



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

Facoltà di Ingegneria

ISTITUTO DI IMPIANTI NUCLEARI

IT8500239

PROBLEMI DI MODELLISTICA NELLO STUDIO
SPERIMENTALE DEL MISCELAMENTO DELL'
IDROGENO CON L'ATMOSFERA INTERNA DEI
CONTENITORI DI SICUREZZA DEGLI IMPIANTI
NUCLEARI IN CONDIZIONI POST-LOCA

F. FINESCHI

S. LANZA

RP 365(79)

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA
Facoltà di Ingegneria
ISTITUTO DI IMPIANTI NUCLEARI

PROBLEMI DI MODELLISTICA NELLO STUDIO SPERIMENTALE DEL
MISCELAMENTO DELL'IDROGENO CON L'ATMOSFERA INTERNA DEI
CONTENITORI DI SICUREZZA DEGLI IMPIANTI NUCLEARI IN
CONDIZIONI POST-LOCA

F. Fineschi
S. Lanza

ATTI ISTITUTO DI IMPIANTI NUCLEARI
1979

INDICE

SOMMARIO	Pag. III
ELENCO DEI SIMBOLI	" IV
1. INTRODUZIONE	" 1
2. MODELLO MATEMATICO PER IL MISCELAMENTO DI DUE GAS PERFETTI	" 5
3. CRITERI DI SIMILITUDINE PER IL MISCELAMENTO DI DUE GAS PERFETTI IN UN MODELLO E IN UN PROTOTI PO GEOMETRICAMENTE SIMILI	" 10
4. CONCLUSIONI	" 16
APPENDICE A	" 19
BIBLIOGRAFIA	" 28

SOMMARIO

Negli impianti nucleari ad acqua leggera si possono realizzare rilasci di idrogeno dal sistema di confinamento uella pressione in seguito ad incidenti di perdita di refrigerante. La conoscenza della distribuzione spazio-temporale delle concentrazioni di idrogeno nei contenitori di sicurezza è importante ai fini di predisporre salvaguardie ingegneristiche per limitare e la probabilità di innesco e l'estensione di fiamme o esplosioni. Si dimostra che uno studio sperimentale su modello in scala è praticabile solo nel caso in cui nel contenitore e nel modello si realizzino condizioni di "piena turbolenza". Si illustrano quindi le linee generali di una metodologia atta a verificare con sufficiente "grado di confidenza" la validità delle ipotesi assunte.

ELENCO DEI SIMBOLI

- A e B : componenti la miscela gassosa, vengono usati anche per indicare genericamente le proprietà molecolari dei due componenti ($M_A, \sigma_A, \epsilon_A; M_B, \sigma_B, \epsilon_B$).
- C_p, C_{pA}, C_{pB} : calore specifico della miscela, di A e di B.
- c_p, c_{pA}, c_{pB} : calore specifico molare della miscela, di A e di B.
- $D, D_M = \frac{\mu}{\rho}, D_T = \frac{K}{C_{p0}}$: diffusività molecolare, di quantità di moto, termica della miscela; un eventuale soprassegno indica i valori medi.
- D^T, D_M^T, D_T^T : diffusività turbolente della miscela.
- $D^* = \frac{D}{D_0}$: con D_0 diffusività molecolare di riferimento.
- f_D, f_μ, f_K : funzioni che esprimono la dipendenza di D, μ, K dalle caratteristiche molecolari di A e B, nonché per μ e K anche dalla composizione della miscela.
- g_x, g_y, g_z : componenti del vettore accelerazione di gravità rispetto alle coordinate spaziali x, y, z .
- g : modulo del vettore accelerazione di gravità.
- $g_x^*, g_y^*, g_z^* = \frac{g_x}{g}, \frac{g_y}{g}, \frac{g_z}{g}$: componenti adimensionalizzate dell'accelerazione di gravità.
- H_A e H_B : entalpie molari di A e B.
- L_0 : lunghezza caratteristica del sistema.
- \bar{L} : scala delle lunghezze.
- M : peso molecolare della miscela = $X_A M_A + X_B M_B = M_0 X^*$
- M_A e M_B : pesi molecolari di A e B.
- M_0 : peso molecolare della miscela alla composizione di riferimento = $X_{A0} M_A + X_{B0} M_B$.

P	:	pressione assoluta.
P_0	:	pressione di riferimento.
P^*	:	P/P_0 , pressione adimensionalizzata.
\bar{P}	:	scala delle pressioni.
R	:	costante dei gas perfetti.
T	:	temperatura assoluta.
T_0	:	temperatura di riferimento.
T^*	:	T/T_0 , temperatura adimensionalizzata.
\bar{T}	:	scala delle temperature.
t	:	coordinata temporale.
t^*	:	$t \frac{V_0}{L_0}$, coordinata temporale adimensionalizzata.
\bar{t}	:	scala dei tempi.
V_0	:	modulo della velocità di riferimento.
\bar{V}	:	scala delle velocità.
\vec{v}	:	velocità media della miscela = $\omega_A \vec{v}_A + \omega_B \vec{v}_B$
\vec{v}_A e \vec{v}_B	:	velocità di A e B.
v_x, v_y, v_z	:	componenti della velocità media della miscela <u>se</u> condo le coordinate geometriche.
\vec{v}^*	:	\vec{v}/V_0 , velocità adimensionalizzata della miscela.
v_x^*, v_y^*, v_z^*	:	$v_x/V_0, v_y/V_0, v_z/V_0$, componenti adimensionalizzate della velocità.
---oo0oo---		
x, y, z	:	coordinate spaziali.
x^*, y^*, z^*	:	coordinate adimensionalizzate = $x/L_0, y/L_0, z/L_0$.

- ϵ : energia caratteristica di interazione tra le molecole.
- k : conducibilità termica della miscela
 $k^* = k/k_0$ con k_0 conducibilità termica di riferimento.
- μ : viscosità della miscela; $\mu^* = \mu/\mu_0$ con μ_0 viscosità di riferimento.
- ρ : densità della miscela = $\rho_A + \rho_B = PM/RT$ per gas perfetti.
- $\Delta\rho$: differenza di densità dalla miscela di riferimento.
- ρ_A, ρ_B : densità di A e di B.
- σ : diametro di collisione delle molecole.

} un eventuale
soprassegno
indica i va-
lori medi

ϕ_v : funzione di dissipazione = $2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_y}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 \right] +$
 $+ \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right)^2 +$
 $+ \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right)^2 - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2$

ϕ_{v^*} : funzione di dissipazione adimensionalizzata dove al posto di v_x, v_y, v_z compaiono v_x^*, v_y^*, v_z^* e al posto di x, y, z ; x^*, y^*, z^* .

ω_A e ω_B : frazioni di massa di A e B = $\rho_A/\rho, \rho_B/\rho$.

X_A : frazione molare di A.

X_B : = $1 - X_A$ = frazione molare di B.

X_{A_0} : frazione molare di riferimento.

X^* : frazione molare di A adimensionalizzata = $\frac{X_A + \frac{M_B}{M_A - M_B}}{X_{A_0} + \frac{M_B}{M_A - M_B}} = \frac{M}{M_0}$

\bar{x} : scala delle concentrazioni.

OPERATORI

$$\nabla \text{ (nabla)} = \frac{\partial}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial}{\partial z} \vec{k}$$

$$\nabla^2 \text{ (laplaciano)} = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

$$\frac{D}{Dt} \text{ (derivata sostanziale)} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)$$

• : prodotto scalare di due vettori.

* : indica che negli operatori appaiono le variabili adimensionalizzate.

GRUPPI ADIMENSIONALI

$$Re = \frac{\bar{\rho} V_0 L_0}{\bar{\mu}} = \frac{V_0 L_0}{\bar{\nu}_M}$$

$$Re^T = \frac{V_0 L_0}{\bar{\nu}_M^T}$$

$$Pr = \frac{\bar{\mu} \bar{c}_p}{\bar{k}} = \frac{\bar{\nu}_M}{\bar{\nu}_T}$$

$$Pr^T = \frac{\bar{\nu}_M^T}{\bar{\nu}_T^T}$$

$$Sc = \frac{\bar{\mu}}{\bar{\rho} \bar{D}} = \frac{\bar{\nu}_M}{\bar{D}}$$

$$Sc^T = \frac{\bar{\nu}_M^T}{\bar{D}^T}$$

$$Fr = \frac{V_0^2}{gL_0}$$

$$Fr \text{ (modificato)} = \frac{V_0^2}{gL_0} \frac{\bar{\rho}}{\Delta \rho}$$

$$\text{Br} = \frac{\bar{\mu} V_0^2}{\bar{k} T_0}$$

$$\text{Eu} = \frac{P_0}{\rho V_0^2} = \frac{RT_0}{M_0 V_0^2}$$

1. INTRODUZIONE

Durante l'evoluzione di un incidente ad un impianto nucleare che danneggi il sistema di confinamento della pressione, è possibile che si registrino all'interno del contenitore di sicurezza rilasci di idrogeno tali da rendere possibile l'innesco di fiamme od esplosioni, nell'intero volume o in alcune parti di esso, pericolose per l'integrità del contenimento e dei sistemi, rilevanti ai fini della sicurezza, che in esso sono parzialmente o interamente contenuti.

Varie salvaguardie sono previste per impedire il formarsi di volumi, sufficientemente estesi da essere realmente pericolosi, in cui le concentrazioni di idrogeno e ossigeno siano interne al campo di infiammabilità.

Per la scelta, il progetto, la localizzazione di questi sistemi è necessario conoscere, con la migliore approssimazione possibile, le distribuzioni spazio-temporali delle concentrazioni che si potrebbero verificare in alcune tipiche condizioni incidentali in assenza o in presenza di una o più di queste salvaguardie.

Escludendo la possibilità di poter compiere prove sperimentali in prototipi nelle reali condizioni incidentali, per poter stimare le distribuzioni e i valori delle concentrazioni, occorre procedere alla formulazione di modelli del trasporto dell'idrogeno con i quali stabilire, tra le variabili interessanti il fenomeno, una serie di correlazioni simulanti, con sufficiente correttezza e approssimazione, il fenomeno fisico reale.

Questi modelli potranno essere: matematici, ovvero formulati con una serie di equazioni integrali o differenziali, tante quante sono le variabili dipendenti del sistema e con una serie di condizioni al

contorno e iniziali, dipendenti dal grado di queste equazioni e risolvibili con i metodi matematici normalmente usati; fisici, ovvero modelli realizzati in similitudine geometrica, cinematica, dinamica, termica e chimica con il prototipo, su cui condurre quelle prove sperimentali e quelle misure che si era impossibilitati ad effettuare direttamente sul prototipo, per risalire quindi, attraverso gli appropriati "rapporti di scala", ai valori che si verificherebbero nella realtà.

Il modello matematico offre la possibilità di una maggiore agilità di gestione, importante per uno studio parametrico del fenomeno; soffre d'altra parte dei limiti inerenti alla trasposizione matematica di un fenomeno fisico quali: l'inadeguatezza di certe formulazioni (per es. di relazioni semiempiriche o addirittura la semplificazione di esso in "leggi", la cui validità è provata solo in un dominio limitato) e l'approssimazione della sua risoluzione con i metodi numerici che in generale, per la complessità del problema, è necessario adottare. Spesso poi, come nel caso in esame, le difficoltà, sia di ordine concettuale che risolutivo, sono tali da sconsigliare (perchè scarsamente attendibile o addirittura antieconomica) di percorrere questa strada e intraprendere invece l'altra.

La definizione del modello fisico implica la determinazione di "rapporti di scala" tra le varie grandezze del prototipo e del modello (come lunghezze, velocità, forze, pressioni, temperature, concentrazioni) che soddisfino alcuni criteri di similitudine essenziali per garantire la rappresentatività del modello rispetto al fenomeno considerato. Tali criteri di similitudine si esplicitano come uguaglianza tra modello e prototipo di alcuni gruppi adimensionali, ovvero di alcuni prodotti di potenze delle grandezze fisiche influenzan-

ti il fenomeno. Il numero dei gruppi adimensionali, cioè dei criteri di similitudine, e il valore degli esponenti delle potenze che vi compaiono sono determinati tramite i metodi dell'analisi adimensionale. Spesso è impossibile trovare "rapporti di scala" (diversi da 1) che riescano a soddisfare tutti i criteri di similitudine ed allora sarà necessario non considerare alcuni di essi: è cioè necessario possedere a priori delle informazioni che ci consentano di valutare quali tra i criteri di similitudine siano trascurabili e comunque tali da non inficiare la possibilità di estrapolare correttamente i risultati ottenuti sul modello al prototipo, almeno nei limiti di approssimazione richiesti.

Questo problema è generalmente conosciuto come valutazione e minimizzazione dell'"effetto scala". Per poter trascurare alcuni di questi criteri, bisogna conoscere il significato fisico dei gruppi il quale appare più facilmente se essi sono ricavati da un processo di adimensionalizzazione delle equazioni con cui si può descrivere il fenomeno, piuttosto che direttamente dall'analisi dimensionale.

Le due strade vengono così in qualche misura ad incontrarsi in certi passaggi obbligati, come nella valutazione della dipendenza di certe caratteristiche fisiche (come densità, viscosità, conducibilità termica) dalle variabili di stato (come temperatura, concentrazione, etc.) per cui bisogna comunque imporre "leggi" matematiche o quantomeno introdurre parametri e costanti che da queste "leggi" sono però definiti.

Le due strade non sono quindi indipendenti, come ad un primo esame potrebbero apparire, e i pregi dell'un metodo possono essere validamente usati per limitare i difetti dell'altro, una volta scelto quale dei due può essere più consono ad offrire una soluzione affidabile.

In ogni caso per riuscire a definire un modello (praticamente integrabile se matematico o in cui sia possibile effettuare realmente delle prove sperimentali, se fisico) è necessario molto spesso, e il caso in esame ne è un esempio, formulare alcune ipotesi semplificative, la validità delle quali è il presupposto necessario per giudicare della bontà dei risultati ottenuti. Inoltre la conoscenza delle condizioni iniziali e al contorno è necessaria per definire il problema e quindi rendere possibile la determinazione o delle costanti di integrazione o delle condizioni sperimentali in cui devono essere condotte le prove.

Risolvere per via matematica il problema del miscelamento dell'idrogeno con l'aria umida presente all'interno di un contenitore di sicurezza di un impianto nucleare dopo LOCA, appare estremamente difficile anche facendo delle ipotesi molto semplificative. Un esempio di questo è riportato nel paragrafo seguente.

2. MODELLO MATEMATICO PER IL MISCELAMENTO DI DUE GAS PERFETTI

Nel caso in esame si è proceduto alla formulazione di un modello matematico in alcune ipotesi semplificative.

I ipotesi: La miscela gassosa considerata è una miscela binaria di gas perfetti.

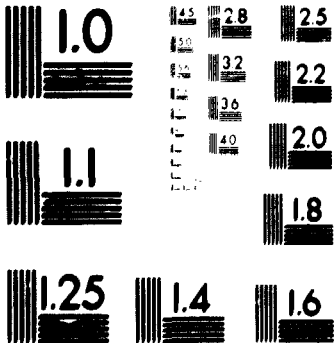
II ipotesi: Il legame esistente tra le componenti del tensore delle tensioni e i gradienti di velocità è quello caratteristico di un fluido newtoniano con un valore della viscosità di massa trascurabile (conformemente a quanto ipotizzato in processi simili che coinvolgono gas a bassa densità).

III ipotesi: Il flusso di massa relativo al moto medio della miscela è determinato esclusivamente dalla diffusione ordinaria (dovuta ai gradienti di concentrazione), ovvero si ritengono non presenti o comunque trascurabili i contributi della diffusione forzata e della diffusione termica.

IV ipotesi: Il flusso totale di energia relativo al moto medio della miscela è determinato esclusivamente dalla conduzione termica e dai flussi di energia collegati all'interdiffusione molecolare; si trascurano cioè gli effetti dovuti all'irraggiamento e all'effetto Dufour.

Le equazioni fondamentali usate per descrivere il fenomeno sono, nelle formulazioni date in^{1/}:

- Due equazioni di continuità (principio di conservazione della massa) scritte in base a bilanci di materia condotti, uno su tutta la miscela e, l'altro, su una delle due specie chimiche;



MICROCOPY RESOLUTION TEST CHART
NATIONAL BUREAU OF STANDARDS
STANDARD REFERENCE MATERIAL 1010a
(ANSI and ISO TEST CHART No. 2)

- Tre equazioni di moto (principio della conservazione delle quantità di moto) scritte per ciascuna delle tre componenti spaziali della velocità;
- Una equazione dell'energia (principio della conservazione dell'energia, ovvero primo principio della termodinamica).

TOTALE: 6 equazioni.

Le variabili dipendenti (intendendo con indipendenti le coordinate spazio-temporali) sono:

- Le tre componenti spaziali della velocità;
- La temperatura;
- La frazione di massa.

TOTALE: 6 variabili dipendenti.

Nel dettaglio:

Equazione di continuità totale della miscela A + B (idrogeno + aria)

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad ; \quad \text{con } \rho = \frac{PM}{RT} \quad \text{si ottiene}$$

$$\rho \left(-\frac{1}{T} \frac{DT}{Dt} + \frac{1}{P} \frac{DP}{Dt} + \frac{1}{M} \frac{DM}{Dt} + \nabla \cdot \vec{v} \right) = 0$$

$$-\frac{D \ln T^x}{Dt^x} + \frac{D \ln P^x}{Dt^x} + \frac{D \ln X^x}{Dt^x} + \nabla^x \cdot \vec{v}^x = 0$$

Equazione di continuità di A (idrogeno)

$$\frac{D}{Dt} \rho_A = -\rho_A (\nabla \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot \rho \mathcal{D} \nabla \omega_A$$

$$\omega_A \frac{D\rho}{Dt} + \rho \frac{D\omega_A}{Dt} = -\rho \omega_A (\nabla \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot \rho \mathcal{D} \nabla \omega_A$$

Essendo per l'equazione di continuità totale $\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0$

$$\rho \frac{D\omega_A}{Dt} = \nabla \cdot \rho D \nabla \omega_A \quad ;$$

sostituendo ad ω_A la sua espressione in funzione di X_A , M_A , M_B e M si ottiene

$$\frac{PM}{RT} \frac{M_A M_B}{M^2} \frac{DX_A}{Dt} = \nabla \cdot \frac{PM}{RT} D \frac{M_A M_B}{M^2} \nabla X_A \quad ;$$

tenendo conto che $D = D(A, B, T, P)$ (vedi di seguito) e adimensionalizzando:

$$\frac{D \ln X^*}{Dt^*} = \frac{D}{L_0 V_0} \left\{ \nabla^{*2} \ln X^* + \nabla^* \ln X^* \cdot \left[\left(\frac{\partial \ln D^*}{\partial \ln T^*} - 1 \right) \nabla^* \ln T^* + \left(\frac{\partial \ln D^*}{\partial \ln P^*} + 1 \right) \nabla^* \ln P^* \right] \right\}$$

Equazioni di moto

Per una qualsiasi delle componenti di \vec{v} , per esempio v_x , si può scrivere:

$$\rho \frac{Dv_x}{Dt} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} - \frac{2}{3} \mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] + \rho g_x \quad ;$$

essendo $\mu = \mu(A, B, T, X)$ (vedi di seguito) e adimensionalizzando:

$$\begin{aligned} \frac{Dv_x}{Dt^*} = & -\frac{RT_0}{M_0 V_0^2} \frac{T^*}{X^*} \frac{\partial \ln P^*}{\partial x^*} + \left(\frac{L_0}{g V_0^2} \right) g_x^* + \frac{D_M}{V_0 L_0} \left[\nabla^{*2} v_x^* + \frac{1}{3} \frac{\partial}{\partial x^*} (\nabla^* \cdot \vec{v}^*) \right] + \\ & + \left(\frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln T^*} \nabla^* \ln T^* + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln X^*} \nabla^* \ln X^* \right) \cdot \left(\nabla^* v_x^* + \frac{\partial}{\partial x^*} \vec{v}^* \right) + \\ & - \frac{2}{3} \left(\frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln T^*} \frac{\partial \ln T^*}{\partial x^*} + \frac{\partial \ln \mu^*}{\partial \ln X^*} \frac{\partial \ln X^*}{\partial x^*} \right) \cdot (\nabla^* \cdot \vec{v}^*) \end{aligned}$$

Analoghe equazioni si scrivono per v_y e v_z .

Equazione dell'energia

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot K \nabla T + \mu \phi_v + \frac{DP}{Dt} + \rho \frac{D}{M_A} (\nabla \omega_A \cdot \nabla H_A) + \rho \frac{D}{M_B} (\nabla \omega_B \cdot \nabla H_B)$$

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = KT \left\{ \nabla^2 \ln T^* + (\nabla \ln T^*) \cdot \left[(\nabla \ln T^*) + (\nabla \ln K^*) \right] \right\} + \mu \phi_v + \frac{DP}{Dt} +$$

$$+ \frac{P}{R} D(C_{pA} - C_{pB}) \frac{M_A M_B}{M_A - M_B} (\nabla \ln T^* \cdot \nabla \ln X^*)$$

Essendo $K = K(A, B, T, X)$ (vedi in seguito) e adimensionalizzando:

$$\frac{D \ln T^*}{Dt^*} = \frac{D_T}{V_0 L_0} \left\{ \nabla^{*2} \ln T^* + \nabla^* \ln T^* \cdot \left[\left(\frac{\partial \ln K^*}{\partial \ln T^*} + 1 \right) \nabla^* \ln T^* + \frac{\partial \ln K^*}{\partial \ln X^*} \nabla^* \ln X^* \right] \right\} +$$

$$+ \left(\frac{R}{c_p} \frac{D_M}{V_0 L_0} \frac{V_0^2 M}{RT_0} \right) \frac{X^*}{T^*} \phi_{v^*} + \frac{R}{c_p} \frac{D \ln P^*}{Dt^*} - \frac{D}{L_0 V_0} \left[\frac{\frac{c_{pA}}{M_A} - \frac{c_{pB}}{M_B}}{c_p \left(\frac{1}{M_A} - \frac{1}{M_B} \right)} \right] (\nabla^* \ln T^* \cdot \nabla^* \ln X^*)$$

Perchè il sistema sia chiuso è necessario, oltre ad imporre le condizioni iniziali e al contorno, esplicitare i legami funzionali che legano ρ , D , μ , K e C_p alle coordinate termodinamiche P , T ed X .

Per la miscela aria-idrogeno, nel campo di temperatura ($0 \div 120$ °C) e di pressione ($1 \div 3$ atm) di interesse, per un contenitore di sicurezza di un impianto nucleare, sono utilizzabili per D , μ , K le relazioni valide per gas a bassa densità^{/2/} riportate in App. A, mentre si può assumere che $c_p = c_{pA} = c_{pB} = \text{costante} = 7 \text{ cal/g-mole } ^\circ\text{K}$.

In generale:

$$\rho = \frac{P}{RT} [X(M_A - M_B) + M_B] = \frac{P_0}{RT_0} [X_0(M_A - M_B) + M_B] \frac{P^*}{T^*} X^*$$

$$D = D(A, B, P_0, T_0, P^*, T^*)$$

$$\mu = \mu(A, B, T_0, X_0, T^*, X^*)$$

$$K = K(A, B, T_0, X_0, T^*, X^*)$$

$$C_p = \frac{c_p}{M} = C_p(A, B, X_0, X^*)$$

Nel caso in cui il moto sia turbolento e limitando l'indagine al la determinazione della componente non stocastica delle velocità, pressioni, temperature, concentrazioni, la forma delle equazioni ri mane inalterata se le diffusività di quantità di moto, termica e di massa sono ritenute comprensive anche delle diffusività turbolente (ammesso che queste siano definibili anche nel caso in esame). In tal caso però le diffusività non risulteranno solo dipendenti dal tipo di gas e dalle coordinate termodinamiche ma anche dal campo di velocità ed i valori possono essere determinati esclusivamente per via sperimentale.

Da quanto detto è evidente che le difficoltà che si presentano nella soluzione matematica appaiono praticamente insuperabili anche con le ipotesi semplificative formulate. Risulta quindi opportuno rivolgere l'attenzione alla possibilità di identificare un modello fisico; per dare una prima valutazione della complessità dei problemi che potrebbero sorgere in questa ricerca si è ritenuto utile con siderare valide le ipotesi semplificative già formulate per il modello matematico.

3. CRITERI DI SIMILITUDINE PER IL MISCELAMENTO DI DUE GAS PERFETTI
IN UN MODELLO E IN UN PROTOTIPO GEOMETRICAMENTE SIMILI

La similitudine tra modello e prototipo richiede che risultino uguali tra i due sistemi:

- A) Le equazioni di bilancio espresse in termini adimensionali con le caratteristiche di trasporto esplicitate in funzione delle coordinate termodinamiche adimensionalizzate;
- B) Le condizioni iniziali e al contorno in termini adimensionali.

Per sistemi descritti dal modello matematico illustrato nel paragrafo precedente, il punto A) è soddisfatto quando tra i due sistemi sono uguali i seguenti gruppi:

- 1) $\frac{D(A, B, P_0, T_0, P^x, T^x)}{L_0 V_0}$
- 2) $\frac{T_0}{M_0 V_0^2}$
- 3) $\frac{L_0}{V_0^2}$
- 4) $\frac{D_M(A, B, P_0, T_0, X_0, P^x, T^x, X^x)}{L_0 V_0}$
- 5) $\frac{D_T(A, B, P_0, T_0, X_0, P^x, T^x, X^x)}{L_0 V_0}$
- 6) $c_p = c_{pA} = c_{pB}$
- 7) $\frac{\partial \ln D^x}{\partial \ln T^x}$
- 8) $\frac{\partial \ln D^x}{\partial \ln P^x}$

- 9) $\frac{\partial \ell_{n\mu}^*}{\partial \ell_{nT}^*}$
- 10) $\frac{\partial \ell_{n\mu}^*}{\partial \ell_{nX}^*}$
- 11) $\frac{\partial \ell_{nK}^*}{\partial \ell_{nT}^*}$
- 12) $\frac{\partial \ell_{nK}^*}{\partial \ell_{nX}^*}$

Ne consegue che, una volta fissata una scala delle lunghezze tra prototipo e modello, \bar{L} :

- a) risulta determinata la scala delle velocità: $\bar{V} = \bar{L}$ (dalla 3)) e quindi la scala dei tempi $\bar{t} = \bar{L}^{\frac{1}{2}}$
- b) anche nel modello i gas prescelti devono essere entrambi biatomici se lo sono nel prototipo (dalla 6))
- c) i rapporti tra le diffusività molecolari, di quantità di moto e termiche nei punti e negli istanti omologhi del prototipo e del modello devono essere costanti e uguali a $\bar{L}^{\frac{3}{2}}$ (dalle 1), 4), 5) e 3)).

In App. A si mostra che, se nel prototipo c'è una miscela aria-H₂ nel campo di temperatura e pressione di interesse per i contenitori di sicurezza di un impianto nucleare, si può ipotizzare che valgano le correlazioni:

$$D = f_D(A, B) \frac{T^{1.7}}{P}$$

$$D_M = f_M(A, B, X) \frac{T^{1.7}}{P}$$

$$D_T = f_T(A, B, X) \frac{T^{1.7}}{P} ;$$

è quindi in pratica necessario (impossibilità di trovare in natura

un'altra coppia di gas biatomici capace di soddisfare a queste condizioni) usare nel modello ancora idrogeno ed aria nelle stesse frazioni molari del prototipo.

$$\text{In tal caso: } \bar{T} = \bar{L} \quad \text{e} \quad \bar{p} = \bar{L}^{0.2}$$

La difficoltà di realizzare la scala delle temperature, potrebbe in realtà impedire l'uso di modelli piccoli rispetto al prototipo. Inoltre le correlazioni che legano le caratteristiche di trasporto della miscela alle coordinate termodinamiche sono strettamente valide nel campo di temperatura esistente nel prototipo e non valgono, con gli stessi limiti di approssimazione, in altri campi di temperatura, per cui anche le 7), 9) e 11) non sarebbero in pieno verificate.

Nel caso in cui lo scostamento delle coordinate termodinamiche da un valore medio sia tanto piccolo da poter considerare lineare l'andamento di ogni funzione di queste coordinate rispetto ad una coordinata, fissati i valori delle altre (ovvero ipotizzando sufficientemente approssimato lo sviluppo in serie di Taylor di queste funzioni arrestato al termine di primo grado), i gruppi adimensionali che compaiono nei criteri di similitudine sono:

$$\text{Re} = \frac{\bar{\rho} V_0 L_0}{\bar{\mu}}, \quad \text{Sc} = \frac{\bar{\mu}}{\bar{\rho} \bar{D}}, \quad \text{Fr} = \frac{V_0^2}{g L_0}, \quad \text{Pr} = \frac{\bar{\mu} \bar{C}_p}{\bar{k}}$$

$$\text{Br} = \frac{\bar{\mu} V_0^2}{\bar{k} T_0}, \quad \frac{\partial \mathcal{D}^*}{\partial T^*}, \quad \frac{\partial \mu^*}{\partial T^*}, \quad \frac{\partial k^*}{\partial T^*}, \quad \frac{\partial \mu^*}{\partial X^*}, \quad \frac{\partial k^*}{\partial X^*},$$

$$\frac{R}{c_p} = \frac{R}{c_{pA}} = \frac{R}{c_{pB}};$$

dove ciascuna caratteristica di trasporto e ciascuna derivata è calcolata per i valori medi delle coordinate termodinamiche.

Non è quindi più necessario che la condizione c) sia soddisfatta

in tutti i punti e in tutti gli istanti ma sarebbe sufficiente che essa fosse rispettata nella condizione "media" dei due sistemi. Si può utilizzare cioè, per soddisfare i criteri di similitudine, sia la scelta dei gas da utilizzare nel modello, sia la scelta dei valori medi delle coordinate termodinamiche dato che entrambi queste scelte influenzano le caratteristiche di trasporto.

E' possibile in pratica, pur in quest'ultima ipotesi, trovare due gas biatomici tali che riescano a soddisfare la similitudine del modello al prototipo, in modo che le scale di temperatura e di pressione siano realizzabili senza troppe difficoltà (tenendo presente che comunque la frazione molare può assumere solo valori compresi tra 0 e 1)? L'impresa pare disperata!

Lo stesso tipo di problema si pone persino quando sia ipotizzabile che:

- 1) siano pressochè nulle le variazioni di temperatura;
- 2) che le velocità siano sufficientemente piccole da poter considerare nullo il loro effetto sui gradienti di pressione ($\frac{\partial P}{\partial x} = \bar{\rho} g_x$);
- 3) che le caratteristiche di trasporto siano pressochè costanti e sia trascurabile la dipendenza di ρ dalla pressione, mentre la dipendenza di ρ dalle frazioni molari sia importante solo nel termine che nell'equazione del moto indica le forze gravitazionali per unità di volume ed anche in questo caso tale dipendenza sia approssimativamente lineare.

(in tal caso i gruppi adimensionali sono: $Re, Sc, \frac{Fr \bar{\rho}}{\Delta \rho}$).

Stessi identici problemi si presentano nel caso di convezione naturale, ovvero nel caso in cui fosse trascurabile l'ingresso di quantità di moto dalla sorgente nel contenitore; infatti sostituendo nelle equazioni a V_0 (che perderebbe di significato) un valore

della velocità di riferimento pari a $\frac{DM_0}{L_0}$ o $\sqrt{\frac{RT_0}{M_0}}$ (o analoghi) sarebbero ancora valide le considerazioni fatte in b) e c).

Le difficoltà incontrate sono quindi collegate essenzialmente alla necessità che nei due sistemi, prototipo e modello, siano rispettate le uguaglianze tra i rapporti delle caratteristiche di trasporto D , D_M , D_T ; è quindi possibile superarli solo nel caso in cui l'influenza di tali caratteristiche sul fenomeno sia pressochè nulla.

Tale condizione è soddisfatta nel caso in cui il regime di moto nei due sistemi risulti talmente turbolento da poter considerare trascurabile D , D_M e D_T rispetto alle analoghe caratteristiche turbolente D^T , D_M^T , D_T^T , dipendenti dalle componenti stocastiche della velocità, temperatura, pressione, frazione molare. Teoria ed esperienza insegnano che i rapporti tra queste caratteristiche turbolente sono pressochè costanti e definite una volta definiti la geometria del sistema e il tipo di fenomeno considerato. Inoltre per un regime di turbolenza pienamente sviluppato il fenomeno è indipendente da Re e i Re turbolenti (scala della turbolenza) risultano automaticamente uguali in due sistemi geometricamente simili.

Fatta tale ipotesi è quindi possibile con maggior facilità soddisfare ai criteri di similitudine, non essendo più come prima condizionante la scelta dei gas, e quindi delle temperature, pressioni e frazioni molari di prova. Per questo motivo non risulta importante l'ipotesi che nei contenitori ci siano solo due gas perfetti e si può quindi considerare anche la presenza di vapor d'acqua.

Certamente questa ipotesi di lavoro deve essere sperimentalmente confermata come vera nella grandissima parte di volume dei due sistemi. Ci saranno comunque zone di moto laminare o poco turbolente (per es. in vicinanza di pareti) in cui i due sistemi non si comporteranno

no in modo simile. Ciò implicherà dei problemi, qualora certi fenomeni di trasporto interessino prevalentemente queste zone (per es. cessione di calore da parte delle pareti) perchè dovranno in ogni modo risultare simili nei due sistemi le condizioni al contorno della zona turbolenta; sarà perciò necessario imporre condizioni fittizie al contorno geometrico del modello tali da rendere simili al prototipo le condizioni al contorno della zona turbolenta.

In altre parole la difficoltà maggiore che si incontrerà in questo caso sarà quella di progettare un modello che rispetti nella zona turbolenta le condizioni di similitudine geometrica, cinematica, dinamica, termica e chimica con la zona turbolenta del prototipo. Tali difficoltà potranno essere superate facilmente solo se le zone non pienamente turbolente sono di ampiezza trascurabile rispetto alle dimensioni dei due sistemi e se non sono determinanti nell'evoluzione del fenomeno da studiare. In questo caso, se il prototipo fosse in condizioni pressoché isoterme ed i gradienti della componente non stocastica della pressione fossero praticamente indipendenti dal campo della componente non stocastica della velocità e la componente non stocastica della densità variasse linearmente rispetto ad un valore medio solo al variare della frazione molare, la similitudine sarebbe verificata soddisfacendo come unico criterio di similitudine l'uguaglianza dei numeri di Froude modificato: $\frac{V^2 \rho}{Lg\Delta\rho}$. Sarebbe quindi possibile valutare i valori non stocastici delle variabili di interesse nel problema a partire dai valori misurati sperimentalmente su un modello a patto che le ipotesi siano verificate realmente e conoscendo con precisione le condizioni iniziali e al contorno, almeno quelle importanti una volta ammessa la piena turbolenza.

4. CONCLUSIONI

Nella stragrande maggioranza dei casi non si riesce a rispettare una completa similitudine tra modello e prototipo, infatti, spesso, non è obiettivamente possibile soddisfare contemporaneamente tutti i criteri di similitudine.

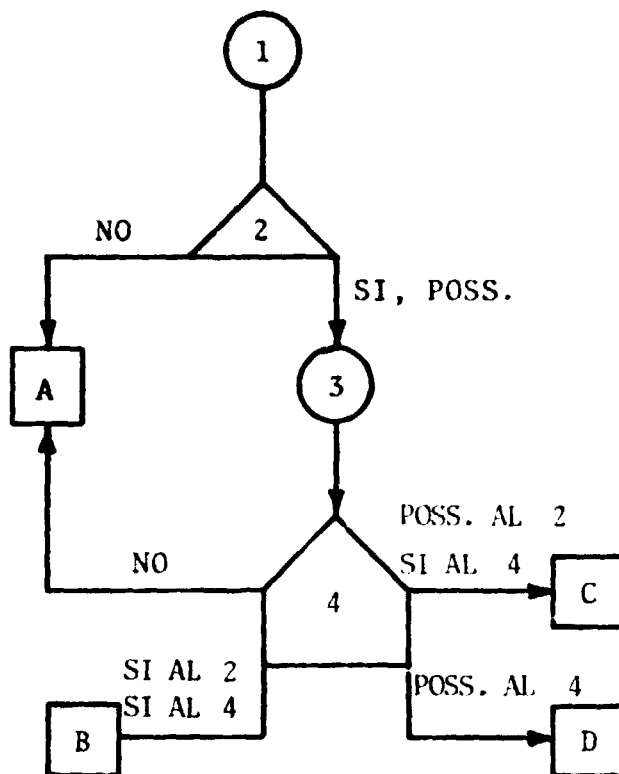
Non tener conto di alcuni di essi, significa presumere valide alcune ipotesi sul fenomeno studiato; la validità di esse deve essere verificata per acquisire un minimo di "confidenza" sui dati ottenuti dalle prove sperimentali condotte sul modello.

Lo studio su un modello in scala del trasporto dell'idrogeno in un contenitore di sicurezza di un impianto nucleare a seguito di LOCA appare dalle considerazioni fatte nei paragrafi precedenti possibile solo ipotizzando che si realizzino condizioni di turbolenza pienamente sviluppata, cioè che il trasporto sia indipendente da Re e dalle caratteristiche fisiche (D , μ e K) dei gas e vapori ivi presenti. Zone in cui tale turbolenza non esistesse, dovrebbero essere di estensione trascurabile e dovrebbero non essere interessate da fenomeni che potrebbero influire sul trasporto dell'idrogeno (per esempio le pareti dovrebbero potersi considerare praticamente adiabatiche).

Altre ipotesi fondate nell'assunto che nel contenitore vi sia una miscela ideale di aria e idrogeno, ammesso e non concesso che sia trascurabile la presenza di vapor d'acqua, non permetterebbero la realizzazione pratica di prove sperimentali in similitudine sul modello o per la difficoltà di operare a temperature troppo basse (poco superiori allo 0 assoluto) o per l'impossibilità di trovare miscele di gas simulanti il fenomeno del trasporto dell'idrogeno in

campi di temperatura sperimentalmente più accessibili.

Una volta individuata come praticabile la sola ipotesi della "pie
na turbolenza" resta però da dimostrare la sua validità e nel conte-
nitore di sicurezza e nel modello per simili condizioni al contorno
ed iniziali secondo lo schema logico illustrato in Fig. 1.



- 1- Formulazioni delle ipotesi necessarie perchè il fenomeno possa essere studiato sperimentalmente su un modello di scala.
 - 2- Verifica della validità delle ipotesi nel prototipo in base a conoscenze teoriche e sperimentali già acquisite o da acquisire. Le risposte a questa verifica possono essere: Non verificate (NO), verificate (SI), è possibile che siano verificate (POSS.).
 - 3- Realizzazione del modello e delle prove. Determinazione delle condizioni per cui nel modello si verificano le ipotesi fatte.
 - 4- Verifica se nel prototipo esistono condizioni simili a quelle che nel modello portano a soddisfacimento delle ipotesi. Le risposte alla verifica possono essere: NO, SI, POSS.
- A- Non è possibile effettuare lo studio del fenomeno con modelli in scala.
B- Lo studio su modello porta a risultati validi per il prototipo.
C- In mancanza di ulteriori informazioni può essere assunto valido per il prototipo lo studio fatto sul modello. Niente contrasta le ipotesi di lavoro formulate, ma non esistono prove della loro effettiva validità.
D- Il livello di conoscenza delle condizioni in cui il fenomeno evolve nel prototipo è troppo basso. Lo studio su modello offre la possibilità di individuare quali informazioni è necessario avere sul prototipo.

Fig. 1 - Schema logico di individuazione dei limiti e del significato di uno studio sperimentale di un fenomeno con modelli in scala.

- APPENDICE A -

DIPENDENZA DELLA VISCOSITA', CONDUCIBILITA' TERMICA, DIFFUSIVITA' MOLECOLARE DALLA TEMPERATURA E DALLE FRAZIONI MOLARI PER MISCELE BINARIE H₂ - ARIA "A BASSA DENSITA' "

I valori della viscosità e della conducibilità termica di una miscela di gas "a bassa densità" sono stimati con sufficiente attendibilità dalla relazione semiempirica di Wilke^{/3/}:

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n X_j \phi_{ij}}$$

$$k_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i k_i}{\sum_{j=1}^n X_j \phi_{ij}}$$

con n = numero dei componenti la miscela

μ_i = viscosità del componente i-esimo puro

X_i = frazione molare della specie i

$$\phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{\frac{1}{4}}\right]^2$$

M_i = peso molecolare della specie i

k_i = conducibilità termica del componente i-esimo puro.

La viscosità di un componente puro può essere stimata dalla relazione^{/1/}:

$$\mu_i = 2.6693 \cdot 10^{-5} \frac{\sqrt{M_i T}}{\sigma_i^2 \Omega \mu}$$

con μ_i [g cm⁻¹ sec⁻¹] viscosità

T [°K] temperatura assoluta

σ_i [Å] diametro di collisione^{/1/}

Ω_μ funzione adimensionale della variabile adimensionale $\frac{KT}{\epsilon_i}$ /4/

K costante di Boltzman = $1.380 \cdot 10^{-16}$ [erg molecole⁻¹ °K⁻¹]

ϵ_i [erg molecole⁻¹] energia caratteristica di interazione tra le molecole^{/1/}

La conducibilità di un componente puro può essere stimata dai valori di viscosità:

$$/1/ k_i = \frac{15}{4} \frac{R}{M_i} \mu_i \quad (\text{monoatomico})$$

$$/5/ k_i = (c_{pi} + \frac{5}{4} R) \frac{\mu_i}{M_i} \quad (\text{poliatomico})$$

con R costante dei gas = $1.987 \text{ cal.g.mole}^{-1} \text{ °K}^{-1}$

c_{pi} calore specifico molare a pressione costante

$\approx 5 \text{ cal.g.mole}^{-1} \text{ °K}^{-1}$ (monoatomico)

$\approx 7 \text{ cal.g.mole}^{-1} \text{ °K}^{-1}$ (biatomico)

La diffusività molecolare di una miscela binaria di gas "a bassa densità" può essere stimata dalla relazione^{/1/}:

$$D = \frac{0.0018583 \sqrt{T^3 \left(\frac{1}{M_i} + \frac{1}{M_j} \right)}}{P \sigma^2 \Omega_D}$$

con D [cm².sec⁻¹] diffusività molecolare

P [atm] pressione

σ [Å] = $\frac{1}{2} (\sigma_i + \sigma_j)$ /4/

Ω_D funzione adimensionale della variabile $\frac{KT}{\epsilon}$ /4/

$\epsilon = \sqrt{\epsilon_i \epsilon_j}$ /4/

Perchè sia possibile affrontare sperimentalmente su un modello

in scala lo studio del trasporto dell'idrogeno nell'aria interna ad un contenitore è necessario (ma non sufficiente) che (Ved. equazioni riportate nel paragrafo 2 e quanto esposto nel paragrafo 3 del testo):

$$1) \mu = f_{\mu} T^{\alpha}$$

$$k = f_k T^{\beta}$$

$$D = f_D \frac{T^{\delta}}{P}$$

con f_{μ} , f_k , f_D funzioni delle caratteristiche molecolari dei componenti A e B (M , σ , ϵ) e f_{μ} e f_k anche della composizione della miscela.

$$2) \alpha = \beta = \delta - 1$$

Solo in questo caso infatti è possibile che $\bar{T} \neq 1$ e quindi $\bar{L} \neq 1$ (dato che $\bar{X} = 1$ perchè f_{μ} e f_k possano risultare uguali nei due sistemi).

Nelle tabelle 1, 2, 3 sono riportati i valori di μ , k e D di miscele aria-idrogeno di varia composizione, nel campo di temperatura interessante ai fini del fenomeno studiato, stimati attraverso le relazioni semiempiriche sopra citate. Nelle Tabelle 3, 4, 5 sono riportati i valori di f_D , f_{μ} e f_k ottenuti dividendo i valori calcolati di D , μ e k rispettivamente per $T^{1.7}$, $T^{0.7}$ e $T^{0.7}$.

Il valore assunto per α , β e $\delta - 1$ è stato dedotto analizzando graficamente la variazione di Ω_{μ} e Ω_D con la temperatura.

I valori di f_D , f_{μ} e f_k risultano circa costanti, per una certa composizione, al variare della temperatura; le oscillazioni che si registrano rientrano nei margini di errore attribuiti^{/2/} alle relazioni empiriche ($\pm 2\%$ per μ , $\pm 4\%$ per k , $\pm 6\%$ per D).

Le condizioni 1 e 2 si possono quindi ritenere soddisfatte nel caso in esame.

X	T ₀ K	271.6	281.3	291.0	300.7	310.4	320.1	329.8	339.5	349.2	358.9	368.6	378.3	388.0	397.7	407.4
0		17.1	17.6	18.0	18.5	18.9	19.4	19.8	20.2	20.7	21.1	21.5	21.9	22.3	22.7	23.1
0.1		17.1	17.5	18.0	18.4	18.9	19.3	19.8	20.2	20.6	21.0	21.4	21.8	22.2	22.6	23.0
0.2		17.0	17.5	17.9	18.4	18.8	19.2	19.7	20.1	20.5	20.9	21.3	21.7	22.1	22.5	22.9
0.3		16.9	17.3	17.8	18.2	18.7	19.1	19.5	19.9	20.3	20.7	21.2	21.5	21.9	22.3	22.7
0.4		16.7	17.1	17.6	18.0	18.4	18.9	19.3	19.7	20.1	20.5	20.9	21.3	21.7	22.0	22.4
0.5		16.4	16.8	17.2	17.7	18.1	18.5	18.9	19.3	19.7	20.1	20.5	20.8	21.2	21.6	22.0
0.6		15.9	16.3	16.7	17.1	17.5	17.9	18.3	18.7	19.1	19.5	19.8	20.2	20.6	20.9	21.3
0.7		15.1	15.5	15.9	16.3	16.7	17.0	17.4	17.8	18.1	18.5	18.8	19.2	19.5	19.9	20.2
0.75		14.6	15.0	15.4	15.7	16.1	16.4	16.8	17.1	17.5	17.8	18.2	18.5	18.8	19.1	19.5
0.8		13.9	14.3	14.6	15.0	15.3	15.7	16.0	16.3	16.7	17.0	17.3	17.6	17.9	18.2	18.5
0.83		13.4	13.8	14.1	14.5	14.8	15.1	15.4	15.7	16.1	16.4	16.7	17.0	17.3	17.6	17.8
0.87		12.7	13.0	13.3	13.6	13.9	14.2	14.5	14.8	15.1	15.4	15.7	15.9	16.2	16.5	16.8
0.9		12.0	12.3	12.5	12.8	13.1	13.4	13.7	14.0	14.2	14.5	14.8	15.0	15.3	15.5	15.8
0.92		11.4	11.7	12.0	12.2	12.5	12.8	13.0	13.3	13.6	13.8	14.1	14.3	14.6	14.8	15.0
0.95		10.5	10.7	11.0	11.2	11.5	11.7	11.9	12.2	12.4	12.6	12.9	13.1	13.3	13.5	13.8
0.98		9.3	9.6	9.8	10.0	10.2	10.4	10.6	10.8	11.0	11.2	11.4	11.6	11.8	12.0	12.2
1.00		8.5	8.7	8.8	9.0	9.2	9.4	9.6	9.8	10.0	10.2	10.3	10.5	10.7	10.9	11.0

Tab. 1 - Valori di $\mu \cdot 10^5$ della miscela aria - idrogeno per varie temperature e frazioni molari di idrogeno in $\text{gr.cm}^{-1} \text{sec}^{-1}$.

X	T ₀ K	271.6	281.3	291.0	300.7	310.4	320.1	329.8	339.5	349.2	358.9	368.6	378.3	388.0	397.7	407.4
0	5.60	5.75	5.90	6.05	6.20	6.34	6.48	6.62	6.76	6.90	7.04	7.17	7.30	7.43	7.56	7.56
0.10	7.61	7.82	8.02	8.22	8.41	8.61	8.79	8.98	9.17	9.35	9.53	9.71	9.89	10.1	10.2	10.2
0.20	9.83	10.1	10.3	10.6	10.8	11.1	11.3	11.6	11.8	12.0	12.3	12.5	12.7	12.9	13.2	13.2
0.30	12.3	12.6	12.9	13.2	13.5	13.8	14.1	14.4	14.7	15.0	15.3	15.6	15.9	16.1	16.4	16.4
0.40	15.0	15.4	15.8	16.1	16.5	16.9	17.2	17.6	18.0	18.3	18.6	19.0	19.3	19.6	20.0	20.0
0.50	18.0	18.5	18.9	19.4	19.8	20.3	20.7	21.1	21.5	22.0	22.4	22.8	23.2	23.6	24.0	24.0
0.60	21.4	22.0	22.5	23.0	23.5	24.1	24.6	25.1	25.6	26.0	26.5	27.0	27.5	27.9	28.4	28.4
0.70	25.3	25.9	26.5	27.1	27.7	28.3	28.9	29.5	30.1	30.6	31.2	31.7	32.3	32.8	33.4	33.4
0.75	27.3	28.0	28.7	29.3	30.0	30.6	31.3	31.9	32.5	33.1	33.7	34.3	34.9	35.5	36.1	36.1
0.80	29.6	30.3	31.0	31.7	32.4	33.1	33.8	34.4	35.1	35.8	36.4	37.0	37.7	38.3	38.9	38.9
0.85	31.0	31.7	32.5	33.2	33.9	34.6	35.3	36.0	36.7	37.4	38.1	38.8	39.4	40.1	40.7	40.7
0.87	32.9	33.7	34.5	35.3	36.0	36.8	37.5	38.3	39.0	39.7	40.4	41.1	41.8	42.5	43.2	43.2
0.90	34.4	35.2	36.1	36.9	37.7	38.4	39.2	40.0	40.7	41.5	42.2	43.0	43.7	44.4	45.1	45.1
0.92	35.4	36.3	37.1	38.0	38.8	39.6	40.4	41.2	41.9	42.7	43.5	44.2	45.0	45.7	46.4	46.4
0.95	37.0	37.9	38.8	39.6	40.5	41.3	42.2	43.0	43.8	44.6	45.4	46.2	46.9	47.7	48.5	48.5
0.98	38.7	39.6	40.5	41.4	42.2	43.1	44.0	44.8	45.7	46.5	47.3	48.1	48.9	49.7	50.5	50.5
1.00	39.8	40.7	41.6	42.5	43.4	44.3	45.2	46.1	46.9	47.8	48.6	49.5	50.3	51.1	51.9	51.9

Tab. 2 - Valori di $K \cdot 10^5$ della miscela aria-idrogeno per varie temperature e frazioni molari di idrogeno in $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$.

$\frac{KT}{\epsilon}$	T (°K)	Ω_D	P_D	$Pf_D \cdot 10^5$
4.4	267.1	0.8652	0.640	4.80
4.5	273.2	0.8610	0.666	4.80
4.6	279.3	0.8568	0.691	4.80
4.7	285.3	0.8530	0.717	4.80
4.8	291.4	0.8492	0.743	4.80
4.9	297.5	0.8456	0.770	4.80
5.0	303.6	0.8422	0.797	4.80
6.0	364.3	0.8124	1.086	4.80
7.0	425.0	0.7896	1.408	4.79

Tab. 3 - Valori di P_D e $Pf_D \cdot 10^5$ per la miscela aria-idrogeno per varie temperature in $\text{atm} \cdot \text{cm}^2 \text{sec}^{-1}$ e $\text{atm} \cdot \text{sec}^{-1} \text{°K}^{-1.7}$.

X	T _{0K}	271.6	281.3	291.0	300.7	310.4	320.1	329.8	339.5	349.2	358.9	368.6	378.3	388.0	397.7	407.4
0	0.338	0.339	0.340	0.341	0.341	0.342	0.342	0.342	0.342	0.343	0.343	0.343	0.343	0.343	0.344	0.344
0.10	0.338	0.338	0.339	0.340	0.340	0.340	0.341	0.341	0.342	0.342	0.342	0.342	0.342	0.343	0.343	0.343
0.20	0.336	0.337	0.338	0.338	0.338	0.339	0.339	0.339	0.340	0.340	0.340	0.341	0.341	0.341	0.341	0.341
0.30	0.334	0.335	0.335	0.336	0.336	0.336	0.337	0.337	0.337	0.337	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338	0.338
0.40	0.330	0.331	0.331	0.332	0.332	0.332	0.332	0.333	0.333	0.333	0.333	0.333	0.334	0.334	0.334	0.334
0.50	0.324	0.324	0.325	0.325	0.326	0.326	0.326	0.326	0.326	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327	0.327
0.60	0.314	0.315	0.315	0.315	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316	0.316	0.317	0.317	0.317	0.317	0.317	0.317
0.70	0.299	0.300	0.300	0.300	0.300	0.300	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301	0.301
0.75	0.289	0.289	0.289	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290	0.290
0.80	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276	0.276
0.85	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266	0.266
0.87	0.250	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.251	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250	0.250
0.90	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.236	0.235	0.235
0.92	0.226	0.226	0.226	0.226	0.226	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.225	0.224	0.224	0.224
0.95	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.207	0.206	0.206	0.206	0.206	0.206	0.206	0.206	0.205	0.205	0.205
0.98	0.185	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.184	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.183	0.182	0.182
1.00	0.167	0.167	0.167	0.167	0.167	0.166	0.166	0.166	0.166	0.166	0.165	0.165	0.165	0.165	0.165	0.164

Tab. 4 - Valori di $f_{\mu} \cdot 10^5$ della miscela aria-idrogeno per varie temperature e frazioni molari di idrogeno in $\text{gr cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{K}^{-0.7}$.

X	T _{OK}	271.6	281.5	291.0	300.7	310.4	320.1	329.8	339.5	349.2	358.9	368.6	378.3	388.0	397.7	407.4
0		0.111	0.111	0.111	0.111	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.112	0.113	0.113
0.10		0.151	0.151	0.151	0.151	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152	0.152
0.20		0.194	0.195	0.195	0.195	0.195	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196	0.196
0.30		0.243	0.243	0.243	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244	0.244
0.40		0.297	0.297	0.297	0.297	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.298	0.297
0.50		0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357	0.357
0.60		0.424	0.424	0.424	0.424	0.424	0.424	0.424	0.424	0.424	0.424	0.424	0.423	0.423	0.423	0.423
0.70		0.500	0.500	0.500	0.500	0.499	0.499	0.499	0.499	0.499	0.498	0.498	0.498	0.497	0.497	0.497
0.75		0.541	0.541	0.541	0.541	0.540	0.540	0.540	0.540	0.539	0.539	0.539	0.538	0.538	0.537	0.537
0.80		0.585	0.585	0.584	0.584	0.584	0.583	0.583	0.583	0.582	0.582	0.581	0.581	0.581	0.580	0.580
0.83		0.612	0.612	0.612	0.612	0.611	0.611	0.610	0.610	0.609	0.609	0.608	0.608	0.607	0.607	0.606
0.87		0.651	0.650	0.650	0.649	0.649	0.648	0.648	0.647	0.647	0.646	0.646	0.645	0.645	0.644	0.643
0.90		0.681	0.680	0.680	0.679	0.678	0.678	0.677	0.677	0.676	0.675	0.675	0.674	0.673	0.673	0.672
0.92		0.701	0.700	0.700	0.699	0.699	0.698	0.697	0.697	0.696	0.695	0.694	0.694	0.693	0.692	0.692
0.95		0.732	0.732	0.731	0.730	0.729	0.729	0.728	0.727	0.726	0.726	0.725	0.724	0.723	0.723	0.722
0.98		0.765	0.764	0.763	0.762	0.761	0.760	0.759	0.759	0.758	0.757	0.756	0.755	0.754	0.753	0.752
1.00		0.786	0.786	0.785	0.784	0.783	0.782	0.781	0.780	0.779	0.778	0.777	0.776	0.775	0.774	0.773

Tab. 5 - Valori di $f_K \cdot 10^5$ della miscela aria-idrogeno per varie temperature e frazioni molari di idrogeno in $\text{cal cm}^{-1} \text{sec}^{-1} \text{ } ^\circ\text{K}^{-1.7}$.

BIBLIOGRAFIA

- /1/ BIRD R.B., STEWART W.E., LIGHTFOOT E.N.
"Transport Phenomena"
Wiley, New York (1960).
- /2/ HIRSCHFELDER J.O., CURTISS C.F., BIRD R.B.
"Molecular Theory of Gases and Liquids"
Wiley, New York (1954).
- /3/ WILKE C.R.
J. Chem. Phys., 18, 517-519 (1950).
- /4/ HIRSCHFELDER J.O., BIRD R.B., SPOTZ E.L.
Chem. Revs., 44, 205 (1949).
- /5/ EUCKEN A.
Physik Z., 14, 324-332 (1913).