle al Vapore;

Interessante è il confronto della orientazione del getto della Barriera, soprattutto nel caso di gas infiammabili ove il maggior effetto diluente si ha con orientazione verso l'alto per il getto della Barriera ad Acqua, e con orientazione verso il basso per il getto della Barriera al Vapore.

Per quanto concerne il parametro di efficienza, legato al richiamo di aria circostante, le Barriere al Vapore sembrano migliori.

Il frazionamento elevato del getto in caso di Barriera ad Acqua, utile per favorire l'assorbimento del rilascio e quindi la dispersione, non consente in genere una intensa azione meccanica che sarebbe vantaggiosa per aumentare il richiamo d'aria.

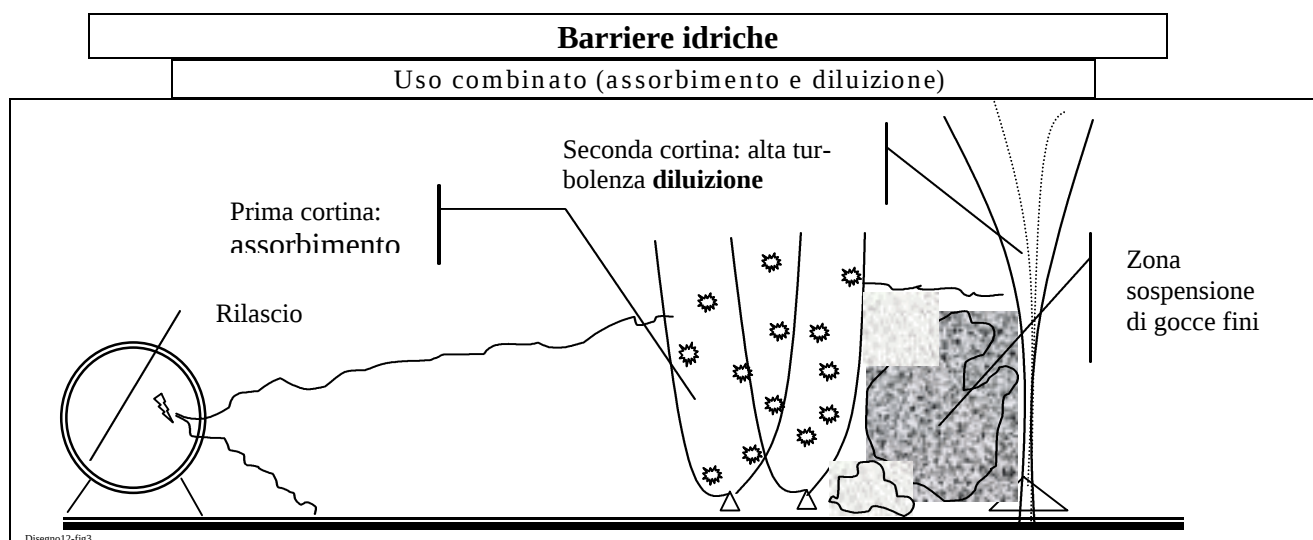
Per contro, il dimensionamento della Barriera ad Acqua se ottimizzato per l'assorbimento tossici non è allo stesso modo ottimizzato per la diluizione infiammabili.

La configurazione della Barriera, sia ad Acqua che a Vapore, rivolta verso l'alto occupa in genere meno spazio; è possibile o a volte necessario accompagnare una barriera fisica (staccionata continua, muretto ...) alla Barriera, qualunque configurazione essa abbia.

La generazione di cariche elettrostatiche, possibile innesco di nubi infiammabili, non sembra essere un problema ostativo alla adozione delle Barriere, pur essendo ovviamente da tener presente, perché esiste una serie di accorgimenti di sicurezza opportuni (equipotenzialità impianti, ventilazione ...) impiegabili. L'applicazione pratica delle Barriere è collegata alla *diluizione* di rilasci gassosi infiammabili fino a qualche decina di kg/s.

¹ Talvolta è stato suggerito un uso combinato assorbimento-diluizione della Barriera Idrica.

Una *prima* Barriera ad Acqua opportunamente posizionata e dimensionata viene utilizzata per *assorbire* il rilascio, mentre una *seconda* Barriera ad Acqua anch'essa opportunamente posizionata e dimensionata viene utilizzata per *diluire* la parte di rilascio che ha oltrepassato la prima Barriera. [fig. 3]



La localizzazione più adatta è intorno al bersaglio da proteggere, alle sorgenti di rilascio (ad esempio serbatoi GNL), ai punti di innesco (ad esempio forni).

L' applicazione delle Barriere alla *assorbimento/diluizione* di rilasci tossici è più difficoltosa, soprattutto perché le concentrazioni sono dell' ordine di ppm o di ‰ anziché di % come nella diluizione di infiammabili.

Le condizioni ambientali, da valutarsi in correlazione dei diversi parametri di stabilità atmosferica, possono suggerisce l'adozione di misure di sicurezza aggiuntive al calcolo; la letteratura suggerisce aumenti considerevoli della larghezza della Barriera Idrica (fino e oltre 3 volte larghezza nube ipotizzata).

Si ribadisce la scrupolosa attenzione progettuale alla inibizione delle possibili fonti di innesco nelle zone a monte della Barriera destinata ad agire in occasione del rilascio di infiammabili. [fig.4]: infatti poco è dato sapere di quanto occorribile a monte delle B.: nulla può dirsi a priori riguardo l'efficacia antincendio di una barriera finalizzata per la dispersione. (possibili problemi di infiammabilità del rilascio a contatto di fonti di innesco legati alla turbolenza generata dalla Barriera sono stati, del resto, il passaggio delle fiamme attraverso la Barriera stessa, intensificazione della combustione e l' incremento di concentrazione del rilascio pericoloso a monte della Barriera.

Risultano meritevoli di ulteriori approfondimenti i seguenti temi:

1) scelta oculata dei modelli di dispersione da utilizzarsi, ovvero la modellazione dell' azione che i sistemi di mitigazione in oggetto sono chiamati a contrastare. I modelli classici di dispersione presentano, infatti, limite del loro campo di applicazione dell' ordine delle centinaia di metri, cioè distanze in genere superiori a quelle di interesse per l' assorbimento/diluizione all' interno dello stabilimento.

2) Considerazioni critiche sulle altezze massime dal suolo che è possibile proteggere con le barriere idriche, cortine o spray: il D.M.20/10/99 invoca la protezione per una altezza pari a quella degli impianti/installazioni che possano dar luogo a rilasci. Le validazioni sperimentali dei modelli di calcolo sono state condotte su altezze ridotte, dell'ordine 3-5 metri: si pone quindi lecito l' interrogativo in merito alla scelta di un bersaglio da proteggere (“ target ”) più limitato, con protezione di una altezza dal suolo che consenta comunque alle squadre di intervento di raggiungere la fonte del rilascio per potere rimuovere le cause di pericolo.

3) La sperimentazione con gas diversi dall' anidride carbonica, dato che i risultati sperimentali presenti in letteratura a supporto di valutazioni dell' efficienza/efficacia della barriera idrica sono relativi a sperimentazioni condotte con anidride carbonica, gas più pesante dell' aria ma meno degli idrocarburi, quindi non integralmente rappresentativo.

Benchè non attualmente contemplati nell' oggetto del presente lavoro, due aspetti particolari sembrano forieri di vantaggiosi sviluppi:

a) la protezione termica con barriere idriche, attraverso l' ottimizzazione progettuale delle funzioni ottenibili dalle barriere stesse (diluizione, assorbimento, schermaggio, lavaggio);

b) la predisposizione della barriera idrica per il confinamento di spazi al chiuso, unitamente ad eventuali schermi di convogliamento per l' incanalamento dei flussi d'aria richiamati.

A questi aspetti particolari potrebbe ravvisarsi la proficuità di studi relativi ad ambienti chiusi al fine del mantenimento di minime condizioni di vivibilità, eventualmente temporanee, in ambienti chiusi e alla configurazione di percorsi d'esodo differenziati o preferenziali.

2. Principali modelli teorico-sperimentali

L'abbattimento delle concentrazioni di agenti tossici e/o infiammabili attraverso l'utilizzo di getti d'acqua nebulizzata o frazionata costituisce modalità di mitigazione degli effetti nocivi di tali agenti tradizionalmente utilizzata dagli operatori antincendio, perseguita tuttavia senza alcuna capacità di previsione dell'efficacia in fase di intervento, ovvero senza possibilità di valutazione del rapporto dei mezzi impiegati e dei risultati raggiunti, eccetto il controllo sul teatro delle operazioni della risposta degli analizzatori di esplosività dell'atmosfera, risposta comunque da intendersi

come controllo speditivo delle operazioni in corso . Il principio di mitigazione così applicato non assurge quindi al ruolo di strumento strategico cui possa essere ascritto un grado determinato di affidabilità .

Al fine di consentire futuri sviluppi per applicazioni di interesse del C.N.VV.F. si è ritenuto utile fornire una panoramica sullo stato dell' arte relativo ai principali modelli di calcolo e di previsione presenti in letteratura. In essi verranno evidenziati i già introdotti principi di:

- Diluizione [fig.5] ovvero di riduzione delle concentrazioni sul luogo del sinistro attraverso l'immissione di aria richiamata da getti di spray di acqua o vapore ,
- Assorbimento ovvero di trasporto tra la fase gassosa costituita dall'agente abbattendo e la fase liquida , accompagnata da eventuali reazioni chimiche favorevoli

Le difficoltà che si presentano per la comprensione e modellazione dei fenomeni, sono ascrivibili a:

- non perfetta rispondenza fra realtà e modelli semplici adottati , per esempio gas perfetti ;
- accoppiamento dei fenomeni termofluidodinamici con quelli chimici, assolutamente turbolenti, plurifasici con simultaneità dei trasporti di materia energia e quantità di moto, con necessità di ricorso a strumenti matematici avanzati;
- natura "aperta" dei sistemi termodinamici sottointesi
- difficoltà nella valutazione delle variabili legate ai fenomeni atmosferici
- limitatezza della modellazione disponibile dell' azione " il rilascio di aereiforme in atmosfera".

I modelli di dispersione atmosferica (Pasquill, Gilford, etc) consolidati dalla tradizione hanno validità per distanze minime dall'origine del rilascio comunque superiore alle distanze di interesse per la mitigazione, da effettuarsi all'interno del perimetro di stabilimento o ad immediato ridosso dello stesso, qualora le condizioni urbanistiche lo consentano.

Si badi che la più recente normativa italiana cogente ha riconosciuto la validità del principio di mitigazione attraverso la protezione con barriere idriche . – D.M. 20 ottobre 1998 " Criteri di analisi e valutazione dei rapporti di sicurezza relativi ai depositi di liquidi facilmente infiammabili e tossici", punto 4.5.3 " Ventilazione, diluizione e mitigazione della dispersione (per le unità di travaso) " : " [...] se per la riduzione delle sostanze di interesse in caso di perdite o diminuzione delle concentrazioni, sono installati sistemi a barriere/cortine di acqua o vapore con altezza almeno pari all' unità da proteggere e realizzate con portate non inferiori a 30 litri/minuto per metro lineare di barriera, può essere adottato uno dei seguenti fattori " (segue declaratoria dei valori dei fattori di mitigazione in funzione dei sistemi di rilevazione).

L'approccio del tipo *Diluizione* che è stato oggetto del maggior numero di formulazioni e verifiche è stato di tipo fisico, indifferente alla natura chimica dell'agente disperdendo. Non mancano modellazioni in cui l'interazione chimica tra agenti dispersori e disperdendi assume ruolo preminente.

2.1 Barriere al Vapor d' acqua – Metodo di calcolo

Il metodo di seguito descritto rientra nella categoria dei modelli semplificati di calcolo di una Barriera al Vapore, e consente pertanto una stima della portata di vapore necessaria in particolare alla *diluizione* del gas pericoloso al di sotto del proprio Limite Inferiore di Infiammabilità LFL.

Il metodo si avvale delle seguenti principali ipotesi semplificatrici:

- si considera l' equazione di conservazione della Quantità di Moto (QdM) tra il getto di vapore, il richiamo di aria ambiente ed il gas pericoloso;
- si ipotizza una distribuzione radiale di concentrazione;
- si suppone che la portata di aria in asse del getto di vapore sia pari al doppio della portata di aria ai lati;
- si suppone che la velocità (media) di uscita del getto di vapore sia all' incirca sonica;
- si suppone che la velocità del vento sia pari alla velocità della nube del rilascio pericoloso;
- si suppone che il gas pericoloso all' ingresso della Barriera al Vapore sia puro al 100 % e venga rilasciato in modo continuo.

Il modello consente una stima dei seguenti parametri significativi:

- 1- portata di aria necessaria per diluire la nube del gas rilasciato ad una concentrazione inferiore al corrispettivo LFL, entro determinati limiti di velocità del vento;
 - 2-la portata di vapor d' acqua per richiamare l' aria circostante sufficiente alla cattura ed alla diluizione del gas pericoloso;
 - 3-una serie di indicazioni progettuali relative al dimensionamento di massima della Barriera al Vapore, quali ad esempio il numero e la spaziatura di ugelli erogatori o la lunghezza della Barriera stessa.
- Sono richiesti taluni dati di ingresso, relativi sia al rilascio di gas pericoloso (portata, angolo di diffusione ...) che alla Barriera al Vapore (portata vapore per ugello erogatore, distanza di installazione della Barriera al Vapore rispetto al rilascio pericoloso ...).

Tra gli elementi del modello maggiormente limitanti possono ricordarsi l' utilizzo della *sola* equazione conservazione QdM e la limitazione della velocità del vento a 2 metri al secondo.

Se ne deduce, per contro, sia l'importanza degli scambi energetici complessivi tra i fluidi in gioco che l'influenza perniciosa di condizioni atmosferiche avverse, in termini soprattutto di stabilità e velocità del vento. Non è contemplato il ricorso a trasformazioni chimiche tra i fluidi.

Si introducono le grandezze:

S = portata in massa di vapor d'acqua, **Steam**, in kg/s.

G = portata in massa di rilascio di gas pericoloso, **Gas**, in kg/s.

A = portata in massa di aria per la diluizione, **Air**, in kg/s.

Il modello si descrive simbolicamente come:

IN = { S }; OUT = { A, G }.

A seguito delle ipotesi semplificatrici prima descritte, l'equazione di conservazione della QdM si traduce in:

$$S * u_S = 2 * (A * u_A) + G * u_G$$

ove i termini di velocità (media) u rappresentano:

u_S = velocità uscita getto vapore = 340 = circa 400 m/s.

u_A = velocità richiamo aria ambiente = u_V = velocità vento.

u_G = velocità rilascio gas pericoloso = u_V = velocità vento.

u_V = velocità vento (limite massimo) = 2 m/s.

$$S = \frac{2 * (A * u_A) + G * u_G}{u_S} = \frac{2 * (A * 2) + G * 2}{400} = \frac{2A + G}{200}$$

L'espressione può convenientemente essere interpretata anche come la portata di vapore (S) per richiamare l'aria sufficiente alla cattura ($A = 0$) ed alla diluizione ($A > 0$) del rilascio pericoloso (G), sotto le ipotesi semplificatrici assunte. [fig. 6]

Alcune considerazioni merita il parametro A , il quale influenza l'abbassamento delle concentrazioni sotto il Limite Inferiore di Infiammabilità LFL del rilascio di gas pericoloso.

Definite x_G e x_A come frazioni molari dell'aria e del gas, risulta:

$$x_A = [(1 - LFL)/LFL] * x_G$$

Introducendo i parametri:

ρ = densità, in kg/m^3 ,

q = portata in volume, in m^3/s .

g = portata in massa, in kg/s.

PM = peso molare.

Si deduce, riferendosi all'unità di tempo:

$$x = g/PM = \rho * q/PM, \text{ da cui:}$$

$$g_A/PM_A = [(1-LFL)/LFL] * (g_G/PM_G)$$

Pertanto:

$$g_A = \left(\frac{1-LFL}{LFL} \right) * g_G * \left(\frac{PM_A}{PM_G} \right).$$

Con la semplice posizioni: $g_A \equiv A$, $g_G \equiv G$, si ottiene

$$A = \left(\frac{1-LFL}{LFL} \right) * G * \left(\frac{PM_A}{PM_G} \right).$$

Quest'ultima espressione mette in relazione la portata in massa di aria (A) con la portata in massa di gas pericoloso (G) ed il LFL dello stesso gas, tenuto conto del rapporto dei rispettivi pesi molari (PM).

Nota la sostanza pericolosa (PM_G), noto il relativo indice di pericolosità (LFL), nota la entità del rilascio pericoloso (G), si ricava la portata d'aria per la diluizione (A) conoscendo la composizione elementare della stessa (PM_A).

Riepilogando:

<u>Dati & ipotesi</u>	<u>Risultati</u>
- Rilascio continuo gas pericoloso G [kg/s]	- Portata aria A [kg/s].
- Angolo piano diffusione nube rilascio α [°].	- Portata vapore S [kg/s] e suo valore specifico- S' [kg/(m*s)] : $S' = S/L$.
- Diametro fori erogatori Barriera al Vapore f [mm]	- Lunghezza Barriera al Vapore L [m] : $L = 2*d*\tan(\alpha/2)$.
- Portata vapore per ugello S_1 [kg/s].	- Numero ugelli Barriera al Vapore n : $n = S'/S_1$.
- Distanza installazione Barriera al Vapore dalla sorgente rilascio d [m].	- Spaziatura ugelli D [m] : $D = 1/n$.

2.2 Barriere ad Acqua – approcci di tipo fisico

Tali tipi di approcci sono in genere conservativi: l'ignoranza di tutti i fenomeni di assorbimento tossico/infiammabile (ATI nel seguito) è per contro economicamente sacrificale, perché anche laddove esistono, non vengono portati in conto i benefici del passaggio in soluzione dell'ATI. Ciò consente tuttavia una trattazione unitaria, laddove considerazioni più strettamente chimiche porterebbero ad una contemplazione dell'efficacia delle barriere relativamente alle singole sostanze.

Ragionando in termini di operazioni elementari, contemplando il trasporto che può verificarsi tra la fase aereiforme costituita dalla miscela di aria – ATI e la fase liquida, costituita dalle gocce d'acqua può verificarsi arricchimento delle fase aereiforme di vapor d'acqua per evaporazione della stessa, o quale trasporto di massa, a causa di un gradiente concentrazione. A tal fine occorrerebbe contemplare il contenuto proprio di vapor d'acqua dell'atmosfera al momento del rilascio. Tuttavia la celerità dei fenomeni sembra escludere nella maggior parte dei modelli² la trattazione dell'influenza della dell'umidità relativa/assoluta dell'atmosfera e della fase disperdendenda.

Fenomeni realmente occorrenti, ma trascurati sono anche:

- l'evaporazione della fase liquida nella fase gassosa da considerarsi totalmente pura
- la umidificazione della fase gassosa ad opera di una fase liquida totalmente pura,

Il dettaglio di tali fenomeni è trattato in particolari sviluppi di modellazioni CFD (metodo dei volumi finiti con approccio misto lagrangiano – euleriano), che esulano dalla nostra trattazione

Il problema è quindi ricondotto in termini di solo trasporto effettuato per scambio di quantità di moto (momentum) perso dalla fase liquida (o vapore) e acquisito dalla fase aereiforme. Così formulato il fondamento della teoria non esclude a priori l'utilizzo di fluidi diversi dall'acqua, e, con asserzione che può risultare disarmante, rende lecito l'interrogativo in merito all'impiego di barriere di aria. In margine a tale considerazione si dà notizia che esperimenti simili sono stati effettivamente condotti [bibliogr 5].

Giova comunque fugare ogni dubbio in merito ad ogni possibile riconduzione della realtà di getto bifase a schemi semplificati di getti sommersi, ovvero la fase liquida dello spray, seppur finemente nebulizzate, non può essere assimilata ad un aereiforme, con caratteristiche "equivalenti", laddove l'equivalenza ipotizzabile è quella tra un aereiforme virtuale, integralmente gassoso e quindi monofasico e il reale miscuglio delle gocce d'acqua e dell'aria trascinata. Mutuando da Bona/Sordelli (bibliogr. 1) l'equivalenza tra un aerosol contenente fasi disperse generiche liquide e solide, di frazione volumetrica complessiva χ e un agente integralmente aereiforme, si dovrebbe porre:

$$\begin{aligned} \delta_{\text{equiv}} &= (1 - \chi) * \delta_{\text{gassoso}} + \chi * \delta_{\text{sosp.}} && \text{Densità equivalente} \\ \delta_{\text{equiv}} * v_{\text{equiv}} &= (1 - \chi) * \delta_{\text{gass.}} * v_{\text{gass.}} + \chi * \delta_{\text{sosp.}} * v_{\text{sosp.}} && \text{Portata equivalente} \\ \delta_{\text{equiv}} * v_{\text{equiv}}^2 &= (1 - \chi) * \delta_{\text{gass.}} * v_{\text{gass.}}^2 + \chi * \delta_{\text{sosp.}} * v_{\text{sosp.}}^2 && \text{Quantità di moto equivalente} \end{aligned}$$

Le tre equazioni non ammettono soluzione univoca, alias non esistono valori di densità δ_{equiv} e velocità v_{equiv} che soddisfino contemporaneamente le tre equazioni. Normalmente l'operazione di omogeneizzazione, ancorché lecita, risulta possibile assumendo che il flusso reale e quello equivalente abbiano stessa velocità: in tal caso l'assunzione $v_{\text{gass}} = v_{\text{sosp.}}$ L'uguaglianza delle velocità tra fasi diverse è stata peraltro assunta da alcuni studiosi come ipotesi per quanto concerne il moto delle masse d'aria immediatamente a ridosso delle aperture degli ugelli. Qualora fosse possibile determinare una equivalenza delle densità sarebbe altresì disponibile una trattazione dei fenomeni in termini di fluido dinamica classica, ovvero di studio di moti di fluidi monofase, che seppur in forma computazionalmente onerosa possono essere integralmente compiuti. *L'assunzione dell'ipotesi di pari velocità risulta ovviamente limitativa nella trattazione di un fenomeno regolato proprio dallo scambio delle quantità di moto.*

Successivamente si darà notizia dell'esistenza di un unico modello (Moore e Rees), che si avvale di tale ipotesi

2.2.1 Modello semi empirico di K. Moodie

Fra i modelli indifferenti dal punto di vista termico e chimico, il modello di K. Moodie si basa sulla quantificazione del fenomeno dell'entrainment (richiamo d'aria) in considerazione dei parametri atmosferici e delle caratteristiche idrauliche degli erogatori. Il carattere parzialmente empirico è dovuto al riscontro effettuato attraverso prove sperimentali dell'efficacia, definita come Cr , rapporto tra la concentrazione a monte e a valle della barriera, in funzione delle caratteristiche idrauliche dei getti costituenti la barriera.

Nucleo del modello è quindi la rappresentazione, attraverso abachi, della relazione:

$Cr = Cr(Mn)$ Mn è il momentum (quantità di moto) specifico, per metro di lunghezza della barriera, che i getti costituenti riescono ad imporre

La grandezza Mn è anche definita come:

$Mn = M_o / P$ (*) M_o = momento all'ugello; P = pressione di erogazione

Mn è anche correlato alla grandezza F_n , numero di flusso, tipica dello specifico ugello, definita come $F_n = Q / \sqrt{P}$; (Q = portata Tale numero è usualmente definito nella tradizione tecnica, sia per i componenti che per gli impianti idraulici, nella forma $Q = K \sqrt{P}$).

² eccezione: modelli PSI, vedi modello di Fthenaky

attraverso la seguente :

$$Mn = K_1 * Fn$$

K_1 = coefficiente caratteristico del tipo di ugello

$Mn = Q.d.M.$ totale, (spray + aria di entrainment) erogabile dal singolo ugello.

Le trattazioni di Moodie obbligano ad interpretare Mn come Mn quale momentum bifasico aria-spray indotto ad una certa distanza dal momentum motore M_o , ovvero dalla quantità di moto disponibile all'ugello, dovuto alla sola fase liquida. Moodie asserisce di K_1 quale caratteristica fornita dal produttore degli ugelli : tale dato per contro è per contro assente in contesto nazionale , nella documentazioni commerciali relativi agli erogatori.

Heskestad, Kung e Todtenkopf (bibliogr.3), nell'ambito di una trattazione più complessa definiscono in maniera analoga il Momentum Coefficient C_m , come:

$$C_m = \rho_w * Q_w * U_p * (x_s) / [\rho_w * Q_w^2 / (\pi * D^2 / 4)]$$

$U_p(x_s)$ = velocità iniziale delle gocce nella sezione x_s ,
origine virtuale puntiforme del getto

D = diametro dell'ugello

Q_w = portata di acqua all'ugello

ρ_w = densità dell'acqua

Il metodo si applica quindi secondo i seguenti step:

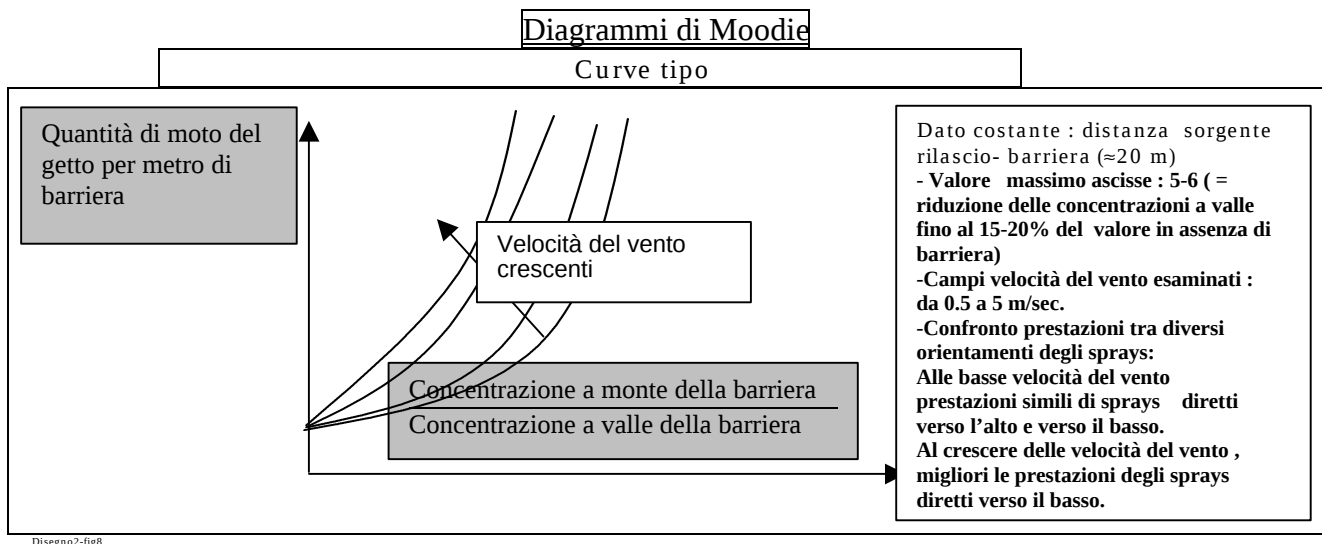
- determinazione della concentrazione in assenza di barriera ad una certa distanza
- imposizione del valore di progetto di determinata concentrazione a valle della barriera , es.: limite inferiore di infiammabilità nel caso di agente infiammabile . Risulta quindi definito il parametro Cr
- in corrispondenza al fissato parametro Cr , i diagrammi di Moodie forniscono il momentum M , quantità di moto specifica, necessaria a garantire la richiesta efficacia Cr
- noto M , si richiede la scelta di ugello di determinata caratteristica K_1
- risultano mutuamente vincolati, a causa della scelta dell'ugello operata al punto precedente
 - il numero di flusso $Fn = Mn/K_1$,
 - la pressione di alimentazione P (memento $Fn == Q / \sqrt{P}$) e il momento richiesto al singolo ugello M_o (memento $Mn = M_o / P$)
- la spaziatura tra gli ugelli risulta completamente determinata dal rapporto $D = M_o / M$
- la alimentazione idrica necessaria a garantire il necessario momentum è anche essa compiutamente determinata dalla scelta del parametro Fn

Accantonate le difficoltà di cui alla determinazione di K_1 , il nucleo del metodo è chiaramente costituito dai risultati delle sperimentazioni che consentono le operazioni di cui al punto b):

i diagrammi derivati dalle stesse tengono conto :

- della morfologia di spray (a getto piano, a cono pieno , a ombrello)
- delle condizioni di vento al momento del rilascio,
- dell' orientamento delle barriere verso l'alto o verso il basso

(Si riporta un diagramma tipo simile a quelli presenti in [bibliogr 2],). Il maggior limite riscontrato nel corpus di tale esperienze è la dichiarata rinuncia della contemplazione dell'influenza della variabile - distanza sorgente/ barriera - sull' efficacia CR . Riguardo all'efficienza della barriera, ovvero alla capacità di indurre il moto di una determinata quantità d'aria in virtù del determinato impiego della risorsa idrica , risulta fondamentale la scelta di ugelli capaci delle migliori prestazioni in termini di K_1 , a testimoniare che ai fini del raggiungimento di risultati ottimali è un elevato valore della grandezza quantità di moto che deve essere perseguita, e che un'ingente portata non assicura di per sé i risultati. Sottolineando ancora il carattere sperimentale del lavoro di Moodie, appare ancora necessario evidenziare alcuni motivi di riflessione indotti dal confronto con altre fonti .



I) Il dato – distanza reciproca tra gli sprinkler – come risultante della spaziatura di dato ugello, capace della quantità di moto M_0 , al fine di garantire una quantità di moto specifica per metro di lunghezza di barriera, dovrebbe essere validato da osservazioni sul campo, volte verificare l'additività della grandezza q.d.m. stessa, poiché secondo altri [bibliogr.] componenti delle quantità di moto efficaci sono quelle verticali, essendo riscontrato che nelle zone di confine le particelle animate di velocità sub-orizzontale provenienti da due getti adiacenti annullano mutuamente le proprie q.d.m. con perdita efficacia globale.

II) Ribadendo il concetto che il principio di funzionamento delle barriera consiste nel trasferimento di momentum dallo spray all'aria, potrebbero risultare leciti gli interrogativi circa i valori di CR – efficacia – in occasione di rilasci di aereiformi con densità notevolmente difforme da quella della anidride carbonica, sostanza che per economicità, atossicità e ininfiammabilità è stata usata per le prove sperimentali.

2.2.2. Modellazioni alle differenze finite dell'interazione tra spray e masse gassose

Si forniscono cenni di indirizzo su le tecniche di termofluidodinamica computazionale, che ponendosi comunque alla frontiera dello Stato dell'Arte, sono disponibili per la modellazione degli spray con il ricorso al metodo delle differenze finite. Risulteranno comunque evidenti i caratteri specialistici del metodo, vuoi per l'ingente onere computazionale, vuoi per la confidenza con la materia per la scelta degli opportuni parametri di input.

Dopo aver discretizzato la regione di indagine in celle elementari, si procede come segue:

i) si determina il campo delle velocità della sola fase aereiforme costituita dalla miscela di aria atmosferica e di ATI sotto l'effetto del campo di pressioni;

ii) si determinano le traiettorie delle particelle sulla base del campo delle velocità imposte al punto precedente

iii) si valuta l'effetto delle singole particelle liquide nelle singole celle quali sorgenti o assorbitori di massa – quantità di moto – energia all'interno delle singole celle

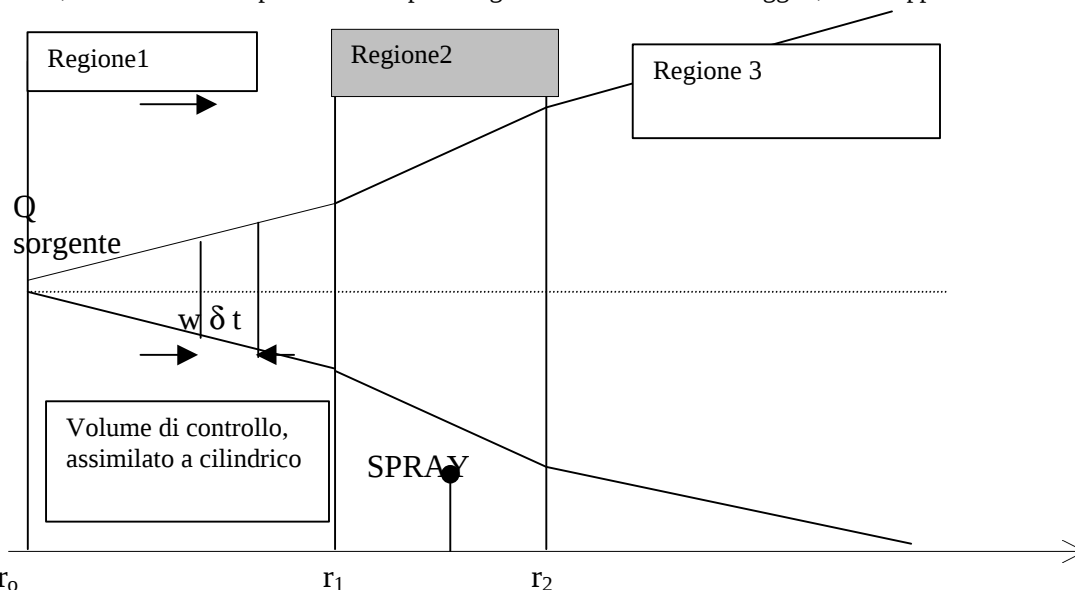
iv) si ridetermina il campo totale delle velocità sulla base delle risultanze di cui al punto precedente

L'obiettivo della convergenza tra i campi delle velocità di cui ai punti i) e iv) impone la reiterazione della sequenza di cui sopra fino al soddisfacimento di una sostanziale contiguità nei valori. Al termine delle operazioni di ogni ciclo vengono all'interno di ogni cella modificati i contributi di massa-quantità di moto-energia delle gocce

Con le operazioni di cui al punto iii) si contemplano quegli aspetti totalmente assenti nel procedimento di Moodie connessi agli scambi di energia tra le gocce d'acqua degli spray e l'aria: tra esse ed la fase aereiforme il calore viene scambiato per convezione. Il gas cede/assorbe calore alle gocce, per convezione. Il calo/aumento di temperatura nel gas ne modifica la densità, quindi il moto, e di conseguenza il calore successivamente scambiato con le particelle. Mutano in conseguenza anche le traiettorie.

2.2.3 Modello semplificato di Moore e Rees

Si descrive una modellazione molto semplice del richiamo d'aria effettuata presso i laboratori BP International Ltd. [bibliogr. 5]. In esso sono definite tre regioni spaziali di diffusione. Nelle regioni I e III la diluizione della nube è naturale per effetto del vento, caratterizzato dalla velocità W , nella II la diluizione è provocata sia dal vento, considerato agente come nelle altre regioni spaziali sia dalla miscelazione della nube con l'aria di entrainment. I ridotti passaggi analitici riconducono il decadere della concentrazione per effetto della quantità costante di gas contenuta nel cilindro di controllo, volume che si espande nel tempo in ragione dell'aumento del raggio, come appresso descritto.



L'equazione fondamentale del richiamo d'aria, tipico delle regioni I e III è mutuata da Bosanquet,

$d(\delta V) / dt = c S u$ (*) δV = vol. elementare che presenta una superficie S all'azione del vento
 c = costante
 u = opportuna velocità

L'effetto dello spray sul volume di controllo è computato modificando la precedente come segue:

$d(\delta V) / dt = c S u + c_s S v_a$ (**) c_s = valore modificato di c , valido nella regione II
 v_a = velocità di entrainment

Le equazioni precedenti danno origine a modellazioni dei fenomeni formulate successivamente, ognuna caratterizzata da ipotesi più o meno restrittive/semplificative. Si illustra con maggior dettaglio il modello elementare e nel seguito si darà notizia delle versioni più avanzate riportate nel relativo articolo in bibliografia.

Ipotesi:

- i) Il volume di controllo ha velocità di traslazione orizzontale, identica a quella del vento w ,
- ii) l'entrainment avviene solo all'interno della regione II, con velocità verticale v_a
- iii) la velocità u nelle formule (*) e (**) è posta pari a w

Nel tempo δt la sorgente emette la quantità $Q \delta t$, contenuta alla distanza x in un volume

$$\delta V = \pi r^2 w \delta t,$$

Si può ipotizzare che la sorgente, alla quale la concentrazione dell'agente rilasciato sia unitaria, sia caratterizzata come il volume di controllo stesso, con opportuno valore del raggio (ridotto) r_0 , e che quindi la conservazione della massa rilasciata sia esprimibile, in funzione dei volumi e delle concentrazioni, come:

$$Q \delta t = 1 * \pi r_0^2 w \delta t = C \pi r^2 w \delta t$$

Assunta la superficie di scambio S come il mantello cilindrico di altezza $w \delta t$,

$S = 2 \pi r w \delta t$, e, applicando l'ipotesi già menzionata della assunzione $u = w$, la (*) diventa

$$d(\delta V) / dt = c * 2 \pi * w \delta t * w,$$

l'osservazione di $w = dx / dt$ permette di formulare, quale legge di variazione del raggio, la semplice:

$dr/dx = c$, immediatamente integrabile come $r = r_0 + cx$, con valore al limite della regione I, $r_1 = r_0 + c x_1$.

Nella regione II, con analogo ragionamento, assumendo anche il contributo dello spray, e operando come sopra, avvalendosi quindi della (**) anziché della (*), si ottiene:

$$r = r_1 + [c + c_s (v_a/w)] * (x - x_1), \text{ ovvero al limite della regione, } (x = x_2) \\ r_2 = r_0 + c x_2 + (c_s v_a/w) * D, \text{ con } D = x_2 - x_1$$

Nella regione III il contributo dello spray è considerabile costante, e la legge di variazione del raggio è esprimibile come:

$$r = r_0 + c x + (c_s v_a/w) * D.$$

L'efficacia della barriera è a questo punto esprimibile, in ogni piano x caratterizzato dal proprio valore di raggio, sottovento alla barriera come:

$Eff. = \text{Concentrazione in assenza di spray} / \text{Concentrazione in presenza di spray}$
 E, stante la costanza della quantità Q ,

Dalla generale $C = Q/V$

$$\text{Efficacia} = \frac{\text{Volume di controllo in presenza di spray}}{\text{Volume di controllo in assenza di spray}}$$

Poiché i volumi in oggetto dipendono solo dai raggi, note le leggi di variazioni degli stessi, risulta

$$\text{Efficacia} = [1 + (c_s v_a D / w (r_0 + cx))]^2$$

Con r_0 generalmente trascurabile rispetto a cx , risultando la precedente ulteriormente semplificabile.

Ulteriori evoluzioni del modello danno luogo ad altre due formulazioni:

- a) la contemplazione di una velocità verticale v acquisita dal volume di controllo che transita nella regione II fa sì che nella regione III il volume stesso si sposti quivi con velocità *n.b. da composizione vettoriale* $\sqrt{(v^2 + w^2)}$, riducendosi ulteriormente la concentrazione non solo perché il volume di controllo aumenta di raggio, ma anche perché interessa strati superiori della atmosfera.

- b) opportuna formulazione è data per nube osservata in volume di controllo parallelepipedo di altezza h estensione nella direzione del moto L e profondità indefinita, sottoposta all'azione di una barriera di lunghezza indefinita agente verso l'alto: sono ovviamente ignorati gli effetti di bordo nella direzione indefinita e si assume che il volume di controllo modifichi solo la sua altezza h per effetto dello spray.

Si omettono le formulazioni dell'efficacia per questi due modelli, in quanto come per il più semplice non sono possibili considerazioni critiche, causa soprattutto la ignoranza dei parametri c e c_s : si giudica altresì interessante notare come tutta questa famiglia di modelli sottointenda la indifferenza ai fenomeni di scambio delle quantità di moto, ovvero alle differenze di densità tra l'aria, l'agente disperdendo, la nube d'acqua e le reciproche miscele. A tal fine gli autori giustificano il proprio operato asserendo di massime differenze di densità tra le fasi aereiformi dentro e oltre la barriera del 5%.

Nonostante le drastiche ipotesi semplificative, le formulazioni anzi riportate sono state suffragate da campagne sperimentali di cui nell'articolo di bibliografia si dà conto. Si osserva che le stesse sono state eseguite anche con agenti effettivamente infiammabili (butano e propano, quest'ultimo studiandone il rilascio da pozza liquida in evaporazione) e con diversi valori della distanza tra sorgente e barriera.

2.2.4 Modello di McQuaid

Anche questo modello si avvale fortemente di deduzioni sperimentali, e, secondo l'autore consiste in una teorizzazione desunta da dati sperimentali [bibliogr. 6], conseguiti in esperienze campali e che, secondo l'autore, di analoghe ricerche volte a studiare la ventilazione in ambito minerario attraverso il principio del richiamo d'aria eseguito con l'utilizzo di getti d'acqua.

Le osservazioni sperimentali hanno portato alla definizione di una relazione, diagrammata, [fig 9] tra le seguenti grandezze, relative a spray conici

Q_a	Portata d'aria richiamata dallo spray nello spazio compreso tra l'ugello erogatore e il piano in cui si vuole abbattere la concentrazione al disotto di un valore prestabilito, es.: il LFL per un infiammabile
Q_w	Portata d'acqua al complesso degli erogatori
ρ_w	Densità dell'acqua
F	numero caratteristico del regime di erogazione $= Q_w / \sqrt{P}$
D	Diametro del cono spray alla quota di intercettazione della nube abbattenda

La figura esprime la relazione tra le grandezze (Q_a / Q_w) e $(\rho_w^2 * F / D^2)$ (*)

Si consideri come, fissata la concentrazione in assenza di barriera da un qualsiasi modello di dispersione (la teoria di McQuaid, come le altre, è indifferente a riguardo), Q_a diventi un dato di progetto, fissato il livello di concentrazione residua, la barriera operante.

McQuaid assume come secondo elemento di progetto la pressione netta di alimentazione idrica, ovvero la pressione disponibile agli ugelli, detratte le perdite di carico sul complesso di alimentazione: tale grandezza è anche essa matematicamente vincolata dalla (*) in quanto contribuisce a determinare il valore di F . Considerazioni sperimentali sui valori minimi di velocità di ingresso dell'aria richiamata, assunto che elevate portate d'aria ingenti animate da bassa velocità siano insufficienti per il risultato conseguito, portano a vincolare la pressione di alimentazione.

Infatti, riscontrato sperimentalmente (e riportato senza altro commento) il valore di 6 m/sec. per la velocità dell'aria quale valore minimo efficace, dalla definizione di portata Q_a sulla sezione ove il cono spray ha larghezza D :

$D^2 = 4 Q_a / \pi V$ (**). Invertendo quest'ultima (**), e moltiplicando i termini per F , risulta

$F/D^2 = [\pi V / 4 \sqrt{P}] * [Q_w / Q_a]$, esprimibile anche come:

$[Q_w / Q_a] = A * [F/D^2]^{-1}$ (con A ovviamente uguale a $[\pi V / 4 \sqrt{P}]$)

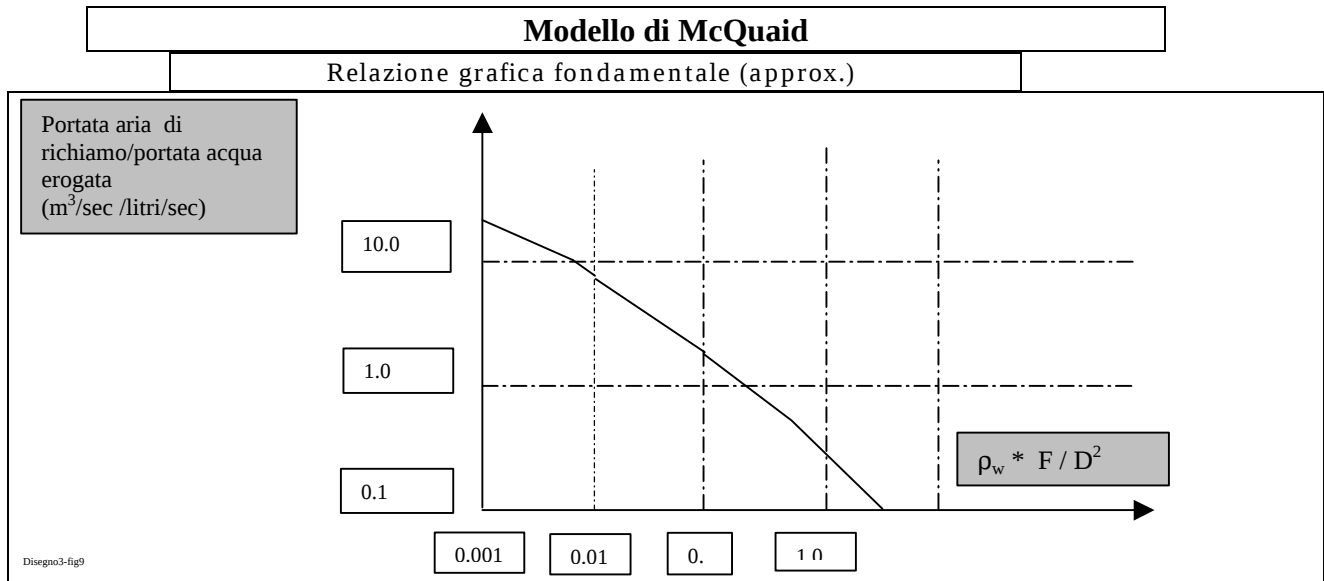
Con ciò si è stabilita una relazione tra:

- rapporto fra le portate di acqua e di aria richiamata,
- caratteristiche dell'alimentazione idraulica.

Tale formulazione è proposta da McQuaid per una proposta di iter progettuale che prevede i seguenti passi:

- determinazione del parametro A sulla base di un valore minimo di velocità dell'aria e della pressione di alimentazione disponibile
- determinazione del valore del rapporto Q_a / Q_w sulla base dell'abaco presentato in figura 9
- noto dal punto precedente il valore Q_w , (memento che Q_a è un dato di progetto), risulta obbligato il valore di F , ovvero un vincolo al tipo di ugello da impiegarsi.
- Dai dati valori numerici imposti per V e Q_a è imposto il valore D , diametro del cono di spray generato dall'ombrello, ovvero, unitamente a quanto già stabilito per il tipo erogatore per quanto detto in III), è

completamente determinato il tipo di ugello come caratterizzato da determinato valore di F e di caratteristiche tali da generare un cono che abbia una sezione di diametro D .



Relativamente al numero degli ugelli, secondo McQuaid il valore della portata d'acqua Q_a che contribuisce a determinare il valore di $F = Q_a / \sqrt{P}$ può intendersi quale grandezza additiva, nel senso che tale portata di calcolo può computarsi come somma di più ugelli, tutti soggetti alla stessa pressione P .

A commento del modello esposto, si rileva la assenza di ogni considerazione sugli effetti del vento atmosferico sull'efficacia delle barriere. Sulla base della documentazione relativa reperita non risulta agli scriventi alcun dato utile ad a motivare ed interpretare la determinazione del valore minimo di velocità di entrainment in 6 metri al secondo. Si ipotizza che, stante la causa prima dell'azione di entrainment nello scambio di quantità di moto tra lo spray, l'aria circostante e la nube disperdenda, tale valore vada calibrato sulle densità di tali tre attori del fenomeno.

2.2.5 Modellazioni e studi condotti presso Von Karman Institute

Presso il citato importante istituto di ricerca belga sono in corso da più di due decenni studi e ricerche sull'utilizzo delle barriere idriche, sia per l'abbattimento dei gas pesanti sia per la protezione dall'irraggiamento termico. Con riferimento al primo aspetto si riportano le potenzialità progettuali del metodo, come esposto per grandi linee in bibliografia [bibliogr. n. 8]

Si evidenziano in particolare :

- la descrizione / interpretazione dei fenomeni
- la approfondita discussione dell'influenza dei parametri idraulici che caratterizzano i getti, e le considerazioni conseguenti in merito alla ottimizzazione ai fini progettuali.

Occorre precisare che gli studi appresso descritti *riguardano solo barriere costituite dalla successione di spray singoli, opportunamente distanziati, e non da cortine continue ("lame" di acqua)*

L'approccio è differenziato per i getti diretti verso il basso e per i getti diretti verso il basso.

E' data notizia di un apposito software per il calcolo delle barriere, sviluppato presso il VKI stesso che consente la calcolazione delle riduzioni di concentrazione.

Tale calcolazione è relata al seguente sistema di equazioni differenziali ordinarie :

- I) equazione delle quantità di moto applicata al liquido e ai flussi d'aria
- II) equazione del moto della singola goccia
- III) equazione di continuità delle portate d'aria richiamate
- IV) equazione della superficie di inviluppo dello spray.

Input

- i) il flusso Q_w di acqua e la pressione di alimentazione ΔP_n all'ugello
- ii) la semiampiezza θ_0 del getto e il diametro d_0 dell'ugello
- iii) il diametro della goccia D_d , da assumersi costante (consigliato il valore $D_d = C * (D^{2/3} / \Delta P^{1/3})$ con C costante³

Output

- I) campi delle velocità del liquido
- II) campi delle velocità del gas e dell'aria all'interno della zona irrogata dagli sprays
- III) campo delle velocità dell'aria esternamente allo spray,

³ Stessa formulazione di manualistica NFPA

L'ultimo dato è quello di principale interesse : note le velocità d'aria esternamente allo spray è infatti possibile risalire alle portate di aria di richiamo (entrainment) e conseguentemente alla riduzione della concentrazione di agente infiammabile in prossimità della barriera.

L'autore , J.M. Buchlin ragionando in termini di efficienza rispetto alle potenze in gioco , definendo come rapporto di efficienza il rapporto tra le potenze idrauliche del flusso d'aria richiamata e del flusso d'acqua degli ugelli , ovvero in termini di :

$$\varepsilon = 10^3 [(\rho_a * V_g / 2) * Q_a] / [\Delta P_n * Q_w]$$

ρ = densità

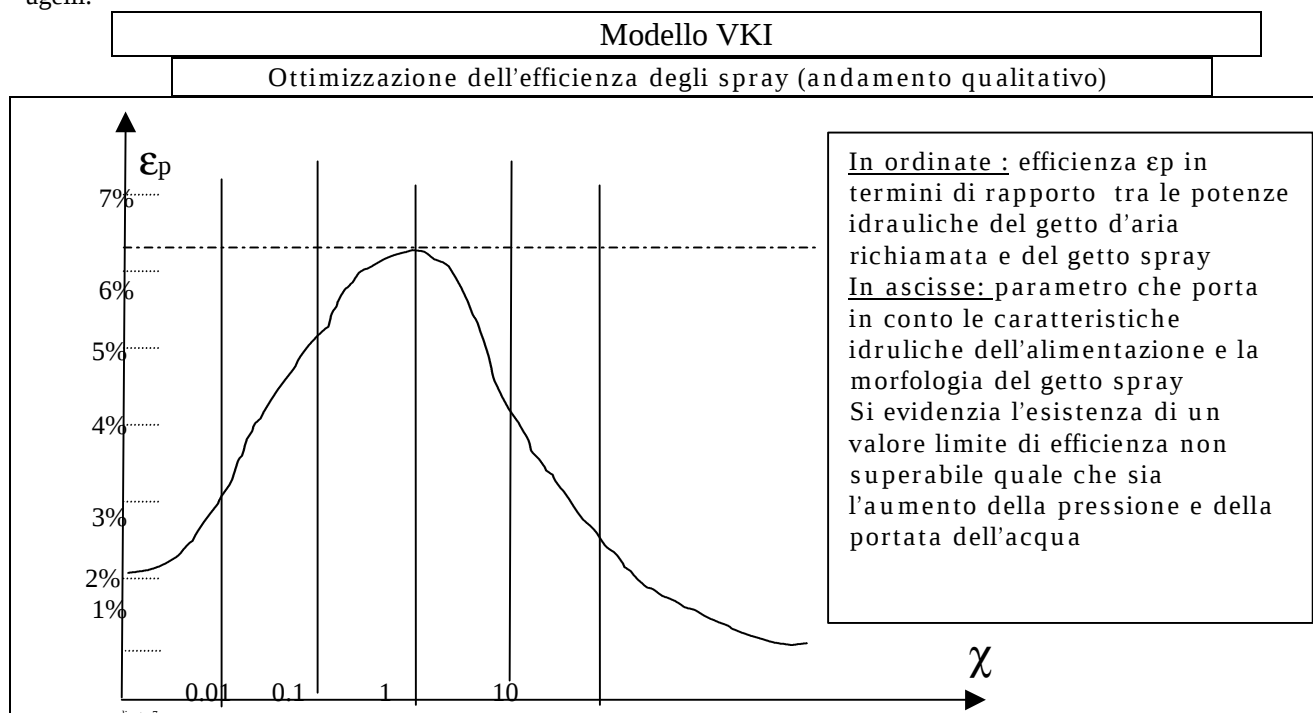
pedice a = aria

pedice w = acqua

Q_w = portata acqua [l/sec]

Q_a = portata d'aria [m³/sec]

Si riporta un significativo diagramma in cui si evidenzia come tale rapporto abbia un valore massimo di circa 7% ^{4,5}. E' rimarcato come una progettazione volta solo alla massimizzazione dell'efficienza non conduca alla massimizzazione dell'efficacia ,ovvero al conseguimento dei massimi ε non corrisponde un valore massimale della portata d'aria richiamata, e inoltre tale approccio conduce in genere a sottostimare il diametro da impiegarsi per gli ugelli.



Si illustrano gli aspetti salienti delle trattazioni per i getti diretti verso il basso e verso l'alto.

modelli VKI per getti diretti verso il basso .

Il principio di funzionamento dei getti diretti verso il basso è quello illustrato in figura 11. La porzione spaziale definita dal getto è schematizzata in tre regioni :

- zona a- il getto ha la forma di un profilo di rivoluzione definito da una curva , ovvero scendendo lungo l'asse del getto il diametro dello stesso aumenta con legge $D = D(x)$. In questa zona di variabilità del raggio l'aria richiamata penetra all'interno del getto perpendicolarmente
- zona b – il diametro ha valore costante : il getto è quindi cilindrico e non vi è più richiamo d'aria all'interno dello spray
- zona c – il getto bifasico aria richiamata- acqua penetra all'interno dello strato di nube pesante , di spessore l e concentrazione C per una profondità l^* . La profondità di penetrazione è correlata al numero di Richardson (adimensionale che tiene conto del rapporto tra la gli effetti gravitazionali e inerziali del getto)

Dalla sezione definita dalla quota l^* , il getto subisce una diffusione radiale come se fosse impattante una superficie libera. Conseguentemente la massa del gas sottostante coinvolta viene ad assumere una velocità radiale, (centro

⁴ in ascisse è riportata la grandezza $\chi = 4 [\sqrt{\Delta P_n / \rho_w}] * [D / \sqrt{Q_w}]$, caratterizzante sia l'alimentazione idrica ($[\sqrt{\Delta P_n / \rho_w}] * [1 / \sqrt{Q_w}]$, sia la morfologia del getto (D è il diametro del cono formato dallo spray)

⁵ si evidenzia come altrove l'efficienza sia definita in termini di *portate* di acqua e di aria, mentre qui vi trattasi di *potenze*

coincidente con l'asse del getto) decrescente, con valore nullo con il raggio stesso , fino ad annullarsi. La massa di gas , nella zona a velocità diversa da zero , viene spostata con una componente diretta verso l'atmosfera fino a fuori uscire dalla nube stagnante pronta ad essere dispersa dalla turbolenza atmosferica. Al di là della semplicistica descrizione , che è fondata su teorie dell'urto e riflessione dei getti si evidenziano alcune considerazioni che si rivelano fondamentali in questo tipo di modellazione e progettazione

- 1) un getto ha influenza su un determinato volume d'aria
- 2) la quota di posizionamento degli ugelli determina la profondità di penetrazione dei getti , rilevandosi che :
 - a) a quota parte della massa gassosa immediatamente sovrastante il terreno potrebbe non essere affatto interessata dalle correnti di aria indotte
 - b) è possibile stabilire una correlazione tra efficacia (memento diversità da efficienza) e altezza di collocazione degli ugelli , ovvero esiste una altezza ottimale

Il modello è ulteriormente parzialmente perfezionato tenendo conto in maniera semplificata degli effetti del vento. In termini generali sono imputabili a tale agente :

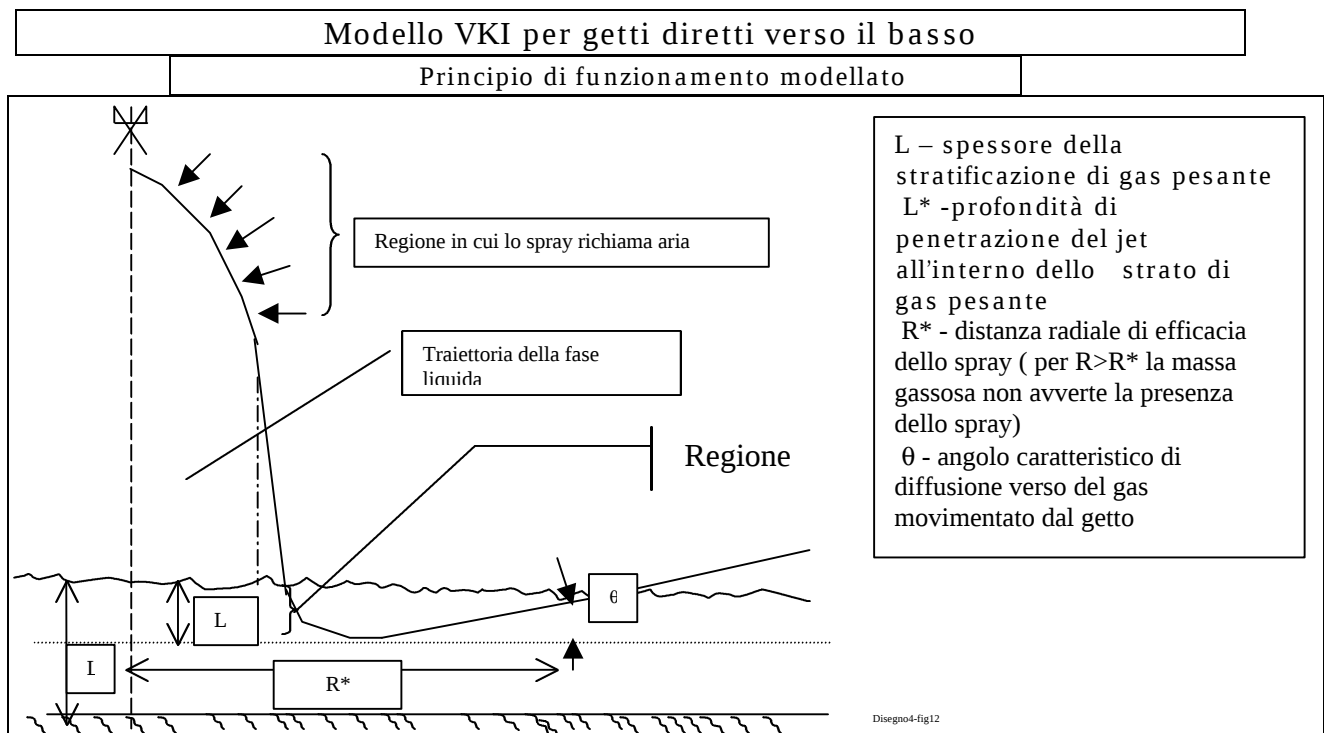
- effetti favorevoli alla efficacia *in ragione della turbolenza ad esso imputabile* (intendi : facilitazione alla dispersione) ;
- effetti sfavorevoli : azione di disturbo del jet (riduttore della sua potenza)

Nella trattazione si assume come ipotesi semplificativa che il vento disturbi l'erogazione delle testine ma che la nube sottostante sia immobile . Importante conclusione è la dichiarazione del fatto che il fenomeno dell'assorbimento di aria da parte del getto è, *oltre determinati valori della velocità del vento , integralmente determinato dal vento stesso e non dallo scambio di quantità di moto tra getto e aria stessa* . Banale , ma non ignorabile conseguenza è il fatto che oltre determinati valori di velocità del vento : *tutto va come se le cortine idriche non esistessero*.

La transizione fra i due regimi, l'uno in cui l'aria è richiamata dal getto e l'altro in cui l'aria è forzata dal vento è dato dalla formula :

$$V_{\text{aria richiamata}} = V_{\text{vento}} * (2/\pi) .$$

(la giustificazione di tale valore si ha in note richiamate in bibliografia dall'autore)



modelli VKI per getti diretti verso l'alto

Con riferimento alla figura 13, in questo modello il getto è considerato come capace di sollevare a determinata quota h' parte della massa di gas pesante accumulato al suolo con concentrazione C .

Alla quota h' il getto ha perso ogni efficacia e parte della miscela aria gas ricade al suolo in basso determinando negli strati superiori della massa gassosa una concentrazione C_1 minore di C , e parte viene dispersa dalla turbolenza atmosferica. In particolare la concentrazione in alla quota di stagnazione del getto è interpretata come proveniente da una sorgente virtuale posta alla quota $h' + h_s$

In tale meccanismo la teorizzazione porta a considerare i valori ottimali dell'angolo di apertura del getto . Tale angolo presenta un valore ottimale di 60° in condizioni di ridotta turbolenza : tuttavia questo valore aumenta fino a $90^\circ - 120^\circ$ all'aumentare della turbolenza (parametro D_t in figura).Premesso che i valori di massa di gas veicolata sono computati dal programma generale che risolve le equazioni differenziali già citate , la concentrazione residua alla quota l, dopo che alla stessa quota ricadono le masse di miscela aria – gas (a concentrazione minore di quella originaria) è data dalla formula :

$$C_1 = [Q_g / 4 \pi * D_t * X] * e^{-U_1 * r / \pi D_t X}$$

D_f parametro di turbolenza

U valore della velocità assiale indotta

x distanza dall'asse

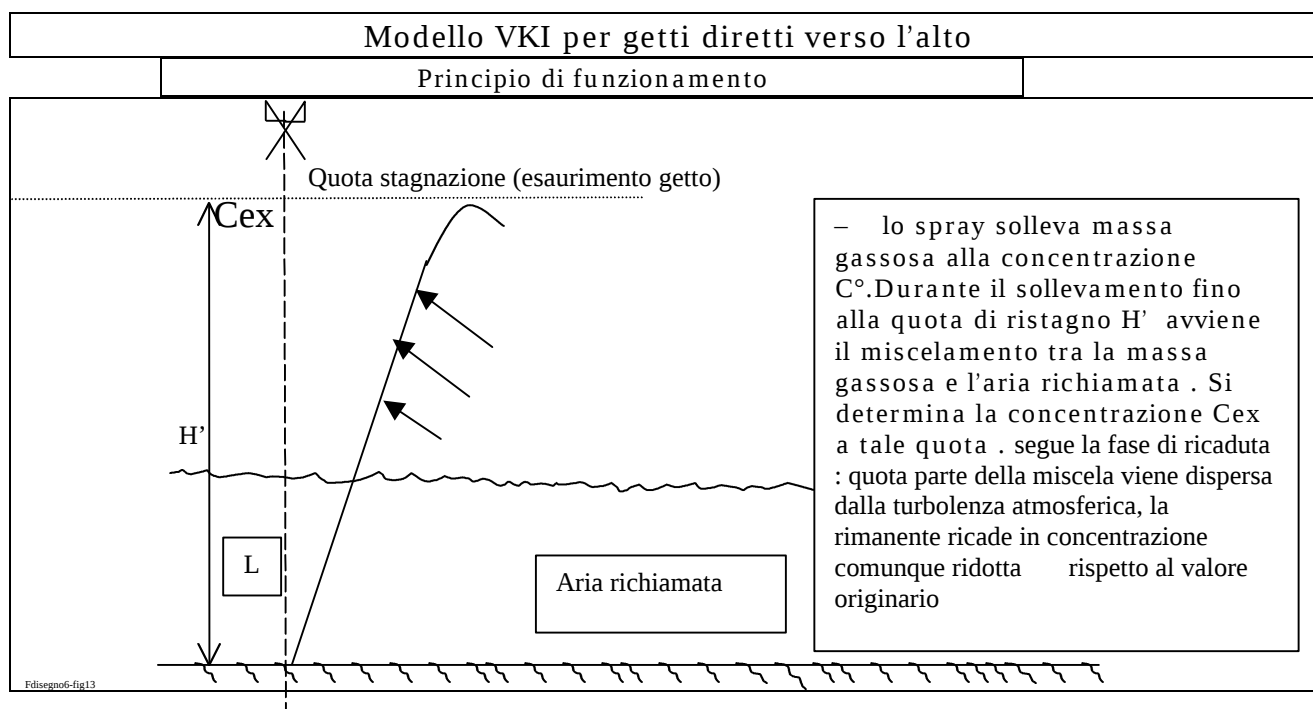
Q_g portata del gas sollevato dal getto

Ribadendo i limiti della presente trattazione, si evidenzia che dalla applicazione dei criteri progettuali evincibili dal modello, è possibile, secondo gli autori:

-ottimizzare il numero degli ugelli in funzione della portata di rilascio ,quantificandone il numero in funzione anche della quota parte del gas che comunque , con barriere realizzate con spray conici verso l'alto , oltrepassa la barriera (memento premesse al presente paragrafo.). Su questo specifico aspetto gli autori richiamano comunque la necessità di ulteriori indagini sperimentali.

- stabilire valori ottimali (similmente a quanto visto per gli spray diretti verso il basso) dell'angolo di apertura dei getti, e conseguentemente la scelta del tipo di ugello.

Anche per la modellazione degli spray diretti verso l'alto sono eseguite considerazioni in merito alla influenza del vento: esso viene ad influenzare l'angolo ottimale di apertura delle teste di erogazione. Viene comunque ribadito che la condizione di ridotta turbolenza atmosferica sia sfavorevole (per il venir meno del contributo favorevole alla dispersione indotto dal vento). In termini generali l'azione del vento sembra essere meno sensibile che nel caso di getti, posti in quota e diretti verso il basso : viene quivi infatti riscontrato che l'azione di detrimento del getto sia particolarmente importante nel punto origine del getto stesso e, con tutta generalità l'azione del vento dovrebbe quindi essere più sensibile in quota (sugli sprinkler alti) che al suolo. A valle di questa considerazione qualitativa espressa dagli autori , si potrebbe auspicare una sperimentazione di barriere costituiti da getti al suolo parzialmente protetti da piccoli muri parzialmente forati o simili (ovvero tali da lasciare arrivare in prossimità degli ugelli dispersori anche gli strati più bassi degli ATI al suolo, riducendo comunque gli effetti del vento) .



2.3 Barriera ad Acqua - approcci di tipo chimico

2.3.1 Programma WATCUR per la stima dell'efficienza di cortine d'acqua nella mitigazione dei rilasci di gas pesante

Il programma in oggetto è stato sviluppato presso l'istituto JRC di Ispra. Le note introduttive al documento in bibliografia [bibliogr. 7] asseriscono di una maggior efficacia dell'applicazione di cortine d'acqua nell'abbattimento della concentrazione di agenti tossici anziché di vapori pesanti di liquidi infiammabili.

Gli autori riportano le esperienze condotte su alcuni specifici agenti tossici.

Il metodo contempla comunque sia le capacità di diluizione che di assorbimento delle barriere idriche.

Il parametro fondamentale che determina l'efficacia delle barriere idriche utilizzata per il contenimento delle fughe di gas tossici è la portata d'acqua addotta. Sono riportate le efficienze di assorbimento dell'acqua per varie sostanze tossiche. Si rammenta la distinzione tra le definizioni codificate nella letteratura :

Efficacia rapporto tra le concentrazioni in assenza e in presenza di barriere

Efficienza rapporto quantità di agente abbattuto/assorbito in relazione alla risorsa idrica impiegato

In linea del tutto generale l'assorbimento è tanto più elevato quanto maggiore è la concentrazione nella nube dispersa.

L'efficienza della cortina è contemplata da una formula convalidata da osservazioni sperimentali:

una delle formule fornite per l'entrainment è la seguente :

$$\ln Y = A + A_1/M_1 + A_2 / \ln M_1 \quad (\diamond)$$

Y efficienza della cortina : [m³ aria di aria richiamata al secondo / litro di acqua erogata al secondo]

A , A₁ , A₂ coefficienti sperimentali

M₁ litri erogati al secondo per metro di barriera

A compreso tra 2 et 2.8 , A₁ prossimo a -0.6 , A₂ pari a circa -0.05.

Senza altro dettaglio viene riferito che, secondo gli autori , tali dati siano funzione del tipo di ugello e della pressione di alimentazione. (i valori precedenti sono riferiti a spray piani, con apertura di 30°, posizionati a 3 metri l'uno dall'altro) Per la concentrazione in aria in assenza di barriera, al fine di agevolare la comprensione del seguito , può banalmente porsi : (atteso che tale valore è calcolato con apposito codice di calcolo)

$C = Mg / (Vg + Va)$, ovvero massa del gas , Mg , su somma dei volumi di gas e aria Vg Va, (in assenza di barriera)

$C = Mg / (Vg + Va + Vca)$, ovvero addizionando l'aria richiamata dalla barriera Vca (in presenza di barriera)

Il volume d'aria Vca è immediatamente desumibile dalla ($\diamond$), fissata la portata d'acqua.

Alias, in fase di progetto, fissata una data efficienza si può dalla stessa desumere la portata d'acqua necessaria .

L'assorbimento viene portato in conto modificando le espressioni di Mg e Vg come segue:

$C = [Mg (1-r)] / [Vg (1-r) + Va + Vca]$, dove r è la frazione di gas assorbita

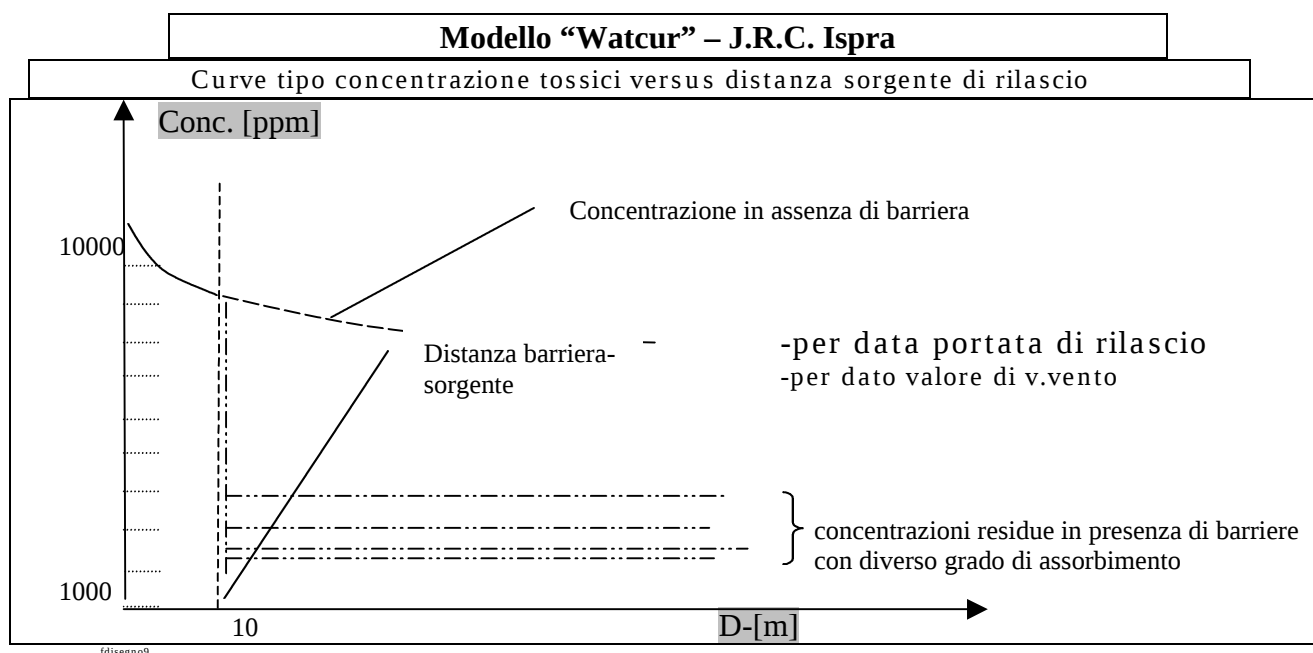
Il parametro r è anche esso funzione del tasso di erogazione idrica e deve essere scelto sulla base di dati sperimentali .

Nella documentazione in bibliografia sono riportati alcuni esempi :

- acido fluoridrico : assorbimento del 90 % per rapporto della massa di acqua erogata su massa di gas dispersa superiore a 40;
- ammoniaca : assorbimento del 80% , nel caso di concentrazioni in aria di ammoniaca superiori al 2%, con rapporto massa d'acqua/massa di gas superiore a 70;
- acido cloridrico in concentrazione in aria superiore al 1% : un rapporto tra massa di acqua erogata su massa di gas disperso superiore a 40 , assicura un assorbimento del 90%

Il programma WATCUR redatto presso JRC-ISPRA contempla due casi di dispersione , l'una con nube traslante con velocità costante sul piano verticale, l'altra con velocità variabile. Costituiscono complesso dell'input:

- il tipo di gas e il suo peso molecolare e temperatura,
- la temperatura ambiente,
- il tasso di rilascio (kg/sec),
- semi ampiezza della nube al rilascio,
- distanza della barriera dal punto di rilascio,



La velocità della nube deve essere specificata secondo parametri prestabiliti (classi VDI delle linea guida VDI “dispersion of emission by accidental releases, safety study , maggio 87 et dicembre 1998).

L’utente viene guidato dal codice di calcolo a fornire gli adeguati valori per i fondamentali parametri di entrainment e di assorbimento.

Il codice di calcolo esegue il controllo sulla densità del gas , in ragione del limitato uso del codice stesso per i gas pesanti. In margine alla descrizione gli autori evidenziano come preponderante per l’efficacia l’assorbimento anziché la diluizione dovuta all’entrainment , in misura tanto più significativa con il crescere delle distanze , consigliando inoltre una collocazione delle barriere quanto più possibile a ridosso degli ipotizzati punto di rilascio, con l’ovvia avvertenza che un posizionamento troppo contiguo può essere totalmente inefficace per un rilascio di tipo jet, ovvero con emissione capace di “perforare la barriera stessa” (getto con momentum sovrachio rispetto a quello della barriera stessa)

2.3.2 Modello di assorbimento secondo Fthenaky

L’assorbimento dei gas tossici per mezzo di spray è stato parzialmente ricondotto dall’autore in termini più generali:

- di solubilità di specie gassose in liquidi con derivazione dalla legge di Henry,
- di trasporto di materia tra zone a diversa concentrazione.

Operativamente è stato utilizzato un modello alle differenze finite – cella PSI – : le equazioni che vengono considerate sono:

Equazioni della fase gas:

- a) conservazione della fase gassosa
- b) conservazione della specie chimica
- c) conservazione della quantità di moto in direzione dell’asse dello spray
- d) conservazione della quantità di moto in direzione ortogonale all’asse
- e) conservazione dell’energia termica

Si omettono ulteriori considerazioni su tali equazioni , rimandando per esse a testi specializzati, evidenziando tuttavia come in [bibliogr. 9] sia presente la formulazione in coordinate cilindriche delle stesse , nonché una definizione delle condizioni al contorno da utilizzarsi in condizioni di spray simmetrico rispetto al suo asse.

Equazioni della fase gocce:

- A) quantità di moto delle gocce
- B) equazioni di trasferimento di massa .

La sintesi appresso riportata non esaurisce il calcolo del reale abbattimento di concentrazione , ma ne descrive i passi principali. In particolare si darà qualche cenno alle peculiarità di tale metodo. [fig.15] Sono tuttavia utili alcune puntualizzazioni dell’autore al tipo di approccio che è possibile utilizzare per la modellazione di un sistema bifasico quale quello costituito dallo spray e dal miscuglio aria –gas tossico.

La fase liquida può essere considerata come mezzo continuo ed essere descritta in termini lagrangiani, o in termini di singole gocce (e conseguentemente ne risulta l’obbligatorietà di un’approccio lagrangiano) .

Possono quindi essere definiti tre livelli di modellazione:

Livello 1 – modellazione monofase

Si è già visto il limite della modellazione semplificata monofase del contesto di interesse (impossibilità di contemplazione di trasferimento di massa e quantità di moto, tanto meno di reazioni chimiche):

Livello 2 –modellazione bifasica , con fluidi omogenei e continui

Successivo livello di trattazione è quello della trattazione quale quello di flusso contemporaneo delle due fasi liquida e gassosa : il limite di questo livello di definizione è relato nella indifferenza della relativa descrizione della fase liquida al diametro delle gocce : il valore del diametro influenza ed è influenzato dal moto del miscuglio aria gas , in maniera non descrivibile in tali tipi di modelli .

Livello 3 –modellazione bifasica, con la fase liquida discontinua

Solo modelli che esaminino il flusso distinto delle due fasi, con la fase liquida caratterizzata dalla precisa definizione spazio-temporale dei diametri delle gocce, riescono a definire correttamente le interazioni tra le due fasi stesse.

Operativamente l’autore agisce in posizione intermedia tra il livello 2 et il livello 3 : il fascio delle gocce spray viene discretizzato in un certo numero di classi , ognuna caratterizzata da un diametro rappresentativo, talchè si possa poi ragionare per sovrapposizione degli effetti dovuti alle singole classi .

Per le finalità del lavoro si omette di descrivere la caratterizzazione di uno spray attraverso la puntuale descrizione di curve cumulative dei diametri e definizione delle velocità delle singole particelle : si dà tuttavia notizia che tali operazioni e interpolazioni statistiche sono state effettuate con l’utilizzo di *analizzatori doppler di fase*(dispositivi ottici collimatore-lettore che effettuando scansioni in numero discreto su piani ortogonali all’asse dello spray permettono, piano per piano, di definire quante sono le gocce di determinato diametro e quali sono le velocità ascrivibili alle singole gocce.)

Chiaro quale possa essere il contributo per la definizione delle classi di diametri più rappresentative:

di particolare interesse l'estensione dei dati così desunti per la fase liquida alla fase gas coesistente. Infatti partendo dalla ovvia considerazione qualitativa, che, con il decrescere del diametro, il comportamento delle gocce spray più fini tende ad raggiungere il comportamento di moto degli aereiformi (ovvero moto regolato precipuamente dalla resistenza di mezzo anziché dalla gravitazione), è possibile in via approssimata asserire che il moto delle specie aereiformi è soddisfacentemente assimilabile, al fine di individuazione delle velocità, al moto delle particelle di diametro inferiore a 20 μ . Pur relegando al calcolo numerico lo studio del moto delle fasi si ottengono così dei dati passibili di qualche riscontro sperimentale.

Passando a esaminare il più classico strumento per la valutazione della solubilità in acqua di un gas - legge di Henry nella sua formulazione tradizionale : *“il rapporto tra le concentrazioni di una specie gassosa in aria e in acqua è funzione della pressione parziale del gas in aria”*, ovvero *“ per data pressione parziale del gas in aria, la frazione molare che passa in soluzione è costante”* – occorre confrontarsi con un suo importante limite di applicabilità in caso di ionizzazione della specie gassosa ed eventuale reazione chimica del gas con il solvente liquido.

La pesantezza di tale limite inficia la possibilità di utilizzare tale fondamentale legge . Fthenaki propone una formulazione derivata della legge di Henry tale da poter portare in conto anche la dissociazione della specie che passa in soluzione e le sue eventuali reazioni, ognuna genericamente caratterizzabile da una propria costante. Sinteticamente, si può porre, partendo dalla formulazione più generale della legge di Henry per specie indissociate :

Per una specie acida HA , dette $[CHA_1]$ la concentrazione in fase liquida,
 PHA la pressione in fase aereiforme,

$H = PHA / [CHA_1]$ H la costante di Henry

E' possibile per la specie dissociata $[HA] + [A^-]$, con costante di dissociazione κ_1 , definire la costante di Henry modificata H^*

$H^* = H ([H^+] / ([H^+] * \kappa_1))$ dove $[H^+]$ è la concentrazione dello ione idrogeno

Quest'ultima esprime tra l'altro la dipendenza dalla acidità della soluzione della solubilità del gas.

Formulazioni simili, appena più complesse sono riportate per acidi a dissociazione doppia (del tipo H_2A), in cui sono richiamate le due costanti κ_1 e κ_2 e per basi deboli.

Valori numerici della costante di Henry modificata, sono riportati tra l'altro per acido fluoridrico, solfidrico, carbonico, nitrico, nonché per ammoniaca e biossido di zolfo

Forniti anche i dati relativi alla anidride carbonica, di particolare interesse per il già menzionato l'utilizzo di tale sostanza nelle sperimentazioni reali.

A partire dai valori di concentrazione della specie che passano in soluzione è secondo l'autore possibile effettuare calcolazioni delle reazioni chimiche che contribuiscono a ridurre le concentrazioni delle specie nocive.

Trasferimento di massa

Si riporta in breve cenno, per punti salienti la descrizione di come il modello tratta i fenomeni di trasferimento di massa, ignorati nei modelli precedenti.

La rimozione del gas dalla fase aereiforme è computizzata, sulle singole gocce, come segue :

Per la specie A , la frazione molare N_A di passare attraverso la superficie di una goccia – diametro d – è data dalla $N_A = K_g (Y - Y^*)$ Con K_g = coefficiente globale di trasferimento di massa, che porta in conto i coefficienti parziali k_g et k_l , relativi alle fasi aereiforme e liquida, nonché della costante di Henry modificata - H^* -

Gli effetti di turbolenza sono portati in conto attraverso coefficienti moltiplicativi del K_g

In un tempo Δt la quantità di gas w che penetra all'interno della goccia di diametro d è data da:

$$w = \int \pi d^2 K_g (Y - Y^*) dt$$

Dalla attenzione puntuale sulla singola goccia si può determinare la quantità di gas che viene assorbita in un volume di controllo eseguendo una doppia sommatoria sulle N_t traiettorie e N_p particelle che transitano all'interno di tale volume.

L'operazione va ripetuta sulle varie classi di diametri con cui si è discretizzato lo spray.

Peculiarità della modellazione

Fthenaki riferisce della applicabilità del codice per diverse condizioni di flusso :

- Flussi di miscuglio aria-gas et spray equiversi diretti sia verso l'alto che verso il basso
- Flussi di differente verso
- Flussi ortogonali (miscuglio aria-gas ortogonale all'asse dello spray, diretto quest'ultimo in alto o in basso)

Il risultato principale della modellazione è comunque la definizione dell'efficienza delle varie tipologie di barriere ; in particolare è stato riportata una ampia casistica relativa all'acido fluoridrico, del quale sono espresse le percentuali di abbattimento in funzione del rapporto tra le portate di rilascio e la portata idrica.

Variabili della contemplata nella ricerca sono state

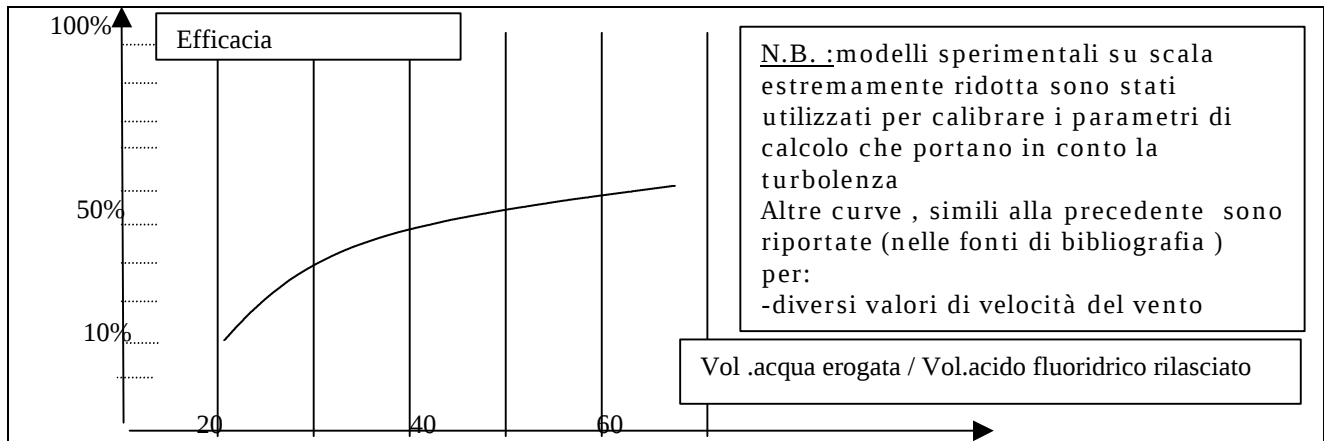
- le tipologie di ugelli
- il diametro medio (media relativa ai volumi) delle gocce

- le velocità del vento

Anche per questo modello vengono avanzate validazioni sperimentali : non è tuttavia omissibile il fatto che la verifica sperimentale è stata condotta sul box di prova di dimensioni estremamente ridotte che richiederebbero un'approfondimento su problemi di scala.

Modello di assorbimento di Fthenaky

Curve di calcolo e sperimentali relativi all'efficacia di spray conici per rilascio HFl-
(qualitativo)



Bibliografia

- [1] Il controllo delle emissioni atmosferiche di impianti industriali – misura e abbattimento . R.Bona e D.Sardelli . Ed. Franco Angeli.
- [2] An Experimental Assessment of Water Spray Barriers for Dispersing Clouds of Heavy Gases – K.Moodie . Institution of Chemical Engineers. Memoria presentata al simposio “ Heavy Gas Releases – Dispersion and Control” – Utrecht , maggio 1994.
- [3] Air entrainment into Water Spray and Spray Curtains - ASME 76-WA/FE – 40.
- [4] The Particle-Source in Cell (PSI-Cell) Model for Gas Droplet Flows – C.T.Crowe, M.P.Sharma, D.E. Stock, Journal of Fluid Engineering , giugno 1977.
- [5] Forced Dispersion of Gases by Water and Steam –P.A.C. Moore W.D. Rees – North Western Branch Papers n.5 , 1981.
- [6] The Design of Water-Spray Barriers for Chemical Plants – J. Mc Quaid – atti da : 2nd International Symposium on Loss Prevention and Safety Promotion in the Process Industries , Heidelberg , settembre 1997.
- [7] Watcur Programme for Estimating Water Curtain Efficiency in Mitigating Heavy Gas Releases – Technical Note No. I.92.31 – C.Drogaris – aprile 1992
- [8] Aerodynamic behaviour of liquid spray - design method of liquid spray curtains – part III , VKI – test report – J.M. Buchlin , febbraio 1980
- [9] A theoretical study of absorption of toxic gases by spraying – J. Loss Prevention Ind. 1990, vol 3 aprile 1990.
- [10] Presentazione Safety, Reliability and Occupational Health , Snamprogetti, Italia, 1999.
- [11] Dispersion of heavy gases by the wind and by steam or water spray barriers , J. Mc Quaid, Gran Bretagna, 1980.
- [12] The safe dispersal of large clouds of flammable heavy vapours , E. M. Cairney, A. L. Cude, Gran Bretagna, 1971.
- [13] The flow field of a free jet , R. P. Benedict, USA, 1974.
- [14] Guidelines for vapor release mitigation , American Institute of Chemical Engineers, USA, 1988.
- [15] Loss prevention in the process industry , F. P. Lees, Gran Bretagna, 1980.
- [16] Fluidodinamica , J. A. Brighton, USA, 1978.
- [17] Aerodinamica, E. Mattioli, Italia, 1992.