

## **Tecnologia degli impianti di aspirazione e ventilazione**

di Renato Rota - Politecnico di Milano

Dipartimento di Chimica, Materiali e Ingegneria chimica "G. Natta"

Tra le numerose postazioni presenti negli stabilimenti di produzione pneumatici in questa memoria si è focalizzata l'attenzione sulle presse di vulcanizzazione.

Queste postazioni sono caratterizzate dalla presenza di una sorgente di inquinante associata a una sorgente di calore, in grado quindi di creare un moto ascensionale dell'aria dalla sorgente di inquinante verso la parte alta dell'ambiente di lavoro. Questo tipo di sorgenti presentano quindi delle peculiarità legate proprio al moto spontaneo del pennacchio caldo che si origina dalla sorgente calda e che trasporta gli inquinanti verso l'alto.

Risulta necessario provvedere al presidio di queste postazioni con sistemi di aspirazione forzata; infatti, la ventilazione naturale (basata cioè sul moto spontaneo dei fumi caldi verso la parte alta del capannone) risulta essere da un lato fortemente dipendente dalle condizioni meteorologiche (temperatura, velocità e direzione del vento prevalenti in una particolare giornata) per poter fornire una protezione efficace, e dall'altro facilmente penalizzata dalla presenza di correnti d'aria spurie nel capannone o dalla modifica impropria da parte dei lavoratori (legata per esempio all'esigenza di controllare il microclima nelle diverse stagioni) delle aperture di ingresso e uscita dell'aria nel capannone stesso.

### ***Tipologie di sorgenti e variabili di progetto***

Assunto quindi che è necessario presidiare queste postazioni con un sistema di ventilazione locale con aspirazione e mandata forzate, in generale le variabili di progetto di un sistema di ventilazione locale sono la geometria della cappa, la portata di aria aspirata e reintegrata nel capannone e la posizione degli ingressi e delle uscite dell'aria rispetto alla sorgente e alla zona occupata dai lavoratori. Si possono individuare tre tipi di sorgenti di inquinanti, che definiscono in prima approssimazione la tipologia della cappa da utilizzare:

1. sorgenti che emettono inquinanti a basse velocità e non formano un pennacchio galleggiante;
2. sorgenti che formano un pennacchio galleggiante;
3. sorgenti che emettono inquinanti ad alta velocità.

Nel primo caso, a causa della presenza di gradienti di concentrazione in tutte le direzioni dello spazio, la diffusione dei contaminanti avviene in tutte le direzioni. Dato che non sono presenti spinte di galleggiamento o elevate velocità iniziali, la velocità con cui gli inquinanti diffondono è condizionata essenzialmente dalla velocità dell'aria nell'ambiente di lavoro.

Nel secondo tipo di sorgenti le forze motrici in gioco sono legate alle spinte di galleggiamento (dovute essenzialmente alla elevata temperatura della sorgente) e quindi i contaminanti diffondono nello spazio attraverso pennacchi galleggianti che hanno origine al di sopra di superfici calde e si muovono verso l'alto.

Infine, in presenza di sorgenti ad alta velocità il movimento dei contaminanti avviene attraverso un getto d'aria o di gas emessi dal processo, oppure a causa del moto delle particelle generate con una elevata velocità iniziale.

Le molte tipologie di cappe esistenti possono essere suddivise in cappe chiuse (o a cabina) e in cappe aperte (o esterne).

Le cappe chiuse racchiudono parzialmente o completamente l'apparecchiatura o il punto di generazione dell'inquinante; l'aspirazione interna alla cappa, se ben progettata, impedisce alla quasi totalità dell'inquinante di fuoriuscire nell'ambiente di lavoro. Le cappe chiuse sono da preferire in tutti i casi in cui la configurazione del processo e l'operazione lo permettono perché forniscono il migliore controllo dei contaminanti con la minore portata di aria, e quindi consentono una riduzione dei costi. Se una chiusura completa della cappa non è possibile, è comunque buona pratica minimizzare le aperture presenti nelle pareti della cappa.

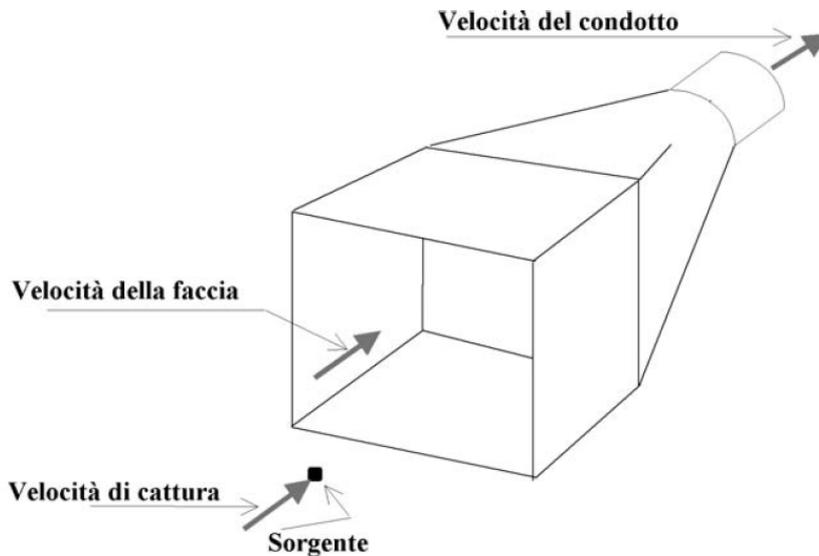
Le cappe aperte sono invece delle aspirazioni poste vicino alla sorgente di emissione senza però racchiuderla. La funzione primaria di una cappa è quella di creare un campo di velocità dell'aria nell'ambiente di lavoro in grado di catturare l'inquinante e trasportarlo all'interno della cappa stessa.

La Figura 1 fornisce la nomenclatura essenziale dei sistemi di ventilazione locale. Si definisce solitamente:

- superficie frontale: superficie dell'apertura della cappa;
- sorgente: punto di emissione dell'inquinante;
- portata di aspirazione: portata di aria aspirata dalla cappa;
- velocità di cattura: velocità dell'aria misurata nel punto in cui il contaminante viene generato;
- velocità della faccia o frontale: velocità dell'aria misurata sul piano di ingresso dell'aria nella cappa;
- velocità del condotto: velocità dell'aria nel condotto di aspirazione.

La cattura e il controllo degli inquinanti emessi dalla sorgente si ottiene mediante il flusso di aria creato dalla cappa di aspirazione.

Per cappe aperte che devono controllare sorgenti che emettono inquinanti a basse velocità e non formano un pennacchio galleggiante, il flusso di aria richiamato verso l'area frontale della cappa deve essere sufficiente a vincere tutte le correnti d'aria presenti nell'ambiente di lavoro (che possono essere generate per esempio da correnti di aria calda, macchine o materiali in movimento, movimenti dell'operatore, aperture che provocano correnti d'aria con velocità superiori a 0,25 m/s) e a trasportare l'inquinante nella cappa. In altri termini, la portata di aria aspirata deve creare un campo di moto davanti alla faccia della cappa tale per cui le velocità indotte nel punto in cui viene generato l'inquinante sia tale da convogliare l'inquinante nella cappa.

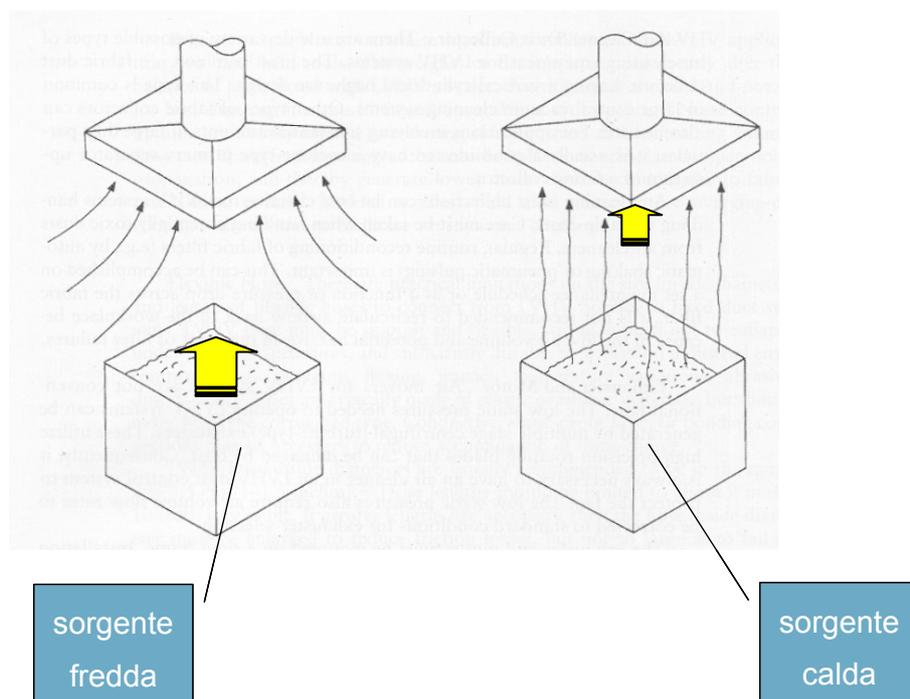


**Figura 1 – Nomenclatura essenziale dei sistemi di ventilazione locale con aspirazione forzata.**

Questo è per esempio il caso illustrato nella Figura 2 per il caso della sorgente fredda: il moto dell'aria in prossimità della sorgente di inquinante è determinato dall'aspirazione della cappa e deve essere in grado di vincere le correnti d'aria presenti nell'ambiente e convogliare l'inquinante nella cappa.

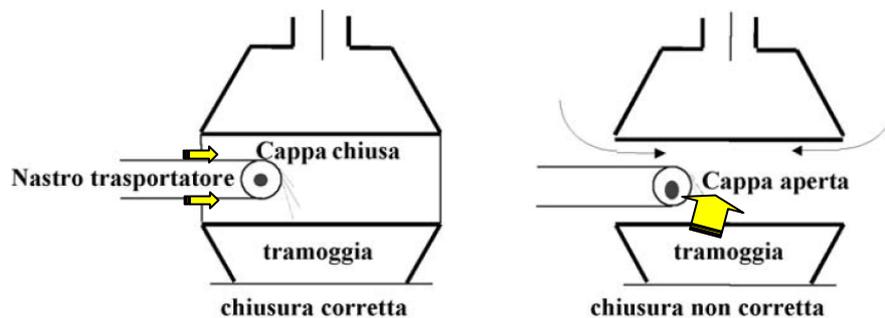
Nel caso invece in cui la sorgente sia calda, la portata di aspirazione non deve creare una velocità dell'aria in corrispondenza della sorgente in grado di catturare l'inquinante, ma deve disturbare il meno possibile il pennacchio generato dalla sorgente calda che spontaneamente tende a portarsi all'interno della cappa. La portata di aria aspirata dalla cappa in questo caso, mostrato sempre nella Figura 2, deve quindi più semplicemente ricevere tutto il pennacchio caldo che si muove verso l'alto e vincere le correnti d'aria spurie. Ricevere il pennacchio significa che la portata di aria aspirata dalla cappa deve essere maggiore della portata del pennacchio in corrispondenza della faccia della cappa (altrimenti una parte del pennacchio non potrebbe entrare nella cappa stessa e rifluirebbe nell'ambiente di lavoro), mentre vincere le correnti spurie significa che deve creare un moto dell'aria in direzione della cappa che sia in grado di impedire la deflessione del pennacchio a opera delle correnti d'aria del locale.

Questo non può essere in generale garantito dal campo di moto generato dalla sola aria di aspirazione, in quanto si ricadrebbe in pratica nella situazione precedente caratteristica delle sorgenti fredde e si perderebbe quindi il vantaggio della presenza di un pennacchio caldo che spontaneamente si porta verso la cappa (cosa che consente di ridurre significativamente le portate di aria di aspirazione richieste per il controllo degli inquinanti emessi), ma viene solitamente garantito dalla combinazione di un'opportuna chiusura della cappa e da un opportuno posizionamento degli ingressi dell'aria di reintegro rispetto alla posizione della cappa, delle sorgenti di inquinante e della zona occupata dagli operatori.



**Figura 2 – Cattura di inquinanti emessi da sorgenti fredde e calde.**

La chiusura della cappa rappresenta, per quanto possibile, un mezzo estremamente efficace per ridurre la portata di aria necessaria a ottenere un controllo adeguato della dispersione degli inquinanti nell'ambiente di lavoro. Un esempio di chiusura di una cappa è mostrato nella Figura 3. Nel caso di cappa aperta l'aria aspirata viene richiamata da tutte le parti e il campo di moto generato dall'aspirazione decade molto rapidamente allontanandosi dalla faccia della cappa; per trascinare l'inquinante nella cappa è necessaria quindi un'elevata portata d'aria in grado di creare un'elevata velocità in corrispondenza del punto dove viene liberato l'inquinante. Se invece la cappa è chiusa (anche solo parzialmente come nell'esempio di Figura 3, dove è presente un'apertura per consentire l'ingresso del nastro trasportatore), la portata di aria aspirata viene richiamata solo attraverso l'apertura presente e quindi la velocità in corrispondenza di questa apertura (che deve solo impedire la diffusione dell'inquinante all'esterno) dipende solo dal rapporto tra la portata di aria e la sezione dell'apertura, ma non dalla distanza dell'apertura stessa dal punto di aspirazione. Se l'apertura è abbastanza piccola, una portata di aria molto minore rispetto al caso di cappa aperta è quindi in grado di produrre un'elevata velocità sull'apertura. Un secondo importante effetto della chiusura della cappa è rappresentato dalla barriera che le pareti di chiusura della cappa oppongono alle correnti d'aria spurie presenti nell'ambiente di lavoro. Mentre nel caso di cappa aperta le correnti di aria spuria attraversano la regione dove viene liberato l'inquinante e possono quindi trascinarlo verso l'ambiente di lavoro, nel caso di cappa chiusa tali correnti non possono raggiungere la sorgente di inquinante e quindi non possono interferire col processo di cattura operato dalla cappa. Questo risulta particolarmente importante nel caso di pennacchi caldi, in quanto il campo di moto generato dalla cappa è solitamente trascurabile (la portata di aria di aspirazione viene solitamente progettata al solo scopo di ricevere il pennacchio caldo) e le correnti spurie possono deflettere il pennacchio portandolo fuori dalla faccia della cappa e creando così un rientro dell'inquinante nell'ambiente di lavoro.



**Figura 3 – Esempio di chiusura corretta e non corretta di una cappa.**

Nel caso in cui non sia possibile una chiusura pressoché completa della cappa riveste un ruolo importante anche la posizione relativa degli ingressi e uscite dell'aria dal capannone, delle sorgenti di inquinanti e degli operatori. Il criterio generale da seguire è che il flusso di aria pulita in ingresso deve attraversare la zona occupata dagli operatori prima di incontrare la sorgente di inquinante e risalire verso la cappa; per nessuna ragione l'aria immessa nel capannone deve creare delle correnti che disturbino il moto dell'inquinante dalla sorgente alla cappa o incontrare la sorgente di inquinante prima di attraversare la zona occupata dagli operatori.

Un caso particolare di quest'ultima norma di buona tecnica è rappresentato dal fatto che la posizione degli operatori (sia durante il normale funzionamento degli impianti, sia durante le fasi di manutenzione) non deve mai essere sul percorso che l'aria di ventilazione compie tra la sorgente di inquinante e la cappa, come illustrato nella Figura 5.

I criteri generali di progettazione di aspirazioni localizzate per i casi di interesse possono quindi essere riassunti come segue.

Nel caso di pennacchi caldi (quali quelli originati dalle presse di vulcanizzazione):

- la cappa deve essere posizionata in modo tale da ricevere il pennacchio e la portata d'aria deve essere superiore alla portata del pennacchio caldo sulla faccia della cappa;
- devono essere previsti schermi che racchiudano il più possibile la zona di formazione degli inquinanti al fine di schermare eventuali correnti spurie presenti nell'ambiente che tenderebbero a deflettere il pennacchio fuori dalla faccia della cappa. Tali schermi possono essere delle paratie fisse oppure mobili costituite da strisce di materiale plastico flessibile; in questo caso le strisce devono essere previste in due file sovrapposte al fine di massimizzarne l'efficacia, come mostrato nella Figura 4;
- l'aria di reintegro non deve disturbare il moto ascensionale del pennacchio e deve attraversare la zona occupata dagli operatori prima di incontrare la sorgente di inquinanti;
- gli operatori non devono operare nella zona compresa tra la sorgente di inquinante e la faccia della cappa.

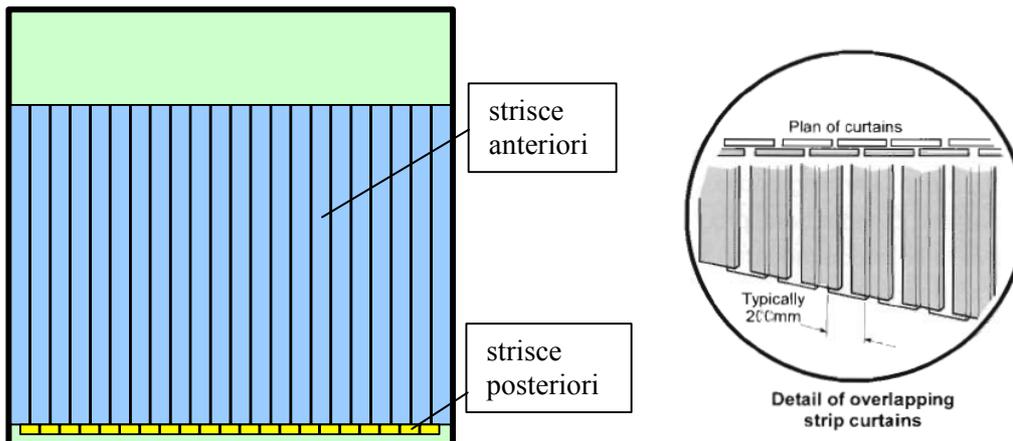


Figura 4 – Esempio di strisce di plastica flessibile sovrapposte per il confinamento parziale.

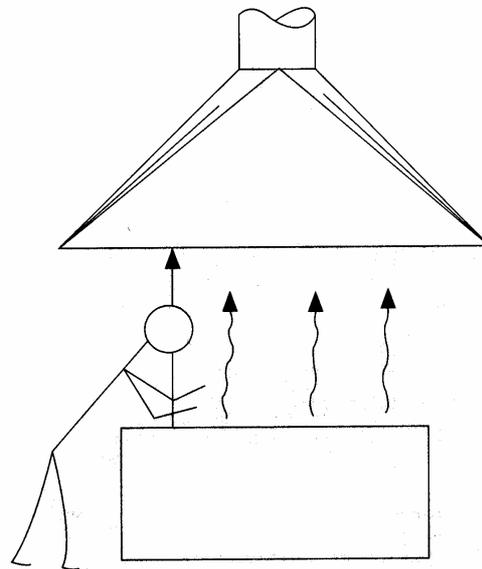


Figura 5 – Posizione relativa scorretta di ingressi di aria – sorgente – operatore – cappa.

Nel caso invece di sorgenti che possono essere chiuse quasi totalmente (come le bocche di caricamento dei mescolatori) la portata di aria deve essere tale da creare una velocità sull'apertura in grado di evitare la fuoriuscita degli inquinanti.

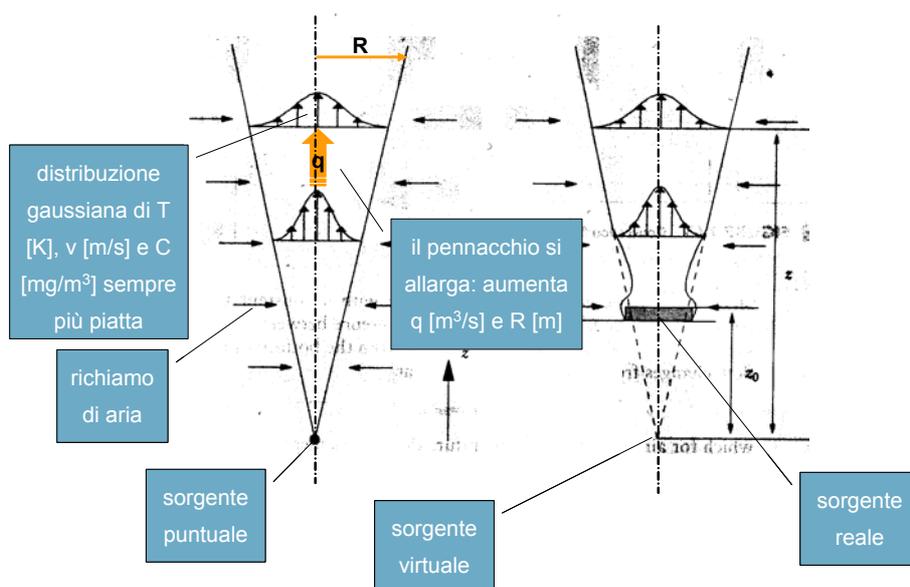
### ***Pennacchi caldi***

Se all'interno di un ambiente un oggetto si trova a una temperatura superiore a quella dell'aria circostante esso cede calore all'aria che viene così riscaldata e, a causa delle forze di galleggiamento, si muove verso l'alto. Le correnti d'aria che si formano attraverso questo meccanismo sono chiamate correnti per convezione naturale o pennacchi caldi.

Man mano che il pennacchio caldo si muove verso l'alto, esso richiama al suo interno parte dell'aria circostante; in questo modo la portata del pennacchio caldo in movimento verso l'alto aumenta con la quota; nello stesso tempo, poiché l'aria richiamata nel pennacchio è fredda e ferma, la temperatura e la velocità del

pennacchio stesso (che risultano distribuite in modo gaussiano, con un valore massimo al centro del pennacchio e minimo ai bordi) diminuiscono con la quota, come illustrato in Figura 6. Ne consegue che il moto verticale del pennacchio cessa quando la temperatura del pennacchio stesso diventa simile a quella dell'aria circostante e quindi le forze di galleggiamento non risultano più significative. Inoltre, la portata di aria di un flusso in convezione naturale dipende dalla temperatura e dalla geometria della superficie o della sorgente e dalla temperatura dell'aria dell'ambiente.

La progettazione di sistemi di ventilazione sopra sorgenti calde richiede quindi una conoscenza delle caratteristiche del pennacchio galleggiante.



**Figura 6 – Schematizzazione di un pennacchio caldo che si innalza da una sorgente di dimensioni infinitesime (puntuale) o finite.**

Alcune relazioni analitiche per determinare i parametri di interesse (temperatura, velocità e portata d'aria) di pennacchi sopra sorgenti calde puntiformi o lineari sono riportate in Tabella 1.

Parametro	Sorgente puntiforme
Velocità nel centro del pennacchio (m/s)	$v_z = 0,128 \cdot \Phi^{\frac{1}{3}} \cdot z^{-\frac{1}{3}}$
Differenza di temperatura tra il centro del pennacchio e l'ambiente (°C)	$\Delta T = 0,329 \cdot \Phi^{\frac{2}{3}} \cdot z^{-\frac{5}{3}}$
Portata del pennacchio (m³/s)	$q_{v,z} = 0,005 \cdot \Phi^{\frac{1}{3}} \cdot z^{\frac{5}{3}}$

**Tabella 1 - Relazioni analitiche per il calcolo di alcune variabili relative a pennacchi caldi su sorgenti puntiformi.  $\Phi$  = flusso termico convettivo;  $z$  = altezza al di sopra della sorgente**

Esse si basano sull'ipotesi che la sorgente abbia una dimensione trascurabile rispetto all'ambiente e non tengono quindi conto della dimensione della sorgente reale e correlano le diverse variabili al flusso termico convettivo originato dalla sorgente calda.

La conoscenza della potenza termica emessa dalla sorgente permette di ricavare il flusso termico con la relazione  $\Phi = k \cdot \Phi_{tot}$ , dove  $\Phi$  è il flusso termico convettivo (W) e  $\Phi_{tot}$  è la potenza termica emessa dalla sorgente (W).

La Tabella 2 riporta alcuni valori tipici di  $k$  per situazioni di questo tipo.

Tipo di sorgente	Intervallo di valori di $k$
Tubi e condotti	0,7 – 0,9
Componenti di dimensione ridotta	0,4 – 0,6
Componenti di grande dimensione	0,3 – 0,5

Tabella 2 - Valori tipici della costante  $k$  distinti in base alla sorgente

Queste relazioni sono riassunte nella Figura 7 per il caso di interesse relativo alle presse di vulcanizzazione.

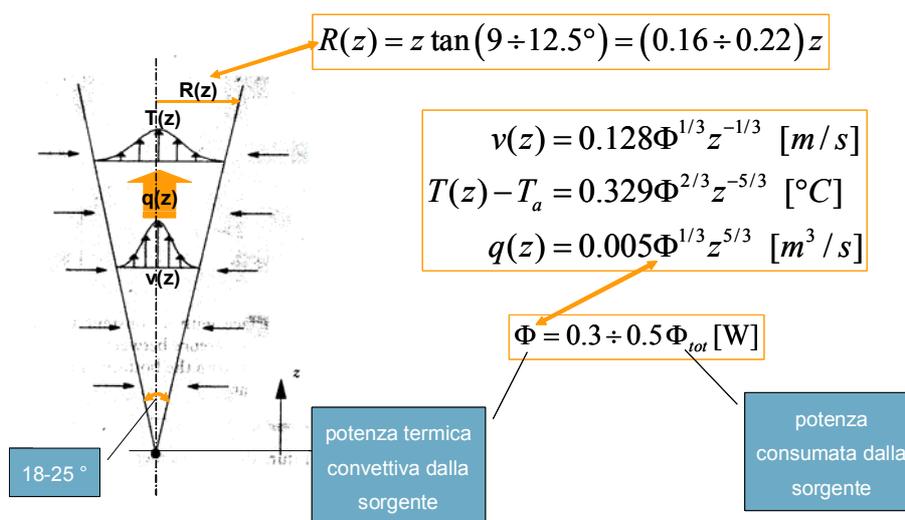
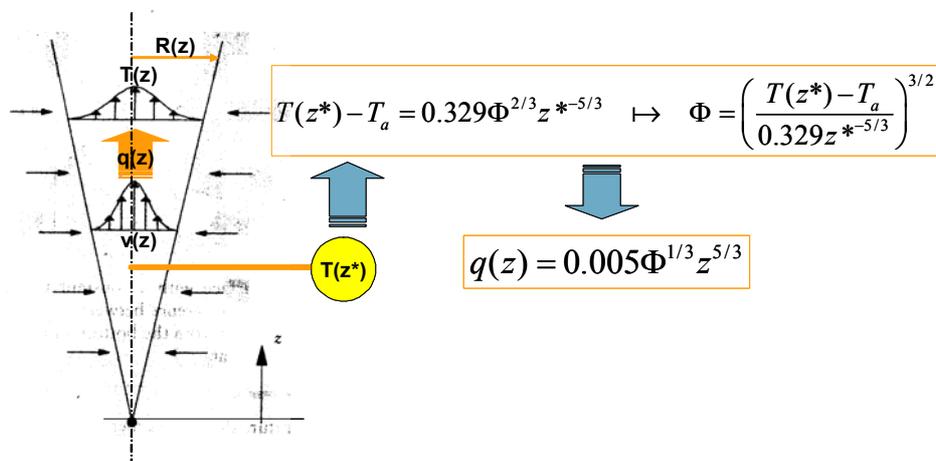


Figura 7 – Relazioni analitiche per il calcolo delle caratteristiche di un pennacchio caldo.

Poiché il calcolo della potenza termica generata dalla sorgente non è sempre agevole, è possibile surrogare tale informazione con delle misure di temperatura e/o velocità a una quota  $z$  sopra l'asse centrale della sorgente calda; da tali misure, utilizzando le relazioni precedenti, è possibile ottenere una stima della potenza convettiva scambiata dalla sorgente calda:

$$T(z) - T_a = 0.329\Phi^{2/3}z^{-5/3} \quad \mapsto \quad \Phi = \left( \frac{T(z) - T_a}{0.329z^{-5/3}} \right)^{3/2}$$

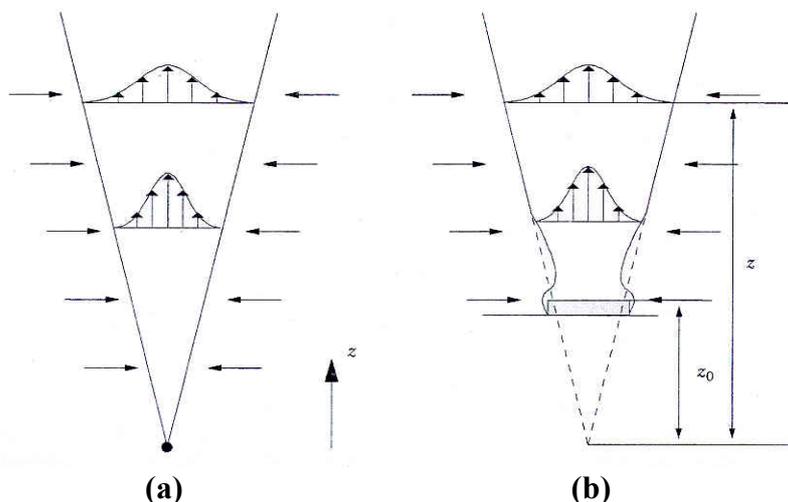
come riassunto nella Figura 8, dove viene anche riportata la relazione di maggior interesse per la progettazione del sistema di aspirazione, cioè la portata del pennacchio a una data quota  $z$ .



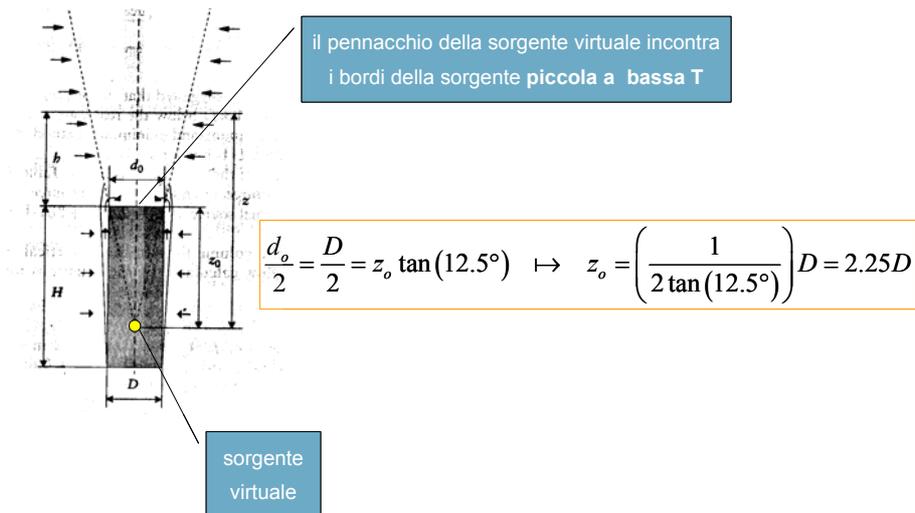
**Figura 8 – Relazioni per il calcolo delle caratteristiche di un pennacchio caldo sulla base di misure di temperatura sull’asse verticale del pennacchio stesso.**

Le sorgenti reali sono in realtà più complesse del caso di sorgente puntuale; per tener conto dell’effettiva dimensione della sorgente si introduce solitamente una “sorgente virtuale” per il calcolo della portata del pennacchio in funzione della quota, come schematizzato nella Figura 9. L’origine virtuale della sorgente puntuale si trova lungo l’asse del pennacchio ad una distanza  $z_0$  dalla sorgente reale sull’altro lato della superficie rispetto alla sorgente reale.

Per stimare la posizione della sorgente virtuale nel caso di pennacchi che si formano sopra dei corpi con un rapporto tra altezza e larghezza simile si utilizza una stima di massimo (Figura 10) e una di minimo (Figura 11).

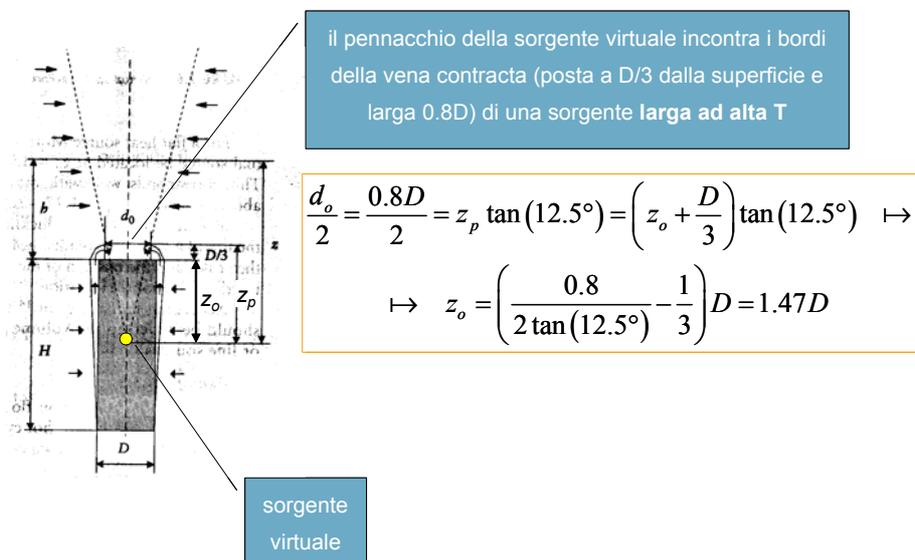


**Figura 9 - Posizione della sorgente virtuale nel caso di sorgente puntuale (a) e reale con dimensione finita (b)**



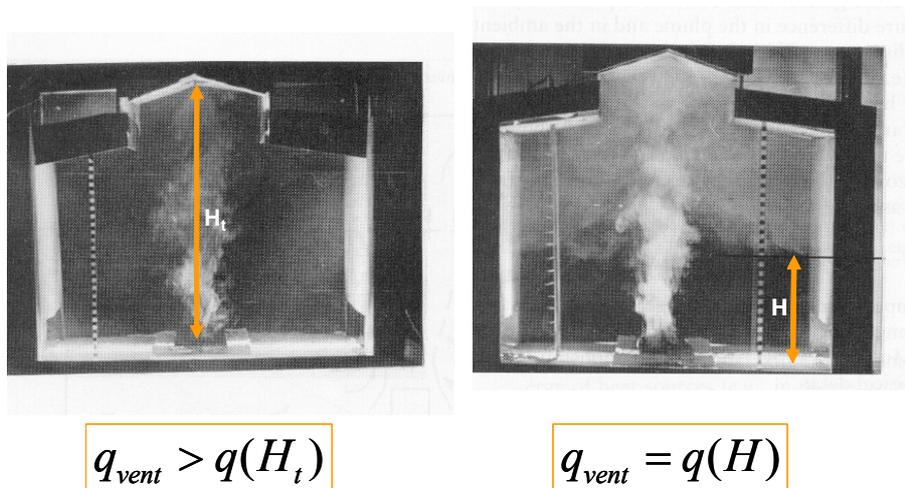
**Figura 10 – Sorgente di dimensioni finite: caso di massimo.**

La stima di massimo consiste nel sostituire la sorgente reale con una puntiforme virtuale posizionata in modo tale che il bordo del pennacchio intersechi il bordo della superficie superiore della sorgente reale. La stima di minimo consiste nel posizionare la sorgente puntiforme in modo tale che il diametro del pennacchio risulta l'80% del diametro della superficie superiore della sorgente ed è calcolato ad un'altezza pari a un terzo del diametro al di sotto della superficie. L'angolo di apertura del pennacchio è di circa 25° (più precisamente, compreso tra 18 e 25°). L'applicazione corretta di questo metodo prevede di utilizzare il caso massimo se la sorgente si trova a bassa temperatura mentre è opportuno il caso minimo per sorgenti di grandi dimensioni e ad alta temperatura.



**Figura 11 – Sorgente di dimensioni finite: caso di minima.**

Se la sorgente di calore reale è praticamente piatta (cioè con dimensione verticale trascurabile) la sorgente virtuale viene posizionata a una distanza  $z_0 = 1,7 - 2,1 \cdot D$  al di sotto della superficie, valore coerente con l'intervallo ottenibile con la stima di massimo e di minimo discussa in precedenza.



**Figura 12 – Comportamento di un pennacchio caldo in un ambiente confinato in funzione della portata di aria entrante nell'ambiente,  $q_{vent}$ .**

Quanto detto in precedenza risulta valido per pennacchi caldi in ambienti non confinati, in cui cioè non vi sia un limite imposto dal confinamento alla quantità di aria che può essere inglobata nel pennacchio caldo man mano che si innalza. Se invece il pennacchio caldo si origina in un ambiente confinato (come un capannone), la portata di aria entrante nell'ambiente rappresenta un limite superiore alla portata di aria che può essere inglobata nel pennacchio; se la portata in ingresso al capannone è superiore a quella richiamata dal pennacchio alla quota di scarico dell'aria dal capannone (solitamente sul tetto) il comportamento del pennacchio è analogo a quello di un pennacchio libero; in caso contrario, come mostrato nella Figura 12, si forma una stratificazione nell'ambiente alla quota in cui la portata del pennacchio eguaglia quella dell'aria entrante nell'ambiente.

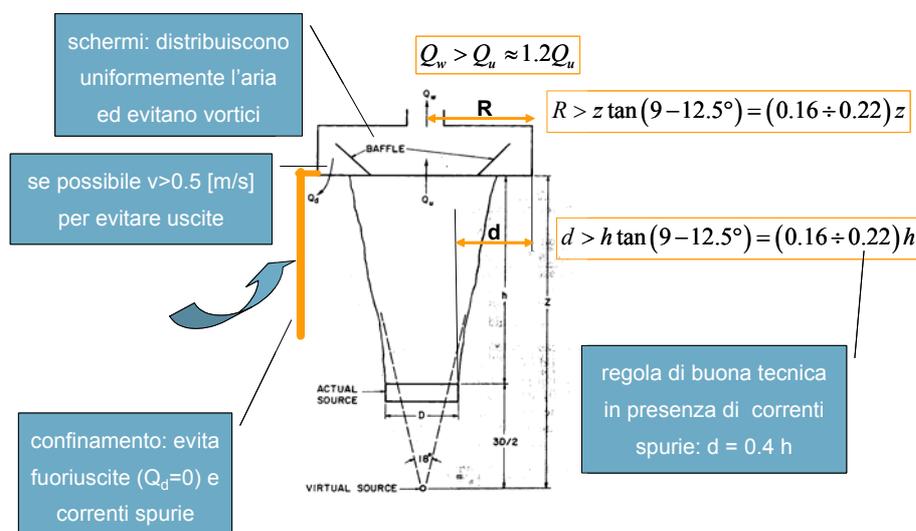
Al di sotto di tale quota il pennacchio si comporta essenzialmente come un pennacchio libero, per cui valgono quindi le relazioni discusse in precedenza.

Sulla base di queste relazioni e delle norme generali di buona tecnica per la progettazione delle ventilazioni locali discusse in precedenza, si possono definire le seguenti norme di buona tecnica per la progettazione dei sistemi di ventilazione sopra sorgenti calde quali le linee delle presse di vulcanizzazione:

1. le aree contenenti le linee delle presse di vulcanizzazione devono essere presidiate con aspirazioni forzate poste in alto rispetto alle linee stesse così da sfruttare il moto ascensionale del pennacchio caldo che si genera;
2. le aree contenenti le linee delle presse di vulcanizzazione devono essere confinate il più possibile in generale e completamente al di sopra di una certa quota (in altri termini, a tale quota si trova la faccia della cappa a cortina suggerita per questa situazione);
3. il confinamento totale deve iniziare dalla quota più bassa compatibile con le esigenze di operabilità degli impianti; al di sopra di tale quota non devono essere presenti aperture in quanto il pennacchio caldo tende spontaneamente a diffondere verso tali aperture;
4. al di sotto della quota di confinamento totale deve essere presente un confinamento parziale di tutte le zone la cui accessibilità non è strettamente richiesta da motivi di operabilità dell'impianto al fine di limitare l'azione di disturbo

della traiettoria verticale del pennacchio caldo a opera delle correnti d'aria spurie presenti nel capannone;

5. nella parte superiore della zona di completo confinamento devono essere presenti delle aspirazioni che consentano:
  - 5.1. di ottenere una portata di aria superiore (come indicazione di massima, del 20% superiore) alla portata del pennacchio alla quota di inizio di completo confinamento, cioè sulla faccia della cappa, al fine di catturare tutto il pennacchio caldo; tale portata si può calcolare, per la singola pressa di vulcanizzazione e sulla base di misure di temperatura sull'asse verticale della pressa, come:  $q(h) = 18 \left( (T(H) - T_a) / (0.329 H^{-5/3}) \right)^{1/2} h^{5/3} [m^3 / h]$ , dove H è la quota a cui sono state effettuate le misure di temperatura T(H), mentre h è la quota della cappa;
  - 5.2. di distribuire uniformemente l'aria aspirata su tutta la faccia della cappa (in altri termini, la velocità della faccia deve essere uniforme) al fine di evitare che le zone caratterizzate da velocità di faccia inferiore non siano in grado di catturare l'intero pennacchio;
6. le dimensioni della faccia della cappa devono essere tali da contenere il pennacchio; in particolare, la cappa deve sporgere dal bordo della pressa di almeno il 15-20% della distanza tra la pressa e la faccia della cappa per evitare che il pennacchio non venga completamente intercettato dalla cappa, come illustrato nella Figura 13;



**Figura 13 – Criteri di progetto per cappe a cortina sopra sorgenti calde.**

7. l'aria aspirata deve essere reintegrata con una portata di aria leggermente inferiore (così da mantenere il capannone in leggera depressione e assicurare che tutta l'aria esca attraverso le aspirazioni) distribuita in modo ragionevolmente uniforme lungo le linee delle presse così da evitare correnti d'aria in grado di deflettere il pennacchio e portarlo fuori dalla cappa;
8. gli scarichi dell'aria all'esterno del capannone devono essere tali da impedire il rientro nel capannone (in particolare attraverso le prese dell'aria di reintegro) dell'aria scaricata;

9. deve essere garantita una verifica del funzionamento e una manutenzione periodica del sistema di ventilazione.