



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA
Facoltà di Ingegneria

ISTITUTO DI IMPIANTI NUCLEARI

IT 8500 241

PROGRAMMI DI CALCOLO PER L'ANALISI
DEL TRANSITORIO TERMOFLUIDODINAMICO
NEL SISTEMA DI CONTENIMENTO SUSSE-
GUENTE A LOCA

A. Gorlandi
M. Mazzini
F. Oriolo

RP 360(79)

RP360(79)

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

PROGRAMMI DI CALCOLO PER L'ANALISI DEL TRANSITORIO TERMOFLUIDO
DINAMICO NEL SISTEMA DI CONTENIMENTO SUSSEGUENTE A LOCA

A. Gorlandi

M. Mazzini

F. Oriolo

*Lavoro svolto in esecuzione del contratto fra il C.N.E.N. e
l'Università di Pisa, registrato a Roma il 7.3.1980 al numero
10986.*

ATTI ISTITUTO DI IMPIANTI NUCLEARI
1979

INDICE

SOMMARIO	Pag. IV
ELENCO DEI SIMBOLI	" V
ELENCO DEI PEDICI	" VII
1. INTRODUZIONE	" 1
2. IL CODICE RELAP-4/Mod.5 - PARTE CONTENIMENTO	" 3
3. IL CODICE "COMPARE"	" 5
4. IL CODICE "FUMO"	" 6
5. IL CODICE CONTMPT LT-026	" 8
6. CONCLUSIONI	" 10
BIBLIOGRAFIA	" 11
APPENDICE A.1: IL CODICE RELAP-4/Mod.5 - OPZIO- NE SISTEMI DI CONTENIMENTO	" 13
A.1.1 Generalità	" 13
A.1.2 Modello del flusso di miscela acqua-vapore-aria	" 13
A.1.3 Trasferimento di calore al ghiaccio	" 14
APPENDICE A.2: IL CODICE "COMPARE", UN PROGRAM- MA DI CALCOLO PER SISTEMI DI CONTE- NIMENTO A PIU' COMPARTIMENTI	" 16
A.2.1 Generalità	" 16
A.2.2 Modelli di efflusso critico	" 17
A.2.3 Modelli di efflusso subcritico	" 17
APPENDICE A.3: IL CODICE "FUMO"	" 20
A.3.1 Descrizione generale	" 20
A.3.2 Equazioni di bilancio	" 21
A.3.3 Equazioni di stato della misce- la acqua-vapore-aria	" 23

A.3.4 Portata tra i nodi	Pag.	26
APPENDICE A.4: IL CODICE CONTEMPT	"	27
A.4.1 Generalità	"	27
A.4.2 Caratteristiche dei modelli dei vari compartimenti	"	28
A.4.3 Modelli di trasferimento di massa ed energia tra i vari compartimenti	"	30

SOMMARIO

Nel presente lavoro sono brevemente descritte le caratteristiche dei codici di calcolo disponibili presso l'Istituto di Impianti Nucleari dell'Università di Pisa per l'analisi del transitorio termofluidodinamico nel sistema di contenimento di un impianto nucleare a seguito di un LOCA (RELAP 4/MOD.5, COMPARE, FUMO e CONTEMPT-LT/026). Qualche maggior dettaglio su ciascun codice è riportato in Appendice.

In particolare l'attenzione è stata focalizzata sulla possibilità di studiare tramite i codici suddetti gli effetti della subcompartimentazione di un sistema di contenimento a piena pressione.

Sono anche discusse succintamente le modifiche ai vari programmi attuabili per una migliore valutazione del transitorio termofluidodinamico.

ELENCO DEI SIMBOLI

a	coefficiente della politropica
A	area di scambio termico
B	fattore di conversione fra le unità di misura di energia meccanica e termica
c	calore specifico
cp	calore specifico a pressione costante
cv	calore specifico a volume costante
C	coefficiente dato in ingresso
d	distanza fra i "mesh-point"
E	energia
f	frazione dell'acqua di fusione del ghiaccio che si porta a \bar{T}
F	fattore di correzione
g	portata specifica (per unità di area)
G	portata di massa
h	entalpia specifica
H	coefficiente di scambio termico per convezione
J	coefficiente correttivo nella formula dell'entalpia del vapore surriscaldato
k	conducibilità termica
K	coefficiente di perdita concentrata
l	lunghezza
L	calore latente di fusione
M	massa
P	produzione di calore per unità di volume
Q	calore rimosso
R	costante dei gas
s	spessore dello strato condensato
S	area di efflusso

t	tempo
T	temperatura assoluta
\bar{T}	valore di temperatura specificato in ingresso
u	energia interna specifica
v	volume specifico
V	volume
w	velocità
x	coordinata corrente
Z	funzione del rapporto fra i valori di pressione a monte ed a valle dell'ugello
ΔE	variazione di energia in un passo temporale
ΔM	variazione di massa in un passo temporale
Δp	differenza di pressione fra due volumi connessi
Δt	passo temporale di calcolo
ΔU	quantità di energia ceduta all'unità di massa di ghiaccio
γ	coefficiente di espansione adiabatica
ρ	densità
$\bar{\rho}$	densità media dell'effluente
ψ	coefficiente di espansione secondo Nusselt
θ	termine correttivo nella formula del volume specifico del vapore surriscaldato
ζ	grado idrometrico (p_s/p_v)
χ	titolo

ELENCO DEI PEDICI

a	relativo all'aria
A	" alla camera anulare
c	valore critico
COND	condizionamento
ds	relativo al volume a valle
D	" al dry-well
e	" all'uscita
f	" al liquido
FL	filtri
FU	fuga
g	relativo al ghiaccio
i	" all'imbocco
id	calcolata per un gas perfetto
j	relativo alla giunzione j
K	" al volume K
L	" al volume L
LA	lago
m	relativo alla miscela di aria e vapore
Moo	calcolata con il modello di Moody
n	relativo al passo temporale attuale
n - 1	" " " " precedente
R	rottura
RIC	ricircolazione
s	relativo al vapore
S	" alla piscina di soppressione
SP	spruzzamento
us	relativo al volume a monte
v	" al vapor saturo

w relativo all'acqua globalmente presente (liquido più
 vapore)

W relativo al wet-well

x $\begin{cases} K \text{ se } G_{KL} > 0 \\ L \text{ se } G_{KL} < 0 \end{cases}$

1. INTRODUZIONE

Il transitorio termofluidodinamico susseguente a LOCA in un sistema di contenimento a piena pressione può essere suddiviso in tre parti:

- 1) Fase iniziale (0 + ~3 sec): sono importanti gli effetti dinamici ed inerziali; si possono avere picchi di pressione locali in zone parzialmente isolate del contenimento (effetti di subcompartimentazione); l'influenza degli scambi termici con le strutture conducenti calore è limitata.
- 2) Medio termine (~3 + ~50 sec): si verifica il primo picco di pressione nel contenimento, ma perdurano limitati effetti di subcompartimentazione; hanno notevole importanza gli scambi termici con le strutture conducenti calore, in particolare con quelle metalliche ed i relativi fenomeni di condensazione del vapor acqueo.
- 3) Lungo termine (oltre ~50 sec): si può verificare un secondo picco di pressione ed assumono importanza sia gli scambi termici con le strutture in cemento e/o altri materiali strutturali, che i fenomeni di condensazione ed evaporazione connessi con l'intervento dei sistemi di spray, etc.; sono scomparsi i fenomeni di subcompartimentazione (almeno per quanto concerne la pressione).

Vista la diversa fenomenologia temporale, inizialmente furono sviluppati due tipi di codice per calcoli di "evaluation model": uno finalizzato alla determinazione dei picchi di pressione locali nell'a fase iniziale (quindi senza strutture conducenti calore), l'altro finalizzato al calcolo dei picchi di pressione nell'intero contenimento e quindi senza possibilità di

analisi di subcompartmentazione.

Successivamente la necessità di calcoli più precisi ("best estimate") richiese lo sviluppo di codici che potessero considerare la subcompartmentazione anche nel medio termine e perciò tenessero conto anche degli scambi di calore e degli interventi dei sistemi di salvaguardia.

Programmi di calcolo di quest'ultima generazione sono stati messi a punto in diversi paesi^{/1/}, ma non sono ancora disponibili a tutti presso le librerie internazionali; si è reso pertanto necessario verificare le possibilità di vari codici di calcolo a disposizione ed in particolare metterne in risalto le peculiarità e la disponibilità ad essere modificati.

2. IL CODICE RELAP-4/Mod.5 - PARTE CONTENIMENTO

L'applicazione del codice RELAP-4/Mod.5^{/2/} per l'analisi del transitorio termofluidodinamico nel sistema di contenimento in seguito a LOCA comporta alcuni problemi dovuti alla struttura stessa del programma di calcolo. Questo è stato infatti ideato per il calcolo del transitorio termoidraulico nel core del reattore e pertanto presenta alcune caratteristiche sfavorevoli ad uno studio completo del sistema di contenimento.

In particolare il disporre, per la determinazione del coefficiente di scambio termico, solo di correlazioni implementate nel codice, finalizzate al calcolo del nocciolo, comporta notevoli difficoltà per l'analisi del transitorio nel sistema di contenimento. Il problema può essere parzialmente risolto sfruttando dei coefficienti moltiplicativi ("dials"), insiti nelle correlazioni; con questo metodo è però possibile ottenere buoni risultati, solo per analisi di subcompartimentazione, nel breve e medio termine, mentre un'analisi comparativa del transitorio, a lungo termine, fornisce risultati mediocri rispetto a codici (come il CONTEMPT) predisposti per questi studi.

Il modello di un generico volume nel RELAP considera, come del resto gli altri codici qui analizzati, solo elementi omogenei e zerodimensionali, anche se in uno stesso elemento si può tener conto di due fasi completamente separate, trascurando però il trasporto di massa ed energia tra di esse.

Riguardo alle giunzioni si possono ipotizzare vari tipi di efflusso^{/2/}, che rendono il RELAP molto versatile da questo punto di vista.

Il programma ha una subroutine particolare per il calcolo del

transitorio in un contenimento a ghiaccio^{/2/}, con correlazioni di scambio termico specifiche; l'anulus con ghiaccio è trattato come una struttura conducente calore con temperatura costante e bassa diffusione di calore.

Il codice RELAP 4 è così noto, che si ritiene superflua una sua descrizione generale, che peraltro sarebbe troppo estesa relativamente ai limiti del presente rapporto. Pertanto nell'appendice A.1 sono riportati soltanto i principali modelli fisico-matematici relativi all'opzione contenimento.

Le principali caratteristiche del codice sono sintetizzate in Tab. 1.

Modifiche al codice RELAP 4 per renderlo adeguato per calcoli di "Best-Estimate" di sub-compartmentazione, vista la complessità del codice, richiederebbero tempi tecnici notevoli.

3. IL CODICE "COMPARE"

Il codice COMPARE^{/3/} è uno dei primi programmi di calcolo ideati per l'analisi della fase iniziale del transitorio termofluidodinamico in un sistema di contenimento a piena pressione, con subcompartimentazione.

La versione attualmente a disposizione^{/3/} non consente di tener conto delle strutture conducenti calore e questo ne limita l'applicazione, dato che dopo i primi istanti anche una analisi di "evaluation model" non può prescindere dagli scambi termici.

Alla base del modello c'è l'ipotesi di poter descrivere il sistema di contenimento con un insieme di volumi omogenei e zero dimensionali.

I tipi di efflusso attraverso le giunzioni sono sufficienti a garantire una buona rappresentazione del fenomeno (Tab. 1).

La struttura modulare del codice permette di aggiungere con relativa facilità subroutine per tener conto degli "scambi termici" con le strutture.

Nell'appendice A.2 sono date indicazioni più dettagliate sulle schematizzazioni adottate nel codice COMPARE.



3.6

4



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

4. IL CODICE "FUMO"

Diversamente dai codici fin qui brevemente esaminati, il codice FUMO^{/4/} è stato ideato per un'analisi completa del transitorio a breve e a lungo termine in un sistema di contenimento con subcompartimentazione; sono infatti previsti anche gli interventi dei sistemi di condizionamento, ventilazione e spruzzamento del volume del contenitore e gli scambi termici con le strutture conducenti calore. Per il primo nodo è possibile tener conto del leakage, della ventilazione, della refrigerazione e ricircolazione dell'aria; i nodi 1 e 2 possono essere schematizzati (l'uno o l'altro) come reattore (dopo la rottura) ed, in questi volumi, può avvenire il blow-down e l'intervento degli ECCS.

Il modello analitico di ciascun volume considera due regioni omogenee e zerodimensionali, prevedendo però scambi di massa ed energia fra di loro (questo rende il codice particolarmente adatto anche per analisi a lungo termine).

Inizialmente il codice disponeva di un modello di flusso per orifizi, basato sulle equazioni dei gas perfetti; attualmente sono invece usate equazioni di portata che tengono conto dell'inerzia, delle perdite concentrate e distribuite e delle variazioni della quantità di moto (spaziale) e questo rende il modello particolarmente versatile. Altre caratteristiche sono riportate in Tab. 1.

In definitiva è chiara la ottima impostazione del codice FUMO, ma si ritiene necessaria una descrizione più dettagliata dello stesso ed una sua applicazione a casi concreti, prima di poter dare una valutazione definitiva delle capacità di tale programma di calcolo.

Per completezza, si riporta in appendice A.3 la descrizione di tale codice data dall'autore.

5. IL CODICE CONTEMPT LT-026

Il codice CONTEMPT LT-026^{/5/} è l'ultima versione di una famiglia di codici appositamente messi a punto per la N.R.C. per l'analisi del transitorio in caso di LOCA in un sistema di contenimento nel suo complesso; consente anche la trattazione del più recente sistema a soppressione di pressione: il Mark III della G.E..

La possibilità di applicazione di questo programma di calcolo agli studi della subcompartimentazione è limitata dato che, senza il sistema di soppressione, non è possibile usare più di due nodi connessi fra di loro. I tipi d'efflusso adoperati in tal caso sono definiti dal codice come "normal" e "penetration leakage"; il primo necessita come input della portata volumetrica in funzione della pressione, il secondo determina la portata tramite le equazioni dei gas perfetti per un ugello.

L'esperienza acquisita consente di affermare che l'uso del "penetration leakage" (con opportune variazioni di un fattore di moltiplicazione della portata) fornisce stime soddisfacenti, in relazione agli andamenti della pressione e temperatura nel medio-lungo termine (Tab. 1).

Nell'ambito degli studi sul contenimento nel suo complesso si sono riscontrate limitazioni, ad es. per il fatto che il codice CONTEMPT LT-026, non può tener conto della non completa condensazione del vapore che, in casi particolari, si può verificare in un sistema di contenimento a soppressione di pressione; una limitazione più seria, per un'analisi di "best estimate", è posta dalla impossibilità di fornire in input più di un coefficiente di scambio termico in funzione del tempo.

Maggiori dettagli sulle principali caratteristiche del codice sono riportate in appendice A.4.

6. CONCLUSIONI

Fra i codici esaminati solo il FUMO permette, sulla carta, l'analisi completa del transitorio dato che tiene conto dei vari fenomeni che avvengono in caso di LOCA nei vari ambienti del sistema di contenimento. Va però sottolineato che lo sviluppo del codice non è ancora completo. Un giudizio definitivo non potrà pertanto essere dato prima di aver svolto il lavoro di completamento e convalida del codice stesso, tramite applicazione a casi concreti; ciò richiede certamente un periodo di tempo di almeno un anno.

Per quanto riguarda il codice COMPARE, l'inserimento delle strutture conducenti calore, può renderlo adatto all'analisi di transitori a breve-medio termine (anche se sarebbe auspicabile tener conto della condensazione e dell'evaporazione tramite un'ulteriore modifica del programma) e ciò è possibile in tempi dell'ordine dei mesi.

Gli altri due programmi di calcolo sono difficilmente modificabili, data la loro complessità, per poter eseguire un'analisi completa di transitorio in un contenimento subcompartimentato.

Si ritiene utile ricordare che, in un futuro abbastanza prossimo, sarà possibile disporre di codici espressamente creati per lo studio del transitorio a breve ed a lungo termine, quali il CONTEMPT-4/Mod.2, il COMPARE Mod. 2 ed il BEACON Mod. 2A.

Quest'ultimo, in particolare, diversamente dagli altri risolve il problema bidimensionale e considera regioni bifasi, conseguendo un notevole salto di qualità rispetto a quanto fatto finora.

BIBLIOGRAFIA

- /1/ W. WINKLER
"Comparison Report on OECD-CSNI Containment Standard Problem n. 1"
GRS, Garching, F.R. Germany (1979).
- /2/ K.R. KATZMA et alii
"RELAP 4/MOD 5 - A Computer Program for Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Nuclear Reactors and Related Systems - User's Manual"
ANCR-NUREG-1335, Aerojet Nuclear Company, INEL (1976).
- /3/ R.G. GIDO et alii
"COMPARE: A Computer Program for the Transient Calculation of a System of Volumes Connected by Flowing Vents"
LA-NUREG-6488-MS, Los Alamos Scientific Laboratory (1976).
- /4/ R. ROMANACCI
"Comunicazione personale"
CNEN, Roma.
- /5/ W.J. MINGS
"Version 26 Modifications of the CONTEMPT-LT Program"
SRD-83-76, Aerojet Nuclear Company, INEL (1976).
- /6/ K. K. ALMENAS and J. M. MARCHELLO
"The Physical State of Post - Loss - of - Coolant Accident Containment Atmospheres"
Nuclear Technology - Vol. 44 - Pag. 411 (1979)
- /7/ M. JAKOB
"Heat Transfer"
John Wiley & Sons - Vol. 1 - Pagg. 680 + 689 (1979)

CODICE	TIPI DI CONTENIMENTO ANALIZZABILI	MODELLO DI UN NODO	NUMERO MASSIMO DI NODI	STRUTTURE CONDUCENTI CALORE	CORRELAZIONI DI SCAMBIO DI CALORE CON LE STRUTTURE	TIPI DI EFFLUSSO ATTRAVERSO LE GIUNZIONI	PERDITE DI CARICO
CONAP 4 Mod. 5	-A piena pressione compartimento -A ghiaccio	Due regioni omogenee, completamente separate, senza trasferimenti di massa ed energia fra di loro.	75	SI	Nove correlazioni implementate nel codice, con possibilità di usare moltiplicatori. Particolari correlazioni solo per il caso di contenimento a ghiaccio.	1) Modello di flusso inerziale 2) Modello di flusso critico sonico per gas perfetti 3) Modello di flusso critico di Moody 4) Modello di flusso critico di Henry-Bauske 5) Modello di flusso critico di equilibrio omogeneo	Concentrate: 1) fornite in Input 2) Calcolate dal codice in base alle variazioni di area Distribuite: 1) Calcolate dal codice
CONFARE	A piena pressione compartimentato	Come sopra, con in più la possibilità di considerare una miscela di 3 gas perfetti nell'ambiente.	100	NO	---	1) Flusso critico di Moody (in caso di presenza dell'acqua) 2) Flusso politropico di gas perfetti attraverso orifizio 3) Modello di flusso inerziale	Fornite in Input come perdite concentrate
	A piena pressione compartimentato	Due regioni completamente separate con trasferimenti di massa ed energia fra di loro.	9	SI (riempendo la subroutine già predisposta)	---	1) Flusso di gas perfetti attraverso orifizio 2) Modello di flusso inerziale	Con il II modello di efflusso, tiene conto di perdite concentrate e distribuite nelle giunzioni.
CONMP1-1.F/026	-A piena pressione con al massimo 2 compartimenti -A soppressione di pressione (di qualsiasi tipo)	Come sopra	4 (Solo 2 sfruttabili per la subcompartmentazione)	SI	-Vari coefficienti costanti -3 correlazioni implementate nel codice -2 correlazioni da fornire in input, di cui una funzione del tempo, l'altra in funzione della temperatura	Per la subcompartmentazione: 1) Flusso di gas perfetti in un ugello (penetration leakage) 2) Tabelle date in input (Normal leakage)	Se ne può tener conto tramite fattori di moltiplicazione della portata.

Tab. 1 - Principali caratteristiche dei codici di calcolo a disposizione.

APPENDICE A.1: IL CODICE RELAP 4/MOD 5 - OPZIONE SISTEMI DI CONTENIMENTO

A.1.1 Generalità

Il codice RELAP 4/MOD 5, al contrario delle precedenti versioni, permette di calcolare il transitorio termoidraulico susseguente a LOCA nel sistema di contenimento di un PWR, a piena pressione od a ghiaccio, anche subcompartimentato.

A tale scopo nel codice sono stati inseriti modelli per descrivere il flusso di aria tra i volumi, il comportamento di valvole inerziali e lo scambio termico con il ghiaccio.

A.1.2 Modello del flusso di miscela acqua-vapore-aria

Il modello del flusso d'aria fra i nodi, ha caratteristiche del tutto generali e non è limitato all'opzione contenimento.

La velocità del suono nella miscela acqua-vapore-aria è calcolata mediante il modello d'equilibrio omogeneo, dalle equazioni base del RELAP per valutare il flusso critico.

Le equazioni del flusso per questa miscela sono ricavate da quelle fondamentali con l'aggiunta di termini che tengono conto della presenza di aria. Ad es., il volume specifico v_{KL} alla giunzione (v. Fig. A.1) è dato dall'equazione:

$$v_{KL} = v_K + \left(\frac{\delta v}{\delta h}\right)_p (h_K - h_L) + \left(\frac{\delta v}{\delta p}\right)_h (p_K - p_L); \quad (A.1.1)$$

le due derivate parziali del volume specifico rispetto all'entalpia ed alla pressione sono esplicitate in modo diverso, a seconda che si tratti di una miscela aria-vapore, ovvero che sia presente anche acqua liquida.

A.1.3 Trasferimento di calore al ghiaccio

Il modello di sistema di contenimento con condensazione "su ghiaccio" prevede, in caso di pressurizzazione dell'ambiente (compartimento inferiore), che il fluido ivi presente sia costretto a passare attraverso il volume contenente ghiaccio, per poi raggiungere il compartimento superiore.

Il trasferimento di calore dal fluido al ghiaccio è qualitativamente simile ai comuni processi di scambio termico impiegati dal RELAP; la superficie di scambio è però variabile con il tempo, in relazione alla fusione del ghiaccio.

Il ghiaccio viene simulato con una colonna cilindrica associata al volume di controllo adiacente.

Il passaggio di calore per convezione dal fluido presente nel volume al ghiaccio è calcolato in modo esplicito ad ogni passo temporale, partendo da condizioni iniziali note.

La temperatura superficiale delle colonne di ghiaccio è quella di fusione (32.018 °F), a meno che un diverso valore non venga fissato come dato di ingresso.

Poichè il ghiaccio ha una bassa diffusività termica, si ipotizza che esso rimanga alla temperatura iniziale, eccetto che alla superficie di fusione.

La temperatura dell'acqua può essere maggiore di quella di fusione, ma occorre specificarlo nei dati d'ingresso.

L'energia necessaria per portare l'unità di massa di ghiaccio al punto di fusione e per riscaldare l'acqua prodotta fino alla temperatura \bar{T} specificata in ingresso, è data (in unità inglesi) da:

$$\Delta U = L_g + c_g (32.018 - T_g) + fh_f(\bar{T}) \quad (A.1.2)$$

La massa di ghiaccio che fonde nel generico volume K durante un

dato passo temporale, si ricava con la relazione:

$$M_{g,K} = Q_K / \Delta U \quad (A.1.3)$$

dove:

$$Q_K = H_{g,K} A_K \Delta t (T_K - 32.018) \quad (A.1.4)$$

è il calore trasferito per convezione al ghiaccio.

Nella determinazione di A_K nella (A.1.4) si tiene conto che la colonna cilindrica di ghiaccio ha raggio via via decrescente fino ad annullarsi a ghiaccio completamente fuso.

Il coefficiente di scambio termico (H_g) con il ghiaccio viene calcolato, tenendo conto della presenza di gas non condensabili, mediante la correlazione di Jakob, modificata da Mac Adams e Mac Curdy^{/7/}:

$$H_{g,K} = C_{1,K} H_s F + C_{2,K} \quad (A.1.5)$$

essendo C_1 e C_2 costanti date in "input", F un fattore che tiene conto della presenza di gas non condensabili (aria) nel volume K (Tab. A.1.1) ed H_s è dato dalla relazione:

$$H_s = \frac{1100 + 9.9 w}{s^{1/3}} \quad (A.1.6)$$

per fluido in condizioni sature, e dalla:

$$H_s = \frac{1130 + 5.05 w}{s^{1/3}} \quad (A.1.7)$$

per fluido in condizioni surriscaldate.

M_s / M_a	F
≥ 0.999	1.0
= 0.9	0.4
= 0.0	0.05

Tab. A.1.1: valori di F utilizzati nel calcolo di H_g

APPENDICE A.2: IL CODICE COMPARE, UN PROGRAMMA DI CALCOLO PER SISTEMI DI CONTENIMENTO A PIU' COMPARTIMENTI

A.2.1 Generalità

Il codice COMPARE, come specificato nel titolo, permette di analizzare il comportamento di sistemi di contenimento a piena pressione, anche con subcompartimentazione.

Ciascun compartimento può essere simulato con un volume di controllo, che è costituito da una miscela acqua-vapore e/o gas perfetti (questi ultimi possono essere al massimo tre, di cui uno può essere l'aria).

La composizione della miscela può variare a causa dei fenomeni di condensazione ed evaporazione, ma all'interno del volume non è prevista la presenza di una zona liquida, formata dalla raccolta del condensato, e pertanto l'acqua di condensa continua a far parte della miscela omogenea presente nel volume.

Questo è abbastanza realistico nella fase iniziale del transitorio^{6/}, quando il condensato è poco ed effettivamente la miscela non subisce importanti fenomeni di separazione di gocce, ma non successivamente, quando si ha un notevole massa di condensato, che nella realtà si deposita sulle pareti e sul pavimento e perciò non fa più parte della miscela omogenea che occupa il volume del compartimento.

Il codice inoltre non tiene conto dei fenomeni di scambio termico con le pareti e/o eventuali strutture interne al compartimento.

Le variazioni di massa ed energia in ciascun volume possono avvenire solo tramite:

- aggiunte dirette (al massimo in 5 volumi), fornite come dati di ingresso (energia e massa dovute al blow-down);
- giunzioni di connessione fra i volumi.

Partendo dalle condizioni iniziali, tenuto conto degli apporti dovuti al blow-down, sono aggiornati i bilanci di massa ed energia in ciascun volume; quindi vengono calcolate pressione e temperatura della miscela, ipotizzando che nel volume sia raggiunto l'equilibrio termodinamico. Su queste basi si calcolano le portate di efflusso alle giunzioni.

Ad ogni passo temporale, partendo dalle condizioni termodinamiche in atto, viene ripetuto il calcolo. Va notato che, nella determinazione delle portate di efflusso fra i compartimenti, si suppone che la situazione termodinamica rimanga costante per tutto il passo temporale.

Un'altra osservazione generale concerne la determinazione delle proprietà specifiche dei fluidi presenti nel compartimento, che è fatta tramite funzioni polinomiali e non con tabelle di interpolazione, come in altri codici.

A.2.2 Modelli di efflusso critico

Il calcolo della portata critica è eseguito in due modi diversi, a seconda della composizione dell'effluente.

Nel caso di miscela acqua-vapore-aria nel compartimento a monte, la portata critica è determinata mediante il modello d'efflusso di Moody; viceversa nel caso di miscele aria-vapore, l'efflusso critico viene valutato mediante il modello dei gas perfetti.

A.2.3 Modelli di efflusso subcritico

Il codice prevede due tipi di efflusso subcritico, tenendo conto o no dell'inerzia del fluido.

In entrambi i modelli, le proprietà termofluidodinamiche del fluido alla giunzione sono ipotizzate costanti durante il passo temporale e sono poste eguali a quelle del volume a monte.

a) Efflusso con inerzia

La portata d'efflusso attraverso un condotto viene ricavata risolvendo l'equazione della conservazione della quantità di moto per efflusso monodirezionale, con area del condotto costante e senza variazione di quota; inoltre si considera la densità costante durante il passo temporale.

Sotto queste ipotesi l'equazione di conservazione della quantità di moto assume la seguente forma:

$$\Delta p_{KL} = \frac{\Sigma K}{2\rho S^2} G_n (G_n) + \frac{Z(1/S)}{\Delta t} (G_n - G_{n-1}) \quad (A.2.1)$$

Il programma tiene conto solo di perdite di carico concentrate e pertanto eventuali perdite distribuite devono essere simulate con perdite concentrate aggiuntive.

I coefficienti di perdita, somma delle perdite concentrate e distribuite, vanno forniti come dati iniziali, dato che non vengono calcolati automaticamente dal codice.

b) Efflusso senza inerzia

Nel caso in cui si abbia efflusso attraverso un orifizio e la miscela possa essere considerata come un gas perfetto, gli effetti inerziali vengono trascurati; la portata viene calcolata considerando il fluido comprimibile, seguente una politropica con esponente determinato in base ai coefficienti di perdita di imbocco e di uscita.

La portata specifica è calcolata con la relazione:

$$g_{1d} = \left\{ \frac{2ap_{us}\rho_{us}}{(a-1)(K_i-1)} \left[\left(\frac{p}{p_{us}}\right)^{2/a} - \left(\frac{p}{p_{us}}\right)^{(a+1)/a} \right] \right\}^{1/2} \quad (A.2.2)$$

dove:

$$a = \frac{K_i+1}{K_i+(1+\gamma)} \quad ; \quad \frac{p}{p_{us}} = \left(\frac{p_{ds}}{p_{us}}\right)^{(K_i+1)(K_i+K_e)} \quad (A.2.3)$$

E' da notare infine che, nel caso di miscela contenente acqua in fase liquida, la portata per efflusso subcritico viene calcolata scalando la portata critica data dal modello di Moody nel rapporto fra i valori di portata subcritica e critica calcolate con la (A.2.2); la portata è calcolata cioè tramite la seguente formula:

$$G = \frac{g_{id}}{g_{c,id}} G_{c,Moo} \quad (A.2.4)$$

APPENDICE A.3: IL CODICE FUMO (*)

A.3.1 Descrizione generale

Il codice FUMO è orientato a studiare quei fenomeni che possono verificarsi in un impianto nucleare per i quali l'aspetto determinante è la presenza e il comportamento di una miscela aria-acqua-vapore, in generale originata dalla rottura di una tubazione contenente acqua in pressione. Tipico è lo studio del massimo di pressione nel contenimento a seguito di LOCA.

Ma diversi altri problemi possono presentarsi: la compartimentazione dell'edificio, l'adozione di pannelli di sfiato per l'edificio, lo studio del transitorio a lungo termine nel contenimento.

Il modello adottato per la loro rappresentazione è mostrato nella Fig. A.2.

E' un modello a nodi (attualmente 9). In ogni nodo vi è un fluido che può essere aria (praticamente mai) o aria-vapore o aria-vapore-acqua. In quest'ultimo caso parte dell'acqua, chiamata "lago", può non essere in equilibrio termico con il resto della miscela. Il "lago" può rappresentare sia la piscina di soppressione nei reattori G.E., sia l'acqua che condensa sulle pareti fredde dell'ambiente o che cade direttamente sul fondo o su altre superfici.

Il codice effettua per ogni nodo il bilancio di massa d'aria e di acqua, di energia e volume e risolve le equazioni di stato della miscela per determinare temperatura e pressione.

Il modello cerca di incorporare tutta una serie di fenomeni, interventi di sistemi, malfunzionamenti, allo scopo di simulare nel modo più generale ed elastico l'edificio o il contenimento del reat

(*) La descrizione riportata è quella fatta dall'autore R. ROMANACCI del CNEN - ROMA.

tore.

- Il nodo N rappresenta l'atmosfera. Per esso valgono sempre i valori iniziali di temperatura, pressione ed umidità.
- La sorgente di acqua in pressione (rottura) può aversi nel nodo 1 oppure nel nodo 2.
- Nei nodi 1 e/o 2 è previsto uno spruzzamento.
- In tutti i nodi è previsto: 1) il "lago";
2) lo scambio termico con l'ambiente attraverso e con le pareti;
3) il condizionamento.
- Nel nodo 1, che è il più "eclettico", sono previste inoltre la fuga (leakage), la ventilazione, la refrigerazione e ricircolazione nel "lago" e lo scambio termico con l'esterno.
- I nodi sono collegabili tra loro per mezzo della matrice delle aree S_{KL} . Se l'elemento S_{KL} della matrice è zero significa che i nodi K e L non comunicano.
- I nodi K e L non possono essere collegati da più di un percorso.
- Le aree S_{KL} possono essere variate durante il transitorio.

A.3.2 Equazioni di bilancio

NODO 1 (l'indice 1, comune a tutte le variabili, è omissis)

Bilancio di massa

$$\frac{\Delta M_a}{\Delta t} = G_{a,COND} - G_{a,FU} - G_{a,FL} - \sum_K G_{a,K} \quad (A.3.1)$$

$$\frac{\Delta M_w}{\Delta t} = G_{w,COND} - G_{w,FU} - G_{w,FL} - \sum_K G_{w,K} + G_{SP} + G_R - G_{w,LA} \quad (A.3.2)$$

Bilancio di energia

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = G_{a,COND} h_{a,COND} + G_{w,COND} h_{w,COND} - (G_{a,FU} + G_{a,FL}) c_p T -$$

$$- (G_{w,FU} + G_{w,FL}) h_w + G_{SP} h_{SP} + G_R h_R - \sum_K G_{a,K} c_p a_x T_x - \sum_K G_{w,K} h_{w,x} - H_{w,LA} - Q$$

ove $x = \begin{cases} K & \text{se } G \text{ va dal nodo } K \text{ al nodo } L \\ L & \text{se } G \text{ va dal nodo } L \text{ al nodo } K \end{cases}$ (A.3.3)

$$\frac{\Delta M_{LA}}{\Delta t} = G_{w,LA} - G_{RIC}$$
 (A.3.4)

$$\frac{\Delta E_{LA}}{\Delta t} = H_{w,LA} - G_{RIC} h_{LA} - Q_{LA}$$
 (A.3.5)

Eventualmente, da un certo istante in poi (a regime), :

$$G_{SP} + G_R = G_{RIC}$$
 (A.3.6)

- Nelle equazioni precedenti i termini col segno positivo rappresentano portate entranti, quelle con il segno negativo portate uscenti.
- Nella (A.3.3) il termine $-(H_{w,LA} + Q)$ è formale. Esso rappresenta l'energia che va al "lago" per condensazione e caduta e quella che va all'atmosfera. Tali quantità non sono indipendenti, ma correlate tra loro (lo scambio con le pareti causa condensazione).
- Anche la grandezza $G_{w,LA}$ è il risultato di un bilancio di più termini.
- Q_{LA} rappresenta la refrigerazione del "lago".

NODO 2

$$\text{Come il nodo 1 ponendo: } G_{FU} = G_{FL} = G_{RIC} = Q_{LA} = 0$$

NODO L

$$\text{Come il nodo 2 ponendo ulteriormente: } G_{SP} = G_R = 0$$

A.3.3 Equazioni di stato della miscela aria-acqua-vapore

Conoscendo energia, masse, volume di ogni nodo, si calcolano, in base alle equazioni di stato, la temperatura (che è la variabile indipendente), la pressione, ecc.

Le equazioni sono diverse a seconda che il vapore sia saturo o surriscaldato.

A.3.3.1 Vapore surriscaldato

Le equazioni di stato usate sono le seguenti:

ARIA (gas perfetto)

$$p_a V = M_a R_a T \quad (A.3.7)$$

$$h_a = c_{p_a} T \quad (A.3.8)$$

VAPORE (formulazione di Mollier)

$$p_s = \frac{M_s R_s T}{V + \theta M_s} \quad (A.3.9)$$

corrispondente alla relazione:

$$v = \frac{R_s T}{p_s} - \theta \quad (A.3.9')$$

$$h_s = 595 + 0.47(T - 273) - J p_s \quad (A.3.10)$$

θ e J sono funzioni della sola temperatura, date in tabella.

Note le condizioni iniziali p_o , T_o , V , ζ , si ha:

$$M_s = \frac{V}{v_s} = \frac{V}{R_s \left[\frac{T_o}{\zeta p_v(T_o)} - \theta(T_o) \right]} \quad (A.3.11)$$

$$M_a = \frac{V}{R_a T_o} \left[p_o - \zeta p_v(T_o) \right] \quad (A.3.12)$$

$$E_m = M_s \left[595 + 0.47(T_o - 273) - J p_v(T_o) \zeta \right] + M_a c_{p_a} T_o - B p_o V \quad (A.3.13)$$

Nel transitorio l'incognita è la temperatura, essendo noti dal bilancio di massa e energia, istante per istante, E_m , M_s , M_a , θ , J (calcolati al passo precedente):

$$E_m = M_s [595 + 0.47 (T - 273) - Jp_s] + M_a c_p T - BV (p_a + p_s) \quad (\text{A.3.14})$$

essendo:

$$p_a = \frac{M_a R_a T}{V}$$

$$p_s = \frac{M_s R_s T}{V + \theta M_s}$$

La (A.3.14) si può pertanto scrivere anche:

$$E_m = M_s 466.6 + M_s T \left(0.47 - \frac{J M_s R_s}{V + \theta M_s} \right) + M_a c_p T - BVT \left(\frac{M_a R_a}{V} + \frac{M_s R_s}{V + \theta M_s} \right) \quad (\text{A.3.14}')$$

da cui:

$$T = \frac{E_m - 466.6 M_s}{M_s \left[0.47 - R_s \left(\frac{J M_s + BV}{V + \theta M_s} \right) \right] + M_a c_v} \quad (\text{A.3.15})$$

Se p è espresso in kg/cm^2 , $B = 10000/427 = 23.42$.

Quando p_s (calcolato con la (A.3.9)) $> p_v(T)$, si passa a condizioni di saturazione.

A.3.3.2 Miscela satura

In questo caso la (A.3.13) diviene:

$$E_m = M_v h_v + M_f h_f + M_a h_a - BpV \quad (\text{A.3.16})$$

$$E_m = M_w [\chi h_v + (1 - \chi) h_f] + M_a h_a - BpV \quad (\text{A.3.16}')$$

con $M_w = M_v + M_f$

Poichè $\chi = \frac{v_w - v_f}{v_v - v_f}$, $v_w = \frac{V}{M_w}$, si può scrivere:

$$E_m = M_w \left[\chi (h_v - h_f) + h_f \right] + M_a h_a - BpV \quad (\text{A.3.16''})$$

$$E_m = M_w \left[h_f + (v_w - v_f) \frac{h_v - h_f}{v_v - v_f} \right] + M_a h_a - BpV \quad (\text{A.3.16'''})$$

$$E_m = M_w v_w \frac{h_v - h_f}{v_v - v_f} + M_w \left[h_f - v_f \frac{h_v - h_f}{v_v - v_f} \right] + M_a c_p T - BpV \quad (\text{A.3.16}^{IV})$$

$$E_m = V \frac{h_v - h_f}{v_v - v_f} + M_w \frac{h_f v_v - h_v v_f}{v_v - v_f} + M_a c_p T - BpV \quad (\text{A.3.16}^V)$$

Questa relazione può essere riscritta come segue:

$$E_m = V f_1(T) + M_w f_2(T) + M_a c_p T - BpV \quad (\text{A.3.17})$$

dove:

$$f_1(t) = \frac{h_v - h_f}{v_v - v_f} \quad ; \quad f_2(t) = \frac{h_f v_v - h_v v_f}{v_v - v_f}$$

$$E_m = V f'_1(T) + M_w f'_2(T) + M_a c_v T \quad (\text{A.3.17}')$$

dove:

$$f'_1(t) = \frac{u_v - u_f}{v_v - v_f} \quad ; \quad f'_2(t) = \frac{u_f v_v - u_v v_f}{v_v - v_f}$$

f_1, f_2, f'_1, f'_2 sono funzioni termodinamiche della sola temperatura.

Risolvendo questa equazione implicita si ricava T e quindi $p_v, p_a, p = p_a + p_v$.

Quando $\chi = \frac{u_v - u_f}{u_v - u_f} = \frac{h_v - h_f}{h_v - h_f} > 1$, si passa a condizioni di sur-

riscaldamento.

A.3.4 Portata tra i nodi

Nella attuale versione sono state adottate le formule di flusso dei gas perfetti da orifizi (Fig. A.1).

$$\text{Se } \frac{P_K}{P_L} < 1.1$$

$$G = S_{KL} \frac{P_L}{P_K} C \sqrt{19.6 \frac{P_K - P_L}{v_K}} \quad (\text{A.3.18})$$

$$\text{Se } \frac{P_K}{P_L} > 1.1$$

$$G = S_{KL} C \psi \sqrt{\frac{P_K}{v_K}} \quad (\text{A.3.19})$$

essendo C il coefficiente di contrazione della vena, costante (= 0.597) e ψ il coefficiente di espansione secondo Nusset.

In effetti è opportuno prevedere anche casi diversi dall'orifizio (caso dei tubi di sfiato, ad esempio).

Inoltre il coefficiente di contrazione varia con la velocità di arrivo all'orifizio, ossia con il rapporto delle aree

$$\frac{S_{KL}}{S_K} \quad (\text{si ha } C = 0.597 \text{ quando } \frac{S_{KL}}{S_K} = 0).$$

APPENDICE A.4: IL CODICE CONTEMPT

A.4.1 Generalità

Il codice può trattare sistemi di contenimento sia a piena pressione, che a soppressione di pressione.

Nel primo caso il sistema di contenimento viene schematizzato con un unico volume di controllo (contenitore semplice), oppure con due volumi (sistema di contenimento duale).

Nel caso di contenimento a soppressione di pressione il codice; considera due compartimenti principali: il dry-well ed il wet-well ~~un~~ ulteriore volume può essere utilizzato per rappresentare il contenitore duale, presente in alcune versioni del sistema MARK III.

Ciascun compartimento è suddiviso dal codice in due regioni, una contenente acqua allo stato liquido (regione liquido), l'altra contenente aria, vapore e gocce d'acqua (regione vapore). In ogni regione la temperatura è considerata uniforme, così come uniforme è considerata la pressione della regione del vapore.

Fra le regioni liquida e vapore sono ammessi trasferimenti di massa e di energia, tramite evaporazione, condensazione ed ebollizione. Questa schematizzazione a due regioni permette una migliore valutazione dei transitori conseguenti ad aggiunte di massa ed energia in una o in entrambe le regioni.

Variazioni di massa ed energia nel compartimento possono avvenire (Fig. A.3) tramite:

- le strutture conducenti calore;
- i sistemi di soppressione;
- i sistemi di sicurezza o salvaguardie ingegneristiche;
- le perdite (leakage);
- le aggiunte dirette tramite tabelle in input;
- le valvole rompivuoto.

Fornite in ingresso le condizioni iniziali del compartimento,

il codice esegue, ad ogni passo temporale, un aggiornamento della massa e dell'energia presenti nel compartimento stesso, (si veda anche il paragrafo A.4.2) e determina con un processo iterativo la pressione, la temperatura e tutti gli altri parametri che caratterizzano le condizioni termodinamiche del fluido contenuto.

Per la determinazione della pressione e della temperatura il codice fa uso del principio di conservazione dell'energia e delle ipotesi di Gibbs-Dalton per i vapori, considerando l'aria un gas perfetto, il vapore indisciolto nel liquido e tutti i componenti alla stessa temperatura.

A.4.2 Caratteristiche dei modelli dei vari compartimenti

A.4.2.1 - Il dry well.

A seconda del sistema di contenimento analizzato questo compartimento assume funzioni diverse. Infatti nei contenimenti a piena pressione esso costituisce il contenitore vero e proprio, mentre se è presente il soppressore di pressione ha la funzione di incanalare la miscela acqua-vapore, prodotta nell'incidente, verso la piscina di soppressione. In questo ultimo caso è possibile schematizzare sistemi di contenimento a soppressione di pressione a sfiati sia verticali (Fig. A.4) che orizzontali (Fig. A.5) scegliendo un'opportuna opzione cautelativa, si ha la possibilità di trascurare la condensazione finché il blow-down ed il flusso nei tubi di sfiato non è terminato; in tal caso la maggior parte delle gocce d'acqua che si formano durante il blow-down non ha il tempo di cadere sul pavimento, ma va a finire direttamente negli sfiati, producendovi una maggiore caduta di pressione, fatto che comporta una pressione maggiore all'interno del dry well.

A.4.2.2. Il wet-well.

Il wet-well è il compartimento caratteristico dei sistemi a soppressione di pressione in cui la piscina ha la funzione di condensare il vapore proveniente dal dry-well attraverso i tubi di sfiato. Nelle figg. A.4 e A.5 sono chiaramente indicati i fenomeni che il codice consente di schematizzare.

Qualunque sia la quantità di acqua presente nel wet-well, il codice ipotizza che il vapore condensi totalmente. Ciò costituisce un limite, perchè porta a sottostimare la pressione che si ha nel dry-well e nel wet well quando la quantità di acqua presente nella piscina è poca rispetto alla massa ed all'energia associate alla portata di efflusso.

A.4.2.3. Il contenitore duale(o compartimento anulare).

Questo compartimento viene considerato solo dalle più recenti versioni del CONTEMPT ed ha lo scopo di contenere il dry well e/o il wet well; a differenza di essi può trasferire massa ed energia soltanto tramite le strutture conducenti calore e le eventuali perdite (il codice non prevede cioè per questo compartimento aggiunte di massa ed energia da tabelle in input).

A.4.2.4. Il sistema primario.

Questo compartimento non è considerato finchè non finisce il blow-down. E' formato dalla sola regione liquido, che il modello considera possa bollire o uscire per troppo pieno.

Gli scambi di massa e/o energia possono avvenire solo con il dry-well e precisamente con la zona vapore nel caso l'acqua bolla, con la zona liquida del dry-well nel caso l'acqua nel primario superi il volume proprio del primario stesso.

Oltre alle aggiunte di massa ed energia connesse con il funzio-

namento degli ECCS, possono essere forniti in input le aggiunte di energia dovute al decadimento dei prodotti di fissione ed alle reazioni metallo-acqua.

E' anche possibile considerare gli scambi termici attraverso le pareti fra il sistema primario e qualsiasi altro compartimento.

A.4.3 Modelli di trasferimento di massa ed energia fra i vari compartimenti.

A.4.3.1 Blow-down

In seguito ad incidente di perdita di refrigerante (LOCA) si ha, all'interno del dry-well, un efflusso di acqua e vapore che costituisce la portata di blow-down. Per studiare il transitorio di temperatura e pressione nel contenimento a seguito di un incidente, è necessario fornire in input ai codici Contempt tabelle che diano la portata totale (acqua + vapore) e l'entalpia specifica in funzione del tempo.

Il codice considera che l'efflusso di blow-down avvenga nella regione vapore del dry-well e che finisca con l'ultimo valore fornito dalle tabelle.

Se prima della fine del blown-down sono già intervenuti i sistemi di refrigerazione e di riallargamento del nocciolo, il loro contributo deve essere incluso nelle tabelle di blown-down.

Durante il calcolo i valori di entalpia e di portata considerati per aggiornare la massa e l'energia nel dry-well sono quelli che si hanno a metà del passo temporale in cui ci si trova e sono ottenuti per interpolazione lineare dei valori tabellati.

Nell'uso del codice si è notato che, per grosse portate e grandi energie di blow-down, è necessario usare piccoli passi di

calcolo; altrimenti il calcolo si blocca perchè il codice non riesce a fare il bilancio di massa e di energia.

A.4.3.2. Strutture conducenti calore.

Il Contempt Lt/26 permette di schematizzare fino a 20 strutture conducenti calore disposte o all'interno di uno qualunque dei compartimenti o fra di essi oppure fra un compartimento e l'esterno. Per ogni struttura bisogna fornire in input i dati geometrici, le regioni con cui confina, la temperatura a cui inizialmente la struttura si trova, il coefficiente di conducibilità del materiale di cui è costituita la struttura, il coefficiente di trasmissione del calore fra la parete e l'ambiente circostante; deve inoltre essere specificato il reticolo cioè le coordinate dei punti in cui va calcolata la temperatura. La scelta del reticolo è molto importante; infatti esso influisce sia sul calcolo della quantità di calore assorbita dalle strutture, sia sul tempo di calcolo del codice (è anche da notare che un reticolo sbagliato porta instabilità nella risoluzione della equazione del calore).

Uno studio parametrico eseguito all'interno dell'Istituto di Impianti nucleari (fig. A.6) ha portato a concludere che è consigliabile usare una distanza fra i "mesh points" per l'acciaio di 1,5 mm e per il cemento di 35 mm.

Il programma usa il metodo alle differenze finite per risolvere l'equazione monodimensionale della trasmissione del calore:

$$c(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \nabla [k(x) \nabla T(x,t)] + P(x,t) \quad (A.4.1)$$

Sulla superficie della struttura avviene lo scambio di calore con i compartimenti adiacenti e la quantità di calore scambiata è data da:

$$Q = A H F (T - T_m) \quad (A.4.2)$$

Il valore di H può essere fornito in input in funzione della temperatura o del tempo, oppure essere calcolato dal codice in vari modi. I fattori A e F dipendono dalla geometria della struttura conducente calore. Infatti se si ha uno slab (parete piana) A è la superficie effettiva ed F è uguale a 1; se si usa una geometria cilindrica A è l'altezza del cilindro ed F il perimetro della circonferenza di base; se si usa una geometria sferica F è la superficie della sfera ed A è 1, se la geometria è una sfera completa, 0,5 se è una emisfera, 0,25 se è un quarto di sfera.

A.4.3.3 Perdite normali (Normal Leakage)

Per perdite normali o di piccole fessure è possibile fissare in input la portata in base alla differenza di pressione Δp fra i due compartimenti connessi (Fig. A.1). Il codice calcola tale portata con la relazione:

$$G_{KL} = C \rho_K \Delta p_{KL} \quad (A.4.3)$$

essendo C un coefficiente da dare in "input" (funzione anche dell'area di efflusso).

A.4.3.4 Perdite attraverso penetrazioni (Penetration Leakage) ^(o)

Per questo tipo di perdite si suppone di calcolare il flusso di miscela con l'equazione valida per un gas attraverso un ugello, che può essere convergente, divergente o convergente-divergente. In tutti e tre i casi l'equazione usata è:

$$G_{KL} = SCZ \rho_K \sqrt{\frac{2\gamma}{(\gamma-1)R_m T_m} (1-Z^{\gamma-1})} \quad (A.4.4)$$

Il valore di Z dipende dalla forma dell'ugello e dalla differenza di pressione fra la sezione di entrata e di uscita.

Dall'analisi dell'equazione si vede che non viene tenuto conto di alcuna perdita di carico irreversibile nell'ugello e che la portata è solo funzione delle caratteristiche del fluido e della differenza di pressione esistente fra i due compartimenti collegati.

E' possibile variare il valore di C (in genere fra 0,5 e 1) per migliorare il calcolo della portata, anche se teoricamente la applicazione della formula A.4.4 dovrebbe essere fatta per $C = 1$.

(o) Nell'analisi del comportamento del codice nell'uso di questo tipo di perdita (ma il discorso è uguale anche per il "normal leakage") si è appurato che i valori delle portate riportate nei tabulati di uscita del codice sono mediati su due passi di calcolo e che la pressione e la temperatura sono calcolate dopo aver aggiornato, con i valori mediati, le masse e le energie dei due compartimenti connessi dalla perdita. In ciò si ha la spiegazione del perchè talvolta si possa avere portata totale e di vapore positiva e portata d'aria negativa (il che sarebbe assurdo se i valori di portata fossero determinati con un solo passo di calcolo). Infatti ciò accade quando, dopo il primo passo di calcolo si ha inversione di pressione; nel secondo passo si avrà convenzionalmente portata negativa e se essa è minore in valore assoluto di quella positiva si avrà sul tabulato portata totale positiva. Questo non impedisce che una delle due portate parziali possa avere segno diverso dalla portata totale. Infatti ciascuna di esse è data, per ogni passo di calcolo, dalla portata totale moltiplicata per la frazione di massa del componente considerato, presente nel compartimento dove all'inizio del passo di calcolo la pressione era maggiore; per cui, se c'è notevole differenza fra le frazioni di massa presenti nei due compartimenti, una delle due portate parziali mediate sui due passi di calcolo potrà avere segno diverso da quello della portata totale.

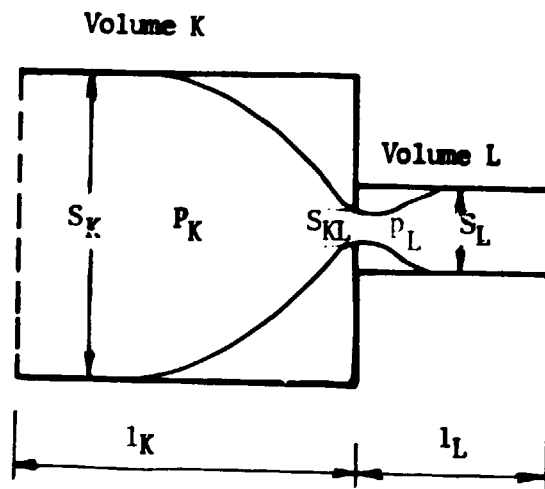


Fig. A.1: Schema di giunzione

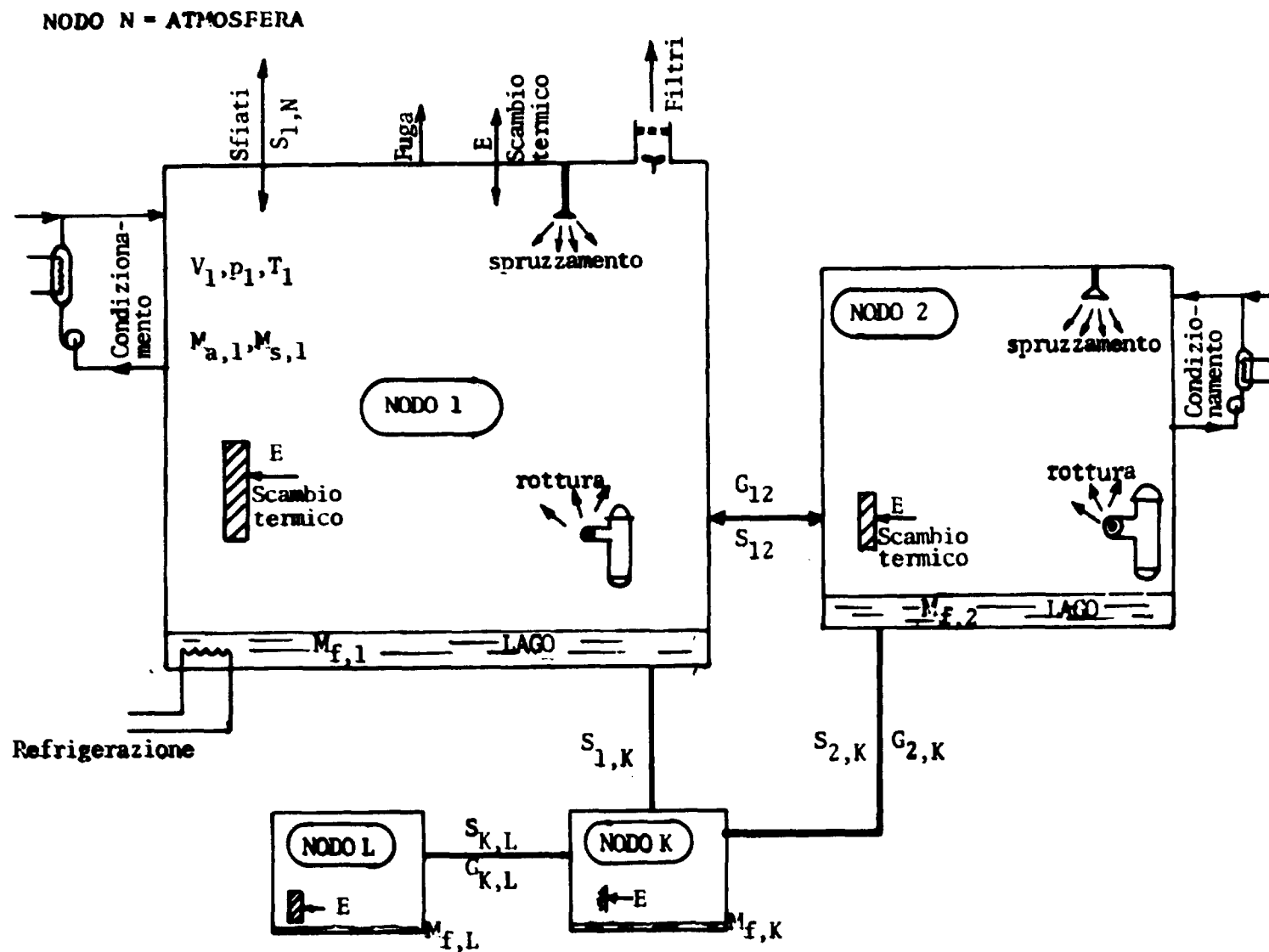


Fig. A.2: Schema dei modelli di base del codice PUMO

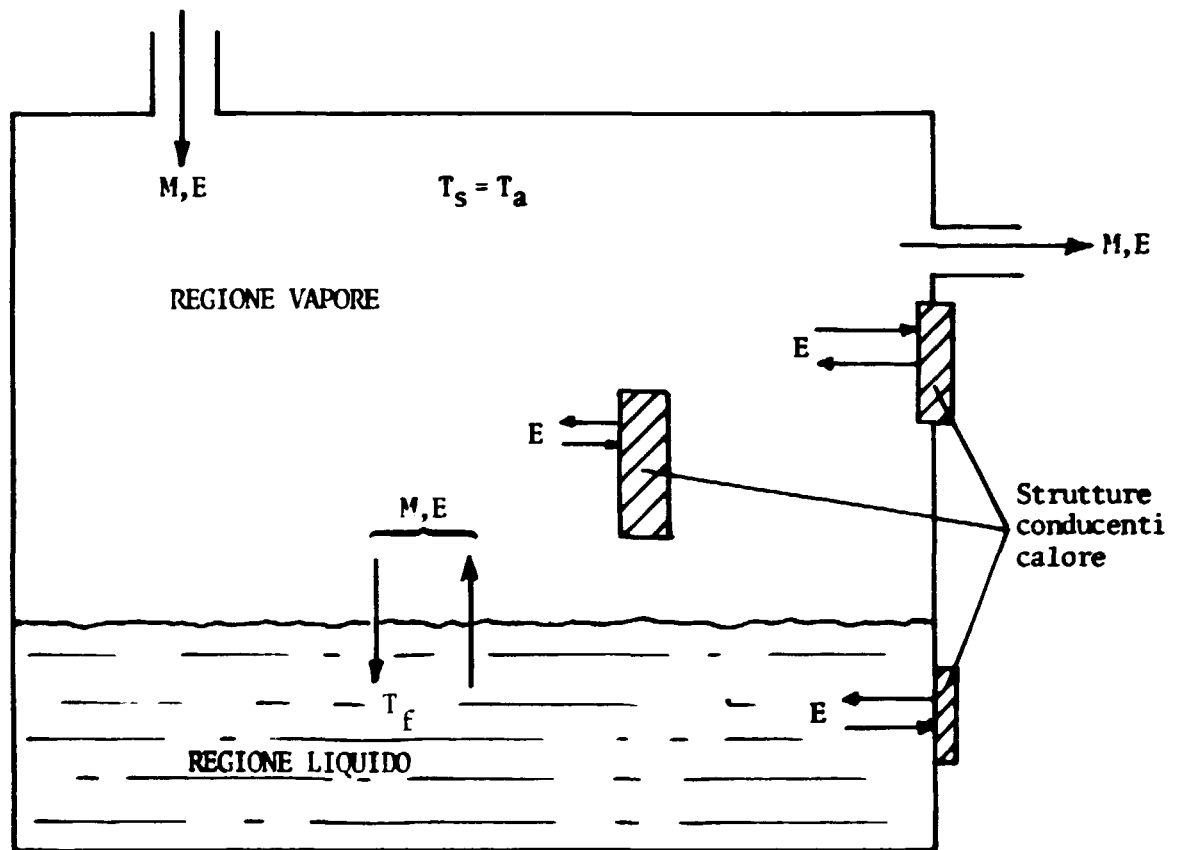


Fig. A.3: Schema del modello di base di un compartimento

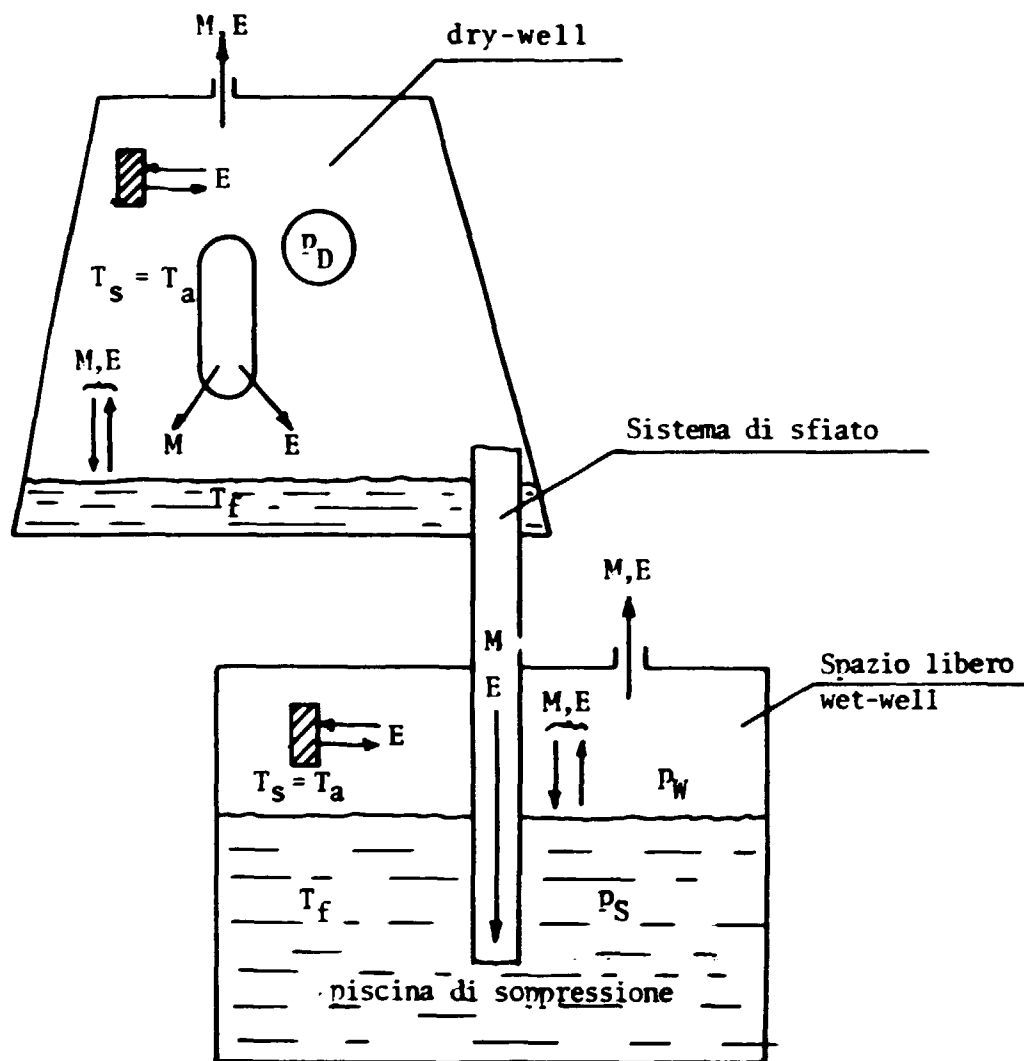


Fig. A.4: Schema di contenimento a soppressione di pressione a sfiati verticali

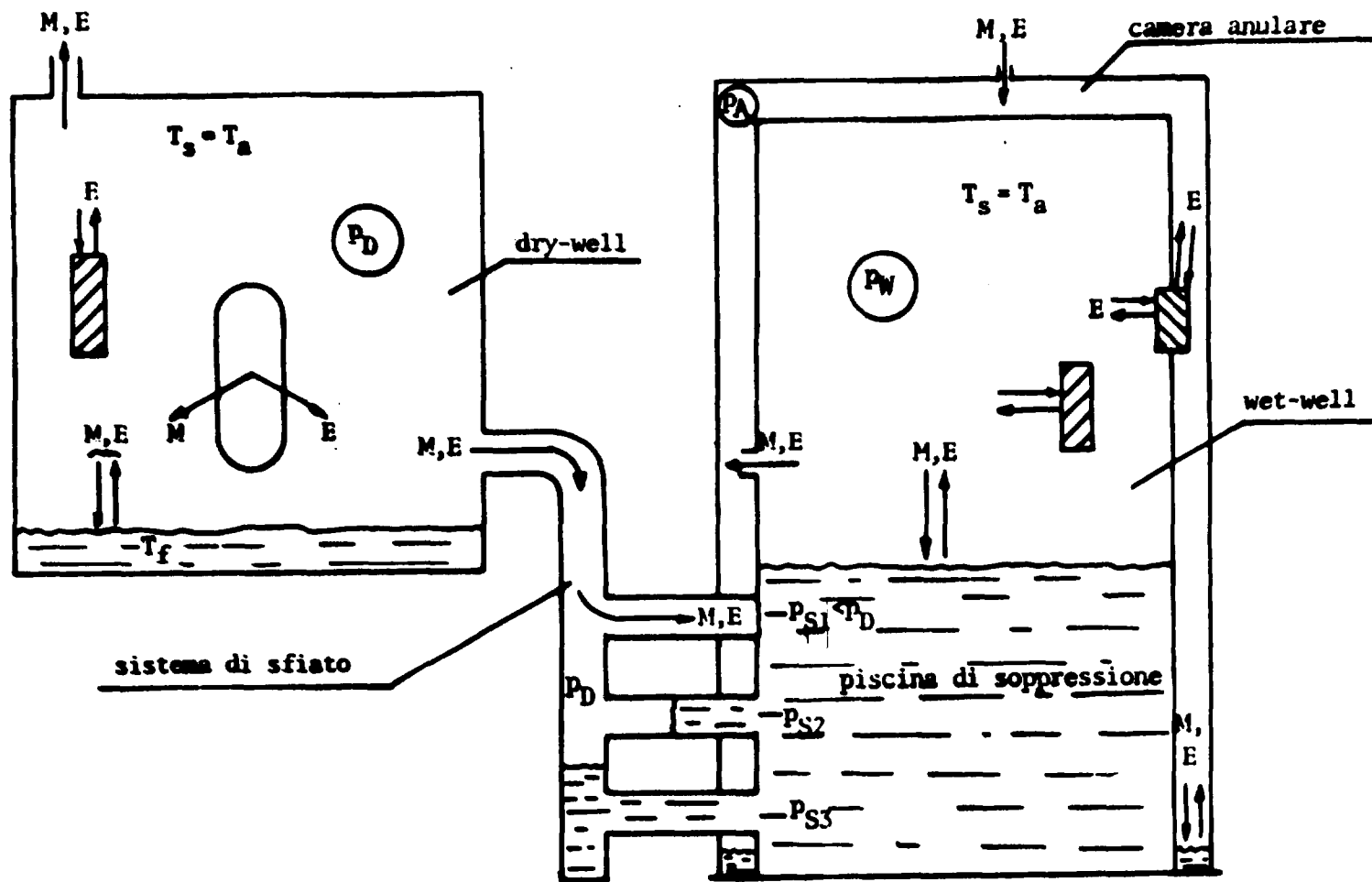


Fig. A.5: Schema di sistema di contenimento a sfiati orizzontali

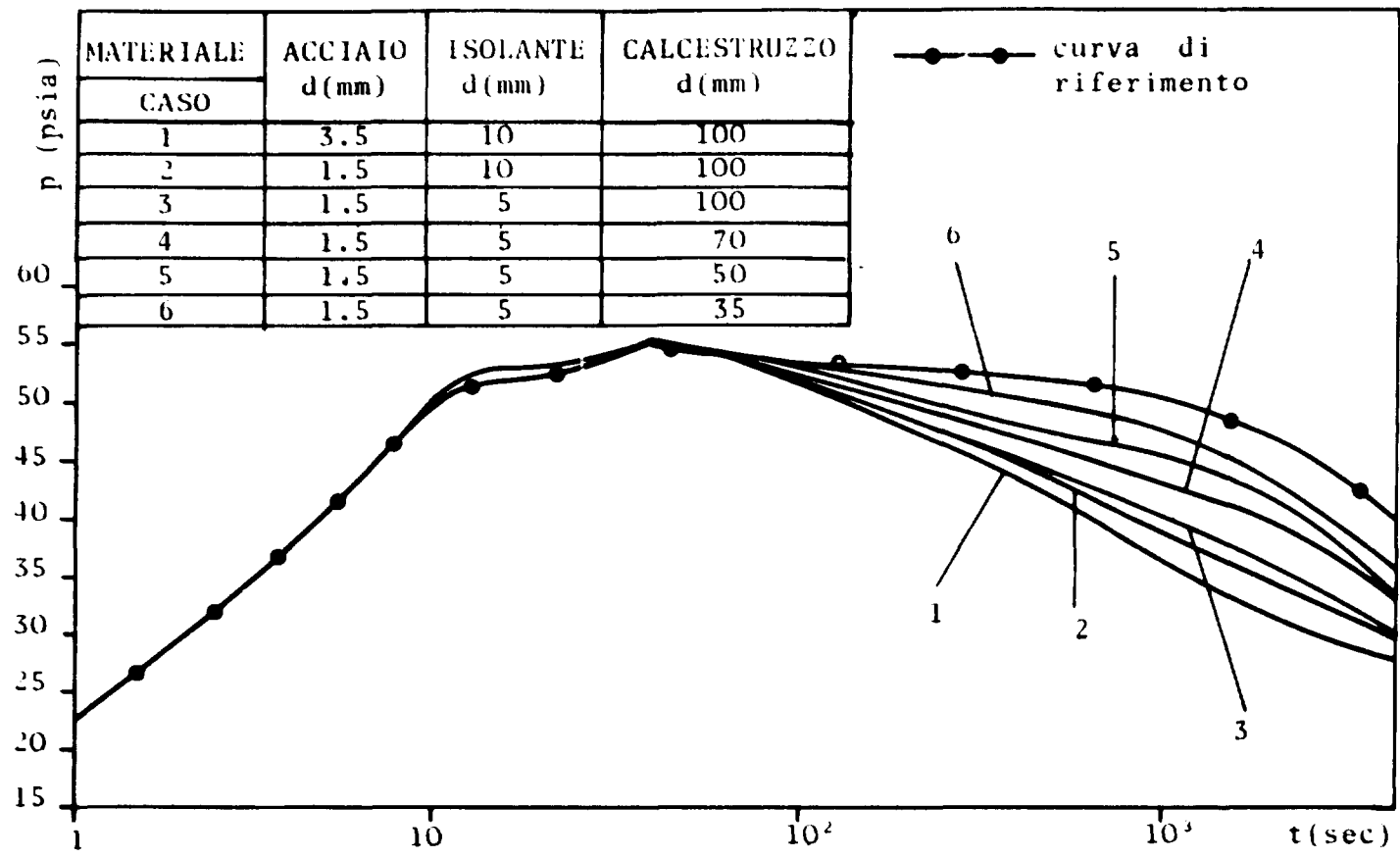


Fig. A.6: Andamento della pressione in un sistema di contenimento al variare della distanza d tra due mesh-points consecutivi nelle strutture conducenti calore (di diversi materiali).