

**ESAME DI STATO PER L'ABILITAZIONE ALLA PROFESSIONE DI INGEGNERE
RAMO NUCLEARE
VECCHIO ORDINAMENTO**

I SESSIONE 2011

Prova scritta del 15 giugno 2011

E' richiesto il calcolo termico dell'elemento di combustibile di un reattore nucleare raffreddato a gas del tipo HTR. Il nocciolo del reattore è costituito da blocchi esagonali di grafite, nei quali sono realizzati fori in cui sono posizionate le barre di combustibile, da altri blocchi di grafite in cui sono inserite le barre di controllo e da blocchi di grafite aventi la funzione di riflettore.

Le barre di combustibile, cilindriche, hanno un diametro inferiore a quello dei fori e nell'intercapedine anulare defluisce l'elio refrigerante in moto discendente.

I blocchi esagonali di grafite in cui è posizionato il combustibile realizzano una geometria anulare, con elementi di controllo e blocchi riflettori sia nella parte centrale del nocciolo che alla periferia.

I blocchi in cui è alloggiato il combustibile sono posizionati in 90 colonne e ciascuna colonna è costituita da 8 blocchi esagonali.

Le barre di combustibile, inserite nei fori dei blocchi, sono costituite da 12 elementi di combustibile di geometria anulare (*fuel compacts*). Nei fori dei *fuel compacts* sono inserite delle barre cilindriche di grafite e tra i *fuel compact* sono posizionati elementi distanziatori di collegamento. All'estremità della barra di combustibile sono posizionati due elementi che svolgono la funzione di supporto e centraggio; 5 degli 11 elementi distanziatori intermedi sono dotati di alette che assicurano il centraggio dei *fuel compacts* nei fori.

Il *fuel compact* è realizzato da una matrice di grafite in cui sono disperse microsferiche costituite da un nucleo centrale di ossido di uranio con quattro strati di rivestimento. Lo strato adiacente al nucleo centrale è realizzato in carbonio pirolitico poroso a bassa densità; seguono, nell'ordine, uno strato di carbonio pirolitico ad alta densità, uno strato di carburo di silicio e un ulteriore strato esterno di carbonio pirolitico ad alta densità. La matrice di grafite contenente le microsferiche è rivestita da uno strato di grafite, sia in corrispondenza dei raggi interno ed esterno, che alle estremità.

I dati geometrici da utilizzare per lo svolgimento del calcolo sono riportati in tabella 1 e in tabella 2.

La potenza termica del reattore e le condizioni operative dell'elio refrigerante sono riportate in tabella 3.

Tabella 1 – Dati geometrici dei canali e del combustibile		
numero di fori del singolo blocco (nei fori è inserito il combustibile e defluisce l'elio refrigerante)	57	
lunghezza delle barre di combustibile	1050	mm
lunghezza dei <i>fuel compacts</i> (*)	83	mm
diametro dei fori in cui è inserito il combustibile	39	mm
diametro esterno dei <i>fuel compacts</i> (*)	26	mm
diametro interno dei <i>fuel compacts</i> (*)	9	mm
spessore dello strato di grafite di rivestimento dei <i>fuel compacts</i>	1	mm

(*) è compreso lo spessore del rivestimento di grafite dei *fuel compacts*

Tabella 2 – Dati geometrici delle microsferi		
diametro del nucleo centrale di ossido di uranio	550	μm
spessore del rivestimento di carbonio pirolitico poroso a bassa densità	140	μm
spessore del rivestimento interno di carbonio pirolitico ad alta densità	25	μm
spessore dello strato di carburo di silicio	40	μm
spessore del rivestimento esterno di carbonio pirolitico ad alta densità	25	μm
frazione del volume occupato dalle microsferi nella matrice di grafite	29	%

Tabella 3 – Potenza termica del reattore e condizioni operative del refrigerante		
potenza termica	600	MW
pressione media dell'elio nel nocciolo	70	bar
temperatura dell'elio all'ingresso del nocciolo	587	$^{\circ}\text{C}$
temperatura media dell'elio all'uscita del nocciolo	850	$^{\circ}\text{C}$
rapporto tra la potenza lineare massima e la potenza lineare media erogata dal combustibile	2.41	

Con riferimento ai dati riportati nelle tabelle 1, 2 e 3, il Candidato sviluppi i punti seguenti:

- 1) calcolo della portata in massa dell'elio refrigerante;
- 2) calcolo della potenza media erogata dall'unità di lunghezza delle barre di combustibile;
- 3) calcolo della potenza massima erogata dall'unità di lunghezza delle barre di combustibile;
- 4) calcolo del flusso termico medio ceduto dalle barre di combustibile all'elio refrigerante;
- 5) calcolo del flusso termico massimo ceduto dalle barre di combustibile all'elio refrigerante;
- 6) calcolo della portata specifica media dell'elio nei canali del nocciolo (valore medio uguale per tutti i canali);
- 7) calcolo della portata specifica del canale posizionato al centro del nocciolo; si assuma una potenza ceduta dal combustibile all'elio che percorre il canale, superiore del 40% rispetto a quella media dell'intero nocciolo; si assuma inoltre che la temperatura dell'elio all'uscita del canale superi di 50 $^{\circ}\text{C}$ la temperatura media dell'elio all'uscita del nocciolo (tabella 3);
- 8) calcolo della massima temperatura raggiunta dal *fuel compact* posizionato a metà altezza del nocciolo, per una potenza lineare pari al valore massimo dell'intero nocciolo; si assuma la portata specifica dell'elio calcolata al punto (7) e una temperatura dell'elio pari alla media aritmetica tra quella di ingresso e quella di uscita del punto (7);

- 9) calcolo del numero di microsfere presenti in un singolo *fuel compact*;
- 10) calcolo delle differenze di temperatura che si realizzano all'interno della microsfera termicamente più sollecitata (posizionata nel *fuel compact* del punto 8).

Si richiede quindi al Candidato di discutere i vantaggi derivanti dalla scelta della configurazione anulare dei *fuel compacts*. E' utile, a questo scopo, effettuare un confronto tra la massima temperatura del *fuel compact* calcolata al punto (8) e la massima temperatura che sarebbe raggiunta da un *fuel compact* di uguale diametro esterno e uguale potenza generata dall'unità di lunghezza, ma realizzato nella configurazione del cilindro pieno.

Si richiede infine al Candidato di discutere le potenzialità dei reattori nucleari a gas ad alta temperatura, sia sotto il profilo della sicurezza, che in relazione al loro possibile impiego per finalità diverse dalla produzione di energia elettrica.

Per le proprietà termofisiche dei materiali e dell'elio, si faccia riferimento alle tabelle 4 e 5.

Nello svolgimento del punto (8), e nel successivo confronto con il *fuel compact* realizzato con la configurazione geometrica del cilindro pieno si assuma, in via approssimata, che la potenza termica erogata dalle microsfere sia generata in modo uniforme all'interno del volume; in tale ipotesi si può effettuare una valutazione approssimata della massima temperatura con le trattazioni della conduzione termica unidimensionale in geometria cilindrica, con generazione di calore volumetrica uniforme, nel caso del cilindro pieno e del cilindro cavo.

Per lo svolgimento del punto (10) si faccia riferimento alla trattazione della conduzione unidimensionale in geometria sferica, nel caso della sfera con generazione volumetrica di calore uniforme e del guscio sferico non generante.

Tabella 4 – Proprietà termofisiche dei materiali		
conducibilità termica della grafite (utilizzabile sia per il rivestimento di grafite che per la matrice di grafite dei <i>fuel compacts</i>)	30	W/(m°C)
conducibilità termica dell'ossido di uranio	3.0	W/(m°C)
conducibilità termica del rivestimento delle microsfere in carbonio pirolitico poroso a bassa densità	1.0	W/(m°C)
conducibilità termica degli strati in carbonio pirolitico ad alta densità del rivestimento delle microsfere	10	W/(m°C)
conducibilità termica del rivestimento delle microsfere in carburo di silicio	16	W/(m°C)

Tabella 5 – Proprietà termofisiche dell'elio		
calore specifico a pressione costante	5.193	kJ/(kg °C)
densità	3.289	kg/m ³
conducibilità termica	0.356	W/(m °C)
viscosità dinamica	0.0000460	kg/(m s)