

IT8400503

**COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO
DELL'ENERGIA NUCLEARE E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE**

Criteria per la progettazione neutronica di un circuito tipo Supersara

F. Casali, D. Cepraga



ENEA-RT/FIMA(82)9

F. Casali, D. Cepraga (Enea - Dipartimento Tecnologie Interrettoriali di Base, Bologna)

CRITERI PER LA PROGETTAZIONE NEUTRONICA DI UN CIRCUITO TIPO SUPERSARA

Riassunto - Viene presentata una metodologia per la progettazione neutronica di circuiti sperimentali posti in reattori di irraggiamento moderati a D₂O del tipo Enor. Il procedimento di calcolo riguarda la ricerca di una cella, tipo Wigner-Seitz, nella quale il canale in questione sia sottoposto alle stesse interazioni neutroniche che si hanno nel reattore.

**COMITATO NAZIONALE PER LA RICERCA E PER LO SVILUPPO
DELL'ENERGIA NUCLEARE E DELLE ENERGIE ALTERNATIVE**

Criteria per la progettazione neutronica di un circuito tipo Supersara

F. Casali, D. Cepraga

Testo pervenuto nell'ottobre 1982

INDICE

1. INTRODUZIONE	pag.	1
2. CONFIGURAZIONE PRESA IN CONSIDERAZIONE	"	3
2.1 Nocciolo	"	3
2.2 Elemento SUPERSARA	"	3
3. METODOLOGIA DI CALCOLO	"	5
3.1 Premessa	"	5
3.2 Schema di calcolo adottato	"	6
4. PARAMETRI ETEROGENEI DEGLI ELEMENTI DI COMBUSTIBILE E BARRE DI CONTROLLO	"	9
4.1 Generalità	"	9
4.2 Elementi di combustibile e barre di controllo dello ESSOR	"	10
4.3 Canale SUPERSARA	"	11
4.4 Indicatori	"	13
5. MIGLIORAMENTO AL PROCEDIMENTO DEL RAGGIO EFFETTIVO DI CELLA	"	17
6. CONCLUSIONI	"	19
REFERENZE		
TABELLE E FIGURE		

1. INTRODUZIONE

Il programma SUPERSARA, proposto dal CCR Ispra, si pone come obiettivo l'analisi del comportamento delle barrette di reattori del tipo H_2O in pressione, sottoposte a danneggiamento a causa della mancanza di refrigerante.

La simulazione di questo tipo di incidente verrà effettuata nello interno di un loop, contenente una porzione significativa di un "array" di barrette tipo PWR, situato nel reattore ESSOR.

Per ottenere una buona simulazione del fenomeno, è necessario che un certo numero di barrette siano sottoposte alle stesse condizioni (temperatura, livello e distribuzione spaziale del flusso, etc.) nelle quali si trovano nel reattore di potenza incidentato.

Poichè l'ESSOR è un reattore a D_2O e poichè, per ovvie ragioni di sicurezza, l'array di barrette è posto in un tubo cilindrico, notevoli difficoltà sorgono nel realizzare, nelle barrette in questione, una distribuzione neutronica (spazio energetico) tipica di un reattore PWR. Oltremodo difficile è inoltre la progettazione neutronica dell'insieme: le difficoltà derivano soprattutto dalla necessità di trattare geometrie molto complesse (array di barrette con passo quadrato entro un tubo cilindrico), arricchimenti che variano da barretta a barretta (per avere una potenza spazialmente costante entro l'array), tubi di forza e di sicurezza con spessori molto elevati, caratteristiche diverse di moderazione del refrigerante (H_2O) e del moderatore (D_2O).

A causa di queste peculiarità del circuito non è possibile utilizzare metodi standard già sperimentati per altri tipi di reattore.

Scopo di questo lavoro è lo sviluppo di una metodologia di calcolo, sufficientemente preciso e veloce; per la progettazione neutronica di questo circuito.

La validità del metodo proposto dovrebbe essere confermata da un'esperienza fatta "ad hoc" nel reattore ESSOR (mock-up fisico del SUPER SARA).

2. CONFIGURAZIONE PRESA IN CONSIDERAZIONE

Fra le varie configurazioni proposte per il SUPERSARA, in questo lavoro ci si è riferiti alla configurazione standard del circuito con tubo di forza e di sicurezza costituiti da una lega di zirconio e niobio. Comunque, come verrà detto esplicitamente in seguito, la geometria del canale è stata opportunamente semplificata.

2.1 Nocciolo

Il nocciolo del reattore, schematizzato in Fig. 1, comprende la zona nutrice, costituita da 16 elementi di combustibile, e la zona sperimentale dove sono presenti i seguenti canali:

3 barre di sicurezza standard;

2 barre liquide;

SUPERSARA.

Nella Fig. 1 sono inoltre indicate altre 6 posizioni potenziali di canali sperimentali.

2.2 Elemento SUPERSARA

Il canale SUPERSARA è costituito da un fascio di 32 barrette con arricchimenti diversi, sistemato entro un tubo di zirconio e niobio (2,5%), denominato "Tubo di Forza", situato a sua volta entro un tubo di zirconio e niobio (2,5%) denominato "Tubo di Sicurezza".

Schema della sezione orizzontale del SUPERSARA è riportata nella Fig. 2.

3. METODOLOGIA DI CALCOLO

3.1 Premessa

Affinchè l'esperienza SUPERSARA sia fattibile devono essere soddisfatte alcune condizioni tra le quali ricordiamo:

- a) l'aumento della reattività in ESSOR, dovuto alla mancanza di refrigerante nel canale SUPERSARA, deve mantenersi al di sotto di un certo valore;
- b) la potenza sviluppata nel SUPERSARA deve essere dell'ordine di 2000 KW per potenze dell'ESSOR dell'ordine di 25÷30 MW;
- c) la distribuzione delle fissioni entro le barrette del SUPERSARA non devono presentare una forte variazione azimutale e devono avere un valore abbastanza uniforme entro il canale;
- d) i tubi di forza e di sicurezza del circuito devono essere sufficientemente spessi per sopportare pressioni comprese tra le 80 e 160 atmosfere.

Le condizioni sopra citate si traducono in scelte ben precise sulla distribuzione degli arricchimenti nelle barrette, sullo spessore dei tubi di forza e sicurezza, sulla potenza alla quale deve funzionare l'ESSOR e sulle caratteristiche del sistema di controllo.

Da quanto detto emerge l'importanza di una corretta progettazione neutronica dell'insieme reattore ESSOR + canale SUPERSARA.

3.2 Schema di calcolo adottato

A causa della forte eterogeneità del sistema (sia radiale che asiale), un metodo di calcolo che fornisce buoni risultati senza un utilizzo spropositato di tempo di calcolatore, è quello "eterogeneo" nell'approssimazione monopolare a tre gruppi di neutroni.

Con questo metodo si risolve l'equazione della diffusione a tre gruppi di neutroni nel moderatore; gli elementi assorbenti e moltiplicanti (barre di controllo, elementi di combustibile, etc.) sono descritti da opportune condizioni al contorno (chiamate "parametri eterogenei") legate alle derivate logaritmiche dei flussi sulle superfici dei canali.

Per il calcolo dei parametri eterogenei solitamente vengono utilizzati i "codici di cella" mediante i quali è possibile risolvere l'equazione del trasporto dei neutroni con la condizione di simmetria del flusso sul bordo della cella (approccio Wigner-Seitz).

Per il calcolo dei parametri relativi a canali costituenti un reticolo regolare (ad esempio reattori tipo CIRENE o CANDU) non vi sono difficoltà: la definizione di una cella è pressochè immediata. Nel caso di sistemi fortemente eterogenei, tipo ESSOR o reticoli non regolari (ad esempio barre di controllo del CIRENE), bisogna ricorrere ad alcuni artifici. Per le barre di controllo del CIRENE si è seguito uno schema a "supercella" dove si prende in considerazione un insieme di quattro elementi di combustibile ed una barra di controllo posta tra i quattro elementi e si effettua un calcolo di cella (i quattro elementi vengono assimilati ad un anello) dal quale è possibile calcolare i parametri eterogenei per la barra //.

Per gli elementi di combustibile dell'ESSOR l'approccio è stato diverso: i parametri eterogenei sono stati calcolati con codici di cella standard (come spiegato più avanti) iterando sul raggio di detta cella fino ad avere sul canale gli stessi rapporti dei flussi (ϕ_{veloce}/ϕ_{th} e ϕ_{ep}/ϕ_{th}) che si ottengono da un calcolo di reattore mediante un codice eterogeneo a tre gruppi (ad esempio con il codice H3D). Il processo iterativo suddetto converge abbastanza velocemente //.

Nel caso trattasi di canali molto complessi (come il SUPERSARA) per i quali si debba far uso di metodi di calcolo molto sofisticati (Montecar-

lo o SN bidimensionale a moltigruppi), questo procedimento comporta un notevole costo di tempo di calcolatore e non è detto che il processo iterativo converga.

D'altro canto la ricerca di un "raggio efficace" di cella si ripresenta prima o poi. Ad esempio, se si vuole calcolare con sufficiente dettaglio la distribuzione assiale di potenza nel SUPERSARA con una distribuzione assialmente variabile di densità di refrigerante, un approccio accurato, quale la tecnica Montecarlo, risulta molto costoso in termini di calcolatore se non si ricorre ad un calcolo del solo canale. Anche un calcolo di retto di reattore, mediante un codice di trasporto di tipo SN, richiede un calcolo di cella per normalizzare le distribuzioni di potenza entro le barrette di combustibile le quali non possono essere descritte, nello schema relativo al calcolo di reattore, con l'accuratezza necessaria.

Scopo di questo lavoro è la ricerca del raggio (che indicheremo R_{eff}) di una cella di un reticolo infinito dove l'elemento di combustibile, costituito dal SUPERSARA, sia sottoposto alle stesse iterazione neutroniche alle quali è sottoposto nel reattore.

Per verificare la riuscita di questa ricerca è stato adottato un modello semplificato sia del SUPERSARA sia dell'ESSOR (vedere paragrafo 4.4) che consiste nell'aver schematizzato il reattore in un insieme cilindrico avente una zona nutrice composta di una corona circolare equivalente ai 16 elementi di combustibile, ed il SUPERSARA in un canale a geometria monodimensionale (anelli concentrici) posto nel centro del reattore stesso.

In questo modo è possibile calcolare i parametri eterogenei del SUPERSARA, con un codice in geometria monodimensionale come ANISN, sia quando il canale costituisce l'elemento centrale del reattore, sia quando costituisce l'elemento di combustibile di una cella.

La ricerca avrà successo quando i risultati ottenuti (potenza e coefficiente di vuoto) con un particolare raggio di cella uguaglieranno quelli ottenuti nella configurazione di reattore. I calcoli della potenza sviluppata nel SUPERSARA e del coefficiente di vuoto vengono effettuati

mediante il codice H3D) in una configurazione del reattore composta di 16 elementi di combustibile più il SUPERSARA nel centro del reattore stesso; in questo modo ci si avvicina allo schema monodimensionale ANISN adottato per il calcolo dei parametri eterogenei.

Si tenga comunque presente che, poichè il canale preso in considerazione è un "fac simile" del SUPERSARA, i risultati ottenuti (potenza e coefficiente di vuoto) presentati nelle figure e tabelle non sono significativi degli analoghi valori relativi al canale SUPERSARA vero.

4. PARAMETRI ETEROGENEI DEGLI ELEMENTI DI COMBUSTIBILE E BARRE DI CONTROLLO

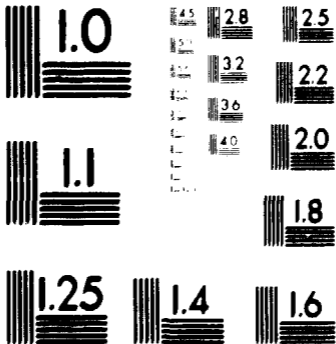
4.1 Generalità

Come parametri eterogenei si intendono le grandezze definite da (Ref. /1/):

$$\gamma_{gg'} = \frac{p_{gg',c} - s_{gg',c}}{2\pi a^2 D_g \bar{\phi}_g^c(a)} \quad (1)$$

dove:

- $p_{gg',c}$ = pozzo di neutroni (neutroni che spariscono nel canale per assorbimento nel gruppo g' e rallentamento verso il gruppo g);
- $s_{gg',c}$ = sorgente di neutroni (comprende sia i neutroni che nascono nel gruppo g per fissione nel gruppo g' sia i neutroni che arrivano in g provenienti dal gruppo g');
- D_g = coefficiente di diffusione del moderatore nel gruppo g ;
- $\bar{\phi}_g^c(a)$ = flusso asintotico del gruppo g' (cioè ricavato mediante la teoria della diffusione) sul canale;
- $\bar{\phi}_g^c$ = flusso medio del gruppo g entro il canale;
- $\gamma_{gg'}$ = parametro "eterogeneo" di monopolio.



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

Per tener conto della fuga dei neutroni lungo l'asse dei canali, si aggiunge all'assorbimento (cioè ai termini diagonali) un termine di "assorbimento fittizio" che ha la semplice espressione:

$$\gamma_{gg}^F = \frac{(V D_g \phi_g)^{\text{canale}} B_z^2}{2\pi a D_g \phi_g(a)} \quad (2)$$

dove B_z^2 è il buckling assiale del reattore.

Dato lo scarso contributo di questo termine alla reattività del sistema, il numeratore viene calcolato dall'espressione:

$$(V D_g \phi_g)^{\text{canale}} = \sum_j V_j D_j \phi_j \phi_g = \frac{\sum_j \phi_{jg} V_j}{3 \sum_j \Sigma_{jg}^{tr} \phi_{jg} V_j} \quad (3)$$

dove j indica la regione j -esima e gruppo g -esimo.

I γ_{gg} , sono grandezze legate alle correnti nette attraverso la superficie del canale e vengono utilizzate come condizioni al contorno per descrivere il contributo del canale k -esimo, nel modo seguente:

$$\left(\frac{d\phi_i}{d\rho_k} \right)_{\rho_k = a_k} = \sum_g \gamma_{ig} \phi_g \quad (4)$$

dove $\vec{\rho}_k$ è il vettore che descrive la distanza $|\vec{\rho}_k|$ dal centro del reattore al centro del canale k -esimo e a_k è il raggio di detto canale. Ulteriori dettagli possono essere ottenuti dalla Ref. /2/.

4.2 Elementi di combustibile e barre di controllo dell'ESSOR

Poichè i canali in questione hanno geometria cilindrica, per il calcolo dei γ_{gg} , viene utilizzato lo schema GAM-GATHER-COMBINE-ANISN a 24 gruppi, ridotti successivamente a 3; in Tabella 1 sono riportati i li

miti energetici dei gruppi in questione.

Per i terminali non attivi del SUPERSARA, si usa ancora lo schema GAM-GATHER-COMBINE-ANISN con una geometria semplificata (anellizzata) del cluster.

Per verificare la validità del metodo di calcolo proposto, è stato calcolato il K_{eff} dell'ESSOR per una configurazione critica, senza canali in zona sperimentale (Ref. /3/), ottenendo $K_{eff}=1,0035$. Si ritiene pertanto che la zona nutrice e il sistema di barre di regolazione e controllo siano calcolati correttamente.

4.3 Canale SUPERSARA

Per un calcolo corretto dei γ_{gg} , del SUPERSARA si dovrebbe utilizzare un codice tipo Montecarlo quale il KIM (Ref. /4/) stante la complessità geometrica del canale.

Esiste però una considerazione che fa preferire, per questa ricerca, lo schema semplificato in geometria monodimensionale.

Non è possibile, infatti, una trattazione con il KIM del SUPERSARA nella configurazione reattore; se si pensa che il calcolo del K_{∞} (e distribuzione di fissioni delle barre), per una cella tipica, comporta un tempo di CPU dell'ordine di 1 ora (IBM 370/168) si può ben immaginare quanto sia dispendioso un calcolo comprendente tutto il reattore.

L'idea è pertanto quella di trovare un raggio di cella equivalente mediante una trattazione in geometria semplificata ed effettuare il calcolo definitivo mediante il codice KIM.

Lo schema di calcolo adottato è pertanto il seguente:

- 1) si schematizza il SUPERSARA come una successione di anelli concentrici dei quali tre sono anelli di combustibile; le guaine delle barrette sono omogeneizzate con l'acqua di refrigerazione (vedere Fig. 3);
- 2) del canale, schematizzato come descritto in 1), vengono calcolati i γ_{gg} , considerando sia una "configurazione di cella" sia una "configurazione di reattore" (ESSOR) nella quale il canale in questione costituisce la parte centrale; la zona nutrice è schematizzata da una zona

anulare contenente i 16 elementi ESSOR opportunamente diluiti (vedere Fig. 4).

I calcoli dei γ_{gg} , vengono effettuati mediante il codice ANISN-P2 a 11 gruppi di energia (vedere schema in Tab. 1b) collassati successivamente a 3;

- 3) i γ_{gg} , calcolati nelle due configurazioni descritte al punto 2) (cella e reattore cilindricizzato), vengono utilizzati, tramite il codice H3D, per il calcolo della potenza e del $\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}}$ dovuto allo svuotamento del SUPERSARA.

Assumendo che i valori del $\frac{\Delta K}{K}$ e della potenza del SUPERSARA, ottenuti con i γ_{gg} , della "configurazione di reattore", costituiscano la verità, mediante un processo iterativo si trova il raggio nella "configurazione di cella" che meglio riesce a riprodurre detti valori.

Nella Fig. 5 è mostrato l'andamento della potenza nel SUPERSARA nel caso di canale con refrigerante a densità nominale ($\rho_{H_2O} = 0.75 \text{ gr/cm}^3$), che indicheremo con "canale pieno", e nel caso di canale vuoto. La potenza è normalizzata a 25 Mw nella zona nutrice. Da tale figura si può rilevare che, qualunque sia il raggio della cella, non si riesce a ritrovare i valori della potenza calcolati con i parametri γ ottenuti da un calcolo del canale posto in zona centrale del reattore (che noi abbiamo assunto essere la "verità"). Si deve comunque notare che esiste un'ampio intervallo (tra 22 e 27 cm), entro il quale i valori della potenza sono indipendenti dal raggio della cella; inoltre le differenze tra il calcolo di "riferimento" (γ da reattore) e "approssimato" (γ da cella) sono molto modeste: circa 10 KW (-0.4%) nel caso di canale vuoto e circa 55 KW nel caso di canale pieno (+3,4%).

Nella Fig. 6 è mostrato l'andamento della reattività, $(\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}})$, introdotta dallo svuotamento del canale, calcolata sia con il "metodo della cella" (approssimato) sia con il "metodo del reattore" (riferimento). Anche in questo caso non si riesce ad ottenere un raggio di cella tale da riprodurre esattamente la reattività inserita; comunque, per raggi di cella compresi tra 24 e 27 cm, l'errore è soltanto dell'ordine di 60 pcm (-4%).

Da questa indagine si può trarre la seguente conclusione: se si vuole calcolare la potenza e il coefficiente di svuotamento di un canale "fac-simile" del SUPERSARA (cioè di un SUPERSARA anellizzato), il calcolo dei γ eseguito con una cella avente un raggio efficace compreso tra 24 e 27 cm comporta un errore massimo della potenza del 3,5% (nel caso del canale pieno) e del 4% nella reattività.

4.4 Indicatori

Il calcolo del raggio efficace della cella, come è stato in precedenza, fa riferimento a due indicatori: la potenza del SUPERSARA ed il coefficiente di svuotamento. E' chiaro che queste due grandezze sono funzioni dei γ per cui, in definitiva, sono i γ ad essere gli "indicatori" di raggio efficace, R_{eff} . E' ovvio però che se si è in grado di calcolare facilmente i γ di reattore, non ha senso calcolare i γ tramite la cella equivalente.

E' quindi indispensabile trovare altri "indicatori" che non si riferiscano a grandezze relative all'interno del canale ma all'esterno o alla superficie del canale stesso. In questo modo sarà possibile, mediante un processo iterativo che coinvolge calcoli di cella e calcoli di reattore, mediante la teoria del "reattore eterogeneo" (codice H₃D), arrivare a determinare correttamente i γ .

Come indicatori non interni al canale sono stati presi in considerazione i rapporti dei flussi (ϕ_1/ϕ_3 e ϕ_2/ϕ_3) sulla superficie del canale e le derivate logaritmiche dei singoli flussi, sempre sulla superficie del canale (gli indici 1,2,3 stanno per gruppo veloce, epitermico e termico rispettivamente).

Nella Fig. 7 sono riportati gli andamenti del rapporto ϕ_1/ϕ_3 , sulla superficie del canale pieno. Le curve 1,2,3 e 4 si riferiscono rispettivamente ai flussi ottenuti con:

- 1) calcolo ANISN con cella a raggi diversi;
- 2) calcolo H₃D con parametri γ da ANISN di cella;
- 3) calcolo ANISN di reattore (valore unico);
- 4) calcolo H₃D di reattore con parametri γ da ANISN di reattore (valore unico).

Innanzitutto si deve osservare che i due valori del rapporto ϕ_1/ϕ_3 per il calcolo del reattore con ANISN (retta 3) e con H3D (retta 4) non coincidono perchè sono diverse sia la schematizzazione geometrica (zona anulare in ANISN, 16 elementi di combustibile in H3D) sia l'approssimazione dell'equazione del trasporto (metodo SN in ANISN e teoria della diffusione in H3D). La differenza tra i due valori, comunque, è molto modesta.

Confrontando le curve 1 e 3, risulta che il raggio di cella per cui il rapporto ϕ_1/ϕ_3 maggiormente si avvicina alla situazione reattore (monodimensionale) è circa 20 cm; se si considerano le due curve 2 e 4, relative al calcolo con H3D, c'è un'ampia zona, tra 22 e 28 cm, che fornisce rapporti ϕ_1/ϕ_3 molto vicini a quelli ottenuti con γ da ANISN di reattore ($\sim 7\%$).

Nella Fig. 8 sono riportati gli analoghi rapporti ϕ_2/ϕ_3 per il canale pieno. In questo caso il raggio efficace si trova compreso tra 24 e 28 cm; in questo intervallo la differenza tra le curve 2 e 4 è dell'ordine del 3%.

Le curve riportate nelle Figg. 9 e 10, analoghe alle 7 e 8, si riferiscono al canale vuoto; per questo tipo di canale la situazione è migliore che per il canale pieno in quanto ϕ_1/ϕ_3 e ϕ_2/ϕ_3 calcolati con i e γ da ANISN di cella, praticamente coincidono con quelli calcolati con ANISN di reattore per raggi di cella compresi tra 25 e 30 cm.

Un secondo tipo di indicatori è la derivata logaritmica del flusso definita nel modo seguente:

$$d_g = \frac{1}{\phi_{eg}} \frac{\phi_{eg} - \phi_{ig}}{R_e - R_i}$$

dove:

R_e = punto di mezzo del mesh point (nella schematizzazione ANISN) successivo la superficie del canale ($R_e = 10,50$ cm);

R_i = punto di mezzo del mesh point precedente la superficie del canale ($R_i = 9,79$ cm);

$\phi_{eg}; \phi_{ig}$ = flussi del gruppo g ($g=1,2,3$) relativi ai raggi R_e ed R_i .

Nella Fig. 11 sono riportati gli andamenti delle tre d_g per diversi raggi di cella e per il canale nella situazione di reattore; tutti i flussi sono calcolati con ANISN. Da detta figura si può vedere che le derivate logaritmiche del ϕ_1 e ϕ_2 , cella e reattore, sono uguali per $R_{eff} \approx 25,0$ cm mentre le derivate del terzo gruppo non sono mai uguali; il R_{eff} per cui la loro differenza è minore si ha a 26 cm.

La Fig. 12 è analoga alla Fig. 11 ma con il canale vuoto; in questo caso tutte e tre le curve relative alla cella intersecano le rette relative al reattore. Ancora una volta il $R_{eff} = 26$ cm è quello che meglio simula la situazione reattore.

Da quanto sopra detto si possono trarre le seguenti conclusioni:

- 1) sia i rapporti dei flussi sul canale sia le derivate logaritmiche portano ad individuare un $R_{eff} \approx 26$ cm. Si ottiene pertanto, con indicatori posti sulla superficie del canale, lo stesso risultato fornito dai γ_{gg} , che sono parametri relativi a ciò che succede dentro il canale;
- 2) i risultati ottenuti per la potenza e la reattività sono abbastanza indipendenti dal raggio di cella scelto purchè questo vari nell'intervallo tra 23 e 27 cm;
- 3) non è possibile, variando il raggio di cella, riprodurre tutti gli indicatori. In alcuni casi, come ad esempio per la derivata logaritmica del flusso termico, all'aumentare del R_{eff} c'è inizialmente un avvicinamento al valore corretto che si trasforma in un allontanamento con un ulteriore aumento del R_{eff} (vedi Fig. 11).

Alle stesse conclusioni si giunge anche se il canale SUPERSARA, anzichè nel centro, viene posto nella posizione corretta. Infatti calcoli eseguiti con il core di ESSOR come indicato in Fig. 1 hanno mostrato che curve del tipo 2 e 4 hanno una traslazione parallela all'asse y e pertanto i vari rapporti dei flussi individuano sempre gli stessi R_{eff} . Nelle Tabelle 2, 3 e 4 sono riportati i risultati dei casi considerati.

5. MIGLIORAMENTO AL PROCEDIMENTO DEL RAGGIO EFFETTIVO DI CELLA

Fino a questo momento abbiamo affrontato il problema del calcolo γ variando solo il raggio di una cella con caratteristiche (combustibile e moderatore) identiche a quelle che il canale ha nel reattore. Vediamo ora se, modificando artificialmente le caratteristiche di questa cella, è possibile ottenere parametri eterogenei ancora più vicini a quelli che si ottengono nel caso di canale posto nel reattore, soprattutto per il canale pieno per il quale la ricerca del R_{eff} presenta qualche difficoltà.

Considerando che le fissioni nel SUPERSARA sono dovute per il 3% ai neutroni veloci, per il 3% ai neutroni epitermici e per il 94% ai neutroni termici, l'indicatore che meglio dovrebbe essere aggiustato sembra essere la derivata logaritmica del terzo gruppo, d_3 , oppure il rapporto ϕ_2/ϕ_3 .

Dalla Fig. 8 risulta che il rapporto ϕ_2/ϕ_3 nella cella è superiore a quello che si ha nel reattore; questo significa che nella cella il flusso è troppo duro e nulla vale, al fine della termalizzazione, aumentare il raggio di cella. Si è allora costruito un isotopo costituito da idrogeno (legato in acqua), non assorbente e si è aggiunto questo "isotopo dummy", in svariate proporzioni, alla D_2O . Il R_{eff} della cella presa in considerazione è 26 cm. I risultati ottenuti sono mostrati nella Tabella 5, dove, nell'ultima colonna, è riportata una grandezza proporzionale alla sezione d'urto macroscopica di fissione del canale per neutroni termici.

Dal 1° al 7° caso è stato aggiunto "idrogeno dummy", con densità equivalente a quella dell'H nell' H_2O , variando il volume del moderatore interessato (nel caso 4° bis è stato aggiunto anche l'ossigeno); nell'8° caso è stato aggiunto un "H dummy" con densità 5 volte maggiore; nel 9° caso "H dummy" con densità 10 volte maggiore.

Dall'analisi della citata Tabella risulta che:

- 1) aggiungendo "H dummy" nella parte periferica della cella si migliorano sensibilmente i rapporti dei flussi e la derivata logaritmica del ϕ_3 . Sembra che la soluzione ottimale sia quella di aggiungere questo idrogeno dummy (o acqua dummy) ai bordi della cella per uno spessore di 11 cm (dal raggio 15 al raggio 26).
Le derivate logaritmiche di ϕ_1 e ϕ_2 peggiorano rispetto alla soluzione di cella senza H dummy;
- 2) introducendo i γ ottenuti dal caso 4 (o 4 bis) si ha un notevole miglioramento nel calcolo della potenza e del coefficiente di vuoto come è possibile rilevare dalle Tabelle 3 e 4 riga 13 (o 14).
Se consideriamo la Tabella 3 l'errore sulla potenza (caso pieno) scende da 55 KW a 21 KW e l'errore sul coefficiente di vuoto scende da 59 a 9 pcm.

Si ritiene che l'inserimento dell'idrogeno dummy sia un approccio interessante quando il metodo del raggio efficace non porti a risultati soddisfacenti.

6. CONCLUSIONI

Da quanto detto nei paragrafi precedenti si possono trarre le seguenti conclusioni:

- a) per canali del tipo SUPERSARA, con tubo di forza e di sicurezza in Zr+Nb, i parametri eterogenei calcolati mediante il procedimento standard della cella di Wigner-Seitz, danno risultati molto vicini a quelli ottenuti con i e γ calcolati per un canale posto nel centro del reattore;
- b) il raggio della cella equivalente, R_{eff} , è circa 26 cm;
- c) i risultati sono abbastanza indipendenti da R_{eff} purchè esso sia compreso tra 23 e 27 cm;
- d) sia i rapporti dei flussi, ϕ_1/ϕ_3 e ϕ_2/ϕ_3 , sia le derivate logaritmiche dei flussi sulla superficie del canale portano ad individuare un $R_{eff} \cong 26$ cm;
- e) lo scarto massimo tra la potenza valutata con il metodo della cella e quello del reattore è di 55 KW (3,5%) e si ha nel caso pieno. Analogamente lo scarto massimo per il coefficiente di svuotamento è di 59 pcm (-4%);
- f) il R_{eff} rimane lo stesso spostando il canale dalla posizione centrale alla posizione eccentrica nella quale si trova realmente;
- g) si può migliorare sia il calcolo della potenza sia il calcolo del coefficiente di svuotamento introducendo al bordo della cella, per una corona circolare di circa 10 cm, un'acqua non assorbente e prendendo come indicatori il rapporto ϕ_2/ϕ_3 e/o la derivata logaritmica del flusso termico.

Il metodo di calcolo proposto consente di individuare una cella del tipo Wigner-Seitz dalla quale è possibile, utilizzando codici sofisticati quali KIM e DOT, ricavare i parametri eterogenei senza un consumo eccessivo di tempo di calcolatore.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori desiderano ringraziare la Sig.ra M.G. Borgia per i suggerimenti relativi all'utilizzo dei codici H3D ed ANISN-P2 ed il Dr. Richena del CCR Ispra per le utili discussioni.

REFERENZE

- /1/ - F. Casali: "A method to calculate the monopole parameters for heterogeneous reactor calculations"
RT/FI(77)5 - CNEN Report;
- /2/ - T. Auerbach, G. Bunard, H. Soodak: "The heterogeneous method and its application"
Conferenza di Ginevra P/650 (1964);
- /3/ - G. Riesch: "Essais lors de la montée en puissance du réacteur ESSOR"
Int. Report 1411 (1969);
- /4/ - E. Cupini, A. De Matteis, R. Simonini: "KIM - A two dimensional Montecarlo Program for thermal reactors"
CNEN-RT/FIMA(80)2.

INTERVALLO DI ENERGIA [eV]	SUDDIVISIONE IN GRUPPI NEI VARI CODICI PER IL CALCOLO γ_{gg}			
	GAM	GATHER	ANISN (INPUT)	ANISN OUTPUT 3 GR.
$1,49 \cdot 10^7$ - $1,11 \cdot 10^5$	1		1	1
$1,11 \cdot 10^5$ - $5,247 \cdot 10^4$	2		2	1
$5,247 \cdot 10^4$ - $1,503 \cdot 10^4$	3		3	2
$1,503 \cdot 10^4$ - $2,035 \cdot 10^3$	4		4	2
$2,035 \cdot 10^3$ - $2,754 \cdot 10^2$	5		5	2
$2,754 \cdot 10^2$ - $3,727 \cdot 10^1$	6		6	2
$3,727 \cdot 10^1$ - 5,043	7		7	2
5,043 - 2,38	8		8	3
2,38 - 0,7		1	9	3
0,7 - 0,46		2	10	3
0,46 - 0,3		3	11	3
0,3 - 0,2		4	12	3
0,2 - 0,16		5	13	3
0,16 - 0,12		6	14	3
0,12 - 0,085		7	15	3
0,085 - 0,075		8	16	3
0,075 - 0,06		9	17	3
0,06 - 0,04		10	18	3
0,04 - 0,025		11	19	3
0,025 - 0,015		12	20	3
0,015 - 0,008		13	21	3
0,008 - 0,005		14	22	3
0,005 - 0,001		15	23	3
0,001 - 0,00		16	24	3

TABELLA 1a : Suddivisione in gruppi per il calcolo dei parametri eterogenei $[\gamma_{gg}]$ degli elementi della zona nutrice ESSOR nei vari codici della catena GAM-GATHER-COMBINE-ANISN

INTERVALLO DI ENERGIA [eV]	SUDDIVISIONE IN GRUPPI NEI VARI CODICI PER IL CALCOLO γ_{gg}			
	GAM	GATHER	ANISN (INPUT)	ANISN OUTPUT 3 GR.
$1,49 \cdot 10^7$ - $1,653 \cdot 10^6$	1		1	1
$1,653 \cdot 10^6$ - $2,472 \cdot 10^5$	2		2	1
$2,472 \cdot 10^5$ - $5,247 \cdot 10^4$	3		3	1
$5,247 \cdot 10^4$ - $1,67 \cdot 10^2$	4		4	2
$1,67 \cdot 10^2$ - 5,043	5		5	2
5,043 - 2,38	6		6	3
2,38 - 0,18		1	7	3
0,18 - 0,10		2	8	3
0,10 - 0,06		3	9	3
0,06 - 0,03		4	10	3
0,03 - 0,00		5	11	3

TABELLA 1b - Suddivisione in gruppi per il calcolo dei parametri eterogenei $[\gamma_{gg}]$ del canale SUPER SARA , tipo ZR, nei vari codici della catena GAM-GATHER-COMBINE-ANISN.

CASO	SUPERSARA	CONFIGURAZIONE PER CALCOLO γ_{gg}	I N D I C A T O R I				
			RAPPORTO FLUSSI		DERIVATE LOGARITMICHE		
			ϕ_1/ϕ_3	ϕ_2/ϕ_3	GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3
1	PIENO	REATTORE	0,0722	0,100	- 0,249	- 0,065	0,0430
2	VUOTO	REATTORE	0,1665	0,178	- 0,260	- 0,036	0,062
3	PIENO	CELLA 15	0,114	0,231	- 0,168	- 0,0063	0,0325
4	VUOTO	CELLA 15	0,208	0,395	- 0,181	- 0,0017	0,050
5	PIENO	CELLA 20	0,093	0,147	- 0,236	- 0,041	0,0391
6	VUOTO	CELLA 20	0,171	0,228	- 0,247	- 0,0185	0,059
7	PIENO	CELLA 26	0,0974	0,133	- 0,250	- 0,0642	0,0403
8	VUOTO	CELLA 26	0,1775	0,193	- 0,260	- 0,034	0,062
9	PIENO	CELLA 30	0,104	0,138	- 0,251	- 0,069	0,0399
10	VUOTO	CELLA 30	0,188	0,197	- 0,261	- 0,0375	0,062
11	PIENO	CELLA 36	0,119	0,152	- 0,252	- 0,0717	0,0387
12	VUOTO	CELLA 36	0,208	0,213	- 0,262	- 0,039	0,062
13(+)	PIENO	26 con H ₂ O	0,0852	0,0976	- 0,261	- 0,095	0,0428
14(++)	PIENO	26 con H ₂ O	0,0858	0,0100	- 0,258	- 0,091	0,0426

(+) Caso 4 Tab.5

(++)Caso 4 bis Tab. 5

TABELLA 2 : Indicatori calcolati con il codice ANISN con differenti aggi di cella equivalente SUPERSARA

CASO	SUPERSARA	CONFIGURAZIONI PER CALCOLO γ_{gg}	Keff	$\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}}$ (pcm)	POTENZA (KW)	I N D I C A T O R I				
						Rapporto Flussi		Derivate Logaritmiche		
						ϕ_1/ϕ_3	ϕ_2/ϕ_3	GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3
1	ZR PIENO	REATTORE	1,17641	1630	1663	0,0742	0,0977	- 0,240	- 0,0656	0,0363
2	VUOTO		1,19559			2554	0,169	0,166	- 0,242	- 0,0353
3	ZR PIENO	CELLA 15	1,17895	1339	1786	0,0839	0,109	- 0,242	- 0,0635	0,0402
4	VUOTO		1,19474			2452	0,160	0,157	- 0,242	- 0,0343
5	ZR PIENO	CELLA 20	1,17744	1527	1723	0,0773	0,10265	- 0,242	- 0,0647	0,0384
6	VUOTO		1,19542			2528	0,1665	0,162	- 0,242	- 0,0342
7	ZR PIENO	CELLA 26	1,17702	1571	1718	0,0765	0,101	- 0,242	- 0,0636	0,0381
8	VUOTO		1,19551			2545	0,168	0,165	- 0,242	- 0,0352
9	ZR PIENO	CELLA 30	1,17708	1565	1730	0,0770	0,1011	- 0,242	- 0,0633	0,0382
10	VUOTO		1,19550			2546	0,1685	0,166	- 0,242	- 0,0355
11	ZR PIENO	CELLA 36	1,17733	1541	1756	0,0781	0,1023	- 0,241	- 0,0626	0,0366
12	VUOTO		1,19547			2542	0,168	0,166	- 0,242	- 0,0356
13 (+)	ZR PIENO	26 con H ²²	1,17623	1639	1684	0,0747	0,0963	- 0,242	- 0,0610	0,03725
14 (++)	ZR PIENO	26 con H ₂ O ²²	1,17628	1635	1686	0,0749	0,0963	- 0,242	- 0,0612	0,0373

(+) Caso 4 Tabella 5

(++) Caso 4 bis Tabella 5

TABELLA 3 : Grandezze varie calcolate con H3D utilizzando i γ_{gg} da ANISN (Casi di Tabella 2). SUPERSARA sull'asse del reattore e zona sperimentale senza γ_{gg} materiali strutturali.

CASO	SUPERSARA	CONFIGURAZIONI PER CALCOLO γ_{28}	K_{eff}	$\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}}$ (pcm)	POTENZA (KW)	I N D I C A T O R I				
						Rapporto Flussi		Derivate Logaritmiche		
						ϕ_1/ϕ_3	ϕ_2/ϕ_3	Gruppo 1	Gruppo 2	Gruppo 3
1 2	ZR PIENO VUOTO	REATTORE	1,14965 1,1689	1674	1656 2562	0,0775 0,175	0,108 0,181	- 0,2382 - 0,233	- 0,0472 - 0,0274	0,0366 0,0590
3 4	ZR PIENO VUOTO	CELLA 15	1,15224 1,16803	1370	1780 2457	0,0876 0,166	0,121 0,171	- 0,235 - 0,236	- 0,0529 - 0,0286	0,0363 0,0585
5 6	ZR PIENO VUOTO	CELLA 20	1,15071 1,16873	1566	1716 2541	0,0807 0,173	0,114 0,177	- 0,238 - 0,236	- 0,0562 - 0,0349	0,0363 0,0472
7 8	ZR PIENO VUOTO	CELLA 26	1,15028 1,16883	1612	1712 2552	0,0799 0,174	0,115 0,180	- 0,2375 - 0,243	- 0,0576 - 0,0275	0,0362 0,0590
9 10	ZR PIENO VUOTO	CELLA 30	1,15034 1,16881	1606	1723 2553	0,0804 0,175	0,112 0,191	- 0,240 - 0,243	- 0,0407 - 0,0344	0,0378 0,0590
11 12	ZR PIENO VUOTO	CELLA 36	1,15061 1,16877	1578	1748 2549	0,0815 0,174	0,113 0,181	- 0,238 - 0,235	- 0,0566 - 0,0344	0,0363 0,0590
13(+) 14(++)	ZR PIENO ZR PIENO	26 con H ²² 26 con H ₂ O ²²	1,14946 1,14952	1685 1680	1677 1679	0,0781 0,07825	0,1068 0,1073	- 0,2385 - 0,238	- 0,0480 - 0,0400	0,0366 0,0366

(+) Caso 4 Tabella 5

(++) Caso 4 bis Tabella 5

TABELLA 4 : Grandezze varie calcolate con H3D utilizzando i γ_{28} , da ANISN (casi di Tabella 2). SUPERSARA in posizione eccentrica e con materiali strutturali nella zona sperimentale.

CASO	ZONA DI MODERAZIONE INTERESS.			I N D I C A T O R I					$\Sigma_{fth}^{H^2}$
	da R (cm)	a R _{cella} (cm)	DENSITA' H ² [n/cm.b]	Rapporto Flussi		Derivate Logaritmiche			
				ϕ_1/ϕ_3	ϕ_2/ϕ_3	GRUPPO 1	GRUPPO 2	GRUPPO 3	
1	10	26	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0671	0,072	- 0,528	- 0,276	0,158	1,385
2	13	26	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0816	0,088	- 0,231	- 0,108	0,0432	1,386
3	14	26	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0837	0,093	- 0,266	- 0,101	0,0430	1,390
4	15	26	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0852	0,098	- 0,261	- 0,0953	0,0428	1,393
4 bis	15	26	H ₂ O ² $6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0858	0,107	- 0,258	- 0,0914	0,0426	1,396
5	16	26	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0865	0,102	- 0,258	- 0,0905	0,0426	1,397
6	17	26	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0876	0,105	- 0,255	- 0,0865	0,0424	1,400
7	20	26	$6,6 \cdot 10^{-2}$	0,0906	0,113	- 0,252	- 0,0789	0,0419	1,407
8	24	26	$2,64 \cdot 10^{-1}$	0,0943	0,120	- 0,252	- 0,0754	0,0412	1,416
9	24	26	$6,6 \cdot 10^{-1}$	0,0946	0,120	- 0,252	- 0,0763	0,0413	1,416
10	Cella Standard 26 cm			0,0974	0,133	- 0,250	- 0,0642	0,0403	1,428
11	Reattore (Riferimento)			0,0722	0,100	- 0,249	- 0,0615	0,0430	1,380

TABELLA 5 - Indicatori con ANISN aggiungendo idrogeno senza assorbimento (H²) al bordo della cella. Confronto con cella senza H² (caso 10) e reattore (caso 11)

R2	= 18,1 cm
R3	= 25,6 cm
R4	= 40,48 cm
R5	= 49,4 cm
R6	= 52,0 cm
R7	= 59,0 cm
R8	= 74,0 cm
R9	= 87,5 cm
Rest.	= 120,0 cm

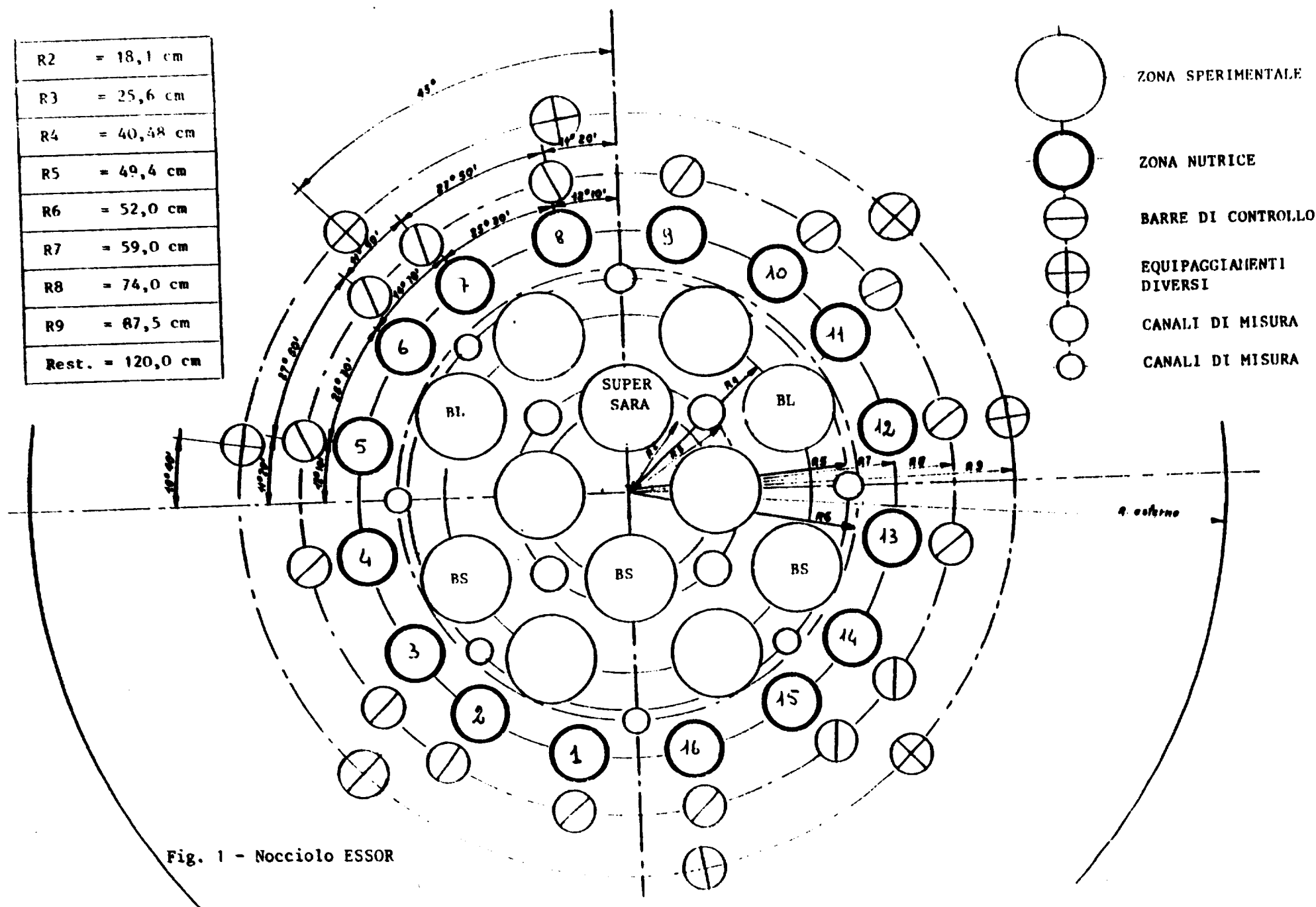
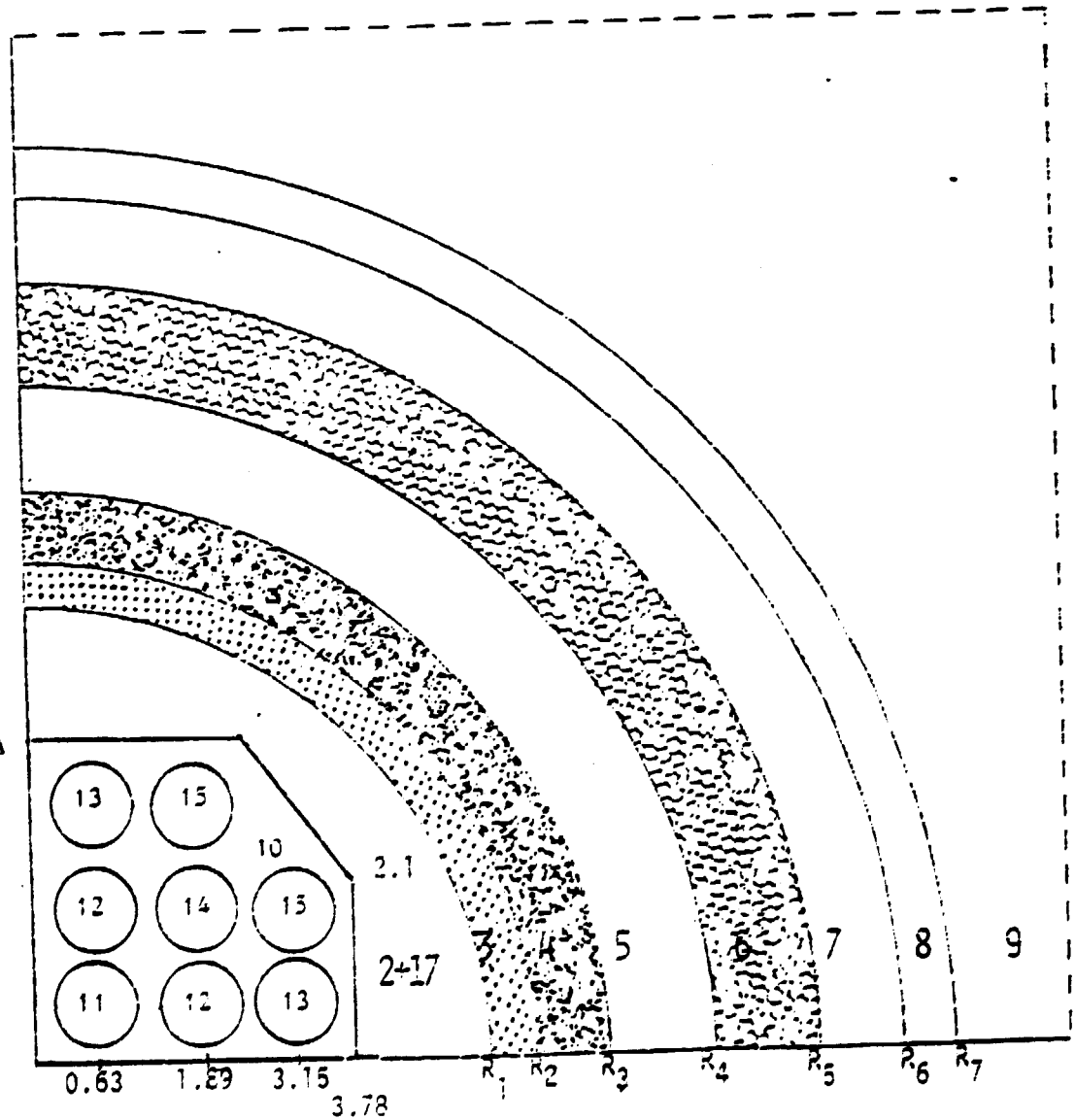


Fig. 1 - Nocciolo ESSOR

- $R_1 = 6,15 \text{ cm}$
- $R_2 = 6,44 \text{ cm}$
- $R_3 = 7,15 \text{ cm}$
- $R_4 = 7,65 \text{ cm}$
- $R_5 = 8,35 \text{ cm}$
- $R_6 = 10,0 \text{ cm}$
- $R_7 = 10, \text{ cm}$

N° MISCELA		N° REGIONE	
1	Zr+O ₂	2	SHROUD
2	PIENO	3	ACQUA REFRIG.
3	ZR = 7 mm	4	TUBO DI FORZA + N°
4	vuoto	5	VUOTO
5	Zr+Nb	6	TUBO SICUREZZA
6	O ₂ O	7	MODERATORE
6	O ₂ O	8	REGIONE SOTTILE
6	O ₂ O	9	MODERATORE
2	PIENO	10	REFRIGERANTE
7	UO ₂	11	UO ₂ 6,4 WZ
8	UO ₂	12	UO ₂ 5,1 WZ
9	UO ₂	13	UO ₂ 3,6 WZ
10	UO ₂	14	UO ₂ 4,3 WZ
11	UO ₂	15	UO ₂ 3,2 WZ
12	Zr	16	GUAINA
1	Zr+O ₂	17	SHROUD

Fig. 2 - Schema SUPERSARA



R1 = 0,364
 R2 = 0,896
 R3 = 1,624
 R4 = 2,156
 R5 = 2,937
 R6 = 3,363
 R7 = 4,048
 R8 = 6,15
 R9 = 6,44
 R10 = 7,15
 R11 = 7,65
 R12 = 8,35
 R13 = 10,0
 R14^m = 15
 20
 26
 30
 36

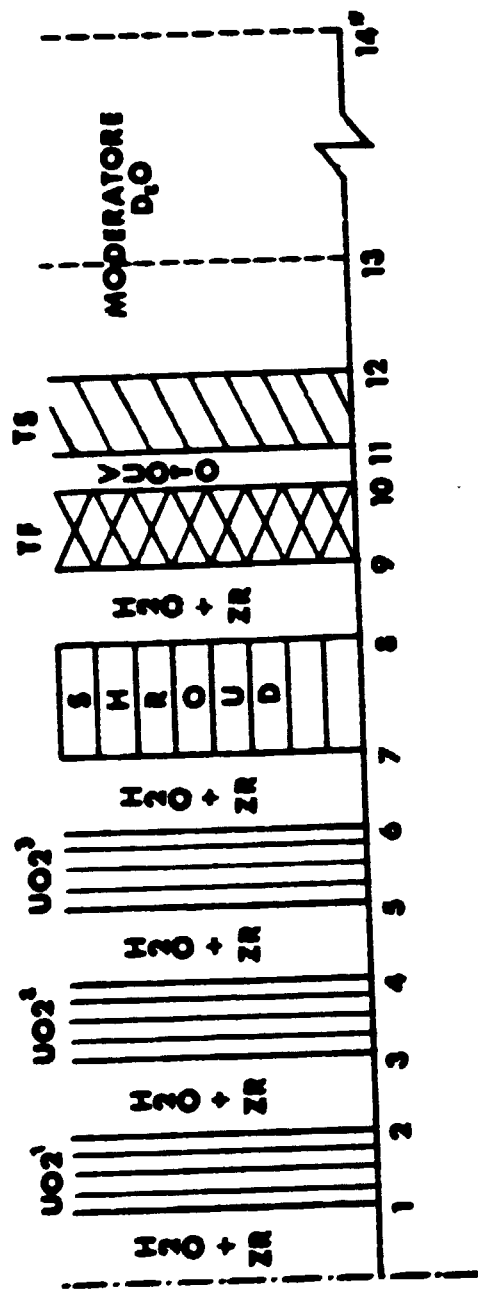


FIG. 3 - Schematizzazione ANISN della cella-elemento SUPERSANA (variante tubo di forza di zirconio). Tipo cella

H_2O+Zr (H,O,Zr)
 UO_2 (O,U-235,U-238)
 SHROUD O,Zr)
 H_2O (H,O)
 TF (B10,Cr,Mn,Fe,Ni,Zr,Nb,Mo)
 TS (B10,Cr,Mn,Fe,Ni,Zr,Nb,Mo)
 VUOTO
 ZN-6 (U-235,U-238,Al,D₂O,Zr)
 D₂O (H,D,O)

R1 = 0,364 R10 = 7,15
 R2 = 0,896 R11 = 7,65
 R3 = 1,624 R12 = 8,35
 R4 = 2,156 R13 = 10,0
 R5 = 2,937 R14 = 15,0
 R6 = 3,363 R15 = 26,0
 R7 = 4,048 R16 = 46,0
 R8 = 6,15 R17 = 69,43
 R9 = 6,44 R18 = 120,0

ZN-16 elementi ESSOR

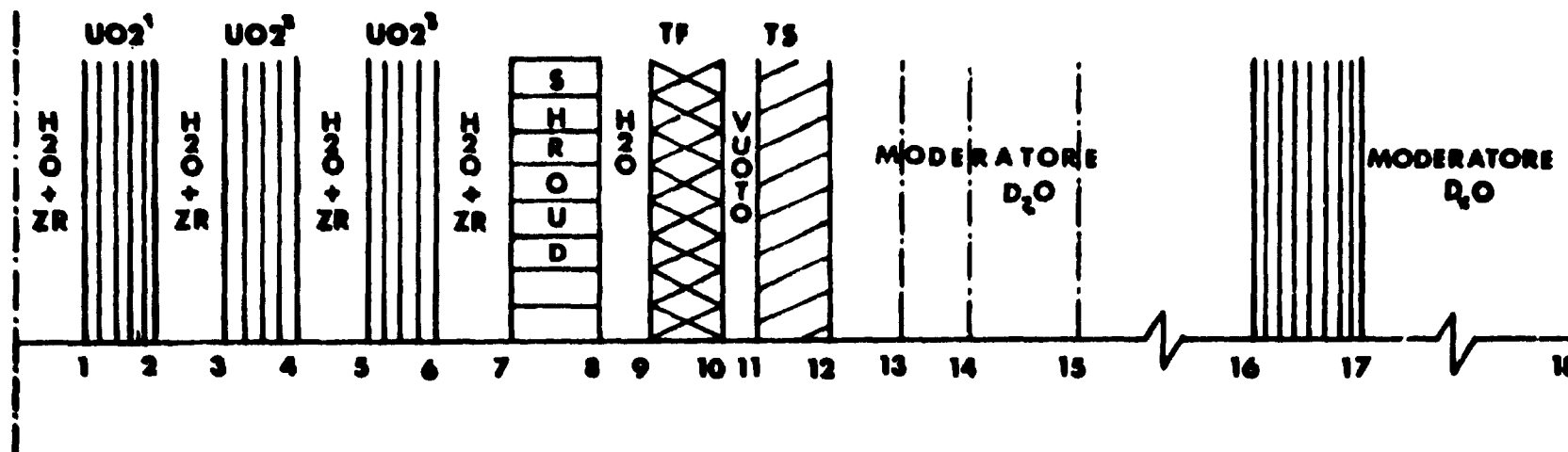


FIG. 4 - Schematizzazione ANISN del reattore ESSOR con l'elemento SUPERSARA (TF di Zr) nella posizione centrale - Tipo reattore

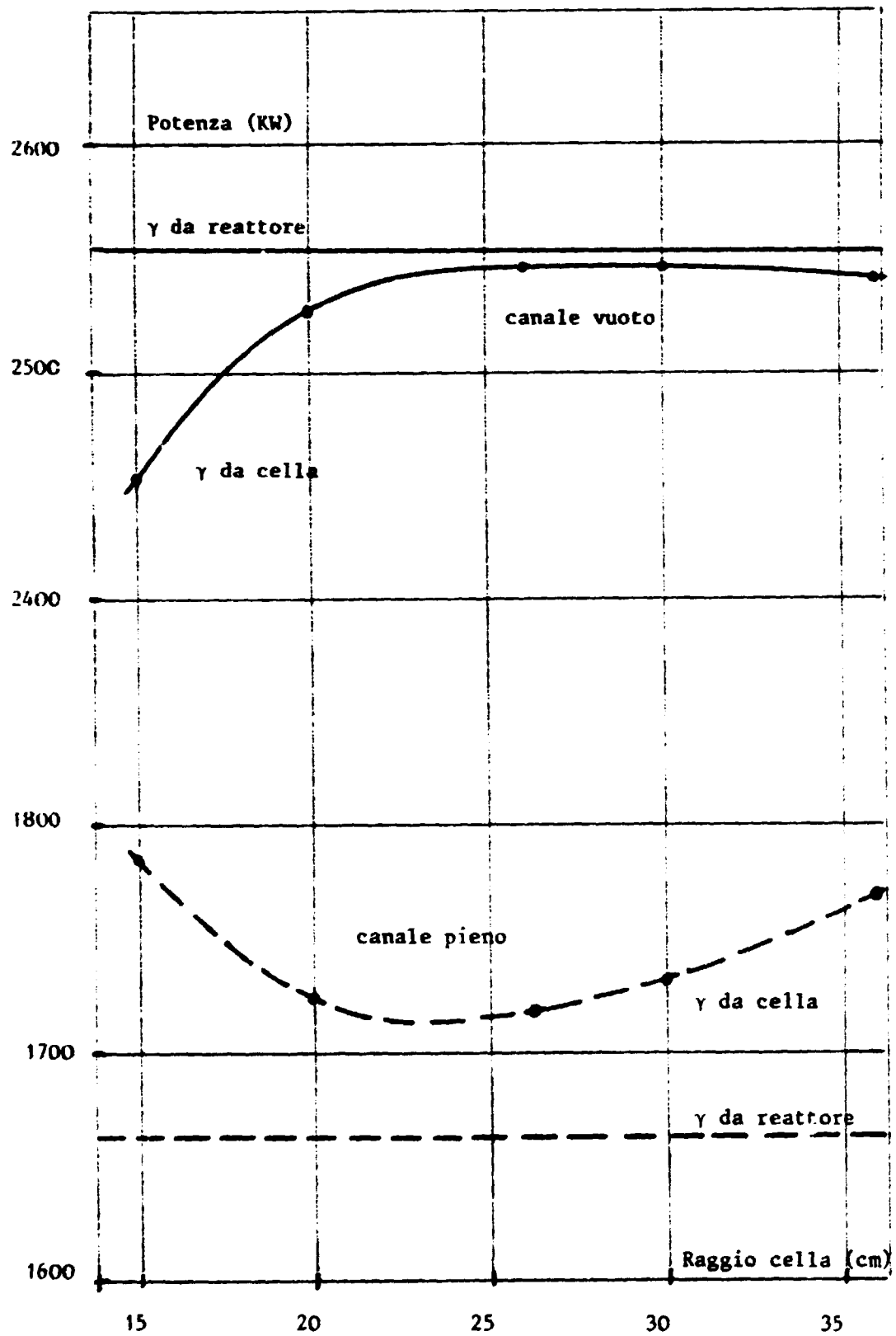


Fig. 5 - Potenza nel canale; confronto tra valori ottenuti con γ da calcoli di cella e di reattore per canale vuoto e canale pieno

$\frac{\Delta K_{eff}}{K_{eff}}$ (pcm)

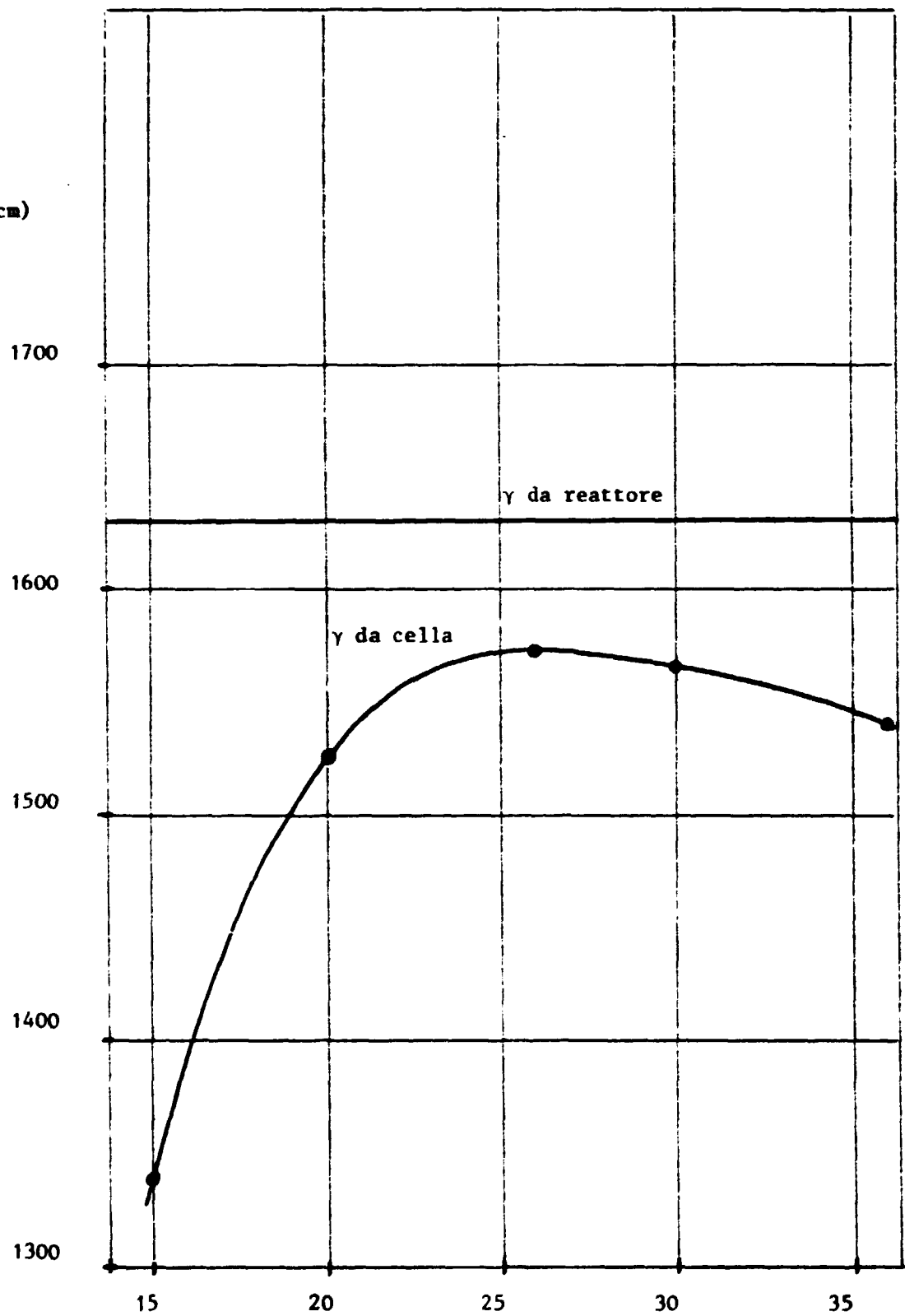


Fig. 6 - Reattività dovuta allo svuotamento del canale; confronto tra valori ottenuti con γ da calcoli di cella e di reattore

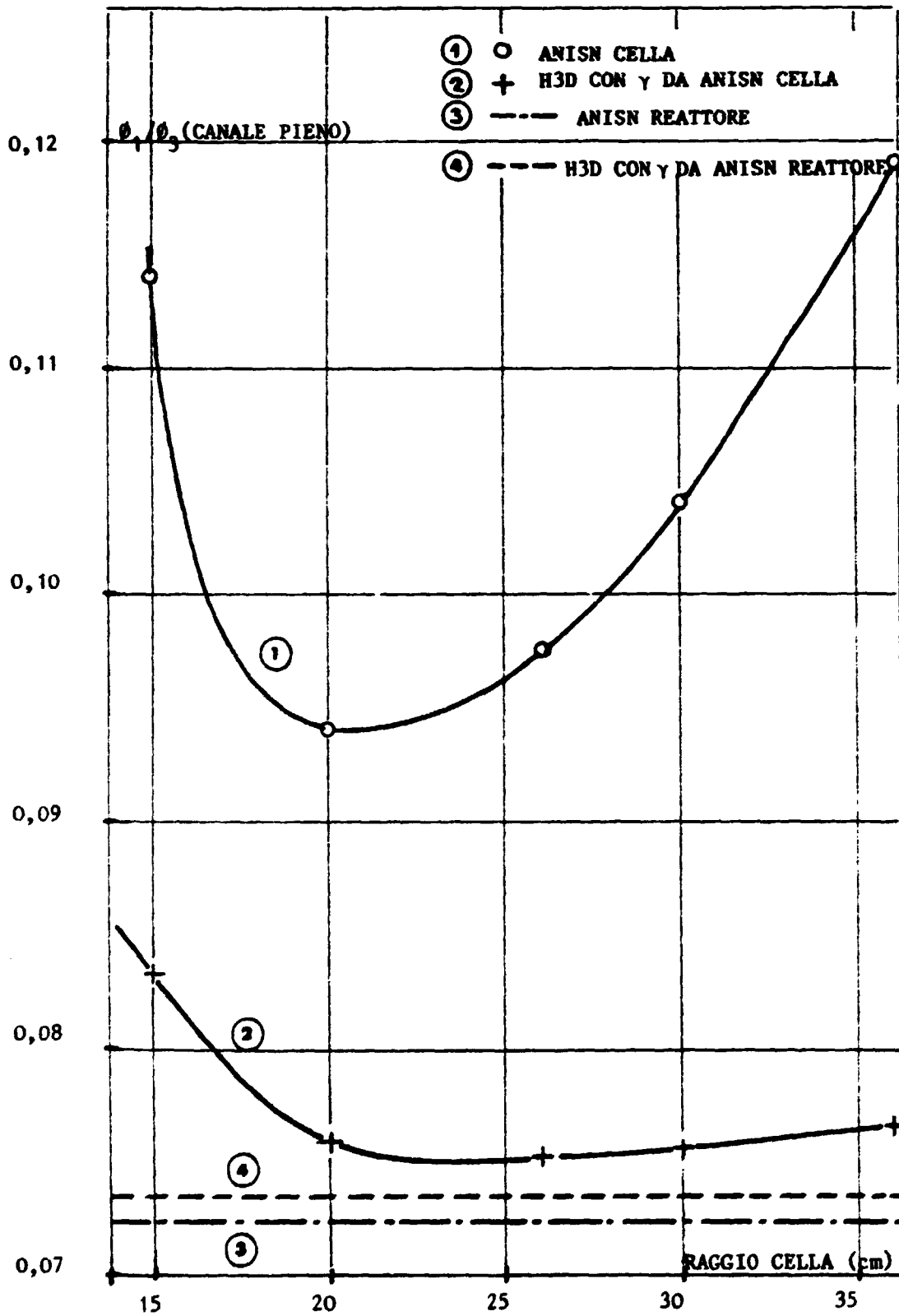


Fig. 7 - Rapporto ϕ_1/ϕ_3 sulla superficie del canale calcolato con metodi diversi

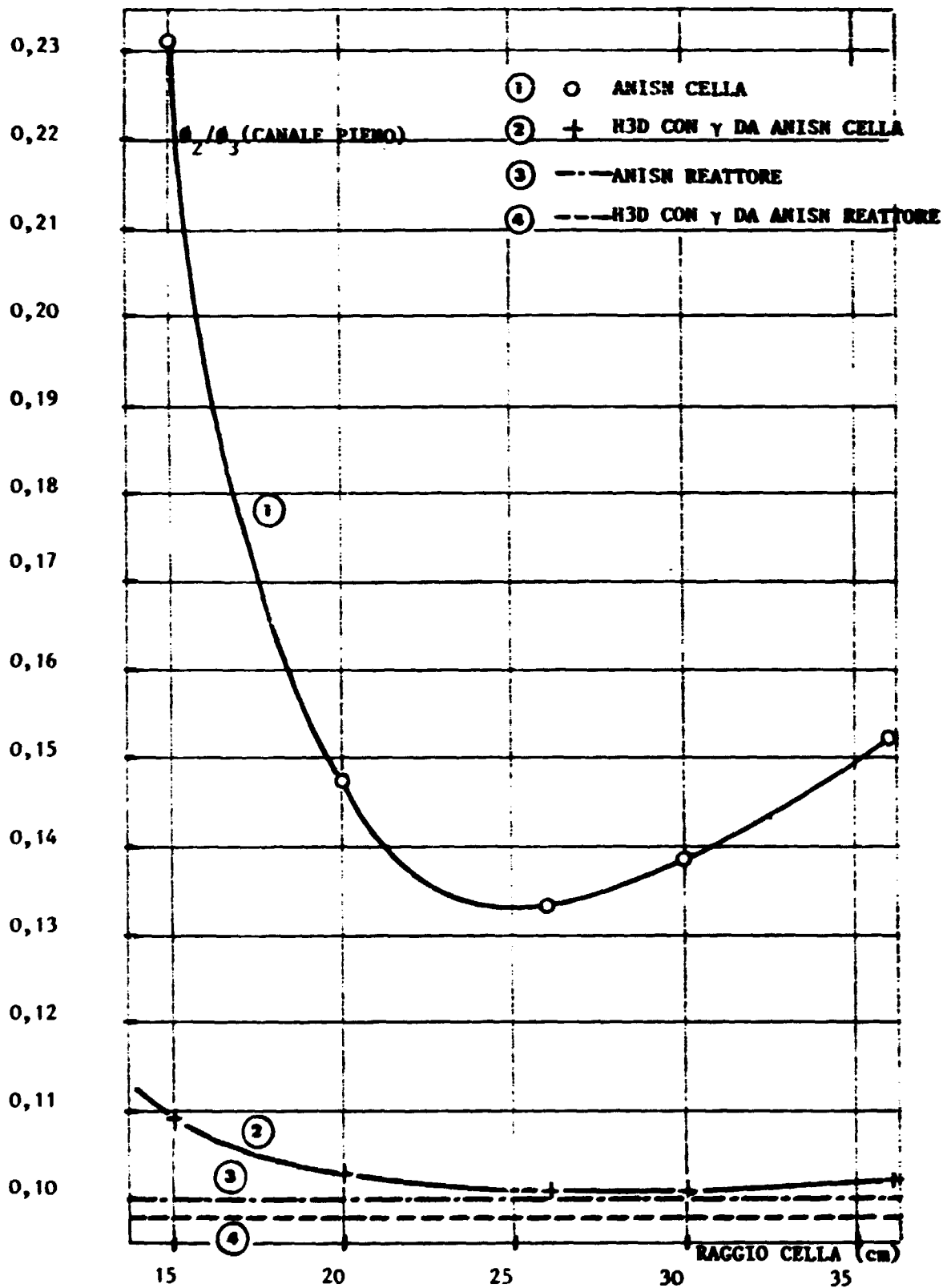


Fig. 8 - Rapporto ϕ_2/ϕ_3 sulla superficie del canale pieno calcolato con metodi diversi

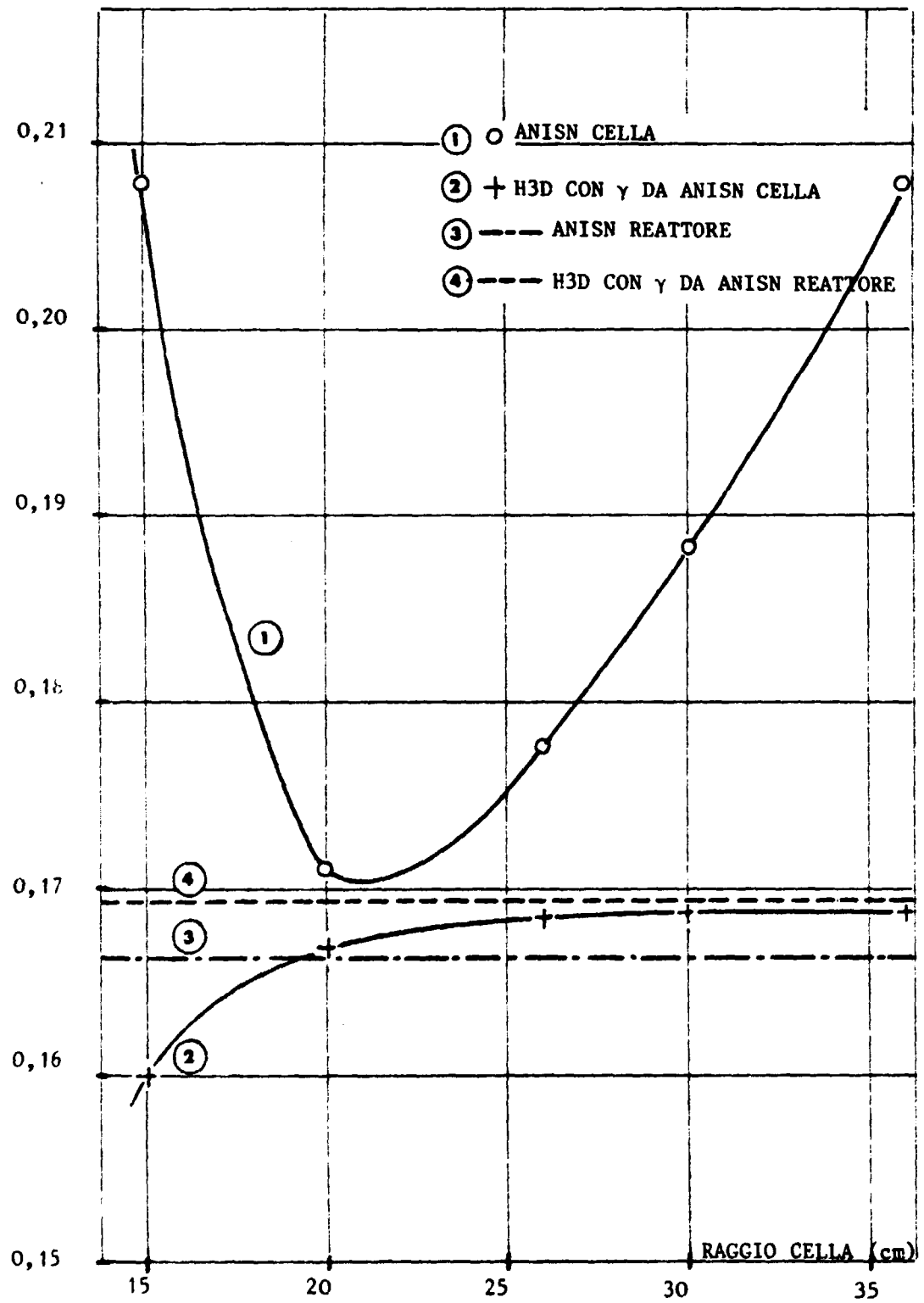


Fig. 9 - Rapporto ϕ_1/ϕ_3 sulla superficie del canale vuoto, calcolato con metodi diversi

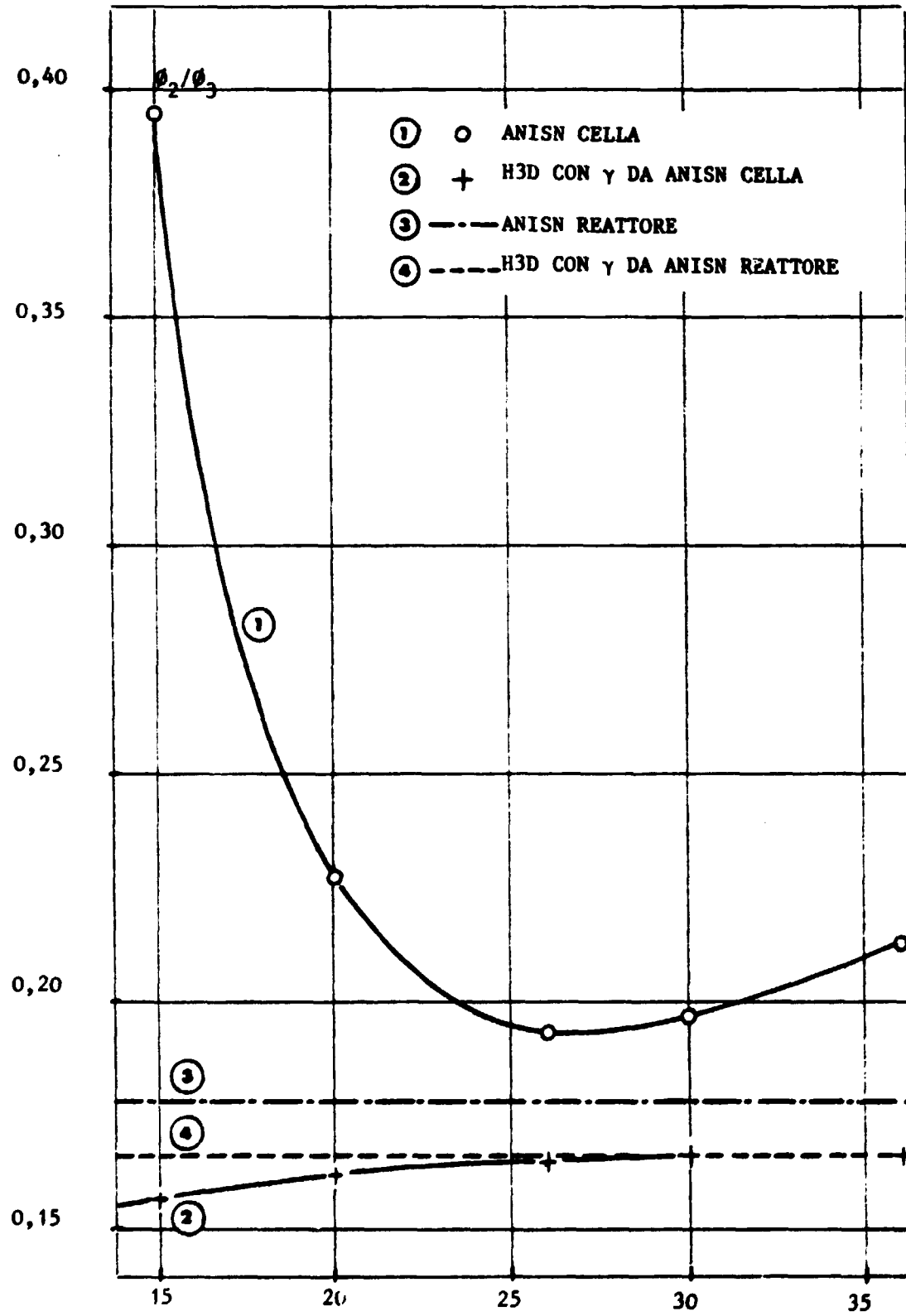


Fig. 10 - Rapporto ϕ_2/ϕ_3 sulla superficie del canale vuoto calcolato con metodi diversi

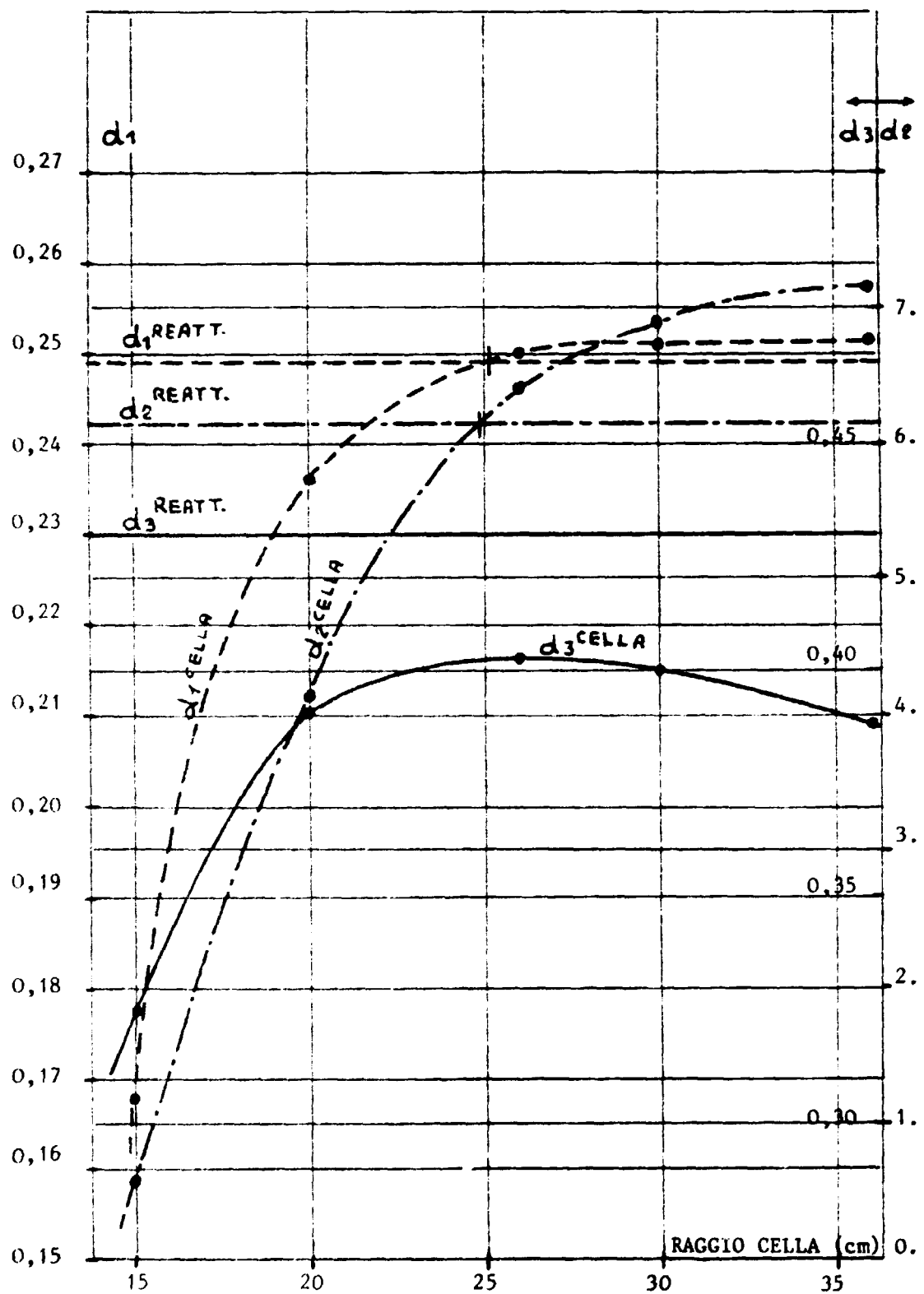


Fig. 11 - Derivate logaritmiche dei flussi sulla superficie del canale calcolate con ANISN reattore e ANISN cella - Canale pieno

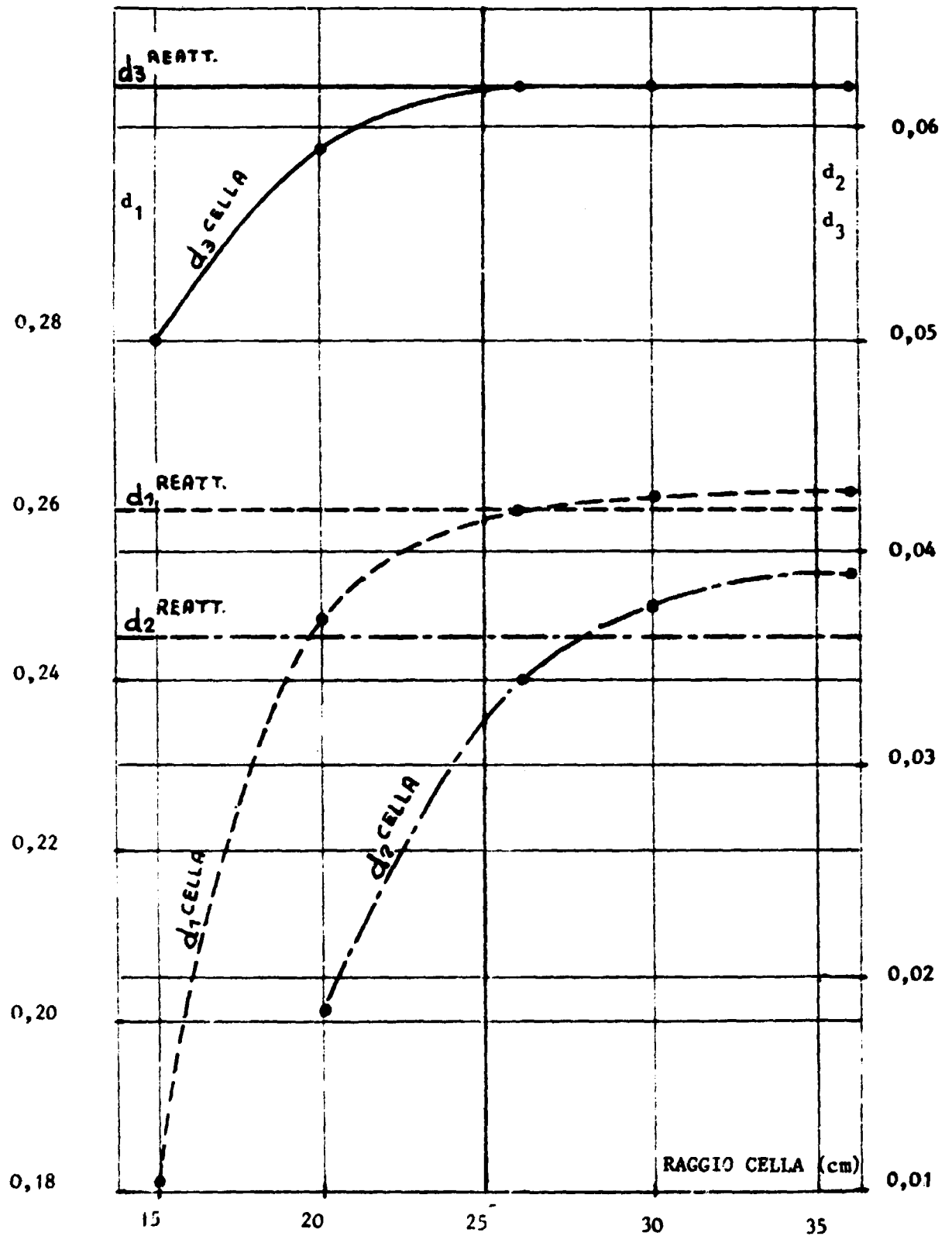


Fig. 12 - Derivate logaritmiche dei glussi nella superficie del canale calcolate con ANISN reattore e ANISN cella - Canale vuoto