



*Modelli di Dispersione  
degli Inquinanti in Aria*  
2011

Parte 6

**Processi di Deposizione**

*dott. Roberto Sozzi  
dott. Andrea Bolignano*

Gli inquinanti emessi nel PBL, durante la loro dispersione in aria subiscono processi che determinano:

1. l'**impoverimento** del *plume* ed il '**trasferimento**' delle sostanze inquinanti **al suolo** (**processi di deposizione**)
1. L'innesco di **trasformazioni chimiche** dovute alla presenza contemporanea di sostanze capaci di reagire (**processi di reattività chimica**). Tratteremo questo argomento successivamente.

## **1. Processi di deposizione:**

**Deposizione Secca** Meccanismo sempre presente nel *PBL* che elimina una parte dell'inquinante presente nel *plume* e lo trasferisce al suolo senza intervento dell'acqua presente in atmosfera

**Deposizione umida** Meccanismo di eliminazione causato dall'azione delle acque meteoriche sul *plume*

## Deposizione Secca

**L'entità della deposizione dipende da 3 fattori :**

- a) Livello di turbolenza** del PBL. Maggiore è il livello di turbolenza, maggiore è la quantità di inquinante portato al suolo e maggiore è la probabilità che venga trasferito al suolo stesso.
- b) Proprietà fisico-chimiche dell'inquinante.** La reattività chimica e la solubilità degli inquinanti gassosi, oppure la densità e le dimensioni del particolato atmosferico.
- c) Natura della superficie.** La struttura della superficie può ostacolare l'assorbimento di certi gas e può impedire il 'rimbalzo' delle particelle solide.

# Deposizione Secca

## Fenomenologia

⇒ sempre presente nel PBL.

⇒ si compone di **tre fasi** distinte:

- a) Trasporto turbolento (fase aerodinamica).** La turbolenza presente nel *SL* causa il trasporto di una parte di inquinante verso il suolo. **La sua entità non dipende dalla natura dell'inquinante, ma solo dal livello di turbolenza del *SL*.**
- b) Trasporto nello strato laminare (fase laminare).** Nello strato di aria vicino al suolo (circa 1 mm) si ha un trasporto causato dalla diffusione molecolare (gas) e dai movimenti browniani (particolato). **Questa fase dipende dalla natura chimico-fisica dell'inquinante.**
- c) Trasporto al suolo (fase superficiale).** In questa fase si ha l'interazione tra l'inquinante e gli elementi soprattutto vegetali che si trovano alla superficie. **Questa fase dipende dalla natura chimico-fisica dell'inquinante e dalla natura della superficie.**

## Deposizione secca dei gas

Il Flusso di inquinante al suolo proporzionale alla concentrazione

$$F = V_d \cdot C(z)$$

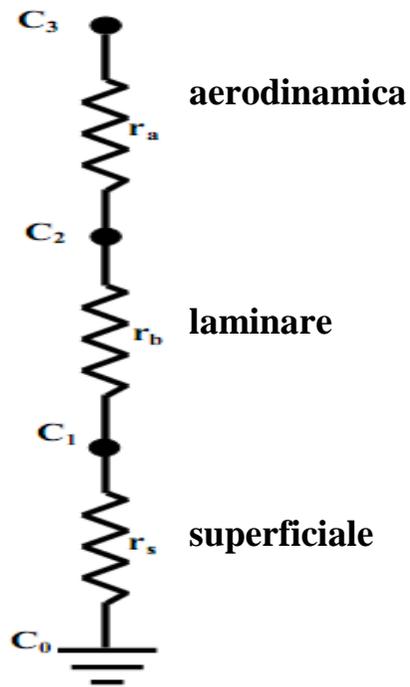
dove  $V_d$  è la **velocità di deposizione** legata alla **resistenza** alla deposizione di inquinante da:

$$V_d = \frac{1}{r_d}$$



### Analogia Elettrica

**C → tensione**  
**F → corrente**

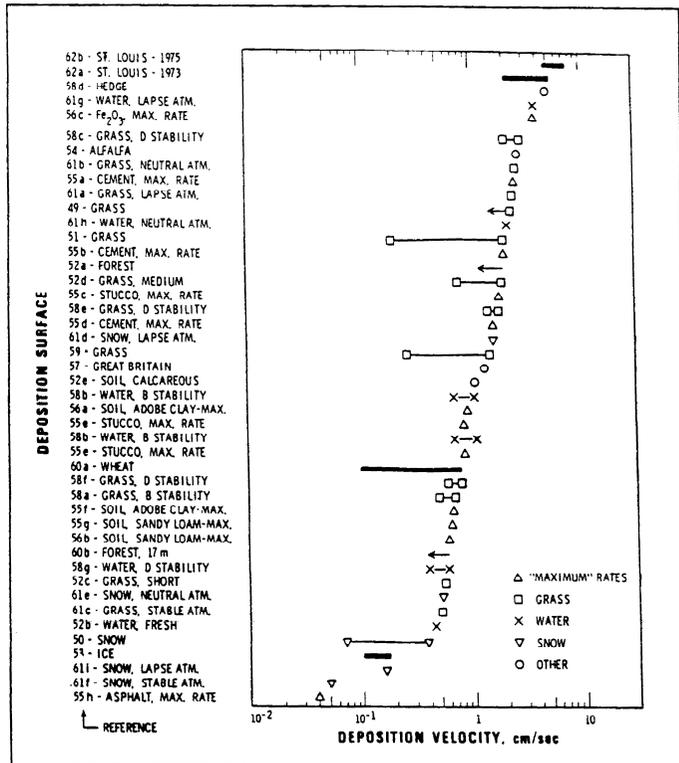


$$C_3 = -(r_a + r_b + r_s) \cdot F_d \quad v_d = (r_a + r_b + r_s)^{-1}$$

## Valori di $V_d$ per alcuni gas



Number of references	Depositing gas	Deposition velocity range, $\text{cm s}^{-1}$
14	$\text{SO}_2$	0.04-7.5
20	$\text{I}_2$	0.02-26
2	$\text{HF}$	1.6-3.7
1	$\text{ThB}$	0.08-2.6
1	Fluorides	0.3-2.4
1	$\text{Cl}_2$	1.8-2.1
7	$\text{O}_3$	0.002-2.0
1	$\text{NO}_2$	1.9
2	$\text{NO}$	Minus-0.9
1	$\text{PAN}$	0.8
3	$\text{NO}_x$	Minus-0.5
1	$\text{H}_2\text{S}$	0.015-0.38
1	$\text{CO}_2$	0.3
1	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$	0.064-0.28
5	$\text{CH}_3\text{I}$	$10^{-4} - 10^{-2}$
1	$\text{Kr}$	$2.3 \times 10^{-11} \text{ max}$



## Valori di $V_d$ per $\text{SO}_2$ a seconda del tipo di suolo

## Deposizione secca del particolato

Anche nel caso della deposizione di particolato vale la legge secondo cui il Flusso di particolato al suolo è proporzionale alla sua concentrazione in aria

Velocità deposizione Secca  $\Rightarrow$   $1/\text{resistenza alla deposizione}$

Differenza nel meccanismo di deposizione rispetto ai gas:

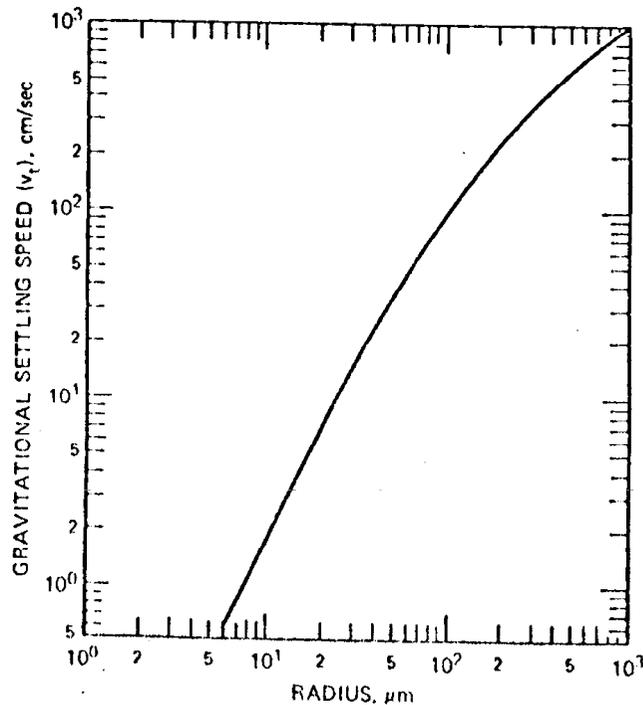
1. il particolato ha una velocità di sedimentazione gravitazionale propria;
2. non interagisce con la vegetazione;
3. possiede la medesima resistenza aerodinamica dei gas.

Il particolato presenta una propria **Velocità di Sedimentazione Gravitazionale** proporzionale alla propria densità superiore all'aria e alle sue dimensioni, secondo la Legge di Stokes

$$m_p \frac{dv_z}{dt} = m_p g + F_{drag}$$

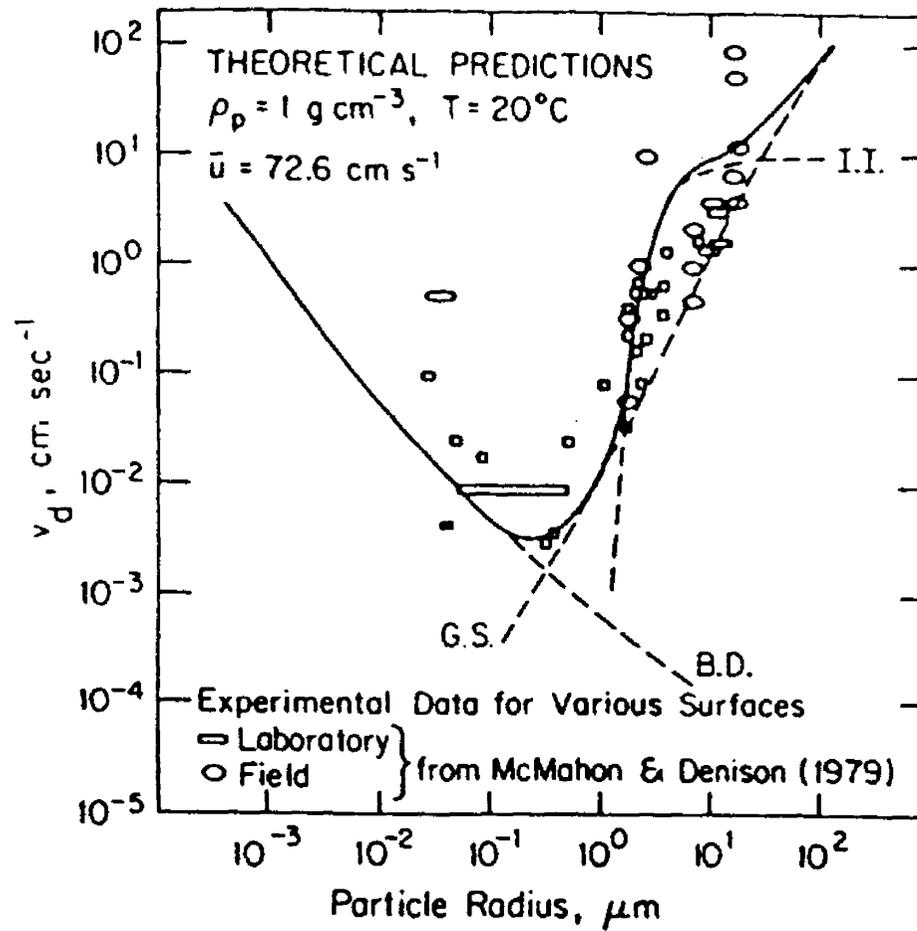


$$V_G = \frac{2r^2 g \rho}{9\mu}$$



$\rho$  è la densità della particella,  
 $r$  è il raggio della particella,  
 $\mu$  è la viscosità dinamica dell'aria.

$$V_d = \left( r_a + r_s + r_a r_s V_g \right)^{-1} + V_g$$



## possibili parametrizzazioni

**a) Fase aerodinamica :** 
$$r_a = \frac{1}{ku_*} \cdot [\ln(z/z_{0h}) - \Psi_h(z/L)]$$

**b) Fase laminare :** 
$$r_d = \left[ u_* \left( Sc^{-2/3} + 10^{-3/St} \right) \right]$$

**c) Fase superficiale :** 
$$r_s = \left[ 1/r_f + 1/r_{cut} + 1/r_g \right]^{-1}$$

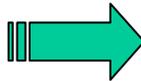
# Introduzione della Deposizione Secca nei Modelli di dispersione

## Modello Euleriano di tipo K

$$\frac{\partial \bar{C}_k}{\partial t} + \left( \bar{u} \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( K_{xx} \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_{yy} \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_{zz} \frac{\partial \bar{C}_k}{\partial z} \right) + S + R(\bar{C}_1, \bar{C}_2, \dots, \bar{C}_N) - D$$

Per introdurre la deposizione secca in questo tipo di modello è necessario cambiare la condizione al contorno alla frontiera inferiore nel modo seguente:

$$K_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0$$



$$\left[ K_{zz} \frac{\partial C}{\partial z} + V_G C \right]_{z=0} = [V_d C]_{z=0}$$

- **esiste un flusso verticale (non nullo) di inquinante al suolo che dipende dalla deposizione secca e dalla sedimentazione gravitazionale delle particelle;**
- **tale flusso risulta direttamente proporzionale alla concentrazione dell'inquinante al suolo.**

## Modelli Stazionari.

*source depletion : impoverimento del plume (tasso di emissione decade nel tempo);*

$$C(x, y, z) = \frac{Q_0}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot f_z(x, z) \cdot \exp\left\{-\frac{v_d \cdot G(x)}{\sqrt{2\pi} \cdot u}\right\}$$

*surface reflection : sorgente immagine "negativa";*

$$C(x, y, z) = Q_0 \cdot D(x, y, z, H) + \int_{-\infty}^{+\infty} \int_0^x \{v_d \cdot C(\xi, \eta, z_d) \cdot D(x - \xi, y - \eta, z, 0)\} \cdot d\xi \cdot d\eta$$
$$D(x, y, z, H) = \frac{1}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

*partial reflection : impoverimento della sorgente immagine*

## Modelli Stazionari.

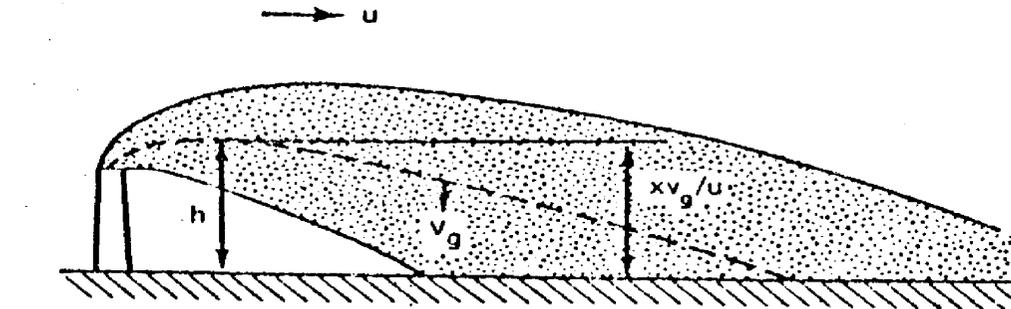
Se la **dimensione del particolato è superiore a 10 μm**, è predominante la **deposizione gravitazionale**:

- che causa la discesa graduale del baricentro del *plume* (con una pendenza pari a  $V_g/U$ )
- senza alcun tipo di **riflessione al suolo**.

La relazione base che descrive la concentrazione del particolato risulta essere:

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \frac{\left(z - \left(h - xV_G/\bar{u}\right)\right)^2}{\sigma_z^2}\right]$$

$$D = V_G \cdot C(x, y, 0)$$



**Se si considera una sostanza gassosa o particolato fine, tenendo conto sia della deposizione secca che della sedimentazione gravitazionale, si ha:**

modello *partial reflection*

**Simula il processo di deposizione degli inquinanti emessi da una ciminiera *riducendo il tasso di emissione della sorgente immagine*.**

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u}} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{\left(z - \left(h - V_G x/\bar{u}\right)\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \alpha(x_G) \exp\left[-\frac{\left(z + \left(h + V_G x/\bar{u}\right)\right)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$

dove il coefficiente di riflessione è dato da:  $\alpha = 1 - \frac{2V_D}{V_G + V_D + \left(\bar{u}h - V_G x\right)/\sigma_z \cdot \left(d\sigma_z/dx\right)}$

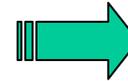
calcolato alla distanza  $x_G$  soluzione dell'equazione  $\left[h - \frac{V_G x_G}{\bar{u}}\right] \cdot \frac{\sigma_z(x)}{\sigma_z(x_G)} = z + h - \frac{V_G x}{\bar{u}}$

Il **flusso di deposizione** è dato da:

$$D = (V_G + V_D) \cdot C(x, y, 0)$$

- $V_D=0$  ( $r_D \rightarrow \infty$ )  $\Rightarrow \alpha=1 \rightarrow$  riflessione totale

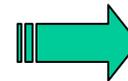
$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h+(V_G x/\bar{u}))^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h-(V_G x/\bar{u}))^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$



*riflessione totale*

- $V_D = \infty$  ( $r_D=0$ )  $\Rightarrow \alpha \rightarrow -1 \rightarrow$  assorbimento totale

$$C = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \cdot \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \cdot \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h+(V_G x/\bar{u}))^2}{2\sigma_z^2}\right] - \exp\left[-\frac{(z+h-(V_G x/\bar{u}))^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}$$



*assorbimento totale*

## Deposizione Umida

Il processo di deposizione umida ha luogo quando i gas o le particelle vengono catturate dalla pioggia o dalla nebbia nei pressi del suolo.

E' un processo molto complesso e non completamente noto.

Normalmente il **Flusso di Deposizione Umida** è dato da:

$$D_H = C(x, y, 0) \cdot W_r \cdot J_0$$

dove:

⇒  $J_0$  è l'intensità di pioggia ( $\text{ms}^{-1}$ )

⇒  $W_r$  è il coefficiente di deposizione umida il cui valore dipende dalla natura dei gas e delle particelle. Un valore tipico è  $6 \cdot 10^5$ .

Es. Se,  $J_0 = 1\text{mm/h}$ , si ha una velocità di deposizione umida ( $W_r J_0$ ) pari a  $17 \text{ cm/s}$ , valore normalmente superiore a quello della deposizione secca.

## Rapporto di dilavamento

- $W$  – tasso di trasferimento dell'inquinante nelle idrometeore;
- $C$  – Concentrazione dell'inquinante;
- $\Lambda$  – rapporto di dilavamento (dipende dal tempo, dalla posizione in atmosfera, dal tipo di inquinante e dal tipo di idrometeora).

$$W = \Lambda \cdot C$$

Poiché il flusso di deposizione umida deve eguagliare l'impoverimento dell'inquinante in atmosfera allora (in condizioni di omogeneità) :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -W + R + E$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\Lambda \cdot C \Rightarrow C(t) = C(t=0) \cdot e^{-\Lambda \cdot t}$$

# Introduzione della Deposizione Umida nei Modelli di dispersione

## Modello Stazionario

- La dispersione del pennacchio rappresentata da un modello gaussiano;
- Il tasso di emissione dell'inquinante è  $Q_0$ .

$$Q(x) = Q_0 \cdot e^{-\frac{\Lambda \cdot x}{U}} = Q_0 \cdot e^{-\Lambda \cdot t}$$

## Modello Euleriano

- Anche in questo caso si utilizza il rapporto di dilavamento come parametro per descrivere la deposizione umida

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = K_{yy} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + K_{zz} \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + v_d \frac{\partial C}{\partial z} - \Lambda C$$

termine di impoverimento

## **Bibliografia Essenziale**

### **Deposizioni**

R. Sozzi (2003): La Micrometeorologia e la Dispersione degli Inquinanti in Aria (APAT- CTN-ACE)

J.H. Seinfeld, S.N. Pandis (2006): Atmospheric Chemistry and Physics 2° Ed – J.Wiley&Sons

M.Z. Jacobson (1999): Fundamentals of Atmospheric Modeling – Cambridge University Press