Comitato Nazionale Energia Nucleare

MISURE DI BUCKLING CON RETICOLI AL TORIO NEL REATTORE ECO

F. AMOROSO, U. BROCCOLI, A. COLOMBINO, V. TOSI, A. VIGO

This material has been copied
under licence from CANCOPY.
Resale or further copying of this material is
strictly prohibited.

Le présent document a été reproduit
avec l'autorisation de CANCOPY.
La revente ou la reproduction ultérieure
en sont strictement interdites.

RT/FI(75)2

Comitato Nazionale Energia Nucleare

MISURE DI BUCKLING CON RETICOLI AL TORIO NEL REATTORE ECO

F. AMOROSO, U. BROCCOLI, A. COLOMBINO, V. TOSI, A. VIGO

CNEN - RT/FI(75)2

F. Amoroso, U. Broccoli, A. Colombino, V. Tosi, A. Vigo (CNEN, Laboratorio Fisica e Calcolo Reattori)

MISURE DI BUCKLING CON RETICOLI AL TORIO NEL REATTORE ECO

Riassunto — Vengono interpretate misure di buckling su reticoli al torio effettuate nel reattore ECO (Ispra) con il metodo della sostituzione. Il combustibile consiste di pastiglie sinterizzate di ossido misto UO_2-ThO_2 arricchito al 2.34% e 2.36% in U-235; gli elementi sono costituiti da fasci di barrette e i reticoli sono moderati a D_2O; il refrigerante è costituito da miscele di D_2O-H_2O e aria. I parametri variati sono il passo reticolare, il numero di barre per fascio, la miscela del refrigerante. Un codice eterogeneo di reattore (HEFREM) in connessione con un codice di cella (PINOCCHIO), viene utilizzato per l'interpretazione dei risultati. infine viene presentato un confronto tra i valori sperimentali e i valori teorici.

CNEN - RT/FI(75)2

F. Amoroso, U. Broccoli, A. Colombino, V. Tosi, A. Vigo (CNEN, Laboratorio Fisica e Calcolo Reattori)

MISURE DI BUCKLING CON RETICOLI AL TORIO NEL REATTORE ECO

Summary — Buckling measurements for ThO_2-UO_2 fuel lattices in ECO reactor are presented. The substitution technique was used. The fuel elements were 19 and 37 rod clusters, with U-235 fissile material enriched to about 2.35%. The measurements were carried out with air, D_2O, H_2O and mixtures of D_2O-H_2O as coolant at four lattice pitches. An heterogeneous code was used to evaluate the experimental data. The measured values are compared with pure theoretical calculations.

RT/FI(75)2

Testo pervenuto nel gennaio 1975

Stampato in formato UNI presso il Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare,
Direzione Centrale Relazioni Esterne - Roma, Viale Regina Margherita 125 (tel. 8528)

INDICE

	Pag.
1. Determinazione del buckling in insiemi critici a due regioni con il metodo di sostituzione	5
2. Procedura sperimentale e risultati	7
3. Interpretazione con metodo eterogeneo dei dati sperimentali	35
Bibliografia	71
Ringraziamenti	73

1. DETERMINAZIONE DEL BUCKLING IN INSIEMI CRITICI A DUE REGIONI CON IL METODO DI SOSTITUZIONE

Questi insiemi critici sono formati da una zona centrale o eccentrica costituita dal reticolo di prova, circondata da una zona che funziona sia da sorgente neutronica (driver) sia da reticolo di riferimento.
Il metodo di sostituzione consiste nel determinare il buckling del reticolo di prova dalla misura dei cambiamenti di grandezza critica indotti nel reticolo di riferimento quando in esso si sostituisce successivamente un numero crescente di elementi di prova.
Il reticolo di riferimento ha un Buckling noto, ottenuto con grande precisione mediante mappature di flusso.
I principali vantaggi della tecnica di sostituzione sono:

- l'utilizzo di un piccolo numero di elementi di prova
- le misure sono semplici e veloci
- le differenze nella grandezza critica si possono misurare con notevole precisione.

Dal punto di vista economico l'utilizzo di un sistema critico è giustificato solo nel caso di una campagna molto estesa di misure di Buckling ed eventualmente anche di altri parametri reticolari. Altrimenti è più conveniente utilizzare sistemi sottocritici, meno costosi per quanto riguarda costo di impianto e di esercizio.
Esiste un notevole lavoro di interpretazione per risalire dal

dati sperimentali al valore del Buckling del reticolo di prova. La maggiore difficoltà è dovuta alla variazione di spettro neutronico delle regioni costituenti il sistema moltiplicante. In Francia un metodo di analisi fu sviluppato da Naudet nel 1959 per reticoli ad D_2O e sperimentato con successo in Aquilon: esso consiste nell'applicazione della teoria perturbativa ad un modello omogeneo a due gruppi /1/.
In Svezia, Persson e collaboratori /2/, nel 1966, svilupparono un metodo basato sulla teoria perturbativa a un gruppo combinata a un nuovo concetto di cella consistente nel considerare l'elemento di combustibile dislocato al confine di cella e il moderatore nel centro della cella: di conseguenza il reattore risulta diviso in tre zone, una zona di riferimento, una zona di prova e una zona di transizione. Il cambiamento in Buckling dovuto alla sostituzione degli elementi di riferimento con elementi di prova viene espresso in termini di Buckling di ognuna delle tre zone. Dalle misure ottenute con due o più zone di rpova di diversa grandezza, la differenza in Buckling tra la zona di riferimento e la zona di prova può essere ottenuta senza la conoscenza del Buckling della zona di transizione. I metodi francese e svedese sono utilizzabili quando il reticolo di riferimento e quello di prova non sono troppo diversi in quanto a bilancio neutronico.
Il metodo usato nella presente tesi nell'interpretazione delle misure di sostituzione effettuate nel reattore ECO (Ispra) su reticoli al Torio è basato su calcoli eterogenei (source-sink) ed è stato sviluppato nel centro di calcolo di Bologna (Laboratorio Parametri Reticolari) /9/. Con questo metodo sono stati interpretati le misure di sostituzione condotte dai canadesi a Chalk-River nel reattore ZEEP e nel reattore ZED-2 /3/. Il metodo viene descritto in dettaglio nel capitolo 3.

2. PROCEDURA SPERIMENTALE E RISULTATI

Nel presente capitolo vengono illustrati i mezzi sperimentali usati (reattore ed elemento di riferimento, elemento di prova) la procedura sperimentale e le tabelle dei dati. Inoltre viene trattato anche il problema degli effetti di inomogeneità degli elementi di prova.

2.1 - Descrizione dell'apparato usato

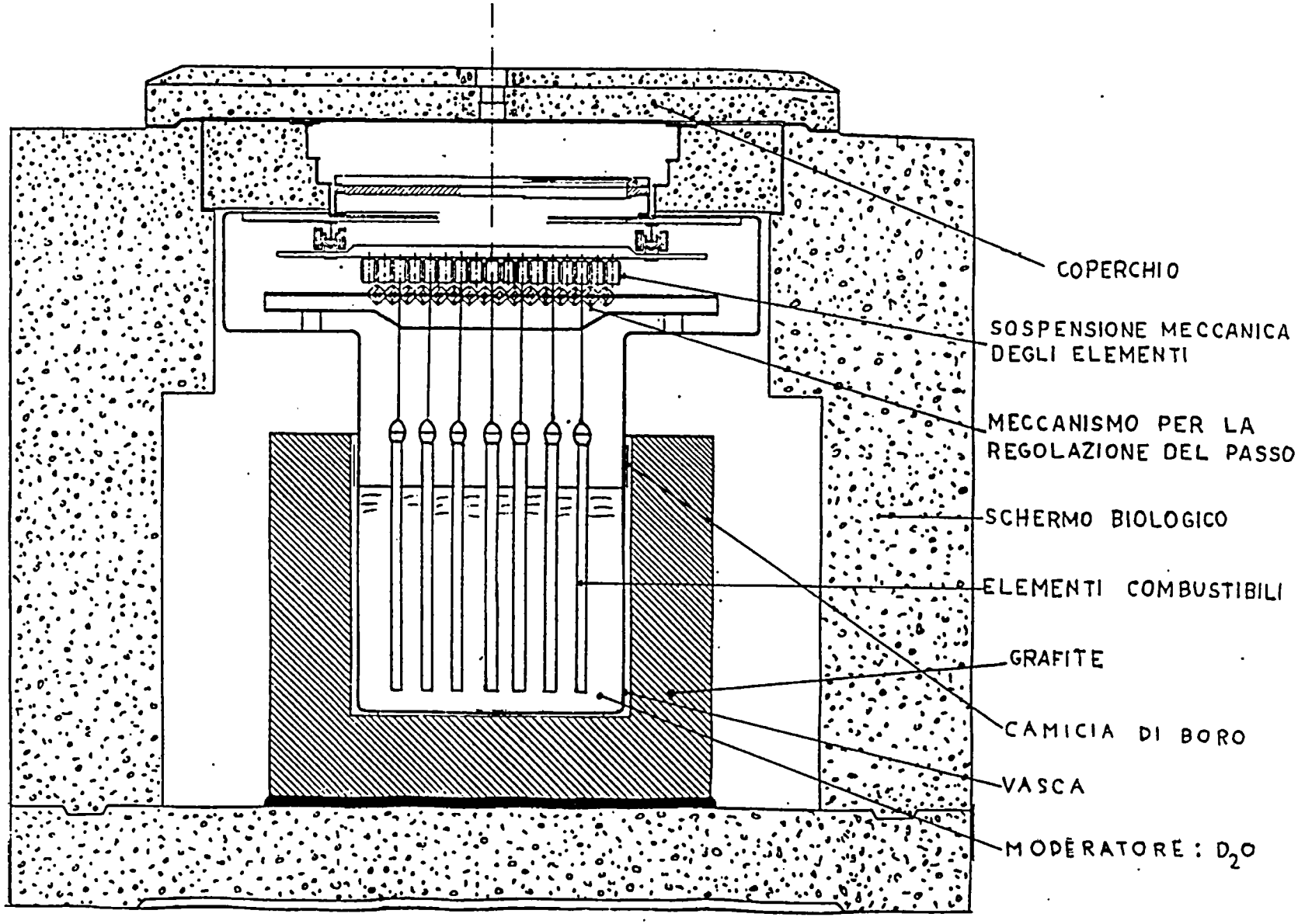
2.1a) Descrizione del reattore ECO

Lo schema semplificato del reattore è rappresentato nella Fig. 1. Esso ha la caratteristica di essere semplice in quanto ha una forma a vasca, il cui fondo e le cui pareti, sono di grafite. La grafite funge da riflettore ed è collocata entro uno schermo biologico reale (calcestruzzo). Gli elementi di combustibile sono sospesi ad un meccanismo - saldato alla vasca - che permette di variare il passo a piacimento tra il limite minimo di 17 cm e quello massimo di 30 cm. Il reattore è connesso al circuito riempito di acqua pesante che a contatto col nocciolo assume moti convettivi.

La superficie non interessata dall'acqua pesante è lambita da gas di azoto (N_2) mantenuto ad una appropriata pressione minima / 9/.

Il materiale che costituisce il reattore vasca cilindrica, è di alluminio e le sue dimensioni sono riportate in Tabella 1.

FIG. 1



SCHEMA DEL REATTORE DI RIFERIMENTO ECO

TABELLA 1

diametro interno	3002 mm
altezza	4225 "
spessore	8 "

L'acqua pesante (D_2O) è alimentata nella vasca da quattro tubi di alluminio che perforano il fondo della stessa, chiusi da un settore circolare di 90°. La parte dei tubi entrante nella vasca è di 1300 mm; essi sono perforati allo scopo di procurare la più piccola perturbazione possibile di superficie durante la circolazione del D_2O. Il riflettore composto da blocchi di grafite, assume una forma ottagonale regolare con un diametro medio esterno di 5053 mm ed un diametro medio interno di 3100 mm. La profondità del riflettore è di 900 mm. La densità della grafite è di 1.70 ± 0.05 gr/cm^3; la grafite presenta inoltre un contenuto di boro di 0.1 ppm e un'impurezza totale dello 0.05%.
Il riflettore presenta buchi orizzontali a diverse altezze effettuati per operazioni ed esperimenti strumentali. Nella interfaccia tra il reattore a vasca ed il riflettore radiale, è mantenuto un rivestimento cilindrico di boro avente le dimensioni riportate in tabella 2.

TABELLA 2

spessore del boro	6.35 mm
raggio interno	1547 "
altezza	500 "
spessore del B_4C	4.35 "

L'orlo inferiore del rivestimento, normalmente coincide col livello di D_2O per far sì che si elimini l'effetto del riflettore radiale a grafite posto sopra il livello di D_2O. Il reattore inoltre presenta la possibilità di funzionare come reattore radialmente nudo in quanto la parete radiale della vasca può essere schermata da un rivestimento di boro. Infine il controllo nucleare del reattore è effettuato con due barre leggere poste a 23 cm dall'elemento centrale, e da quattro piatti di controllo di cui due orizzontali e due verticali.

2.1b) Descrizione dell'elemento di riferimento

L'elemento di combustibile di riferimento ECO è disegnato in Fig. 2, è composto di un fascio di 19 barre cilindriche di uranio naturale metallico. Il fascio è rivestito da un tubo di alluminio tipico a pressione e da difenile che funge da refrigerante organico.
Lo spazio tra la zona a pressione e il tubo di calandria è riempito da aria. Queste parti che costituiscono il rivestimento dell'elemento di combustibile - tubo a pressione, tubo di calandria e tipo di refrigerante organico - possono essere facilmente sostituibili in caso di necessità.

TABELLA 3

Caratteristiche dell'elemento combustibile di riferimento ECO

diametro della barra	12 mm
rivestimento d'alluminio	1 "
lunghezza della barra di U	2900 "
peso dell'U per barra	6231.5 g.
volume del refrigerante organico a 20°C	5001.5 cm^3
volume di U per unità di lunghezza dell'elemento	21.48 cm^3/cm
densità dell'U	18.95 g/cm^3
volume del refrigerante organico per unità dell'elemento	17.668 cm^3/cm
impurezze del boro nell'U	= 1.2 ppm

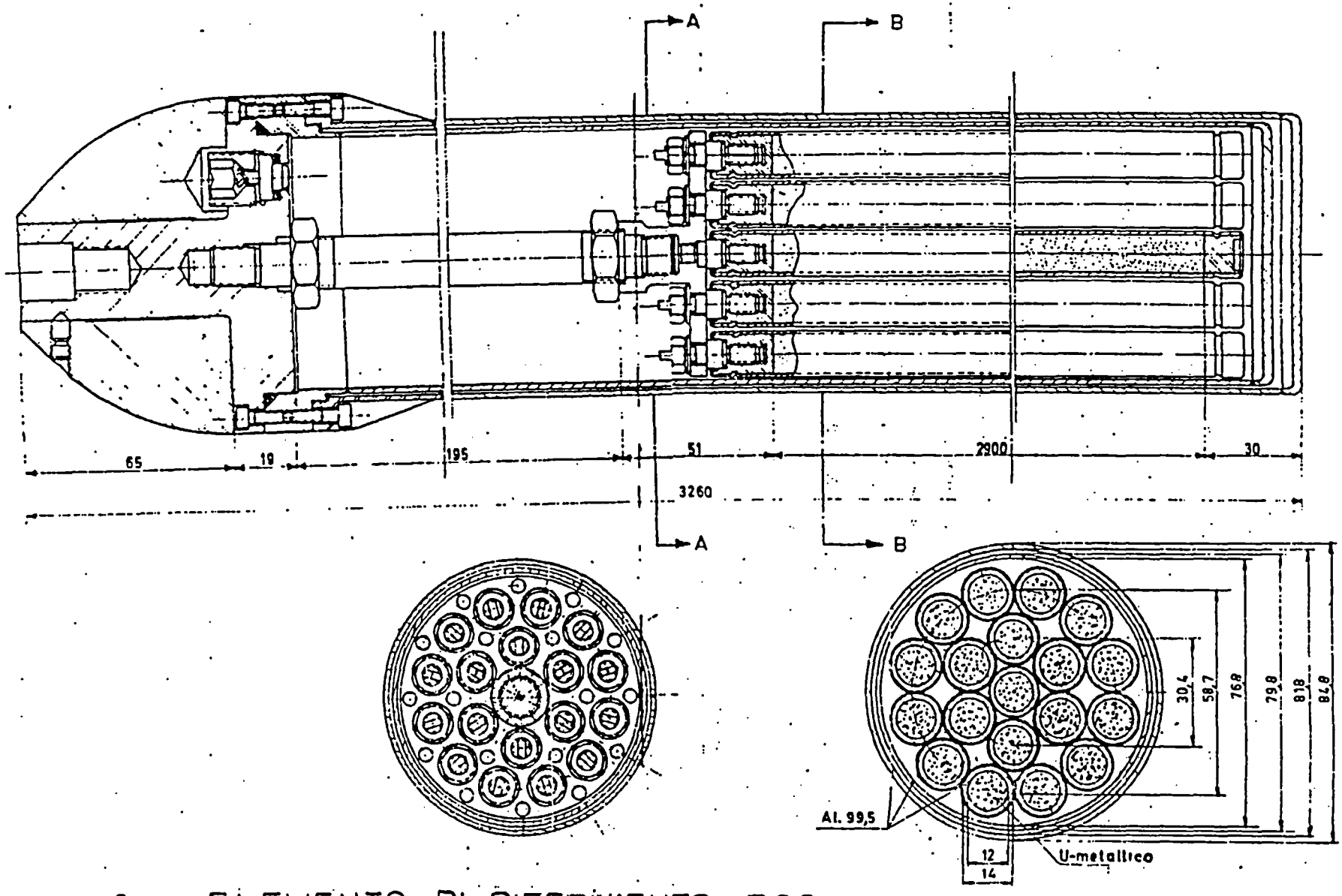


FIG. 2 ELEMENTO DI RIFERIMENTO ECO

2.1c) Descrizione dell'elemento di prova

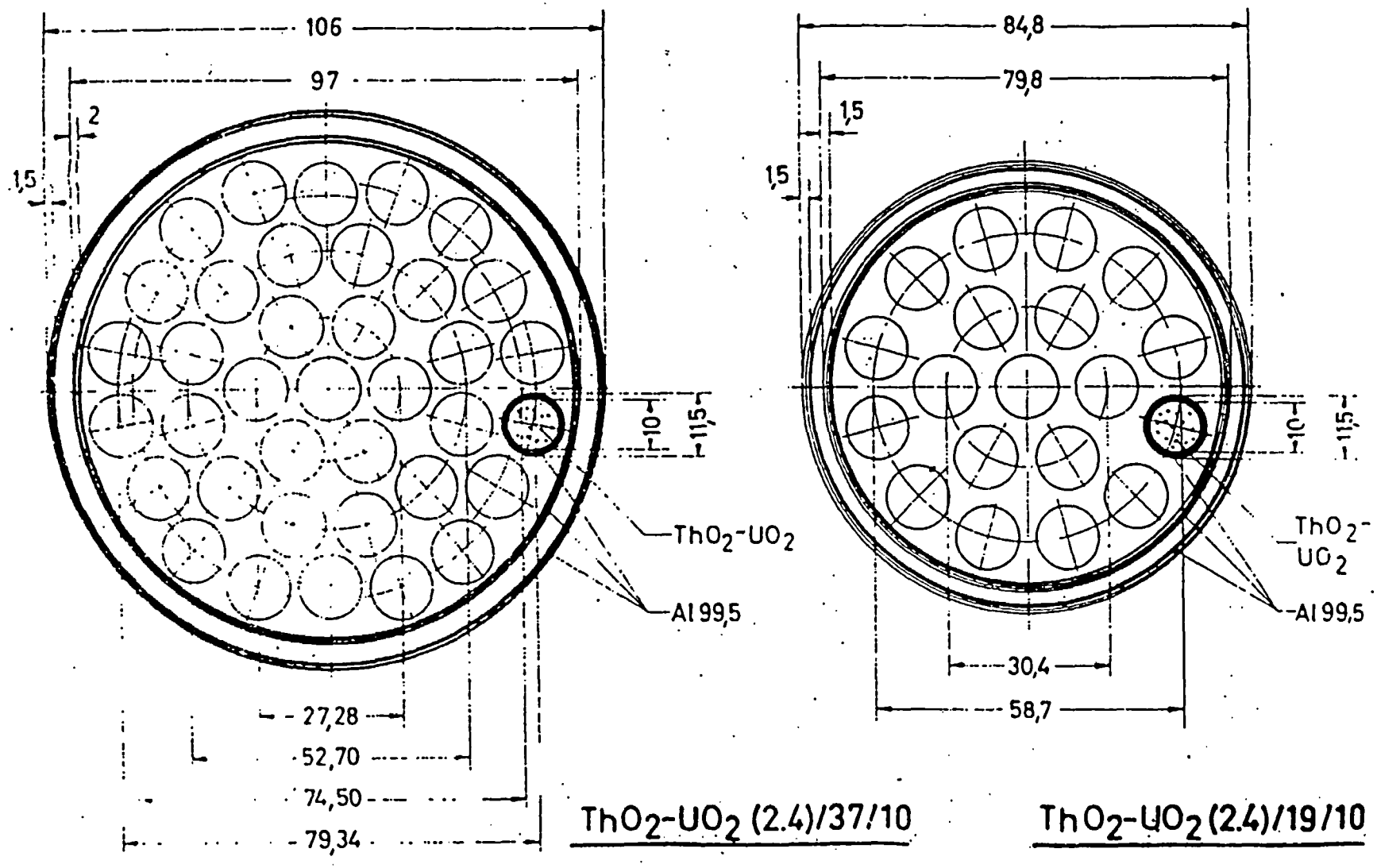
Vengono utilizzati due elementi di combustibile di prova, essi sono disegnati in Fig. 3. Il materiale fertile è l'insieme $ThO_2 - UO_2$. Sono composti uno da un fascio di 19 e l'altro da un fascio di 37 barrette cilindriche di ThO_2-UO_2 in alluminio al 99.5.

Tutto il fascio è poi rivestito da un tubo di alluminio tipico a pressione e da un tubo di alluminio calandria. Lo spazio tra i due tubi è riempito da aria, mentre il refrigerante che riempie il tubo a pressione è vario, ossia può essere D_2O, aria oppure un misto di H_2O e D_2O.

TABELLA 4

Caratteristiche dell'elemento combustibile di prova

Diametro della barra	10 mm
Rivestimento d'alluminio	0.75 "
U contenuto	U/(U+Th) = 2.67%
Contenuto di U235	U/(U+Th) = 2.40%
Arricchimento d'U	U/U = 89.9%
Lunghezza della barra fertile	1800, 2000, 2200 mm
Densità del $Th_2O - UO_2$	9.35 g/cm^3
Materiale di rivestimento	Al al 99.5
Refrigerante	H_2O, D_2O, aria e misto di H_2O e D_2O
n° di barre del fascio	37 e 19

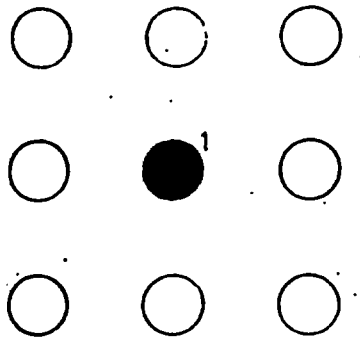


ELEMENTI DI PROVA AL TORIO

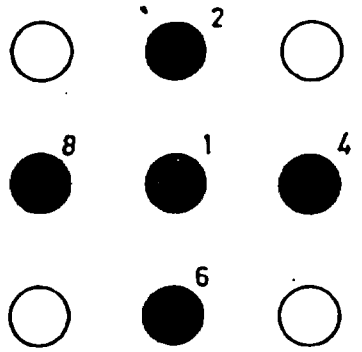
FIG. 3

2.2 - Descrizione del metodo sperimentale usato

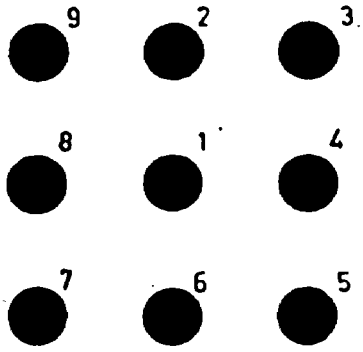
Il lavoro sperimentale fatto può sintetizzarsi in due fasi.
La prima riguarda la determinazione del buckling materiale del reticolo di riferimento del reattore ECO, mediante il metodo flusso mappato. Il reattore ECO era costituito da 89 elementi combustibili di riferimento che formavano un reticolo quadrato prima col passo 18.8 cm poi 22.3, 25.5 e 28.05 cm.
I risultati di questo primo lavoro parziale sono riportati nel capitolo successivo.
La seconda fase consiste nell'inserire gli elementi combustibili di prova a 19 e 37 barre nella zona centrale del reticolo di riferimento. La sostituzione degli elementi combustibili di riferimento con quelli di prova viene effettuata secondo lo schema della Fig. 4 cioè si parte col sostituire l'elemento centrale poi 5 elementi centrali e infine 9 e per ognuna delle 4 situazioni viene misurato il livello critico con una precisione di $\pm$ 0.1 mm.
Queste misure vengono ripeture per 4 diversi passi reticolari e per i seguenti tipi di refrigerante negli elementi di prova: aria, H_2O, 30% H_2O-70% D_2O, 50% H_2O - 50% D_2O, quest'ultimo solo per gli elementi di prova a 37 barre, e D_2O.
Le misure delle altezze critiche sono state fatte in concomitanza alla rilevazione della temperatura del moderatore che è costituito da D_2O.
I valori di suddette misure sono riportati nelle tabelle 5 ÷ 13.



1 ELEMENTO DI PROVA SOSTITUITO



5 ELEMENTI DI PROVA SOSTITUITI



9 ELEMENTI DI PROVA SOSTITUITI

Fig. 4

2.3 - Tabelle riassuntive dei risultati

TABELLA 5

Elementi a 19 barre - refrigerante:aria

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	218.31	24.31	99.725
	1	206.45	24.32	
	5	172.14	24.28	
	9	149.28	24.28	
22.3	0	180.33	24.31	99.725
	1	173.26	24.15 24.2	
	5	151.50	24.17	
	9	135.85	24.16	
25.5	0	190.01	24.18	99.725
	1	182.42	24.18	
	5	159.26	24.17	
	9	143.00	24.18	
28.05	0	212.13	24.04	99.724
	1	202.31	24.05 24.05	
	5	174.10	24.06	
	9	155.18	24.06	

TABELLA 6

Elementi a 19 barre- refrigerante: D_2O

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	218.75	23.81	99.716
	1	206.51	23.80	
	5	169.86	23.82	
	9	145.18	23.84	
22.3	0	180.51	23.58	99.716
	1	173.56	23.84 23.77	
	5	151.39	23.83	
	9	135.13	23.81	
25.5	0	190.33	23.94	99.722
	1	183.02	23.94 23.94	
	5	160.36	23.92	
	9	143.97	23.92	
28.05	0	212.19	23.95	99.722
	1	203.21	23.91	
	5	176.33	23.95	
	9	157.65	23.93	

TABELLA 7

Elementi a 19 barre – refrigerante: H_2O

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	219.91	23.22	99.693
	1	212.21	23.24	
	5	190.40	23.20	
	9	174.45	23.24	
22.3	0	181.66	23.30	99.693
	1	179.06	23.30	
	5	172.03	23.30	
	9	166.35	23.29	
25.5	0	191.85	23.23	99.693
	1	190.25	23.24	
	5	186.81	23.24	
	9	184.05	23.26	
28.05	0	214.20	23.61	99.700
	1	213.04	23.59	
	5	211.66	23.70	
	9	210.67	23.69	

TABELLA 8

Elementi a 19 barre – refrigerante: 0.3 H_2O – 0.7 D_2O

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	219.43	24.13	99.708
	1	208.42	24.16	
	5	175.05	24.14	
	9	151.64	24.15	
22.3	0	181.25	24.18	99.708
	1	175.72	24.16	
	5	157.81	24.16	
	9	143.81	24.18	
25.5	0	191.07	24.35	99.711
	1	185.73	24.35	
	5	168.94	24.32	
	9	155.60	24.29	
28.05	0	214.17	23.63	99.701
	1	207.77	23.62	
	5	188.27	23.62	
	9	173.27	23.61	

TABELLA 9

Elementi a 37 barre – refrigerante: aria

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	220.35	21.81	99.683
	1	207.03	21 80	
	5	173.45	21.79	
	9	149.86	21.79	
22.3	0	181.91	21.50	99.686
	1	172.21	21.50	
	5	145.83	21.48	
	9	126.76	21.64	
25.5	0	192.69	21.75	99.684
	1	180.98	21.78	
	5	149.60	21.80	
	9	128.17	21.84	
28.05	0	215.85	21.75	99.684
	1	200.22	21.75	
	5	160.34	21.75	
	9	135.19	21.76	

TABELLA 10

Elementi a 37 barre – refrigerante: D_2O

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	221.22	24.17	99.680
	1	207.52	24.20	
	5	171.40	24.18	
	9	145.00	24.20	
22.3	0	182.50	23.94	99.680
	1	173.02	23.94 23.94	
	5	146.00	23.93	
	9	125.67	23.93	
25.5	0	193.32	23.92	99.681
	1	181.93	23.92	
	5	150.85	23.91	
	9	128.80	23.92	
28.05	0	216.25	22.29	99.683
	1	201.60	22.31	
	5	162.72	22.32 22.31	
	9	137.17	22.32	

TABELLA 11

Elementi a 37 barre – refrigerante: H_2O

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	222.07	26.11	99.667
	1	208.49	26.10	
	5	170.25	26.06	
	9	140.82	26.04	
22.3	0	183.32	25.65	99.605
	1	175.82	25.65	
	5	153.55	25.67	
	9	134.10	25.73	
25.5	0	193.97	25.96	99.667
	1	186.24	25.95	
	5	163.97	25.98	
	9	144.43	26.02	
28.05	0	217.63	25.94	99.666
	1	208.12	25.91	
	5	181.79	25.90	
	9	159.50	25.88	

TABELLA 12

Elementi a 37 barre – refrigerante: 0.7 D_2O – 0.3 H_2O

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
18.8	0	222.03	25.63	99.678
	1	208.16	25.60	
	5	170.23	25.60	
	9	142.30	25.59	
22.3	0	182.90	25.63	99.678
	1	170.13	25.18 25.27	
	5	148.41	25.14	
	9	128.06	25.13	
25.5	0	216.98	25.19	99.679
	1	204.17	25.15	
	5	169.36	25.13	
	9	144.56	25.10	
28.05	0	216.98	25.19	99.679
	1	204.17	25.15 25.14	
	5	169.36	25.13	
	9	144.56	25.10	

TABELLA 13

Elementi a 37 barre – refrigerante: 0.5 H_2O – 0.5 D_2O

Passo	N° di elementi sostituiti	H(cm)	T_{D_2O} (C°)	Purezza dell'D_2O (W%)
22.3	0	182.70	24.39	99.680
	1	174.30	24.39	
	5	149.56	24.39	
	9	129.38	24.40	
28.05	0	216.86	24.45	99.680
	1	205.16	24.45	
	5	172.88	24.44	
	9	148.59	24.42	

2.4 - Effetti di inomogeneità nel caso a 37 barre

Per accertarsi del grado di inomogeneità degli elementi di prova, sono stati eseguiti tre esperimenti nel caso di un passo di 22.3 cm, refrigerante D_2O ed elementi a 37 barre:

a) sostituzione di ognuno dei 9 elementi di prova nella posizione centrale del reattore

b) sostituzione di due diversi gruppi di 5 elementi di prova nella zona centrale del reattore

c) sostituzione di nove elementi di prova nella zona centrale con due diverse disposizioni dei singoli elementi.

Per ogni sostituzione si è misurato il corrispondente livello critico: i risultati sono riportati nella Tabella 14, 15 e 16

Si può osservare che le differenze fra le altezze critiche sono notevoli nei casi a) e b). Nel caso di sostituzioni di 9 elementi non si nota invece alcun effetto ponendo più vicino al centro gli elementi n° 2, 4, 6, 8 invece di 3, 5, 7, 9.

Gli effetti osservati si possono attribuire a variazioni nell'arricchimento in U235, essendo del tutto trascurabili le variazioni della densità del combustibile.

I risultati di una analisi chimica hanno confermato i sospetti di una forte inomogeneità relativa al contenuto di U235 nelle pasticche di ossido. La quantità misurata con metodo polarografico /5/ è definita come rapporto fra la quantità totale di U(235 + 238) e la quantità totale di ossido. La quantità U235/(U + Th), che è la grandezza che entra direttamente nel calcolo è stata valutata con la seguente formula:

$$\frac{U_{235}}{U+Th} = 0.899 \frac{U}{U+Th} = 0.899 \cdot q \frac{UO_2 + ThO_2}{U + Th} =$$

TABELLA 14

EFFETTI DI INOMOGENEITA

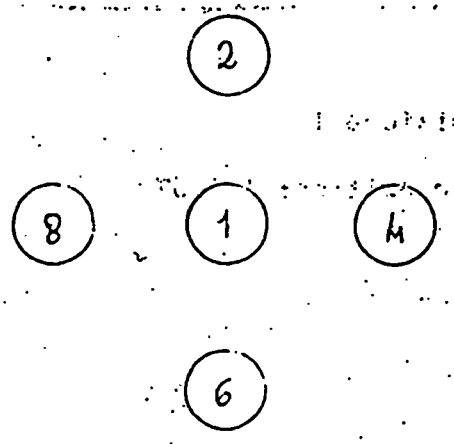
Sostituzione di ognuno dei nove elementi di prova in posizione centrale

N° elemento sostituito	livello critico
5	172.66
6	174.44
1	173.17
7	172.91
3	173.29
2	174.72
9	173.33
8	173.99
4	174.28

TABELLA 15

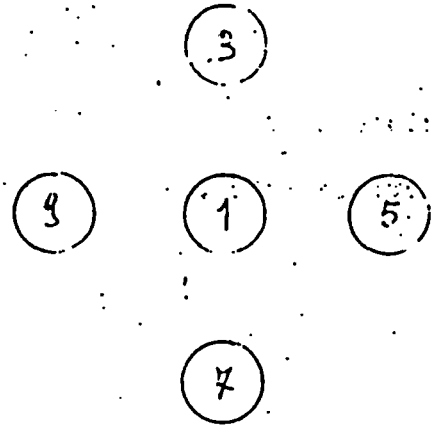
EFFETTI DI INOMOGENEITÀ

Sostituzione di due gruppi diversi di cinque elementi di prova in posizione centrale



Gruppo 1

Livello critico: 145.00



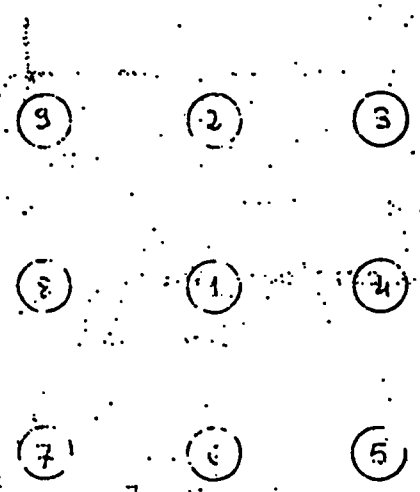
Gruppo 2

Livello critico: 142.72

TABELLA 16

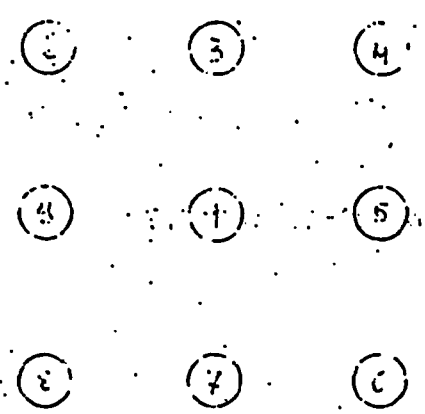
EFFETTI DI INOMOGENEITA

Due diverse disposizioni di nove elementi di prova in posizione centrale



Disposizione 1

Livello critico: 125.67



Disposizione 2

Livello critico: 125.67

(l'uranio è arricchito all'89,9% in U235, q è la quantità misurata)

$$= 0.899 \times q \frac{Z_{235} N_{235} + Z_{238} N_{238} + Z_{232} N_{232} + 32 (N_{235} + N_{238} + N_{232})}{Z_{235} N_{235} + Z_{238} N_{238} + Z_{232} N_{232}}$$

(dove Z e N sono rispettivamente i pesi atomici e la percentuale presente di ogni elemento)

$$= 0.899 \times q \left[1 + \frac{3.2 (2.4 + 97.6)}{235.05 \times 2.4 + 0.2667 \times 238.04 + 232.04 \times 97.333} \right] =$$

(si è preso approssimativamente uguale a 2.4 la percentuale di U235 rispetto a U + Th. La formula dipende molto debolmente da questo valore)

$$= q \times 1.00229$$

In tal modo la quantità misurata q è stata ridotta nella forma desiderata. Per calcolare l'arricchimento efficace di ogni elemento a 37 barre, si è tenuto conto della notevole depressione di flusso che si verifica all'interno dell'elemento. L'arricchimento medio di ogni singolo elemento a 37 barre è stato valutato con la seguente formula:

$$A = \frac{\phi_1^2 A_1 + \phi_6^2 A_6 + \phi_{12}^2 A_{12} + \phi_{18}^2 A_{18}}{\phi_1^2 + 6 \phi_6^2 + 12 \phi_{12}^2 + 18 \phi_{18}^2}$$

dove A_1 è l'arricchimento medio della barretta centrale, A_6 l'arricchimento medio delle 6 barre della prima corona etc. I flussi relativi sono stati calcolati con PINOCCHIO.

I risultati sono dati dalla Tabella 17.

La Fig. 5 mostra in grafico l'arricchimento medio del singolo elemento sostitutivo verso il livello critico misurato. Allo scopo di verificare

TABELLA 17

N° dell'elemento	arricchimento= $\frac{U_{235}}{U + Th}$
5	2.427
2	2.278
1	2.354
7	2.372
3	2.340
4	2.309
9	2.336
8	2.311
6	2.297

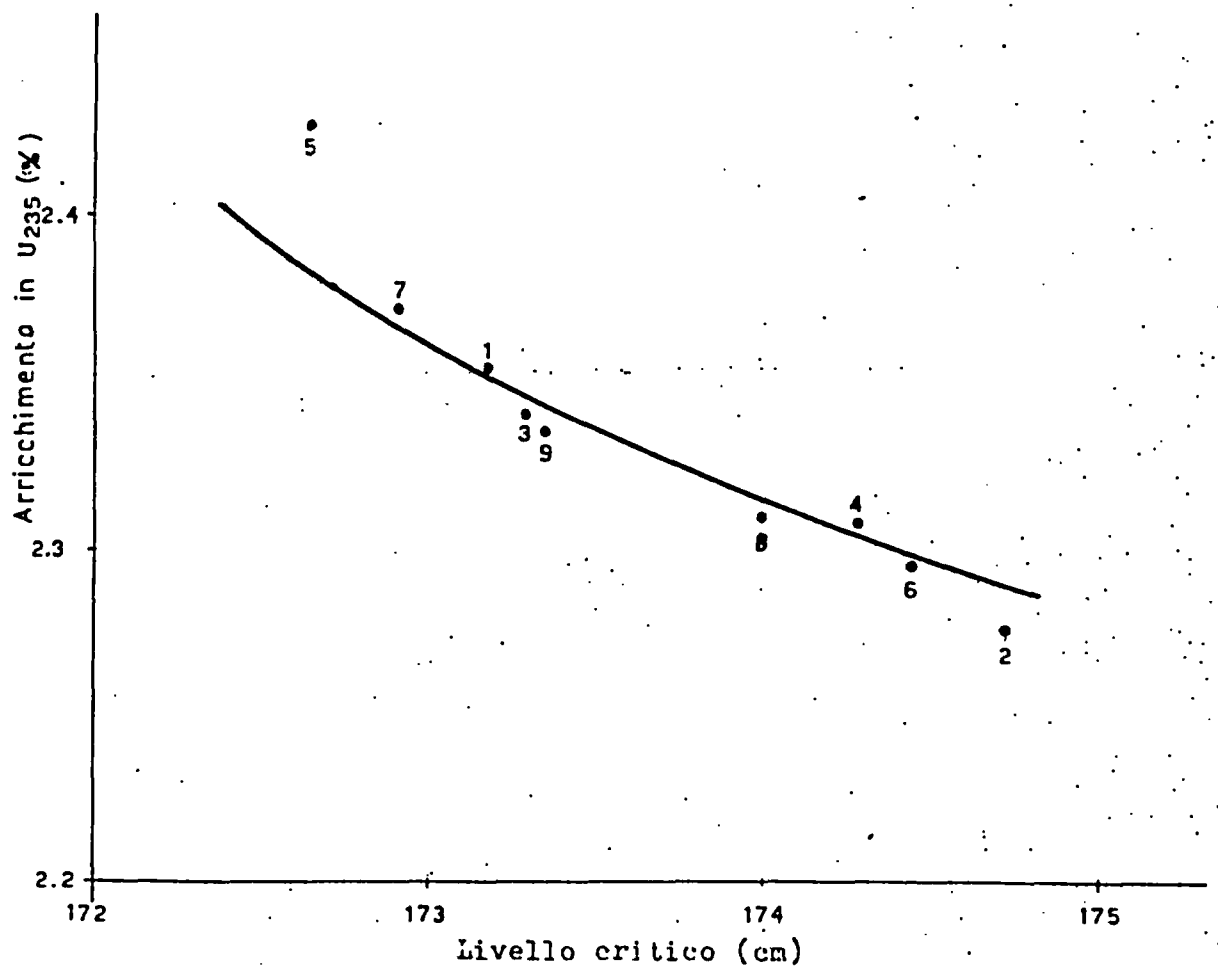


FIGURA 5: Arricchimento medio dell'elemento al torio costituito in funzione del livello critico.

questi dati sperimentali, si sono fatti alcuni calcoli con il codice SQUID,/6/ bidimensionale a molti gruppi. Si sono scelti 4 gruppi e geometria r, z. Si è usato come raggio del reattore il raggio estrapolato $R_o = \frac{2.405}{\alpha}$ ottenuto conoscendo il valore sperimentale α, fornito da misure di mappatura di flusso. Le costanti di cella, per ogni arricchimento, sono forniti dal PINOCCHIO. Mediante lo SQUID si ottiene come autovalore il K_{eff} in corrispondenza di ogni valore di altezza assegnata interpolando tra alcuni valori ottenuti si trova il valore dell'altezza critica relativa a $K_{eff} = 1.00$. Usando questo procedimento per ogni arricchimento considerato si ottiene un set di valori di altezza critica in funzione dell'arricchimento. Nei calcoli eseguiti si sono considerati i seguenti arricchimenti in U235: 2.28, 2.34, 2.38, 2.43.

La curva calcolata, normalizzata a 173.4 cm per un arricchimento di 2.34%, riproduce bene l'andamento sperimentale (vedi Fig. 5).

Nell'esperimento b) la differenza in arricchimento dei due gruppi di 5 elementi sostituiti è di 2.6% e la variazione di livello critico è di 3.28 cm. Il calcolo SQUID, per la stessa variazione in arricchimento dà una variazione di livello critico di 4.8 cm.

Conclusioni

I dati dell'analisi chimica hanno messo in luce forti inomogeneità nell'arricchimento del combustibile e ciò può spiegare ragionevolmente gli effetti riscontrati durante le misure con gli elementi a 37 barre. Tuttavia si è verificato che quando tutti i 9 elementi di prova sono sostituiti nella zona centrale l'altezza critica misurata non dipende dalla posizione degli elementi; ciò che conta, in questo caso, è il valor medio dell'arricchimento. Una situazione analoga è ritenuta valida per gli elementi a 19 barre. L'inomogeneità nell'arricchimento degli elementi di prova non ci permette di utilizzare i dati relativi a tutte e tre le sostituzioni successive (1, 5, 9 elementi) eseguite per ogni condizione, perchè, nel variare il numero di elementi sostituiti si varia anche l'arricchimento medio

della zona sostituita.

Nel calcolo si potranno utilizzare quindi solo i dati relativi alla sostituzione di tutti i 9 elementi di prova con i seguenti arricchimenti medi:

. elementi a 19 barre	arricchimento 2.36%
elementi a 37 barre	arricchimento 2.34%

3. INTERPRETAZIONE CON METODO ETEROGENEO DEI DATI SPERIMENTALI

3.1 - Motivi della scelta del metodo eterogeneo

Generalmente nel calcolo dei reattori nucleari termici a struttura geometrica eterogenea viene utilizzato il metodo omogeneo. Mediante questo ultimo il reattore si presenta come un sistema uniforme, i cui parametri di rallentamento, di diffusione e di assorbimento sono opportunamente calcolati. Il metodo omogeneo ha il vantaggio di offrire un procedimento analitico semplice, però presenta svantaggi non eliminabili, essi sono:

a) l'impossibilità di poter studiare i reattori che hanno una struttura reticolare con delle irregolarità che non permettono di fare l'approssimazione delle celle di Wigner e Seitz , considerata nel metodo omogeneo. Esempi di questi casi sono i reticoli composti cioè sovrapposizione di reticoli regolari con caratteristiche diverse.

b) l'impossibilità di poter dare un andamento, abbastanza approssimato, del flusso termico nei punti di discontinuità del reticolo, come ad esempio ai confini della "zona attiva" (zona in cui avviene il processo di fissione).

c) L'inaccuratezza nel calcolo dei reattori a pochi elementi di combustibile. Pertanto è interessante lo studio di un metodo diretto che diamiamo "metodo eterogeneo" che permetta di superare almeno in parte le difficoltà del "metodo omogeneo" suddetto, partendo da ipotesi più approssimata ossia:

a) le barre (o sfere) di combustibile, immerse nel moderatore, si considerano per un lato sorgenti lineiformi (o puntiformi) di neutroni veloci e dall'atro buche di assorbimento termico o di risonanza della stessa forma. Questa schematizzazione è tanto più accettabile quanto più l a distanza tra le barre, la lunghezza di diffusione, quella di rallentamento, sono maggiori delle dimensioni delle barre stesse.

b) il campo dei neutroni termici viene rappresentato dall'equazione della diffusione ed è tanto più giustificato quanto più l'assorbimento dei neutroni termici è basso /7 /.

I vantaggi dell'uso di un modello eterogeneo su esposti sono evidenti nel nostro caso, in quanto le misure si riferiscono ad un reattore con nocciolo misto.

3.2 - Descrizione del metodo di calcolo eterogeneo

3.2.a) -. HEFREM - 1

Il programma denominato HEFREM-1 è stato preparato nel laboratorio parametri reticolari di Bologna; esso è l'insieme dei codici HETROIS-BUCFIT o SOS-BUCFIT, dove HETROIS e SOS sono programmi eterogenei

/ 11 /, / 12 /, / 13 /, / 14 /. Nella nostra trattazione utilizziamo la catena HETROIS-EUCFIT e pertanto faremo solo una descrizione di q uesti ultimi codici.

3.2.a.1) HETROIS

Il codice HETROIS utilizza la teoria eterogenea con il formalismo monopolare che adesso descriviamo.
Premettiamo che la caratteristica principale della teoria eterogenea è che, se abbiamo un reattore con inseriti degli elementi combustibili, lo si può studiare, considerando e risolvendo l'equazione di diffusione solo nel moderatore e ponendo condizioni al contorno sul bordo del reattore e sulla superficie degli elementi di combustibile, trattati come aventi raggio finito, purchè il sistema sia cilindrico, finito e con un solo materiale moderatore nel nocciolo e riflettore. L'equazione di diffusione a 3 gruppi ((1) veloce, (2) epitermico, (3) termico) può essere scritta così:

$$\begin{cases} D_1 \nabla^2 \phi_1(\vec{r},z) - \Sigma_{12}\phi(\vec{r},z) = 0. \\ D_2 \nabla^2 \phi_2(\vec{r},z) - \Sigma_{23}\phi_2(\vec{r},z) + \Sigma_{12}\phi_1(\vec{r},z) = 0 \\ D_3 \nabla^2 \phi_3(\vec{r},z) - \Sigma_{33}\phi_3(\vec{r},z) + \Sigma_{23}\phi_2(\vec{r},z) = 0 \end{cases}$$

dove Σ_{12} e Σ_{23} sono le sezioni d'urto di trasferimento e Σ_{33} è la sezione di assorbimento per il gruppo termico, $r = (\theta, r)$. Se ci limitiamo al caso bidimensionale, separando le variabili, la distribuzione assiale del flusso si limita alla funzione $\operatorname{sen}\frac{\pi}{H}z$ con H=H estrapolate dall'insieme moltiplicante. Perciò avremo, risolvendo equazioni omogenee del tipo

$$\nabla^2 \chi_g(\vec{r},z) = \frac{1}{\tau_g}\chi_g(\vec{r},z) \qquad (1)$$

con $\tau_1 = \dfrac{D_1}{\Sigma_{12}}$, $\tau_2 = \dfrac{D_2}{\Sigma_{23}}$, $\tau_3 = \dfrac{D_3}{\Sigma_{33}} = L^2$

$$(3)\quad \begin{cases} \phi_1(\vec{r}, z) = \chi_1(\vec{r}, z) \\ \phi_2(\vec{r}, z) = T_{21}\,\chi_1(\vec{r}, z) + \chi_2(\vec{r}, z) \\ \phi_3(\vec{r}, z) = T_{31}\,\chi_1(\vec{r}, z) + T_{32}\,\chi_2(\vec{r}, z) + \chi_3(\vec{r}, z) \end{cases}$$

dove i coefficienti di accoppiamento sono così definiti:

$$\begin{cases} T_{21} = \dfrac{D_1}{D_2} \cdot \dfrac{1/\tau_1}{1/\tau_2 - 1/\tau_1} \\ T_{32} = \dfrac{D_2}{D_3} \cdot \dfrac{1/\tau_2}{1/L^2 - 1/\tau_2} \\ T_{31} = \dfrac{D_1}{D_3} \cdot \dfrac{1/\tau_1 \times 1/\tau_2}{(1/L^2 - 1/\tau_1)(1/\tau_2 - 1/\tau_1)} \end{cases}$$

e le $\chi_g(\vec{r}, z) = \chi_g(\vec{r})\,\mathrm{sen}\,\frac{\pi}{H} z$ per cui la (1) si può scrivere

come

$$\nabla^2 \chi_g(\vec{r}) = \nu_g^2\, \chi_g(\vec{r}) \qquad (2)$$

dove $\nu_g^2 = 1/\tau_g + B_z^2$.

Il problema perciò è nella risoluzione della (2). Determinati i ν_g^2 si può, tramite le (3), risalire al valore del flusso in un punto r qualsiasi del moderatore. Tenendo conto sia delle dimensioni finite del reattore sia del contributo dovuto agli N elementi di combustibile ed imponendo la condizioni dell'annullamento del flusso in r = R = raggio estrapolato del reattore, otteniamo che la soluzione della (2) è:

$$\chi_g(\vec{r}) = \sum_{K=1}^{N} \sum_{s=1}^{2} \sum_{m=0}^{\infty} A_{gK}^{sm} \Big\{ K_m(\nu_g \rho_K)\, f_m^s(\omega_K) - \sum_p \frac{K_p}{I_p}(\nu_g R) \cdot$$

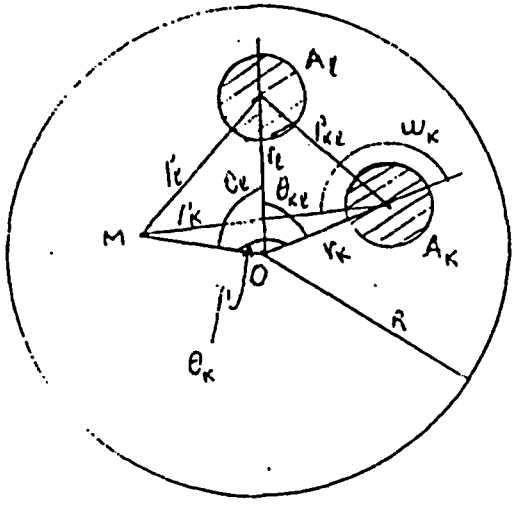
$$\cdot I_p(\nu_g r) \left[I_{p-m}(\nu_g r_K) - (-1)^s I_{p+m}(\nu_g r_K) \right] \cdot f_m^s(\theta_K) \Big\}$$

con K_m, K_p, I_p funzioni di Bessel di ordine m e p.

$$f_m^s(\theta_K) = \begin{cases} \cos \theta_{Km} & \text{se} \quad s = 1 \\ \operatorname{sen} \theta_{Km} & \text{se} \quad s = 2 \end{cases}$$

A_{gk}^{sm} sono coefficienti che vanno determinati imponendo le condizioni al contorno sul canale degli elementi di combustibile. ρ_K, ω_K, r_K, θ_K rappresentano le grandezze mostrate nella Fig. 6

FIGURA 6



Fermandoci al primo termine della sommatoria in m, ossia al termine di ordine zero (formalismo monopolare) otteniamo un flusso costante ed uniforme sul contorno del canale e la descrizione dell'assorbimento e della produzione caratteristiche dell'elemento, mentre se ci fermiamo al termine di ordine 1 della sommatorio (formalismo dipolare) otteniamo l'informazione della variazione del flusso sul canale in quanto il 2° termine della sommatoria contiene gli effetti dovuti alla fuga radiale. Nel nostro caso utilizzando solo il formalismo monopolare e quindi troncando la serie al termine di ordine zero e considerando come soluzione:

$$\chi_g(\vec{r}) = \sum_{k=1}^{N} A_{gk} \Big\{ K_0(\nu_g r_k) - \sum_{m=0}^{\infty} \varepsilon_m \frac{K_m}{I_m}(\nu_g R)\, I_m(\nu_g r_k) \cdot$$

$$\cdot (\nu_g r)\, I_m \cos m\theta_k \Big\} \quad \text{con} \quad \varepsilon_m = \begin{cases} 2 & \text{se } m \neq 0 \\ 1 & \text{se } m = 0 \end{cases} \tag{4}$$

Occorre ora esprimere localmente la funzione $\chi_g(\vec{r})$, ossia mettersi nell'intorno dell'ellesimo elemento e scrivere la χ_g sull'elemento l dovuto al contributo di tutti gli elementi che costituiscono il reticolo, otteniamo pertanto:

$$\bar{\chi}_{\ell(g)} = \sum_{K=1}^{N} A'_{K(g)} M_{\ell K(g)} \tag{5}$$

con $M_{\ell K g} = I_0(\nu_g a_\ell)\, I_0(\nu_g a_K) \Big[K_0(\nu_g r_{K\ell}) - \sum_m \varepsilon_m \frac{K_m}{I_m} \cdot$

$\cdot (\nu_g R)\, I_m(\nu_g r_K)\, I_m(\nu_g r_\ell) \cos \theta_{K\ell} \Big]$ = funzione nota

$A'_{K(g)} = a_K \nu_g \frac{I_1}{I_0}(\nu_g a_K)\, \bar{\chi}_{K(g)} - a_K \overline{\nabla \chi}_{K(g)} = A_{gK} / I_0(\nu_g a_\ell)$

con a_K raggio della barra K-esima.

Fatto questo si pongono le condizioni al contorno sulla superficie del canali per calcolare $A'_{K(g)}$ da cui risalire ad A_{gk} e quindi a ; esse sono:

$$d_i \bar{V} \phi_i(g) = \sum_{g'=1} \alpha^i_{gg'} \phi_i(g') \qquad (6)$$

I parametri eterogenei $\alpha_{gg'}$ hanno il seguente significato fisico:

α_{11} = sparizione nel canale dei neutroni veloci dovuta all'assorbimento e fissioni

α_{21} = apparizione nel gruppo epitermico dei neutroni rallentati nel canale a partire dal gruppo veloce $\alpha_{21} < \alpha_{11}$

α_{22} = analogo a quello di α_{11}, ma per il gruppo epitermico

α_{33} = costante eterogenea dell'assorbimento termico

α_{32} e α_{31} = parametri che caratterizzano il rallentamento dei neutroni e la loro apparizione nel gruppo termico

α_{13} = produzione dei neutroni veloci dovuta alla fissione termica

α_{12} = analogo di α_{13} però relativa alla fissione epitermica.

Per tener conto delle fughe assiali occorre esprimere i termini monopolari in funzione di B_z^2, o meglio dei termini α_{11}, α_{22}, α_{33} che sono quelli interessati essenzialmente a questo effetto. Sapendo che i $\bar{X}_{\ell(g)}$ sono legati ai $\Phi_{\ell(g)}$ per cui, per ottenere gli A_{kg} che ci sono necessari, si fa un processo iterativo, il quale è:

a) si assegna agli $A_{k(g)}$ un valore iniziale arbitrario e si calcolano i $\Phi_{\ell(g)}$

b) usando la (6) dai $\phi_{\ell(g)}$ ricaviamo i $\bar{V}\phi_{\ell(g)}$

c) la relazione tra i $\bar{X}_{\ell g}$ e i $\phi_{\ell(g)}$ calcoliamo i $\bar{V}\bar{X}_{\ell g}$

d) utilizziamo i valori di $\bar{X}_{\ell g}$ e $\bar{V}\bar{X}_{\ell g}$ dalla 3ª espressione delle (5) otteniamo i valori degli $A'_{k(g)}$.

Il procedimento iterativo prosegue fino a quando si arriva a valori di $A'_{k(g)}$ che non variano più tra una iterazione e l'altra, quindi si riprende

la (4) e si calcola il flusso nel moderatore nei punti voluti facendone una mappatura confrontabile con i risultati sperimentali.
Dicevamo che il codice che utilizza la teoria eterogenea presentata è l'HETROIS. Esso adotta il formalismo monopolare (come accennato) estendendolo però anche al caso tridimensionale. Premettiamo che nella nostra analisi viene usato come codice eterogeneo bidimensionale monopolare. L'HETROIS utilizza l'equazione (6) innanzi scritta, dove per gli $\chi^{i}_{gg'}$ vale la relazione:

$$\chi^{i}_{gg'} = -(-1)^{\delta_{gg'}} a_i \left[\gamma^{i\infty}_{gg'} + B_z^2 \mu^{i}_{gg'} \delta_{gg'} \right]$$

con

a_i = raggio dell'elemento di combustibile i-esimo

$\delta_{gg'}$ = delta di Kronecker = 1 se $g = g'$

= 0 se $g = g'$ $\qquad g, g' = 1, 2, 3$

$\gamma^{i\infty}_{gg'}$ sono i parametri eterogenei ricavati considerando nulle le fughe assiali, ossia per un reticolo infinitamente alto.

μ^{i}_{gg} = coefficienti di fuga

B_z^2 = buckling assiale.

3.2.a.2) BUCFIT

Il secondo codice che fa parte della catena HEFREM-1 è il BUCFIT /11/ dal quale è stata utilizzata una versione ridotta che usa i flussi calcolati nel moderatore da HETROIS per cercare il E^2 radiale. L'input del BUCFIT richiede i valori del flusso e la distanza dall'asse del reattore dei punti in cui il flusso è stato calcolato. Il BUCFIT cerca il valore di α tale che la funzione di Bessel $J_0(\alpha r)$ meglio riproduca i flussi precedentemente calcolati. Se questo valore di α è diverso da quello sperimentale in HETROIS, R varia automaticamente fino a quando i due valori coincidono.

Infine BUCFIT dà in output il buckling radiale assieme agli scarti fra i ϕ calcolati con la Bessel nei medesimi punti.

3.2.b) HEFREM-3

Il c odice HEFREM-3 è una versione opportunamente modificata di HEFREM-1, che calcola il B^2 materiale in funzione del numero di barre, per vedere in quale tipo di situazione (se asintotica o meno) si viene a lavorare nei casi che analizziamo. Infatti il B^2 geometrico, man mano che si aumenta il numero di barre del reticolo dovrebbe tendere al valore asintotico del B^2 materiale, valutato dai codici di cella. Quindi con HEFREM-3 possiamo fare una verifica della bontà dei parametri eterogenei e dei coefficienti di fuga forniti dai codici di cella, poichè i dati che servono per questo programma sono esclusivamente le costanti del moderatore, i $\gamma_{gg'}$, i $\mu_{gg'}$, e il raggio esterno per ogni tipo di elemento di co mbustibile.

3.3 - Calcolo dei parametri eterogenei mediante i codici di cella

Il problema fondamentale di tutta l'analisi eterogenea consiste nella ricerca dei parametri eterogenei (unipolari o dipolari) $Y_{gg'}$ che rappresentano i coefficienti di risposta dei canali. Essi ci vengono forniti dai codici di cella, che lavorano solo nel canale, di cui ci danno le sezioni d'urto, i coefficienti di diffusione, i parametri cellari e che ricercano il flusso dentro la cella e al suo contorno.

Il codice di cella PINOCCHIO / 8 / è stato usato in connessione con la catena eterogenea HEFRM per interpretare queste misure.

Il codice PINOCCHIO risolve il probelma degli autovalori del trasporto, usando il formalismo della prima collisione nell'elemento di combustibile e la teoria della diffusione nel moderatore. La cella del reticolo viene omogeneizzata in un insieme di anelli circolari con un contorno esterno cilindrico che riflette isotropicamente i neutroni.

Nel codice vi sono 13 tipi di geometrie relative agli elementi di combustibile; occorre quindi specificare in input il tipo di geometria dell'elemento di combustibile che si considera ed i raggi delle varie regioni in cui esso viene diviso con le concentrazioni degli isotopi presenti.

Le sezioni d'urto utilizzate in PINOCCHIO vengono prese dalla libreria del GAM II per la regione epitermica e dalla libreria del GATHER II per quella termica.

Come si è detto prima il PINOCCHIO risolve il problema degli autovalori utilizzando come metodo di approssimazione dell'equazione del trasporto quello che si basa sulla probabilità di collisione. Questo metodo ha il vantaggio di essere semplice ed accurato. Si introduce una struttura a multigruppi energetici, in cui tutti i parametri sono mediati sull'energia, e il mezzo in cui viaggiano i neutroni si divide in regioni omogenee e finite in cui le sezioni d'urto sono considerate costanti e il flusso è la somma di integrali estesi ai volumi di tali regioni.

In PINOCCHIO l'intervallo energetico è diviso in 10 gruppi di cui 4 riguardano la regione veloce, dal 5° al 9° quella epitermica e l'ultimo la termica.

IPOTESI NEL PINOCCHIO

Per alcuni casi significativi si è fatto uso dell'HEFREM-3 per calcolare B^2 in funzione del numero di elementi (N = 16, 31, 84, 161) per settore. I parametri eterogenei (Σ_{out}, D, γ, μ) sono forniti dal PINOCCHIO, considerando la geometria reale dell'elemento di combustibile e la geometria variata nel modo seguente (Fig. 7).

Sono stati effettuati dei calcoli con la geometria variata, assegnando al raggio RCT del nuovo tubo di calandria i seguenti valori: RCT cm 4.26, 4.30, 4.50, 5.00, 6.00, 7.00.

Le nuove densità del tubo pressurizzato, strato d'isolante (insulating layer), tubo di calandria sono le seguenti:

$$\bar{\rho}_{PT} = \rho_{PT} \frac{(3.99^2 - 3.84^2)}{(4.09^2 - 3.84^2)} \quad , \quad \bar{\rho}_{IL} = \rho_{CALT} \quad , \quad \bar{\rho}_{CALT} = \rho_{D_2O}$$

dove

$\bar{\rho}_{PT}$ = densità del tubo di pressione a geometria variata

ρ_{PT} = densità del tubo di pressione a geometria reale

$\bar{\rho}_{IL}$ = densità dello strato d'isolante a geometria variata

$\bar{\rho}_{CALT}$ = densità del tubo di calandria a geometria variata

ρ_{CALT} = densità del tubo di calandria a geometria reale

ρ_{D_2O} = densità del moderatore.

La densità del tubo di pressione a geometria variata (vedi Fig. 7) è stata ottenuta nel seguente modo:

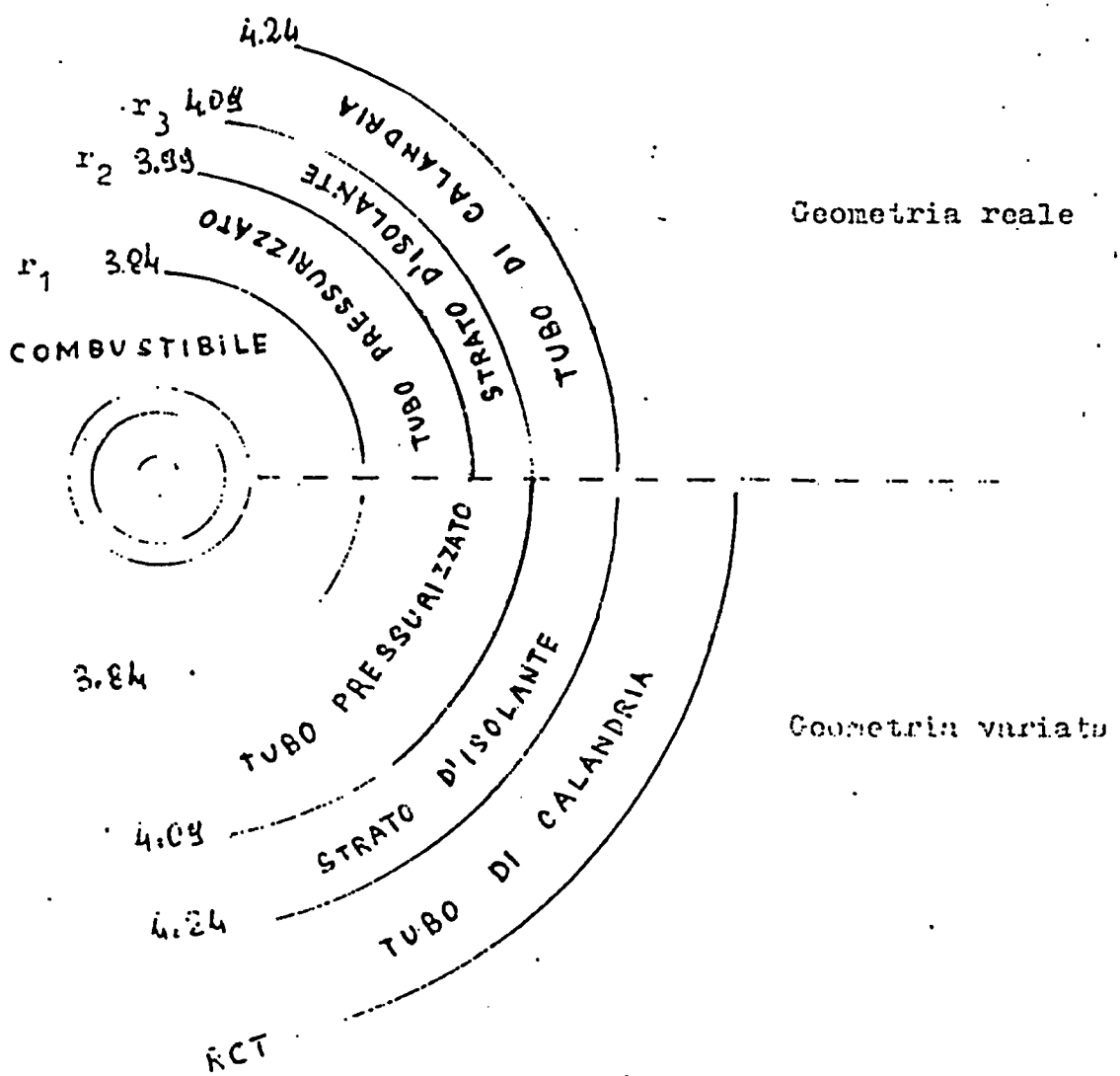
$$\bar{\rho}_{PT} = \rho_{PT} \frac{\pi (r_2^2 - r_1^2) h}{\pi (r_3^2 - r_1^2) h}$$

r_1 = 3.84 cm
r_2 = 3.99 cm
r_3 = 4.09 cm

Si è adottata la geomatria simulata nel modo precedente, allo scopo di valutare l'effetto sui parametri eterogenei e di conseguenza sulla funzione $B^2(N)$, dovuto alla variazione della linea di raccordo tra la regione

FIGURA 7

SCHEMA DELLA GEOMETRIA REALE E VARIATA DELL'ELEMENTO DI RIFERIMENTO ECO E DELL'ELEMENTO DI PROVA AL THO_2



dove il PINOCCHIO adotta la teoria del trasporto (elemento di combustibile) e la regione dove viene adottata la teoria della diffusione (moderatore).

3.4 – Uso operativo dei codici

3.4.a) Aggiustamento della geometria usata nel codice di cella

I parametri eterogenei ($\Sigma_{gg'}$, D_g, $\gamma_{gg'}$, $\mu_{gg'}$) forniti dal PINOCCHIO, per l'elemento combustibile di riferimento ECO sono stati calcolati con geometria reale (GR) e variata secondo lo schema indicato in Fig. 7. Ogni set di essi viene testato con dei calcoli mediante HEFREM-3 di B^2 in funzione del numero di elementi (N = 16, 31, 84, 161). L'andamento delle curve ottenute con HEFREM-3 riportate nei grafici 1, 2, 3, 4, 5 è analogo per tutti i passi; e in più il B^2 converge verso un valore asintotico.

Dalle curve riportate nei grafici 1, 2, 3, 4 allegati risulta che per i vari passi per l'elemento di riferimento si assumono i parametri eterogenei relativi alle geometrie della tabella 18.

Nel caso del reattore a Torio le curve sono riportate nel grafico 5. In questo caso la scelta privilegia la geometria reale in quanto il valore asintotico di B_m^2 viene raggiunto per valori di N più bassi.

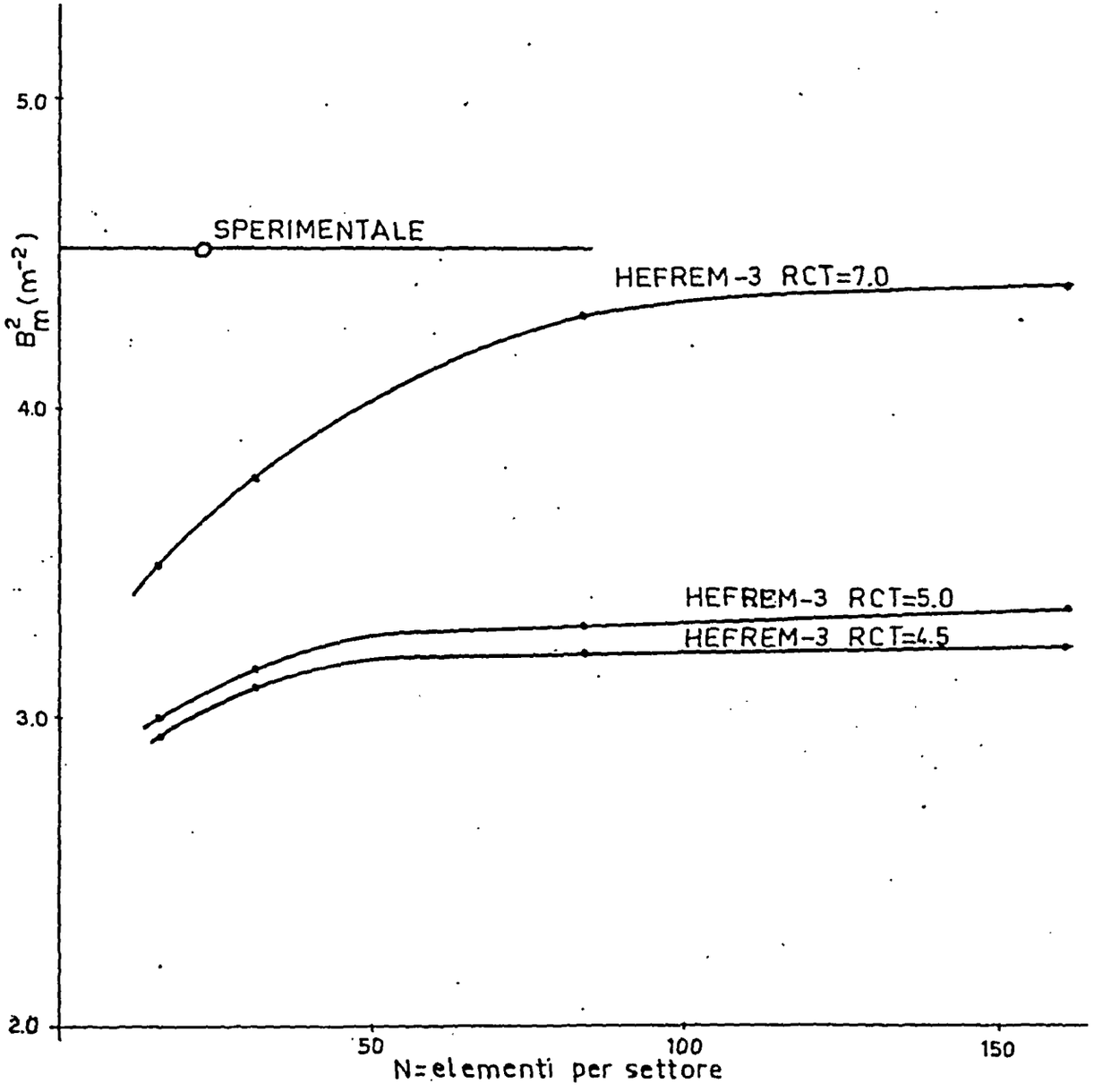


GRAFICO 1: REATTORE DI RIFERIMENTO: passo=22.3 cm.

Andamento del buckling calcolato con HEFREM-3 in funzione del numero di elementi e confronto con il valore sperimentale ottenuto da mappatura del flusso.

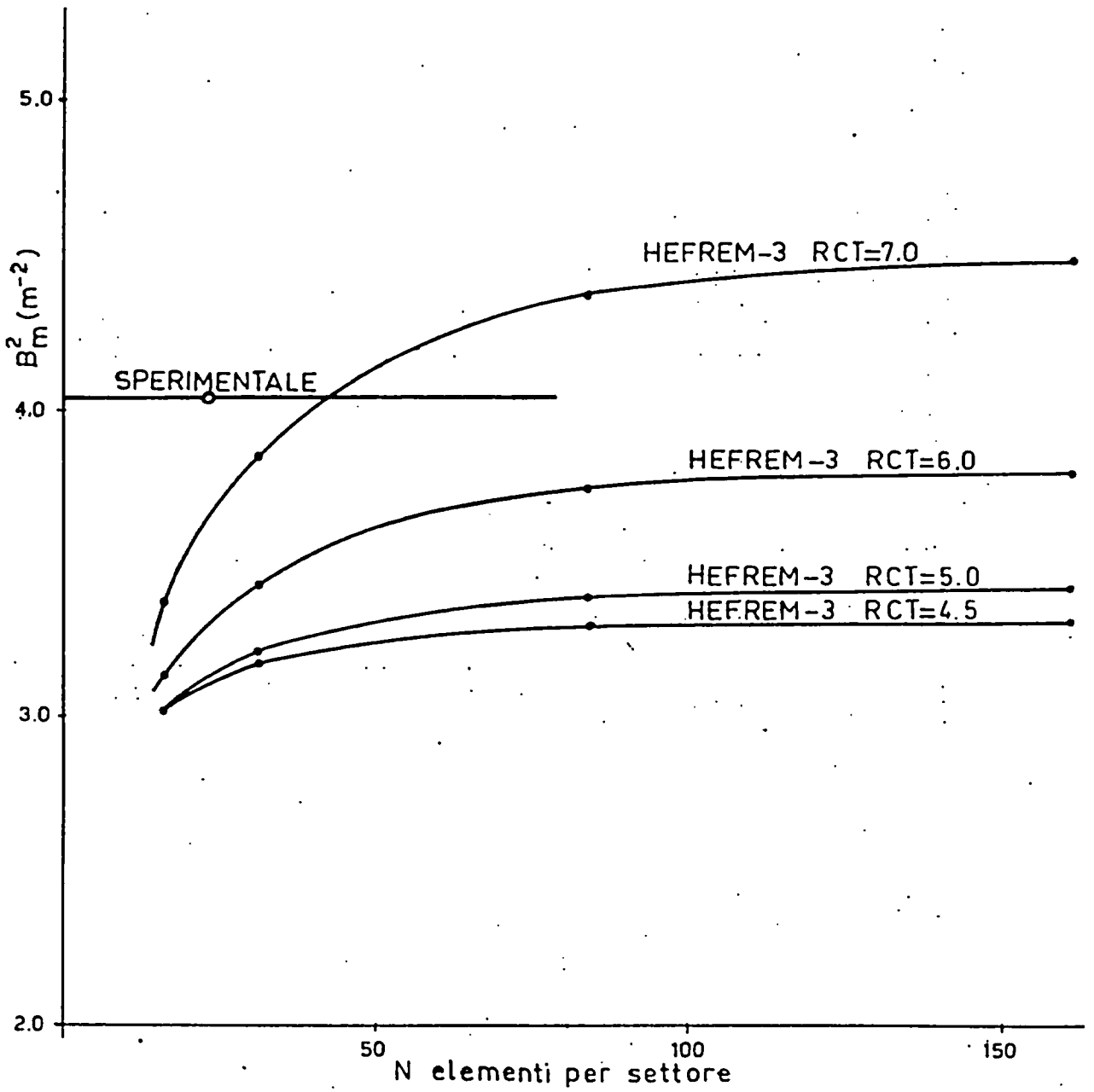


GRAFICO 2: REATTORE DI RIFERIMENTO: passo=25.5 cm.

Andamento del buckling calcolato con HEFREM-3 in funzione del numero di elementi e confronto con il valore sperimentale ottenuto da mappatura del flusso.

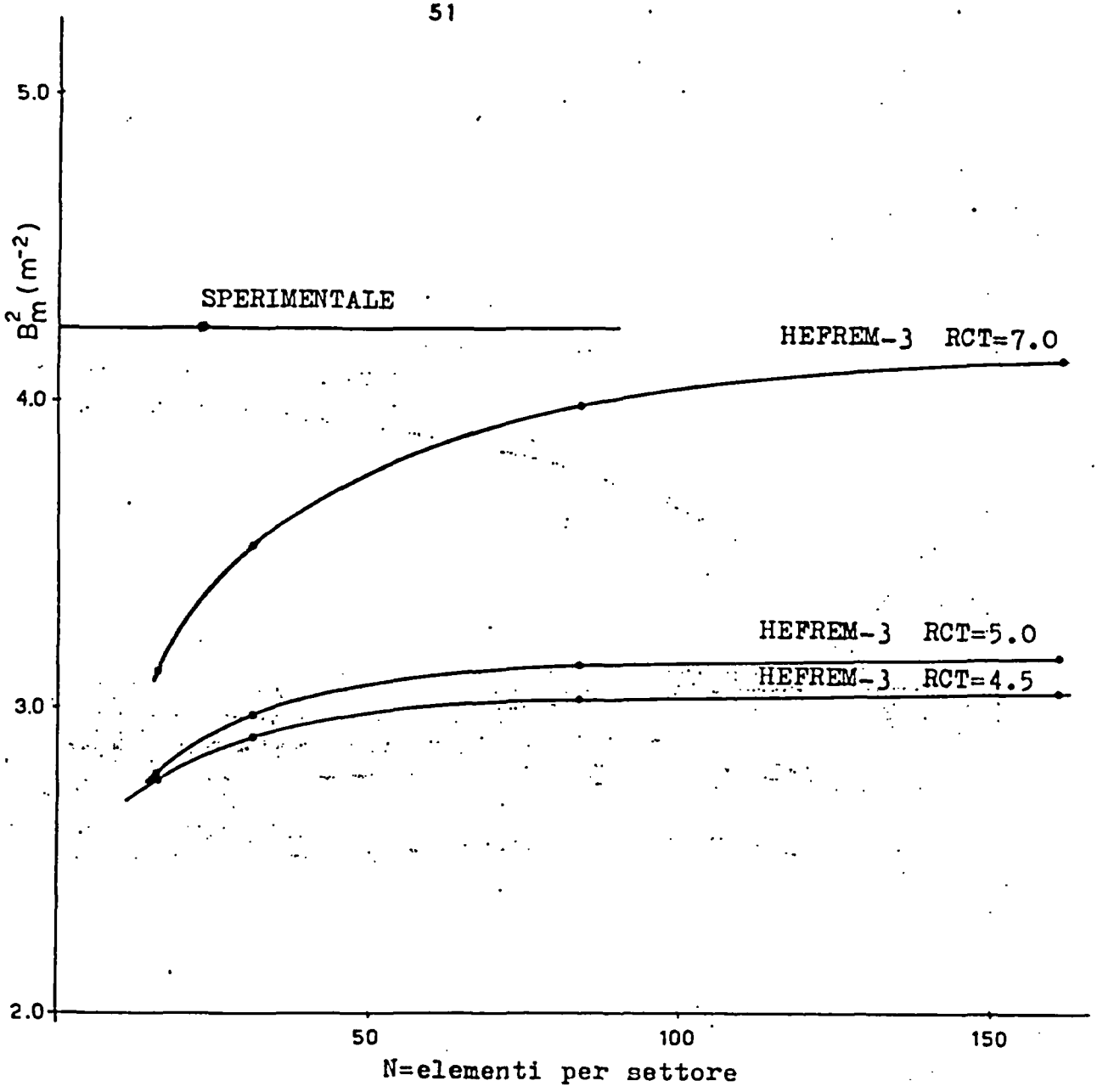


GRAFICO 3: REATTORE DI RIFERIMENTO: passo=18.8 cm.

Andamento del buckling calcolato con HEFREM-3 in funzione del numero di elementi e confronto con il valore sperimentale ottenuto da mappatura del flusso.

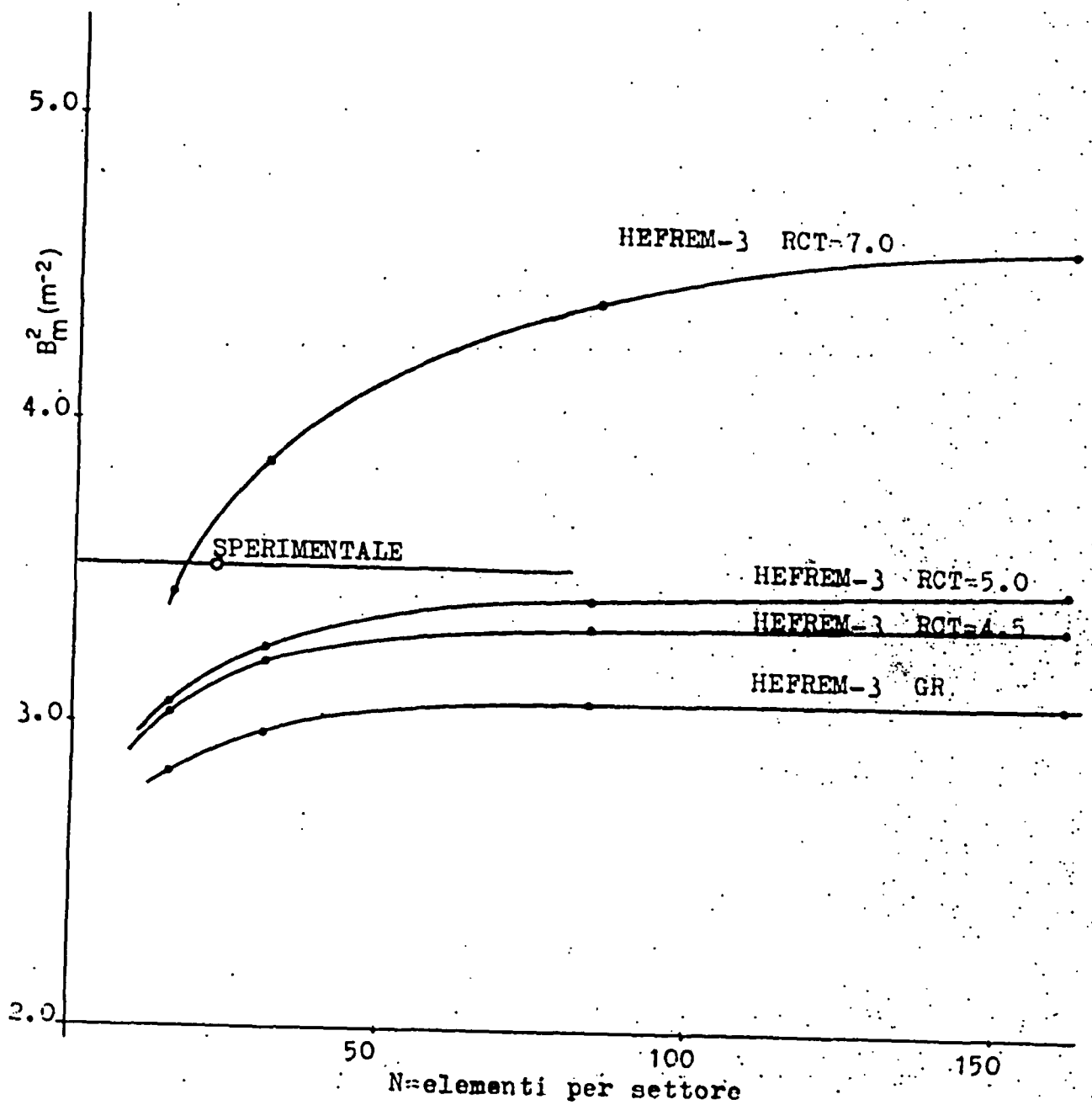


GRAFICO 4: REATTORE DI RIFERIMENTO: passo=28.05 cm.

Andamento del buckling calcolato con HEFREM-3 in funzione del numero di elementi e confronto con il valore sperimentale ottenuto da mappatura del flusso.

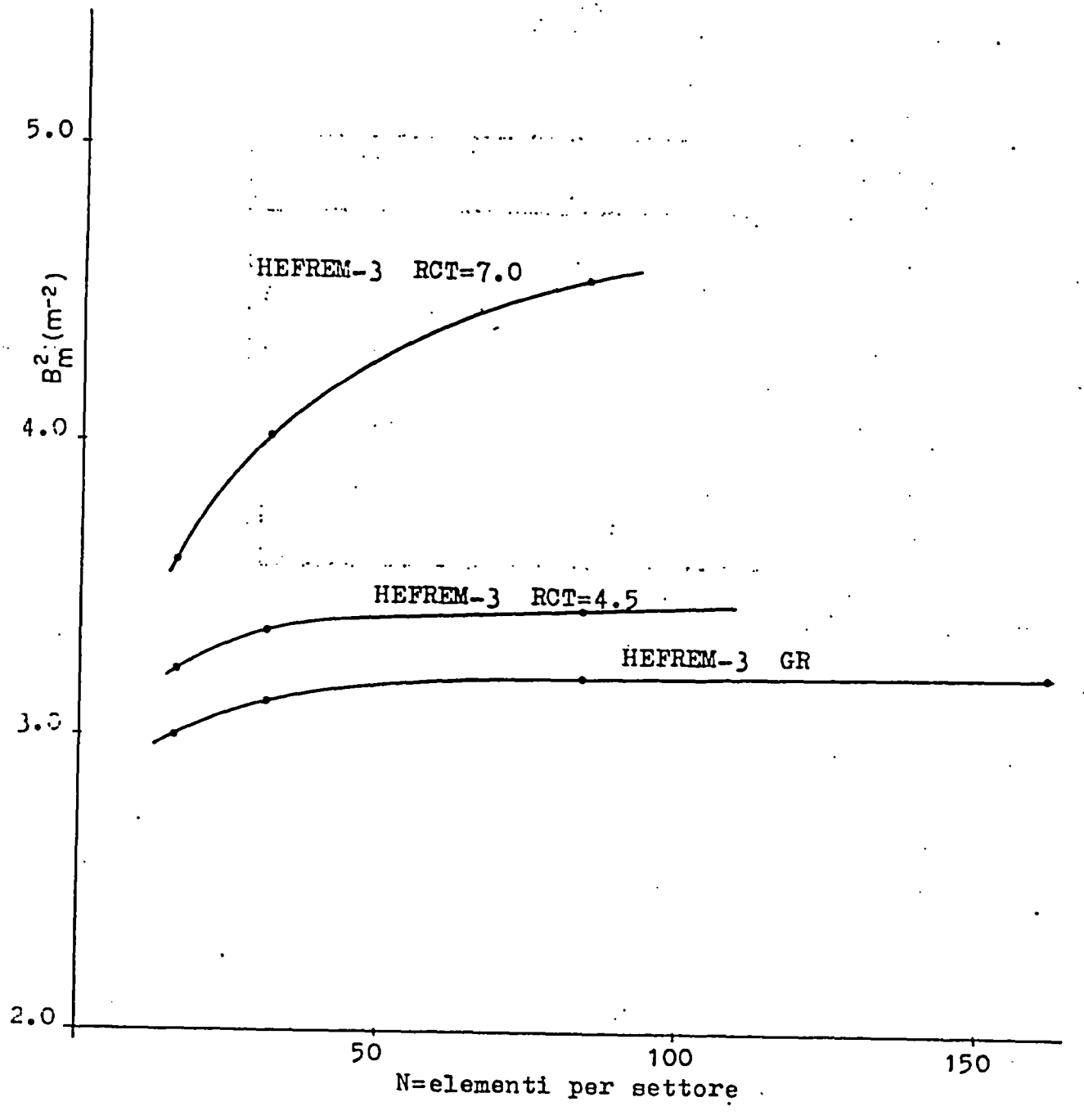


GRAFICO 5: REATTORE CON ELEMENTI AL TORIO A 19 BARRE

Confronto tra i valori sperimentali del buckling in funzione del numero di elementi.

Passo=28.05 cm.

Refrigerante: H_2O

TABELLA 18

Passo (cm)	RCT
18.8	7.00
22.3	7.00
25.5	6.00
28.05	5.00

3.4.b) HEFREM-1

La catena HEFREM-1 utilizza i parametri eterogenei forniti dal PINOCCHIO per calcolare il B^2 materiale dei reticoli di prova, secondo il metodo di sostituzione di poche barre nei reticoli di riferimento. Nel caso nostro; ossia nell'HETROIS-BUCFIT, dando in input opportune direttive, si possono calcolare i flussi nel moderatore con il codice eterogeneo, poi questi vengono fittati con la Bessel Jo nel BUCFIT e si ricava il B^2 radiale e quindi il B^2 totale.

I parametri che l'input di HEFREM-1 vuole sono:

1) valore di NCODE = 1 perchè sia eseguita la via HETROIS-BUCFIT
   = 2 perchè sia eseguita la ci a SOS-BUCFIT
2) numero di barre per settore e numero di settori in cui è stato diviso il reticolo, coordinate delle barre nel reticolo e coordinate dei punti in cui si richiede il calcolo del flusso termico nel moderatore
3) $\alpha = \sqrt{B^2 \text{ radiale}}$, dove il B^2 radiale è ottenuto tramite mappatura dei flussi sperimentali
4) un valore iniziale del raggio estrapolato del reticolo di riferimento
5) parametri del reticolo di riferimento ottenuto nel modo come indicato nella scelta dell'RCT; parametri eterogenei della zona sostituita (Th) ottenuti da calcoli PINOCCHIO con geometria reale; $H_e = H_o + \delta H$ (H_o ci è fornita delle misure effettuate a Ispra di cui ci è parlato nel Cap. 2; δH = reflector saving) sia per il riferimento che per il Th misurate per ogni configurazione. In questa situazione di input, HEFREM-1 esegue in breve tempo le quattro seguenti operazioni:
   a) considera il reticolo di riferimento, e cerca di riprodurre la giusta curvatura del flusso, calcolato negli stessi punti in cui è stato trovato sperimentalmente, fino ad ottenere il valore di B^2 radiale uguale al quadrato del valore di α dato in input. Contemporaneamente viene aggiustato il raggio iniziale fino ad ottenere il valore del raggio

effettivo a cui il flusso si annulla, tenendo, in questo modo, conto della presenza del riflettore.

b) viene aggiustato il parametro eterogeneo γ_{13} del reticolo di riferimento, dal momento che il γ_{13} riguarda direttamente le fissioni termiche, fino a raggiungere, per l'altezza data, la criticità.

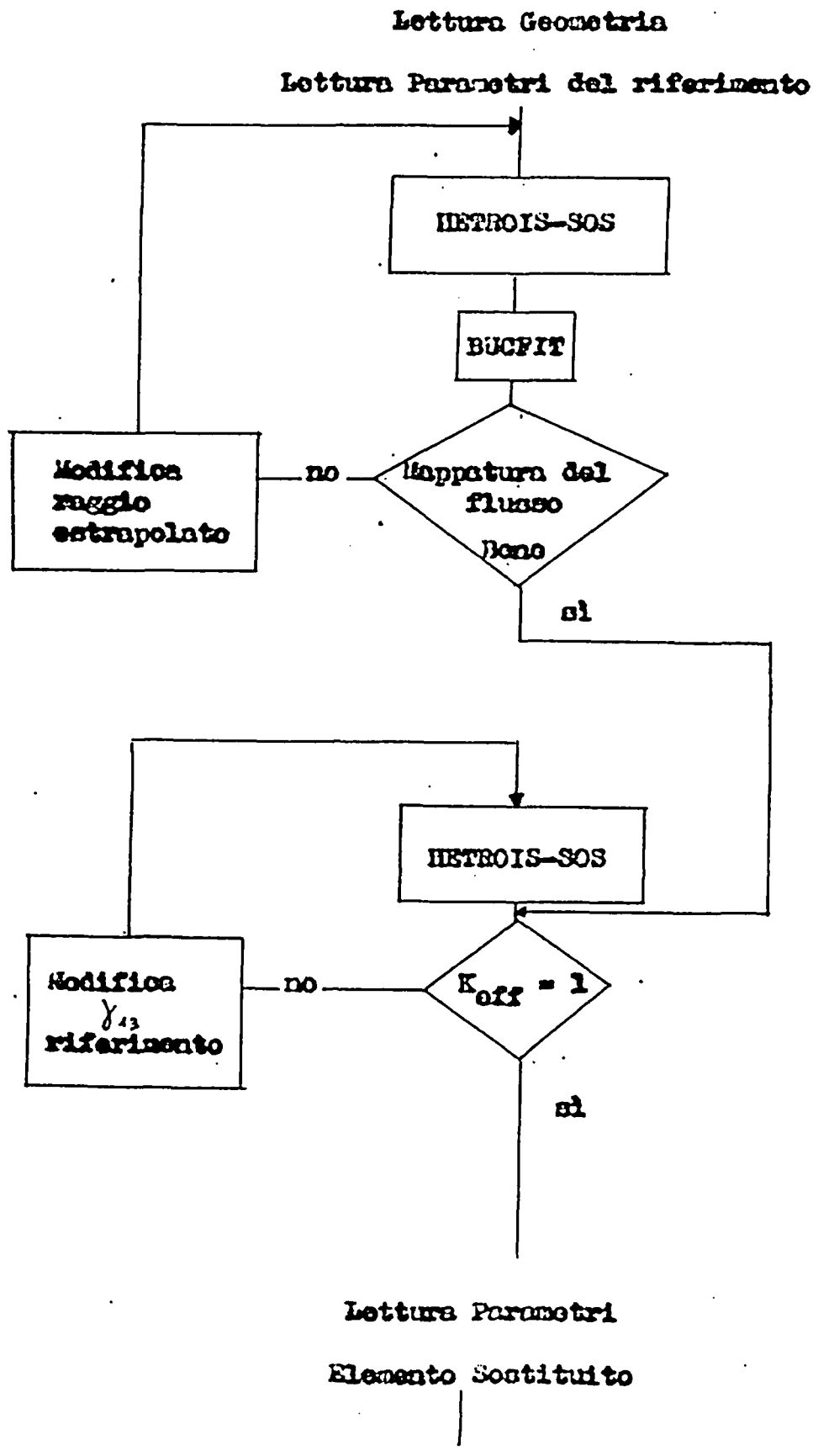
c) nel reticolo di riferimento, reso critico dalle operazioni a) e b) viene fatta la sostituzione delle barre di prova e, se il sistema non è critico, si varia il γ_{13} della barra di prova fino ad ottenere il $K_{eff} = 1$

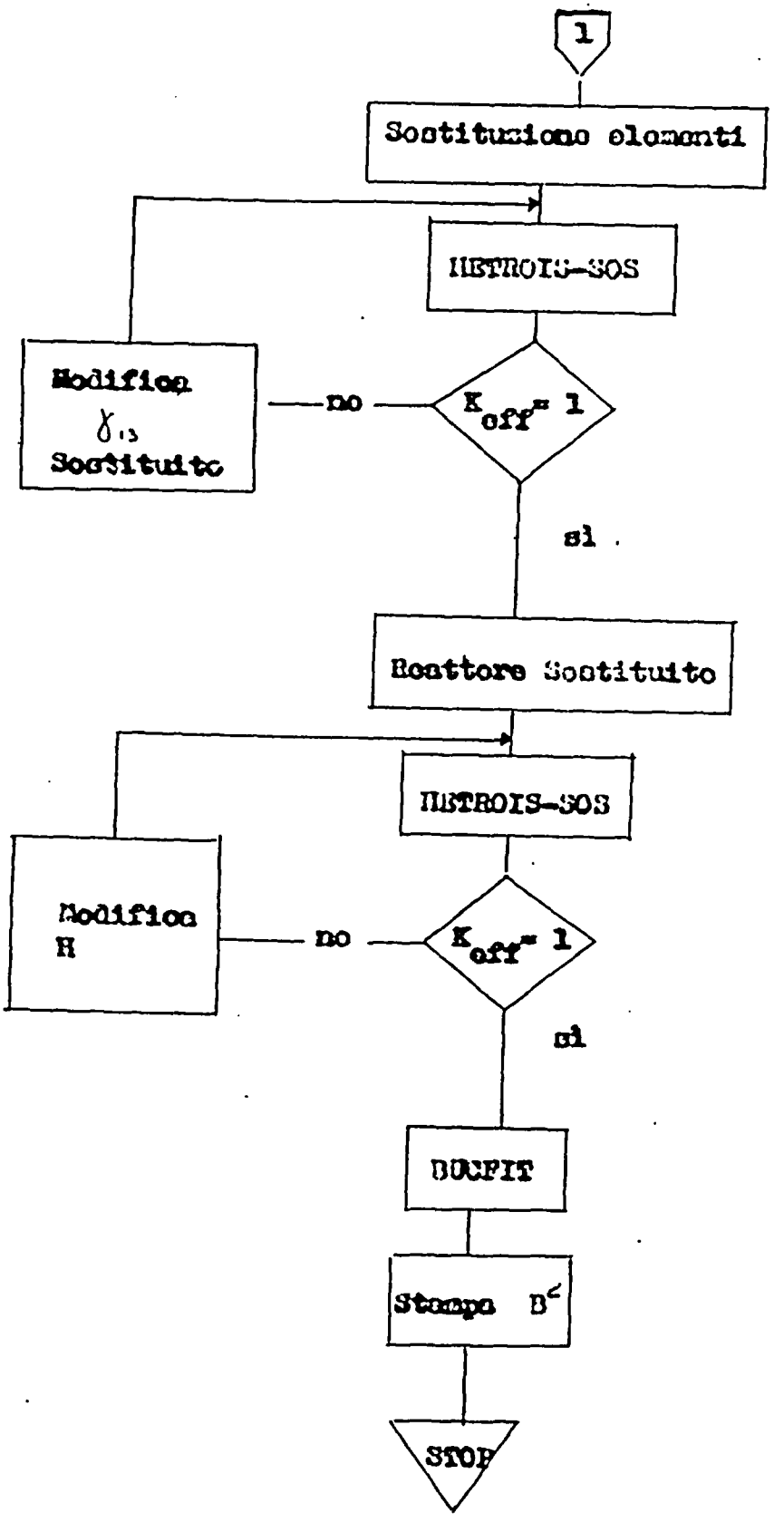
d) si passa poi all'intera sostituzione del reticolo di riferimento, ottenendo così un core interamente riempito di barre di prova, il cui γ_{13} è stato aggiustato durante la fase c). Per portare alla criticità questo sistema, viene variata l'altezza. Quando la criticità è raggiunta vengono valutati i flussi, che sono introdotti nel EUCFIT e fittati con la Bessel Jo (α, r), in modo da ricavare il B^2 radiale. Tramite l'altezza del sistema critico si ottiene il B^2 assiale che sommato al B^2 radiale dà il B^2 materiale delle barre di prova, che volevamo. Nella Fig. 8 viene presentato uno schema a blocchi del funzionamento di HEFREM-1.

3.5 - Risultati sperimentali

I valori del buckling ottenuti con l'interpretazione eterogeneo HEFREM-1 sono presentati nei grafici da 7 a 14. Sia nel caso degli elementi a 37 barre sia in quello a 19 barre sono presentate le curve del buckling in funzione del passo per ogni tipo di refrigerante. Nel grafico 15 è riportata la posizione del massimo al variare del contenuto di H_2O nel refrigerante. Per quanto riguarda la precisione dei risultati la situazione è complicata dal fatto che il metodo di interpretazione è un metodo semiempirico. In ogni caso si ritiene che errori di origine puramente sperimentale come quelli relativi alla misura del livello critico o quelli relativi alle non perfettamente identiche condizioni di misura tra reattore di riferimento

FIG. 8 - Diagramma a blocchi di HEFREE-1




1
Sostituzione elementi
METROIS-SOS
Modifica
γ_{is}
Sostituito
no
$K_{eff} = 1$
si
Reattore Sostituito
METROIS-SOS
Modifica
H
no
$K_{eff} = 1$
si
BUCFIT
Stampa B^2
STOP

e reattore misto (p.es. temperatura e titolo dell'acqua pesante) possono essere trascurate rispetto alle incertezze delle quantità teoriche (costanti) di gruppo ecc.) che compaiono nell'interpretazione. Un errore inferiore all'1%, e perciò trascurabile, si introduce per l'adozione, nel reattore misto di un reflector saving uguale a quello del reattore di riferimento. Ciò è risultato da una serie di calcoli eseguiti con il codice a diffusione a due gruppi, bidimensionale EQUIPOISE /10/.

3.6 - Risultati teorici e confronti

I valori teorici del buckling ottenuti con PINOCCHIO sono presentati assieme ai valori sperimentali nei grafici da 7 a 14.
Per gli elementi a 37 barre refrigerati a H_2O i valori sperimentali presentano reticoli sopramoderati nell'intervallo di passo considerato in accordo con i valori teorici che però sono inferiori di circa il 30% (vedi grafico 7).
Nel caso di refrigerante a D_2O e aria il massimo teorico è spostato rispetto al valore sperimentale verso passi più piccoli (vedi grafici 8 e 9). Nel caso di refrigerante a miscela i valori sperimentali presentano un massimo che si sposta verso passi più piccoli al crescere del contenuto di H_2O. (vedi grafici 10, 15), i valori teorici indicano invece ancora reticoli sopramoderati.
Per gli elementi a 19 barre refrigerati a H_2O e miscela, i valori sperimentali presentano reticoli sopramoderati (vedi grafici 11, 13). Nel caso di refrigeranti D_2O e aria è presente un massimo nell'intervallo di passo considerato (vedi grafici 12, 14). I valori teorici presentano reticoli sopramoderati in tutti i casi a 19 barre. Un confronto fra i casi a 37 barre con quelli a 19 barre mostra che nei casi a 37 barre refrigerati a D_2O e aria la posizione del massimo è spostata verso passi più grandi rispetto ai casi corrispondenti a 19 barre; il valore assoluto del massimo è più alto nei casi a 37 barre, nonostante l'arricchimento sia più basso (2.34%) che nei casi a 19 barre (2.36%) (vedi grafici 8, 9 e 12, 14). I valori teorici, limitatamente al caso aria, mostrano la stessa tendenza dei valori sperimentali per quanto riguarda la posizione del massimo (vedi grafici 9, 14) mentre il valore assoluto del massimo è più basso nei casi

a 37 barre. Si noti che un aumento dell'arricchimento da 2.34% a 2.36% innalza i valori teorici del buckling di circa il 2.2% (vedi grafico 9).
In conclusione si può dire che i valori teorici ottenuti con PINOCCHIO sono generalmente più bassi dei valori sperimentali, in alcuni casi anche del 30% e la posizione del massimo teorico è spostata rispetto al massimo sperimentale verso passi più piccoli.
La discrepanza che si nota tra i dati sperimentali e quelli teorici forniti da PINOCCHIO esigerebbe un'analisi approfondita del codice di cella usato. Sembra comunque ragionevole formulare alcune ipotesi circa tale differenza riscontrata:

- il PINOCCHIO non lavora con una geometria reale, ma considera una cella che viene omogeneizzata in anelli cilindrici; questo può avere una certa influenza nella valutazione della distribuzione spaziale della densità termica.
- la distribuzione spaziale del flusso epitermico dipende dalla definizione delle sezioni d'urto di risonanza che andrebbero verificate accuratamente.

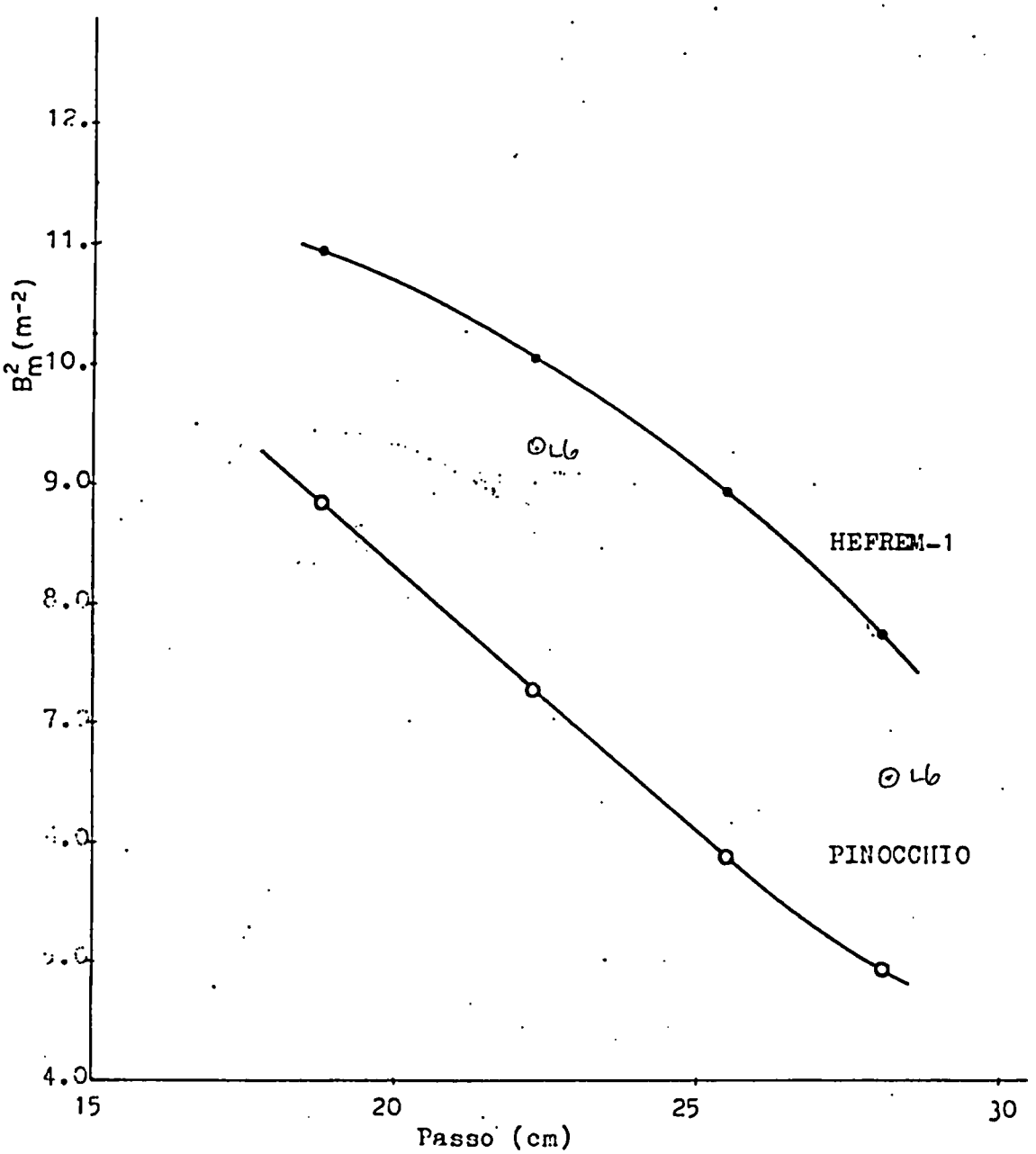


GRAFICO 7: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 37 barre

Arricchimento 3.34%

Refrigerante: H_2O

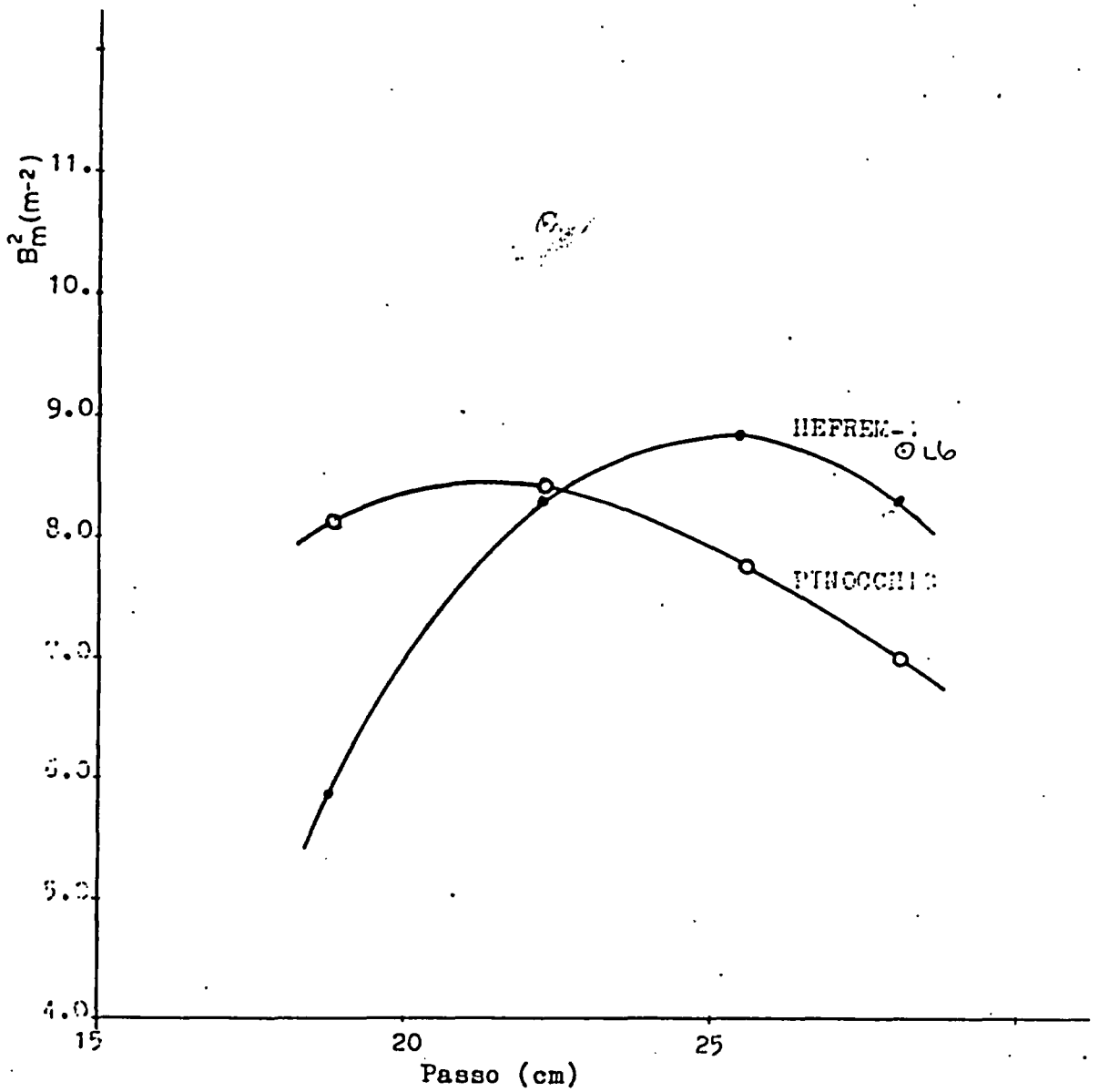


GRAFICO 8: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 37 barre

Arricchimento 2.34%

Refrigerante: D_2O

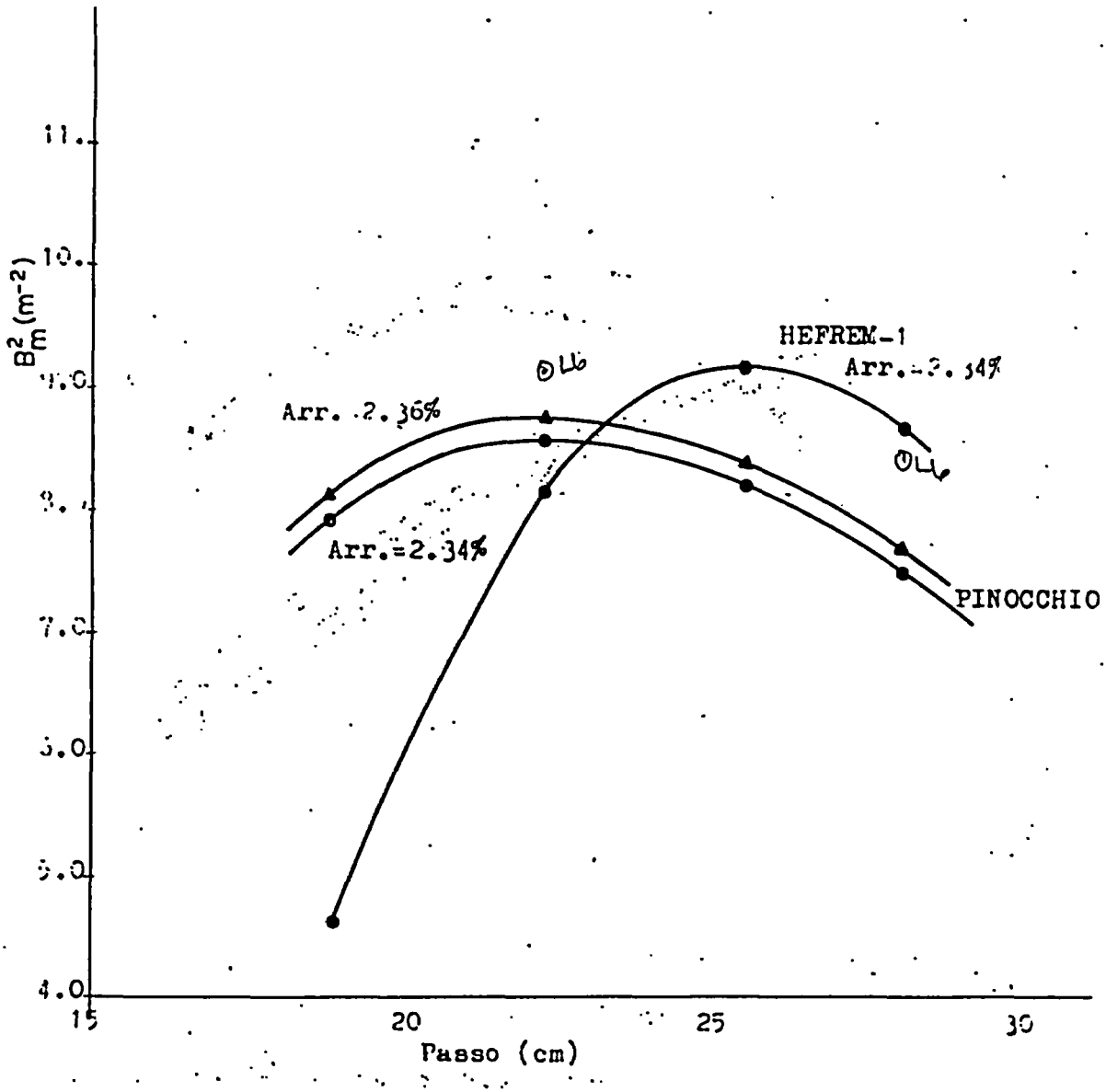


GRAFICO 9: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 37 barre

Arricchimento 2.34%

Refrigerante: aria

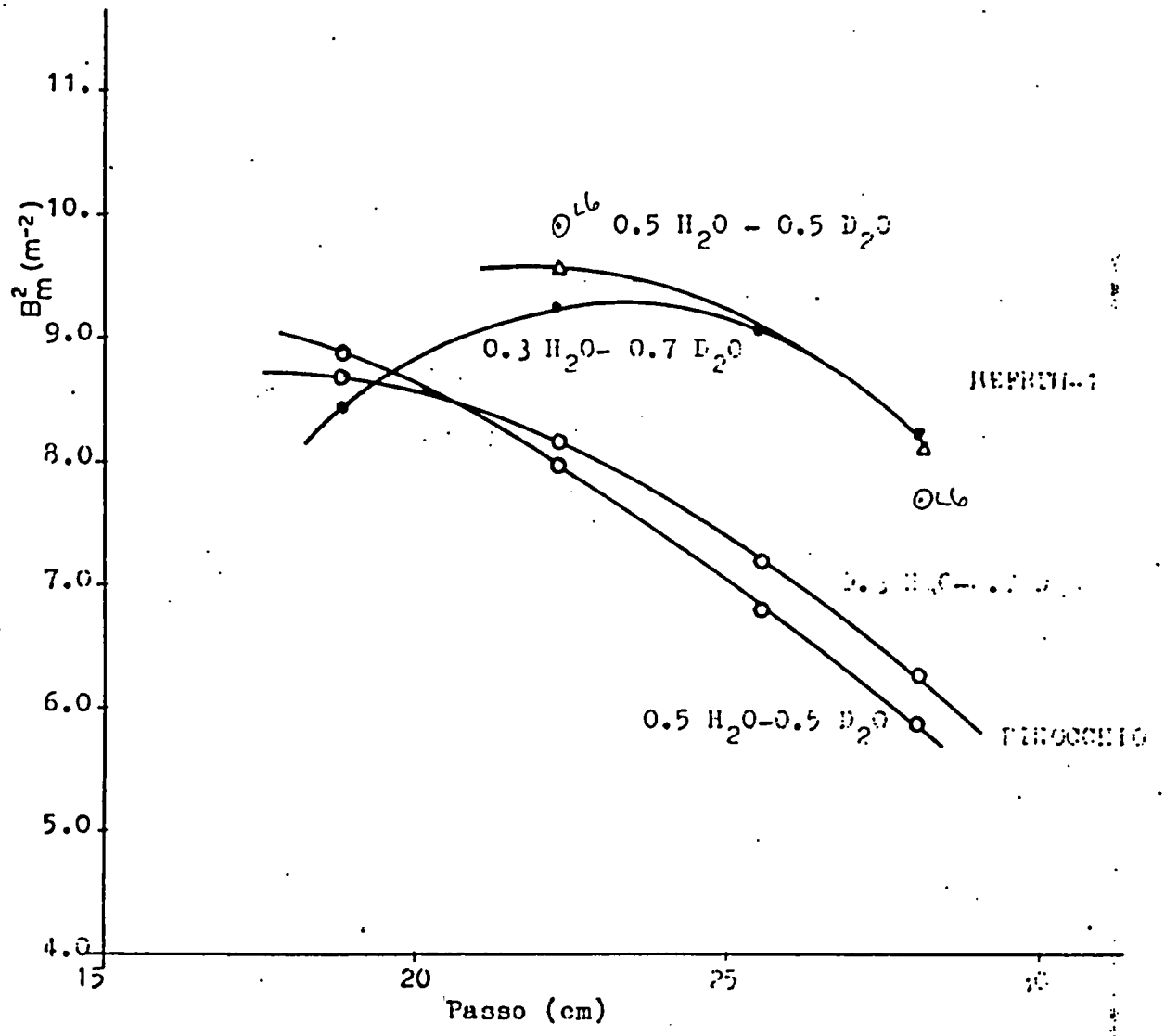


GRAFICO 10: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 37 barre

Arricchimento 2.34%

Refrigerante: 0.3 H_2O-0.7 D_2O ; 0.5 H_2O-0.5 D_2O

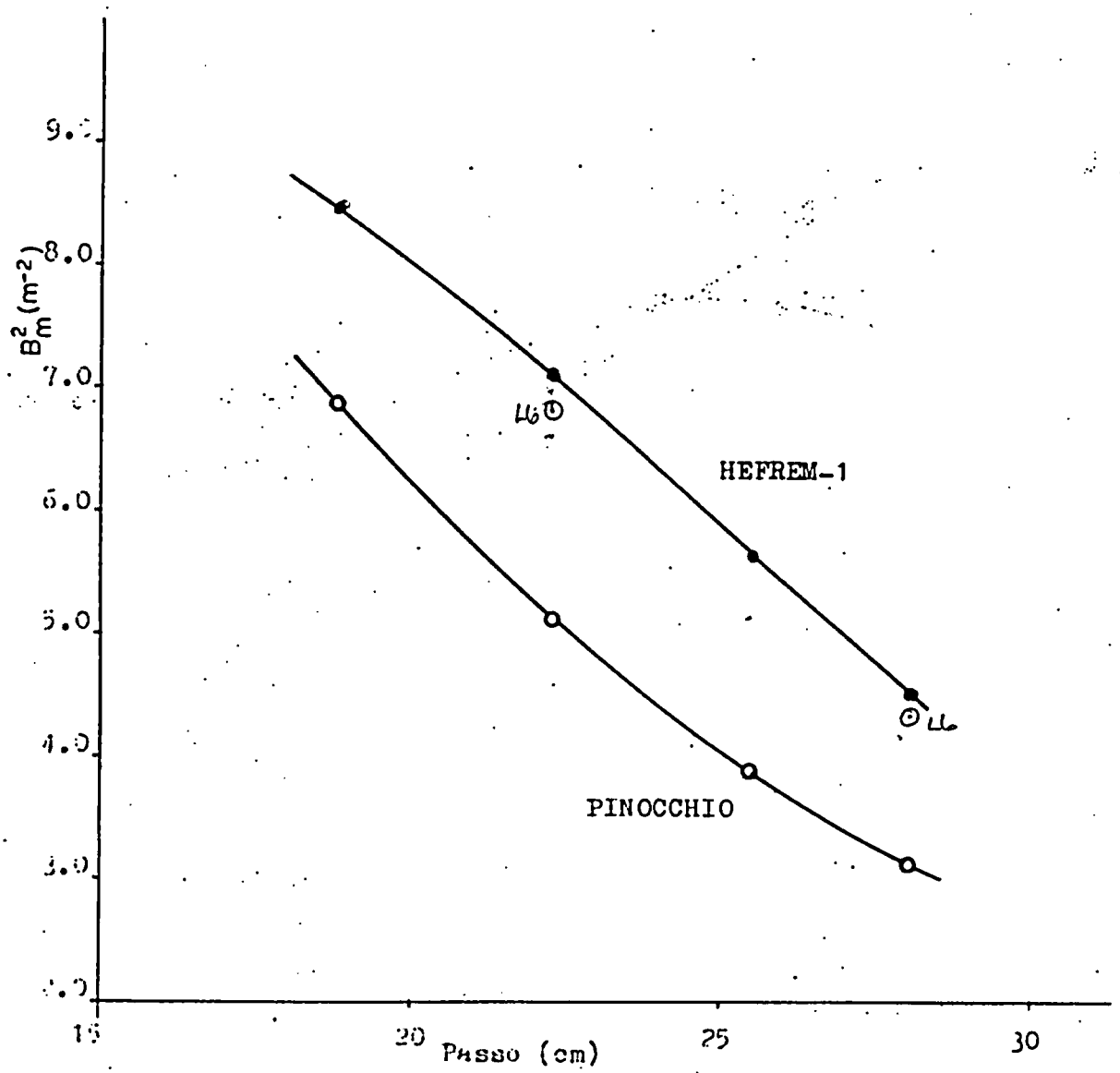


GRAFICO 11: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 19 barre

Arricchimento 2.36%

Refrigerante: H_2O

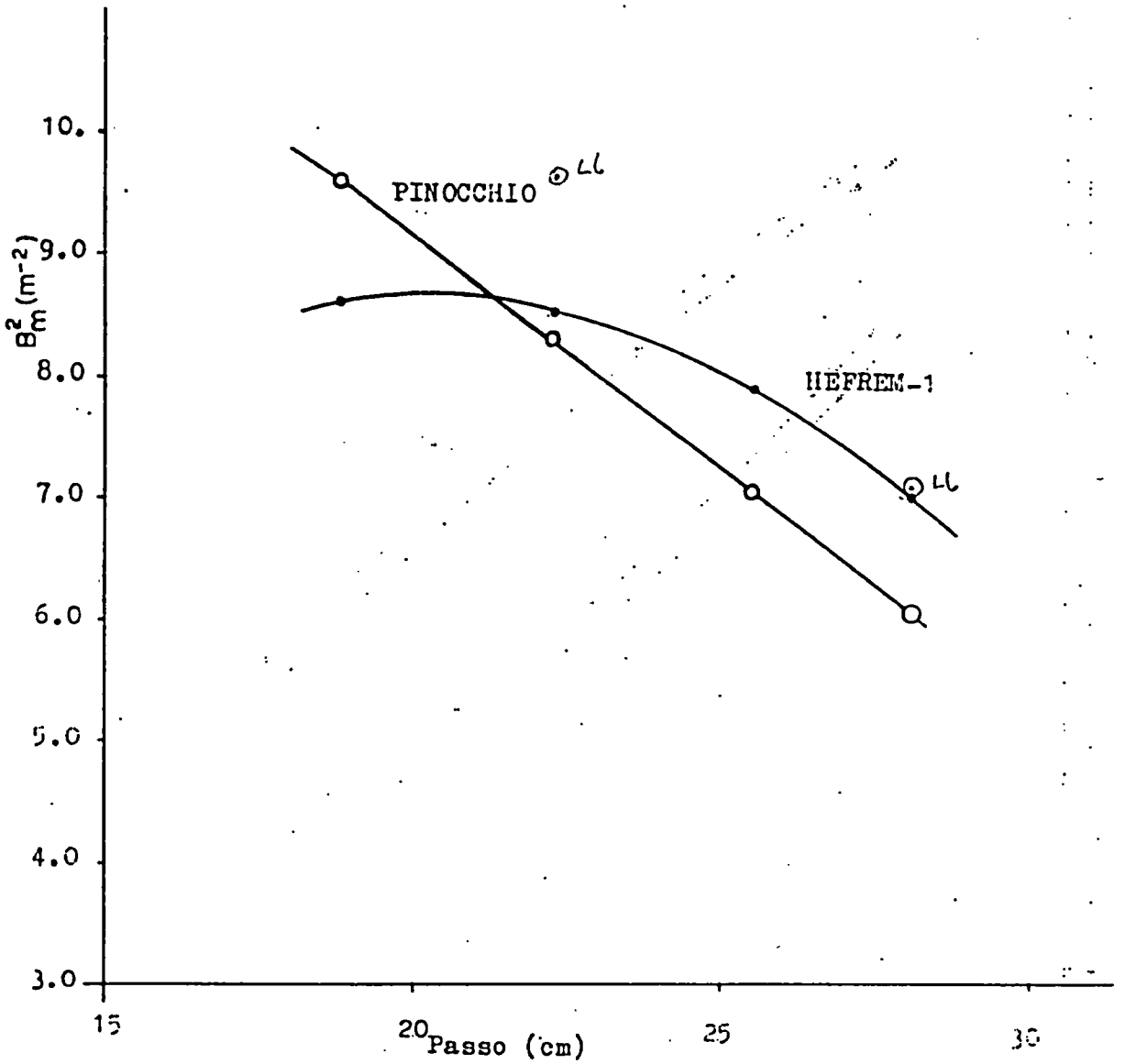


GRAFICO 12: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 19 barre

Arricchimento 2.36%

Refrigerante: D_2O

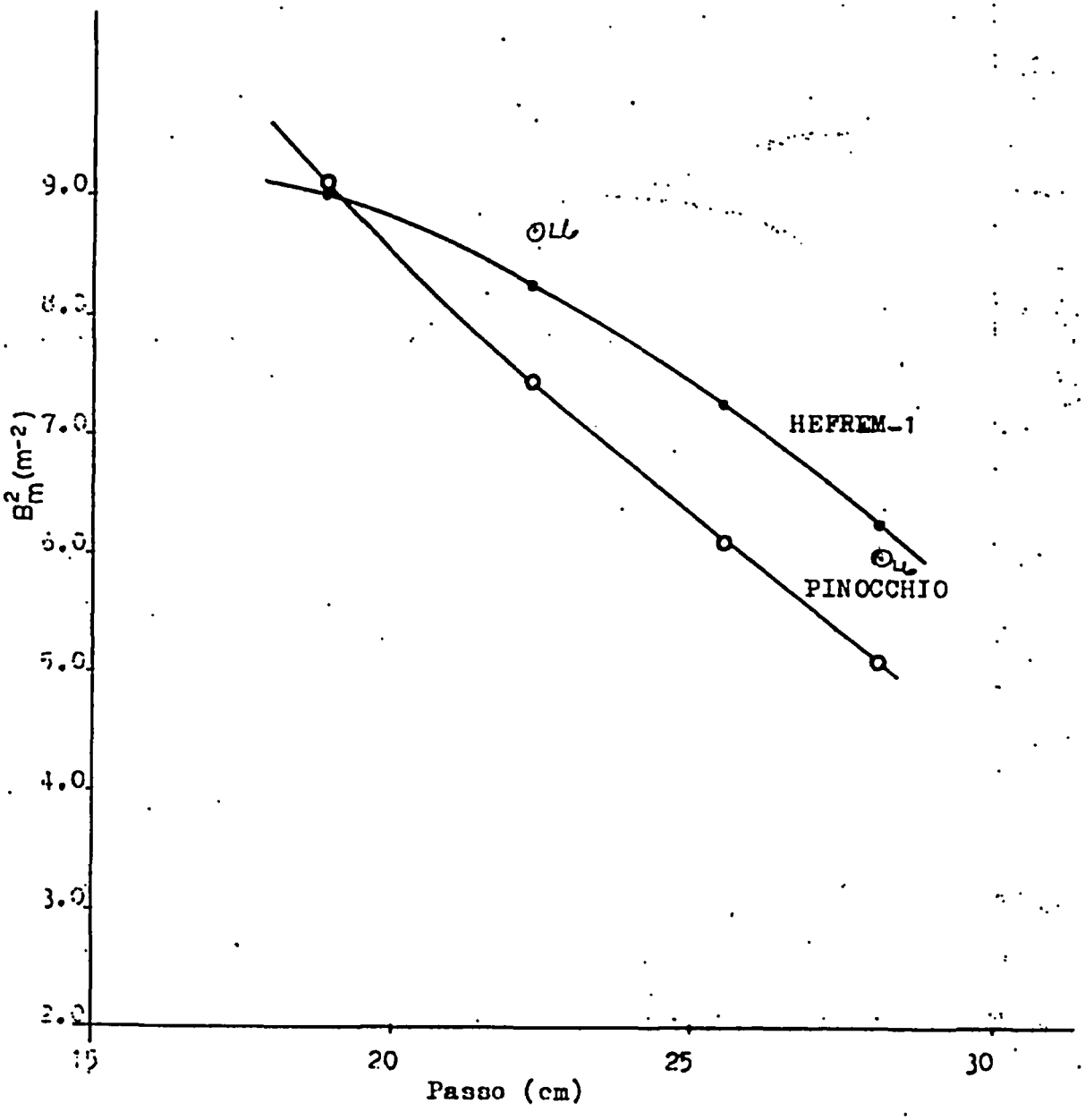


GRAFICO 1:: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 19 barre

Arricchimento 2.36%

Refrigerante: 0.3 H_2O-0.7 D_2O

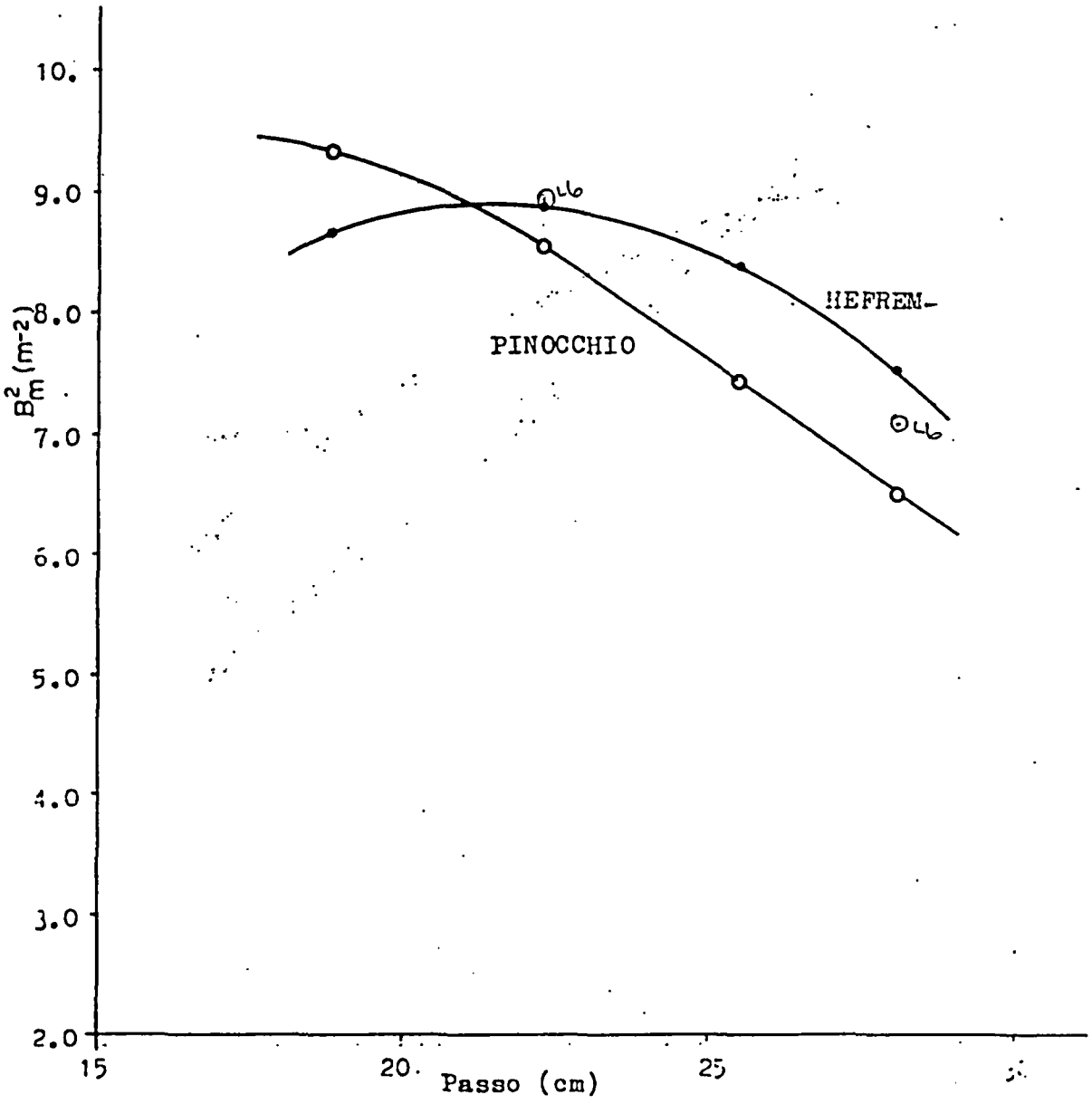


GRAFICO 14: Confronto tra valori sperimentali (HEFREM) e valori teorici (PINOCCHIO) del buckling.

Elementi a 19 barre

Arricchimento 2.36%

Refrigerante: aria

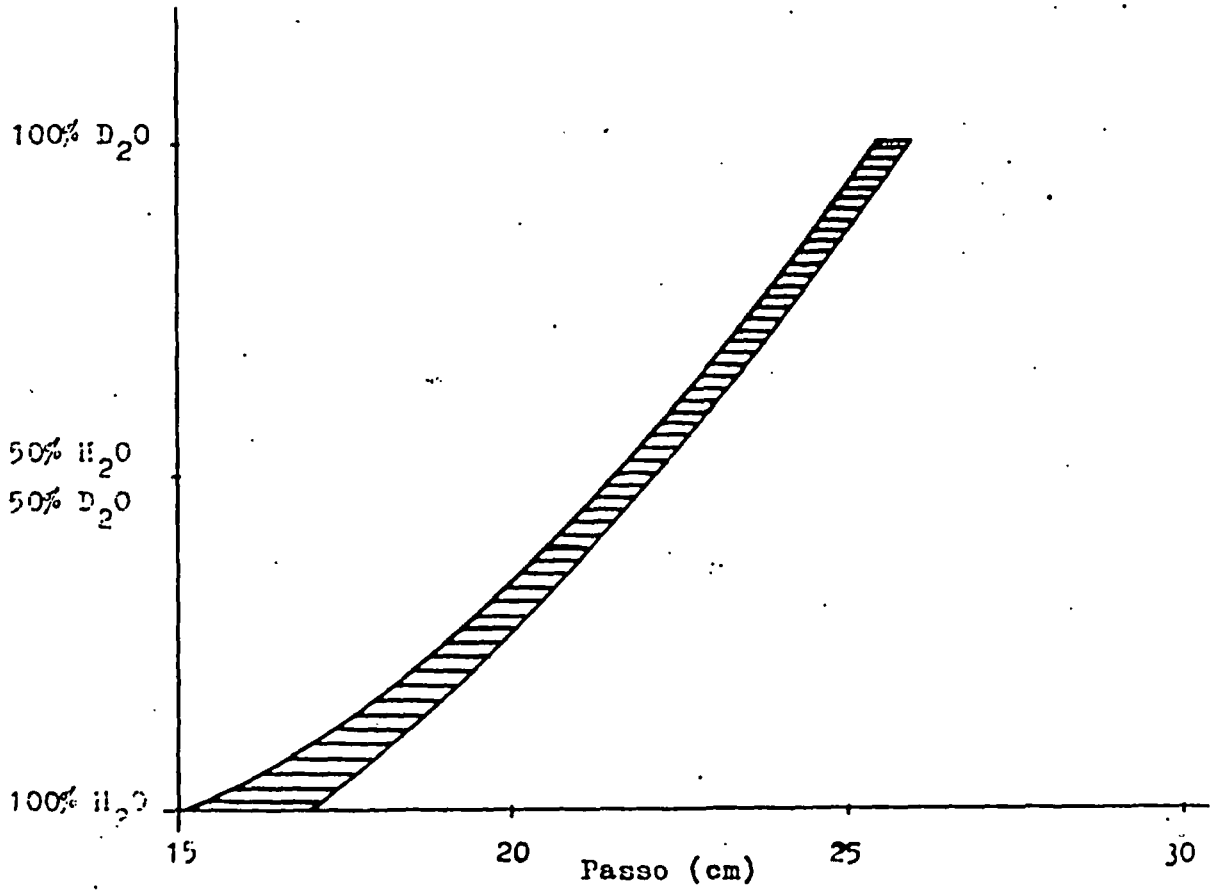


GRAFICO 15: Posizione del massimo del buckling materiale al variare del contenuto di H_2O nel refrigerante dell'elemento a 37 barre.

BIBLIOGRAFIA

/1/ P.BACHER et R. NAUDET (1958) "Mesures de Laplaciens par la methode du remplacements progressif"

/2/ R. PERSSON "Perturbation method of analysis applied to substitution measurements of buckling" AE-256 (1966)

/3/ Interpretazione delle misure eseguite a Chalk-River mediante metodi di calcolo messi a punto presso il Laboratorio Parametri Reticolari (Tesi di laurea di Renza Berti - Bologna: anno accademico 1972-73)

/4/ W.HAGE et al. " First experiments with the zero power facility ECO" ATKE 13-26 (133-138) (1968) Ispra

/5/ S.CASADIO, L .LORENZINI "Analitical letters" 6(9) pag. 809 820 (1973)

/6/ A.DANERI "Modalità di uso del codice SQUID-2 " CEC(68)15

/7/ A.GANDINI "Calcolo eterogeneo dei reattori nucleari" CNEN Doc. Int. LFCR(67)12

/8/ L.AMYOT, G.CASINI, R.CUNIBERTI and C.DADIO "PINOCCHIO: a computer program for cell reactivity calculations" EUR M231 e (1969)

/9/ U.BROCCULI "HEFREM: heterogeneous program for replaced elements measurements" Rapporto interno CNEN.

/10/ M.L.TOBIAS, T.B.FOWLER "EQUIPOISE-3: a two dimensional two group neutron diffusion code for IBM-7090 computer" ORNL 3199(1961)

/11/ BUCFIT: Internal Report Euratom Buckling Fit Program fur ECO Experimente (H.J.Metzdorf) 1965

/12/ G.BURNAND et al. "SOS-1: a program for calculating the flux in heterogeneous system" Euratom Ispra, Rapporto interno

/13/ J.LIGOU - HETROIS, Communication Euratom-G.A.A.A.

/14/ U.BROCCOLI: HETROIS-C versione per il calcolo IBM 360/75 del c odice eterogeneo tridimensionale monopolare HETROIS. Doc. CEC(72)15

RINGRAZIAMENTI

Molti ringraziamenti sono dovuti a H. Hettiger, H. Hohman, F. Toselli per il loro contributo nella preparazione e nella esecuzione delle misure e al Dr. S. Grifoni per la sua consulenza nell'interpreazione dei dati.