



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO-LFR: progetto preliminare neutronico, termoidraulico e termomeccanico

*C. Artioli, A. Cammi, G. Grasso, S. Lorenzi, D. Mattioli, R. Pergreff, C. Petrovich, F.  
Rocchi, M. Sumini, P. Turrone*



Report RdS/2012/041

NUOVA CONCETTUALIZZAZIONE DEL NOCCIOLO DI DEMO-LFR: PROGETTO PRELIMINARE NEUTRONICO,  
TERMOIDRAULICO E TERMOMECCANICO

C. Artioli – SIET s.p.a., A. Cammi, S. Lorenzi – CIRTEN Politecnico di Milano, G. Grasso, D. Mattioli, R.  
Pergreffi, C. Petrovich, F. Rocchi, P. Turrone – ENEA, M. Sumini – CIRTEN Università di Bologna

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in materia  
nucleare

Responsabile del Progetto: Mariano Tarantino, ENEA

**Titolo**

**Nuova concettualizzazione del nocciolo di DEMO-LFR: progetto preliminare neutronico, termoidraulico and termomeccanico**

**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Rapporto Tecnico  
**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"  
**Argomenti trattati:** Generation IV Reactors  
 Neutronica  
 Termoidraulica del Nocciolo  
 Termomeccanica

**Sommario**

Nel presente rapporto vengono individuati i due documenti di riferimento compendianti l'attività pregressa in tema di ricerca e progettazione nazionale per un dimostratore di reattore di potenza raffreddato a piombo (DEMO).

Sono quindi individuate le nuove finalità di AFRODITE e conseguentemente i parametri su cui operare, arrivando alla definizione di una nuova configurazione di riferimento del nocciolo di tale sistema.

Sono infine riportati i risultati di analisi preliminari di progettazione neutronica, termoidraulica e termomeccanica a supporto della configurazione scelta.


**Note**


Autori: C. Artioli<sup>(1)</sup>, A. Cammi<sup>(2)</sup>, G. Grasso<sup>(3)</sup>, S. Lorenzi<sup>(2)</sup>, D. Mattioli<sup>(3)</sup>,  
 R. Pergreff<sup>(3)</sup>, C. Petrovich<sup>(3)</sup>, F. Rocchi<sup>(3)</sup>, M. Sumini<sup>(4)</sup>, P. Turrone<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup> SIET S.p.A., <sup>(2)</sup> PoliMI, <sup>(3)</sup> ENEA, <sup>(4)</sup> UniBO

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMMISSIONE	13/09/2012	NOME	G. Grasso	M. Tarantino	M. Tarantino
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

 <b>Ricerca Sistema Elettrico</b>	<b>Sigla di identificazione</b>	<b>Rev.</b>	<b>Distrib.</b>	<b>Pag.</b>	<b>di</b>
	NNFISS - LP3 - 048	0	L	2	16

## Indice

1. Introduzione .....	3
1.1. Considerazioni di carattere strategico .....	3
1.2. Documenti di riferimento.....	3
1.3. Considerazioni preliminari .....	3
1.4. Prime valutazioni generali .....	4
2. Da DEMO ad AFRODITE.....	7
2.1. Scelta della configurazione di riferimento .....	11
3. Analisi preliminari sulla configurazione scelta .....	11
3.1. Considerazioni neutroniche .....	12
3.2. Analisi termoidraulica della barretta calda .....	13
3.3. Analisi termomeccanica della barretta più sollecitata .....	15
4. Conclusioni .....	16

## 1. Introduzione

Il presente documento raccoglie le considerazioni e le analisi che hanno condotto alla definizione di una nuova configurazione per il nocciolo di un reattore dimostrativo della filiera di reattori veloci refrigerati a piombo (Lead-cooled Fast Reactor, LFR), sviluppato da ENEA con il supporto di alcune università del CIRTEN.

### 1.1. Considerazioni di carattere strategico

Le scelte da adottarsi nell'ambito del presente Accordo di Programma (AdP) dovranno essere conformi alle idee, scientifiche e tecniche, e convinzioni che a livello nazionale i vari attori hanno, ma nel contempo tenendo conto dei programmi sullo stesso tema che vengono portati avanti a livello europeo, e ai quali enti, agenzie, industrie ed università italiani del resto partecipano.

In particolare si fa esplicito riferimento alla Road Map europea per i reattori LFR (Lead Fast Reactor), ai Programmi Quadro europei 5° (PDS-XADS), 6° (Eurotrans e ELSY) e 7° (LEADER).

Ciò consentirà agli attori nazionali di ottenere un duplice ordine di vantaggi: qualificare al massimo il prodotto nazionale grazie alle sinergie coi progetti europei ed internazionali in genere, e presentarsi sui tavoli internazionali con credenziali e conoscenze specifiche particolarmente elevate, create grazie all'attività nazionale.

### 1.2. Documenti di riferimento

Nell'ambito del programma europeo LEADER viene sviluppato il dimostrativo ALFRED (reattore raffreddato a piombo di 300 MWth) che dovrà dunque essere tenuto presente nell'attuale programma nazionale, e la cui documentazione è accessibile agli attori italiani (Ansaldo, ENEA, CIRTEN), in quanto partner dei citati programmi.

Le attività già svolte e i risultati ottenuti nell'ambito dell'AdP negli anni precedenti sono compendiate nei documenti afferenti all'Accordo di Programma (AdP) ENEA-MSE:

- ENEA NNFISS-LP3-018 'Revision of the DEMO core configuration and of its dynamic behaviour', G. Grasso e C. Petrovich, e
- ENEA-Ministero dello Sviluppo Economico-SIET; Ricerca di Sistema Elettrico: Static-Dynamic DEMO core characterizations, G. Grasso *et al.*

ai quali si fa specifico riferimento come punto di partenza.

### 1.3. Considerazioni preliminari

L'obiettivo primario consiste nella progettazione, e sperabilmente successiva realizzazione, di un dimostratore (AFRODITE – Advanced lead-cooled Fast Reactor Oriented to the Demonstration of Innovative TEchnologies) di un reattore di potenza, veloce, raffreddato a piombo (LFR). Pertanto si dovrà preliminarmente:

- mettere in evidenza quali siano i parametri che il dimostratore:
  - dovrà avere in comune col reattore di potenza (es. scelte tecnologiche dei materiali, geometria del reticolo dell'elemento, ecc.),
  - potrà riprodurre in misura scalata (es. potenza del nocciolo) e
  - dovrà necessariamente avere differenti (es. arricchimento, BU, ecc.).

Pur restando fondamentale il requisito di rappresentatività di AFRODITE rispetto al LFR, in AFRODITE occorrerà non esasperare i parametri prestazionali e ciò per conseguire una più spedita licenziabilità e fattibilità tecnica.

Rispetto ai documenti citati dovranno essere aggiornati gli obiettivi dell'attività: infatti non essendo più attuale l'ipotesi di un DEMO avente anche funzione di impianto di irraggiamento per test di materiali, viene conseguentemente a cadere il requisito di massimizzare il flusso (veloce) in AFRODITE. La rimozione di tale obiettivo comporterà una riprogettazione della barretta, attualmente molto esasperata sia per quanto riguarda il suo diametro (5.10 mm) che per quanto riguarda il foro centrale (1.72 mm). Mentre va mantenuta la funzione di test del combustibile per alti valori di BU, il che implica una specifica attenzione al ciclo in pila del combustibile, che dovrà prevedere alcuni elementi destinati a raggiungere BU particolarmente elevati.

Mentre obiettivi che sono primari per LFR non possono essere replicati/simulati su AFRODITE, in quanto che la diversa taglia rende la cosa impossibile: in particolare il concetto di "adiabaticità" non può essere dimostrato praticamente. Infatti il maggior arricchimento richiesto dalla minor taglia non consente il BR unitario e modifica significativamente i ratei di produzione/sparizione degli attinidi minori spostandone in modo inaccettabile la loro concentrazione di equilibrio. Tuttavia tramite la progettazione di AFRODITE sarà possibile la dimostrazione teorica della adiabaticità e l'acquisizione dei dati fisici per la riduzione delle incertezze.

In realtà il conseguimento della adiabaticità, come altri parametri, possono essere ottenuti anche su dimostratori di piccola taglia, ove si distingue correttamente tra "taglia di potenza" e "taglia di dimensioni". Un nocciolo di grandi dimensioni può essere progettato come adiabatico anche se la sua potenza di progetto è bassa (il che però frustra il desiderio di contenimento dei costi del nocciolo).

#### ***1.4. Prime valutazioni generali***

Nella presente attività verranno confermate le scelte tecnologiche, i campi termici e le velocità del refrigerante, come assunte per ALFRED (EU 7th FP, LEADER), la taglia di 300 MWth e la scelta di includere nel progetto, sia pure di massima, anche il BoP (balance of plant) al fine di avere consapevolezza del comportamento dinamico del reattore anche in funzione delle variazioni di esercizio, intenzionali o accidentali, del secondario (o del carico alla turbina) dell'impianto.

Qualificante differenza rispetto ad ALFRED, ma a conferma della precedente attività per AdP, è invece la configurazione degli elementi e la distribuzione delle barrette negli elementi.

Al fine di conseguire un significativo vantaggio economico gli elementi di combustibile saranno aperti, di sezione quadrata, e le barrette saranno a loro volta aggregate secondo un reticolo quadrato.

Sebbene questo tipo di distribuzione utilizzi in modo meno ottimizzato il refrigerante, rispetto al più classico (per reattori veloci) reticolo esagonale, esso risulta assai più economico da realizzare soprattutto tenendo conto della mancanza di scatola esterna. Altre considerazioni qualitative che possono immediatamente essere fatte e che potrebbero meritare una attenzione quantitativa sono:

- il reticolo quadrato, utilizzando in modo meno efficiente il refrigerante rispetto al reticolo esagonale, presenta una maggior frazione volumetrica del piombo (refrigerante) che incrementa il coefficiente di vuoto, atteso largamente

positivo per LFR anche se su AFRODITE potrebbe essere negativo a causa delle ridotte dimensioni,

- questa stessa maggior frazione volumetrica implica un maggior diametro idraulico che migliora la circolazione naturale in caso di arresto delle pompe, il che riduce la rampa di salita della temperatura del cladding e la temperatura di equilibrio (massima) del cladding in caso di ULOF (unprotected loss of flow).

La scelta del reticolo quadrato va tuttavia meglio argomentata e dimostrata efficiente e sicura, meglio di quanto sia stato fatto fin ora sia a livello nazionale che europeo. Occorre, allo scopo, sviluppare considerazioni e rispondere in modo convincente ad alcune domande cruciali.

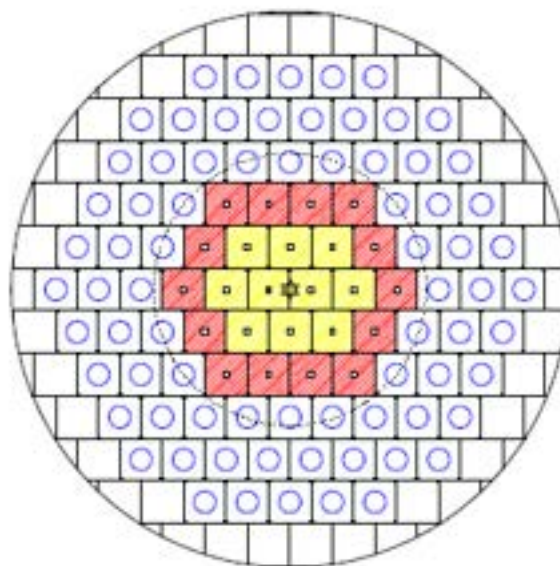
1. La mancanza di scatole non consente la specifica orifiziatura per proporzionare la portata di refrigerante alla potenza del singolo elemento. Come è possibile ottenere una distribuzione di temperature di uscita dagli elementi ragionevolmente appiattita in modo da non penalizzare eccessivamente il rendimento termodinamico dell'impianto? Ciò è stato già dimostrato nei lavori precedentemente menzionati (e anche nel programma europeo del EU 6th FP, progetto ELSY): una attenta zonizzazione ad arricchimenti differenziati permette di ottenere una distribuzione di potenza tra elementi con un fattore di distribuzione inferiore a 1.2. Ciò consente di ottenere una temperatura media di uscita del refrigerante di 480 °C rispettando ovunque la temperatura massima sul cladding stabilita in 550 °C.
2. Inoltre la strategia di utilizzo di assorbitori distribuiti ("finger") da alloggiarsi al centro di molti elementi di combustibile, all'interno di una scatola che ha anche una funzione strutturale per l'elemento stesso, permette – mediante un uso differenziato degli stessi – un ulteriore appiattimento della distribuzione radiale del flusso, in particolare durante l'evoluzione del ciclo. Ciò è stato già sufficientemente dimostrato nelle attività precedenti e non c'è motivo per cui non possa esserlo anche nella presente attività.
3. L'assenza di scatola dell'elemento è finalizzata, oltre all'economia sia monetaria che neutronica, a scongiurare le nefaste conseguenze di ostruzione al refrigerante (auspicabilmente parziale) nell'elemento di combustibile a causa di corpi estranei portati in sospensione dal refrigerante stesso. Infatti, in caso di localizzate ostruzioni, il flusso di refrigerante può aggirare l'ostruzione stessa essendo le pin non contenute in una scatola. A tale proposito questa scelta va sostenuta, essendo di 'dubbia' logicità la considerazione avanzata a favore dell'elemento inscatolato (progetto LEADER, scelta per ALFRED). Infatti la considerazione che in caso di ostruzione questa possa essere rivelata da un aumento di temperatura localizzato alla sommità in presenza della scatola non sembra segnare un punto di vantaggio rispetto all'evitare le conseguenze dell'eventuale ostruzione. Come non sembra condivisibile la teoria del piromane che appiccava deliberatamente gli incendi perché in tal modo poteva comunicare ai pompieri l'esatto punto di innesco. Il risultato di un calcolo ad hoc (alla fine del progetto ELSY), che dimostrava che anche senza scatole il combustibile andava soggetto ad una fusione localizzata in caso di ostruzione, è da considerarsi poco probante in quanto che la modellizzazione del calcolo qui richiamato era straordinariamente 'conservativo':
  - l'ostruzione era ipotizzata molto improbabilmente all'inizio della parte attiva della pin, anziché all'inizio della pin stessa. Evidentemente in questo caso –

- più realistico – non sussiste una generazione di potenza ad una quota dove ancora non si sia verificato un sufficiente flusso trasversale del refrigerante.
- le condizioni al contorno assunte in quel caso erano tali da modellizzare non una ostruzione, ma una molteplicità di ostruzioni contemporanee.
4. Tutto questo non esclude che occorra fare una analisi dettagliata intesa a dimostrare come il sistema “elementi aperti” costituisca un sistema controreazionato. Vale a dire che ove si presenti localmente (in termini assiali per una pin o radialmente per una pin rispetto alle adiacenti) un picco di potenza (ad esempio per disomogeneità di arricchimenti del combustibile, diametri delle pellet, gradienti di flusso in particolare nei pressi degli assorbitori) il refrigerante aumenterà la sua portata locale in quel punto. Il che non eviterà un aumento di temperatura, ma lo limiterà. Tale analisi sarà finalizzata a dimostrare che il sistema *non è retroazionato positivamente*, nel qual caso l’incremento di temperatura del cladding e del combustibile sarebbe incontrollato. Al momento attuale la conclusione di controreazione negativa può essere ragionevolmente assunta, in attesa di una dimostrazione inequivocabile.

Rispetto ai valori riportati nei documenti a riferimento, vanno riconsiderati e ricalcolati alcuni parametri come conseguenti alle seguenti osservazioni:

- assumere per la temperatura massima di guaina 550 °C, essendo i 600 °C postulati troppo “avveniristici” per un dimostratore;
- assumere come limite di velocità massima del refrigerante 2 m/s (anziché i 3 m/s) in corrispondenza delle griglie spaziatrici, il che implica una velocità di bulk massima pari a circa 1.5 m/s;
- non esasperare la miniaturizzazione delle pin forate; per altro è proprio il ridotto diametro che obbliga ad alte temperature di cladding;
- riconsiderare il nocciolo in modo da portare il massimo arricchimento del combustibile a valori accettabili da parte del fabbricante ( $Pu/(Pu+U) < 30\%$ ).

Si riporta di seguito (Figura 1) la schematizzazione in pianta del nocciolo, come presente nei documenti di riferimento citati.



**Figura 1.** Configurazione “GPS10” di DEMO: in giallo e rosso gli elementi di combustibile in zona interna ed esterna, rispettivamente, circondati da elementi “dummy” che schermano l’Inner Vessel.

Da ultimo si ritiene che non debba essere perseguita l'ipotesi di rivestimento protettivo in tantalio, se non a fronte di evidenze metallurgiche, attualmente mancanti, di compatibilità di questo metallo col piombo, nelle condizioni di temperatura e velocità presenti.

## 2. Da DEMO ad AFRODITE

Puntando a modificare le opzioni di progettazione che caratterizzano DEMO, alla luce delle considerazioni sopra riportate, si provvede in primis ad adottare una velocità di refrigerante inferiore. Dall'esperienza e dai risultati del comportamento di ELSY (1.6 m/s) e ALFRED (1.4 m/s), si assume come nuovo valore di riferimento 1.5 m/s, pari alla metà del precedente valore di velocità. Al contempo, si riduce la temperatura massima di guaina di 50 °C per rispettare il nuovo limite. Partendo dai dati di un'analisi termica a fine vita (Tabella I) di DEMO, si stabiliscono così i termini della modifica della geometria della cella elementare per AFRODITE.

**Tabella I.** Dati termici e geometrici della barretta più sollecitata di DEMO a fine vita.

Parametro	Valore
Diametro guaina [mm]	6.00
Passo reticolo [mm]	8.71
Potenza lineare massima sulla barretta [W/cm]	362
Temperatura di ingresso del refrigerante [°C]	400
Temperatura di uscita del refrigerante [°C]	501
Temperatura massima di guaina [°C]	550

Si decide inoltre di cogliere l'occasione per introdurre ulteriori margini, perché AFRODITE non risulti così esasperatamente rasente al limite, come, d'altronde, un dimostratore dovrebbe.

Si decide così di ridurre a 525 °C la massima temperatura di guaina, dimezzando di fatto il salto termico tra guaina e refrigerante. Di conseguenza, si raddoppia il diametro della barretta.

D'altro canto, però, anche la potenza lineare deve essere ridotta, giacché la temperatura massima del combustibile in DEMO supera i 2000 °C. Richiamando i risultati ottenuti per altri analoghi reattori, si decide di portare i 360 W/cm di DEMO a 330, riducendo la potenza lineare di 1/12.

Fatta la termica della barretta, resta da fare il canale. Che, come detto, deve solo raddoppiare d'area (e poi contrarsi di 1/12), intorno alla nuova barretta ingrandita.

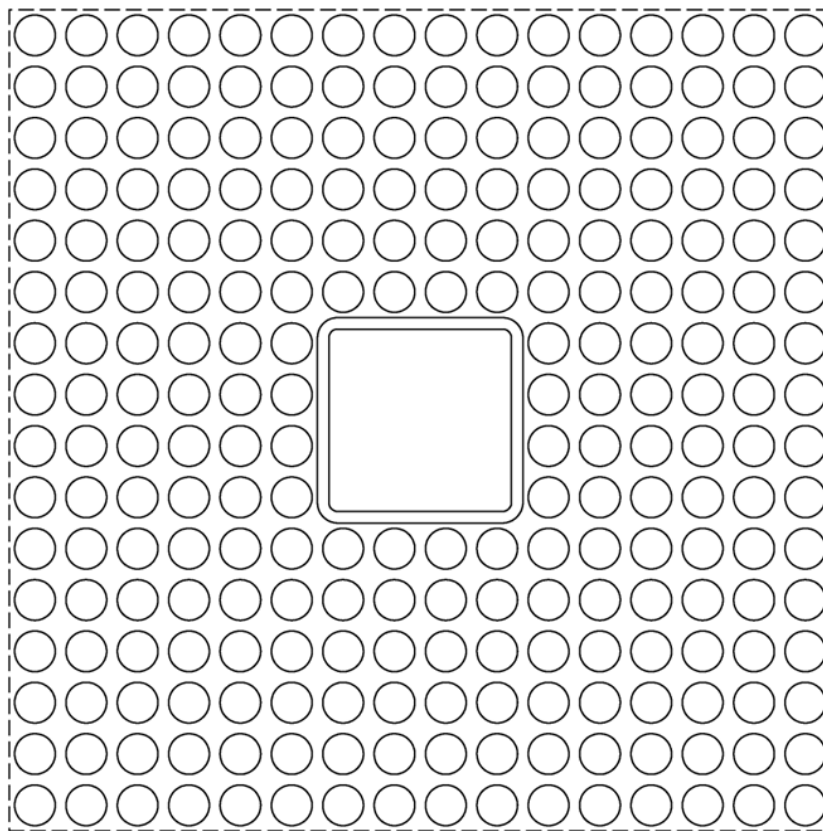
Presi dunque gli 11/12 del doppio del diametro di una barretta da 6.0 mm (che – guarda caso – fa proprio 11.0 mm), e il (quasi) doppio dell'area di refrigerante intorno, il passo del reticolo di AFRODITE risulta esattamente 13.50 mm.

È ora necessario prendere in considerazione l'estensione radiale del nocciolo che si vien configurando, per valutarne l'ingombro nell'Inner Vessel. I 330 W/cm massimi, con 1.15 di fattore di forma assiale (ragionevole), e 1.25 di fattore di distribuzione pin per pin (fattibile), fanno 230 W/cm di media. Per un'altezza di 65 cm (quella delle barrette di DEMO, fin qui sottintesa) significa quasi 15 kW a barretta. Dunque, arrivare a 300 MW, significa arrangiare 20100 barrette.

Gli elementi di combustibile, per tenere il passo anche tra due righe adiacenti (essendo queste sfalsate di mezzo elemento), devono raggruppare un numero pari di

barrette per lato. Ad esempio: 14 x 14, 16 x 16, 18 x 18, e così via. Un numero maggiore di barrette per elemento non è consigliabile, considerato che è bene che gli elementi non siano troppo pochi (per contenere il valore in reattività del singolo elemento). In pratica, immaginando un lato di 14 barrette, servirebbero 112 elementi; arrangiandone 16, 84; 18: 70.

Scelta la configurazione da 16 barrette per lato (Figura 2), per il buon rapporto rigidità della struttura / numero di barrette di combustibile perse, una volta introdotta la trave a scatola nel centro dell'elemento, un semplice esercizio di geometria col CAD mostra che, all'interno dello stesso raggio in cui si arrangiano 84 posizioni di combustibile, se ne possono posizionare anche altre 3.



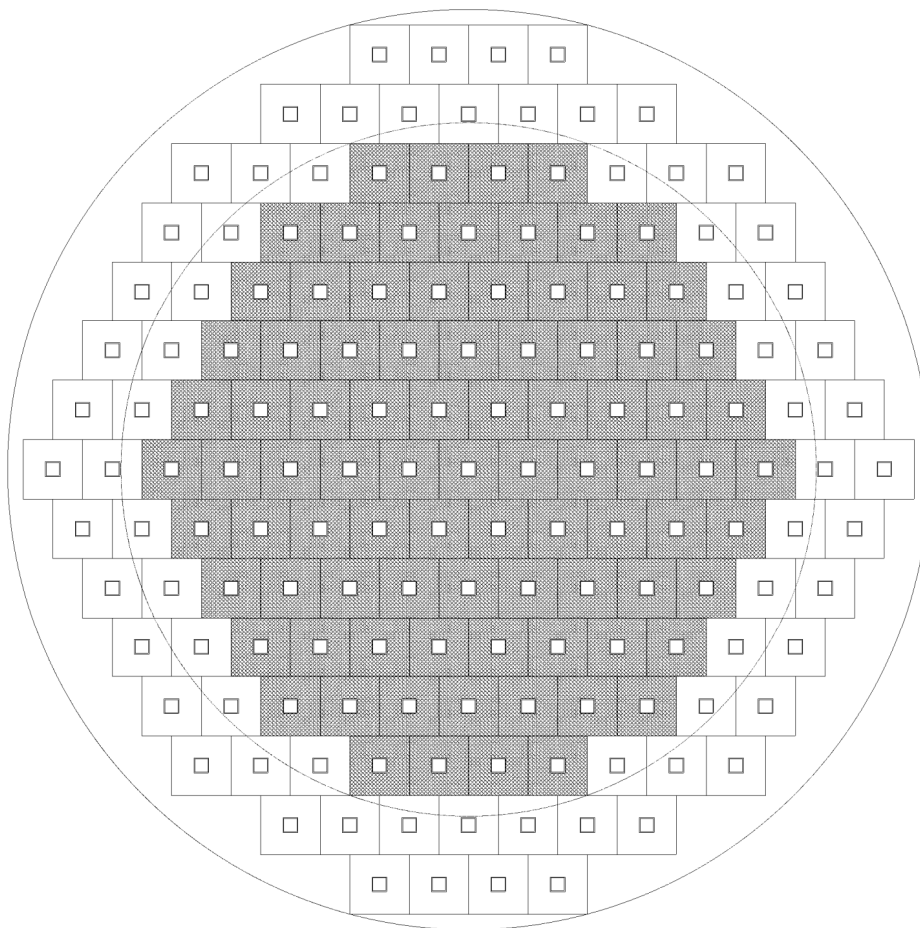
**Figura 2.** Schema di elemento di combustibile con 16 x 16 posizioni, le 16 centrali sono rimpiazzate dalla trave a scatola.

L'esubero di posizioni suggerisce due alternative:

- si considera che 300 MW non sono un vincolo, dunque si possono togliere/aggiungere elementi come fin qui definiti, variando la potenza totale del sistema proporzionalmente;
- si riaggiusta la geometria dell'elemento mantenendo il riferimento dei 300 MW, dunque considerando un riaggiustamento della potenza lineare media, dunque di quella massima, del diametro della barretta (per mantenere i 525 °C massimi alla guaina) e del passo (rimodulando l'area del refrigerante alla maggior/minor potenza integrale della barretta media).

Nel caso specifico, dato l'esiguo numero di posizioni che differenziano la configurazione "nominale" da quella geometricamente ottimale, si opta per

mantenere fissa la potenza, adeguando geometria della barretta e del canale a quest'ultima. In Figura 3 lo schema di nocciolo che ne deriva.



**Figura 3.** Mappa di nocciolo, in cui si mostrano le 87 posizioni utili (grigie) circondate da altre posizioni (bianche) per elementi schermanti.

I risultati delle due configurazioni fin qui descritte sono riassunti in Tabella II.

**Tabella II.** Parametri geometrici dell'elemento di AFRODITE prima e dopo l'ingegnerizzazione del sistema (ipotesi di fattore di distribuzione in pianta della potenza: 1.25).

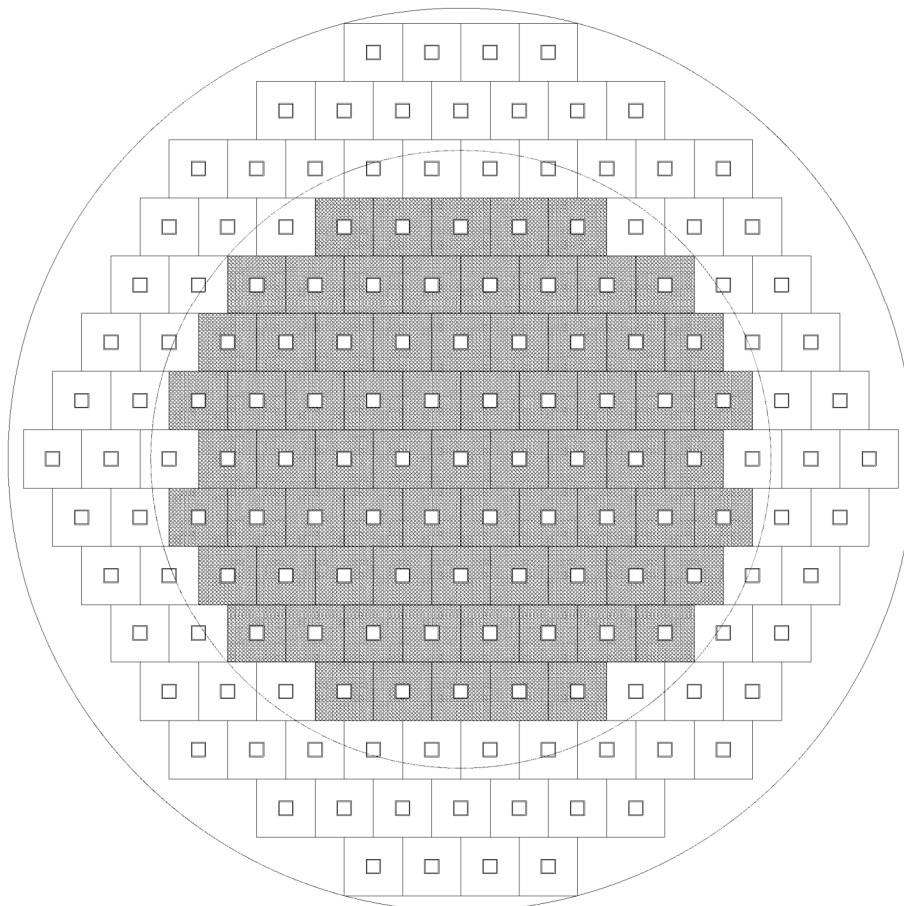
Parametro	DEMO	AFRODITE	
		Bozza a matita	Schizzo CAD
Diametro della barretta [mm]	6.00	11.00	10.60
Passo del reticolo di barrette [mm]	8.71	13.20	12.90
Diametro del foro nella pastiglia [mm]	1.72	2.00	2.00
Raggio della pastiglia di combustibile [mm]	2.55	4.70	4.55
Spessore dell'intercapedine [mm]	0.10	0.15	0.15
Spessore della guaina [mm]	0.35	0.65	0.60

Si badi che tutti i risultati fin qui ottenuti sono frutto dell'assunzione che un ragionevole fattore di distribuzione in pianta della potenza - barretta per barretta - sia 1.25, valore mutuato dal sistema fratello ALFRED. In tale reattore, infatti, la

configurazione degli elementi di controllo della reattività (pochi, “massivi” ed in posizioni isolate della mappa del nocciolo) non consente un controllo puntuale della distribuzione radiale del flusso, se non con lo stesso grado di raffinatezza delle poche posizioni di controllo (12) su tutte quelle di combustibile (171).

In AFRODITE, invece, si intende sfruttare larga parte dei canali definiti all’interno delle travi a scatola presenti in ogni elemento di combustibile, per l’introduzione di un piccolo elemento di controllo. Questo sistema, già adottato nella precedente configurazione, consente di ottenere – attraverso logiche di inserzione differenziali degli assorbitori nelle diverse posizioni di nocciolo – una distribuzione di potenza molto meglio appiattita (in DEMO il fattore di distribuzione ottenuto già con una inserzione uniforme degli elementi di controllo era 1.15).

Assumendo quest’ultimo valore per il fattore di distribuzione in pianta della potenza barretta per barretta, e mantenendo il medesimo vincolo sulla potenza lineare massima, si ottiene che le barrette necessarie a produrre 300 MW sono ora 18500, arrangiabili (16 x 16) in 77 elementi di combustibile. In questo caso l’organizzazione dei 77 elementi porta ad una configurazione di nocciolo, resa irregolare da 4 elementi “di troppo”.



**Figura 4.** Mappa di nocciolo ridotto, in cui si mostrano le 73 posizioni utili (grigie) circondate da altre posizioni (bianche) per elementi schermanti.

Rimosse quindi le 4 posizioni spurie (la mappa del nocciolo è mostrata in Figura 4), si riportano di seguito i parametri geometrici di elemento nel caso in cui si riduca la potenza del nocciolo proporzionalmente al numero di posizioni rimosse, o in cui – mantenendo ferma la potenza totale del sistema – si aggiustino di conseguenza le dimensioni della barretta e del canale.

**Tabella III.** Parametri geometrici dell'elemento (ingegnerizzato) di AFRODITE a potenza lineare nominale o maggiorata (ipotesi di fattore di distribuzione in pianta della potenza: 1.15).

Parametro	DEMO	AFRODITE	
		284 MW	300 MW
Diametro della barretta [mm]	6.00	11.00	11.60
Passo del reticolo di barrette [mm]	8.71	13.50	14.10
Diametro del foro nella pastiglia [mm]	1.72	2.00	3.00
Raggio della pastiglia di combustibile [mm]	2.55	4.70	4.95
Spessore dell'intercapedine [mm]	0.10	0.15	0.15
Spessore della guaina [mm]	0.35	0.65	0.70

### 2.1. Scelta della configurazione di riferimento

Alla luce di quanto fin qui descritto, si riassumono in Tabella IV le configurazioni proposte per AFRODITE (nel seguito indicate come “SB1”, “SB2” ed “SB3”), elencandone i parametri di nocciolo che le caratterizzano.

**Tabella IV.** Principali parametri delle tre configurazioni proposte per AFRODITE.

Parametro	DEMO	AFRODITE		
		SB1	SB2	SB3
Potenza del nocciolo [MW]	300	300	284	300
Fattore di distribuzione della potenza pin-per-pin	1.15	1.25	1.15	1.15
Diametro della barretta [mm]	6.00	10.60	11.00	11.60
Passo del reticolo di barrette [mm]	8.71	12.90	13.50	14.10
Frazione volumetrica del refrigerante [%]	63	47	48	47
Raggio della parte attiva del nocciolo [cm]	76.5	121	115	120
Velocità del refrigerante [m/s]	3.00	1.50	1.48	1.50
Portata massica del refrigerante per sottocanale [kg/s]	1.50	1.23	1.36	1.47

Puntando a mantenere l'obiettivo di riferimento dei 300 MWth, si decide di adottare la configurazione “SB3” per la maggior compattezza che presenta. Tale configurazione, peraltro, si presenta come la più versatile, con una distribuzione degli elementi dummy più facilmente predisponibile all'inserimento di ulteriori elementi di combustibile, qualora questi fossero richiesti, in fase di commissioning del reattore, per far fronte alle incertezze sulla massa critica.

## 3. Analisi preliminari sulla configurazione scelta

A sostegno delle analisi parametriche svolte nella precedente sezione, per la modifica della configurazione di riferimento per il nocciolo di AFRODITE, sono di seguito riportati i risultati di alcune analisi preliminari di progettazione neutronica, termoidraulica e termomeccanica dello stesso.

### 3.1. Considerazioni neutroniche

Come si è visto, il nocciolo di AFRODITE ha, rispetto al DEMO del quale può essere considerato in una qualche misura l'evoluzione – anche se i requisiti sono decisamente diversi – pin di diametro circa doppio e minori potenze lineari. Questi due fatti implicano una drastica riduzione del flusso neutronico. Del resto è stato appunto per massimizzare il flusso neutronico veloce, pensandolo anche come strumento di irraggiamento sperimentale, che il progetto di DEMO aveva portato a quelle geometrie e potenze lineari.

In prima approssimazione ci si può aspettare che il flusso neutronico si riduca a circa un quarto di quello calcolato per DEMO, come risultato di una riduzione della densità di potenza di oltre un fattore quattro e di un minor arricchimento che per converso implicherà un aumento del flusso neutronico.

Ciò porterà un sicuro beneficio per quanto riguarda la fluenza sui materiali strutturali residenti nella tanca, ad eccezione dell'irraggiamento sul cladding il quale invece dipenderà principalmente dai livelli di BU che si richiederà al combustibile.

Il parametro principale da delineare preliminarmente è l'arricchimento del combustibile, essendoci proposti di mantenere questo entro il 30%.

A tale scopo si può estrapolare in prima approssimazione tale parametro a partire dagli arricchimenti dei due noccioli che possono essere considerati di riferimento per AFRODITE: DEMO ed ALFRED.

La Tabella seguente raccoglie i dati essenziali per proiettare il presunto valore di arricchimento per AFRODITE.

**Tabella V.** Geometrie e coefficienti di espansione dei sistemi presi a riferimento.

Parametro	DEMO	ALFRED	AFRODITE
Diametro del nocciolo [cm]	153	250	245
Altezza della zona attiva [cm]	65	60	65
Coefficiente di dimensione radiale	□ 0.22	□ 0.08	0.08 (estrapolato)
Coefficiente di dimensione assiale	□ 0.2	□ 0.16	0.16 (estrapolato)
Frazioni volumetriche comb./refrigerante/guaina	24/63/8	36/48/16	35/47/12
Arricchimento ( Pu / (Pu+U) )	32	26	TBC

#### 1) Calcolo a partire d ALFRED

Le dimensioni sostanzialmente uguali di ALFRED ed AFRODITE consentono di avvalersi – con buona approssimazione – di metodi di proiezione delle proprietà calcolate per il primo sistema, al fine di dedurre stime della reattività del secondo. In particolare, riguardo la differente altezza attiva, è possibile assumere a riferimento un coefficiente di dimensione assiale pari a 0.16. Sotto tale ipotesi, l'aumento dell'altezza attiva da 60 a 65 cm (+ 8.3%) comporterà un aumento di reattività stimabile in circa 1300 pcm (8.3% x 0.16). In ALFRED, un punto di arricchimento vale circa 2000 pcm (1% / 26% x 1/2), per cui la maggior reattività data dall'incremento dell'altezza attiva porta alla possibilità di ridurre di 0.67 punti l'arricchimento, che passerebbe così da 26% a circa 25.3%.

Il secondo effetto di cui tener conto è legato alla diversa frazione volumetrica del combustibile. A questo livello di approssimazione non si tiene conto dei diversi assorbimenti conseguenti alle diverse frazioni volumetriche di refrigerante e strutturali e del diverso spettro neutronico.

La riduzione della frazione volumetrica del combustibile da .36 a .35, pertanto per un 2.8%, dovrà essere compensata da un eguale aumento dell'arricchimento che pertanto passerà dal 25.3% nuovamente ad un 26% stimato, atteso per AFRODITE.

## 2) Calcolo a partire da DEMO.

Le notevoli differenze tra DEMO e AFRODITE rendono tale proiezione assai più incerta della precedente. In particolare:

- la notevole differenza dei raggi non consente un uso soddisfacente del coefficiente d'espansione radiale, la cui validità ed applicabilità (di fatto consiste in una linearizzazione di un fenomeno che non è lineare) è in un intorno dei valori di riferimento;
- l'eccessivamente diverso rapporto diametro/altezza dei due noccioli introduce una variabile legata al buckling geometrico non quantificabile, se non con calcoli ad hoc.

Alla luce di tali considerazioni si assume, sia pure con larga approssimazione, un coefficiente di espansione radiale, da usarsi nel campo molto ampio tra il raggio di DEMO e quello di AFRODITE, nell'ordine di 0.15. Un aumento del raggio del 60% (da 153 cm a 245 cm) dovrebbe pertanto comportare, di per sé, un aumento di reattività di 9000 pcm (60% x 0.15).

Un punto di arricchimento di DEMO vale circa 2000 pcm ( $1\% / 32\% \times 2/3$ )<sup>1</sup> per cui la compensazione dovuta all'aumento di raggio sarebbe dell'ordine di 4.5 punti, portando così l'arricchimento da 32% a 27.5%. La frazione volumetrica del combustibile, salita dal 24% al 35%, riduce ulteriormente di circa un terzo tale arricchimento, portandolo a circa il 19%. A questo punto però c'è la grossa diminuzione di reattività dovuta alla nuova forma del nocciolo, molto schiacciato, perdita non immediatamente stimabile senza calcoli adeguati.

Alla luce delle considerazioni sopra riportate, si può concludere che l'arricchimento atteso per AFRODITE è in prima approssimazione stimabile nel range 25-27%, quindi entro il 30% come richiesto.

### ***3.2. Analisi termoidraulica della barretta calda***

Per verificare la bontà delle assunzioni sulla geometria della barretta e del canale di AFRODITE, si è provveduto ad effettuare un'analisi dei profili di temperatura, prendendo a riferimento la barretta più calda. Si badi che tali valutazioni, di natura preliminare, non intendono sostituirsi a più accurate verifiche termoidrauliche, da eseguirsi a valle della completa caratterizzazione neutronica del sistema, che sarà oggetto delle attività nelle prossime annualità del presente Accordo di Programma.

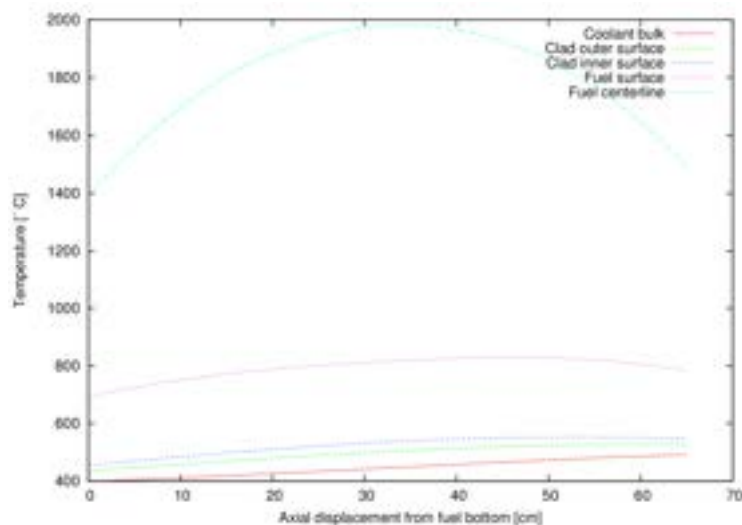
I parametri utilizzati per la presente analisi termoidraulica della barretta più calda sono riportati in Tabella VI.

<sup>1</sup> Il fattore 2/3, introdotto analogamente al caso precedente per considerare l'effetto di saturazione della criticità in funzione dell'arricchimento del combustibile, risulta superiore a quello assunto in precedenza (1/2) per via dell'ampia variabilità della reattività del combustibile su un range di valori di arricchimento più vasto che nel caso precedente.

**Tabella VI.** Parametri per l'analisi termoidraulica della barretta più calda di AFRODITE.

Parametro	Valore
Raggio interno combustibile [mm]	1.50
Raggio esterno combustibile [mm]	4.95
Raggio interno guaina [mm]	5.10
Raggio esterno guaina [mm]	5.80
Passo del reticolo (quadrato) di barrette [mm]	14.10
Altezza attiva [cm]	65.0
Potenza termica del nocciolo [MW]	300
Numero di FA	73
Pin per FA	240
Numero Totale Pin	17520
Potenza lineare media [kW/m]	26.34
Fattore picco radiale (stima)	1.15
Fattore picco assiale (stima)	1.15
Potenza lineare di picco sulla barretta più calda [kW/m]	34.84
Portata di refrigerante nel canale medio [kg/s]	1.47
Area dei sottocanali [mm <sup>2</sup> ]	101.68
Velocità del refrigerante nel canale medio [m/s]	1.50
Diametro idraulico dei sottocanali [mm]	10.22
Numero di Peclet	1369
Numero di Nusselt (secondo la relazione di Zhukov)	9.912
Porosità del combustibile	0.05
Rapporto stechiometrico O/M	1.97

In Figura 5 si riportano gli andamenti dei profili di temperatura del refrigerante, della guaina (superfici esterna ed interna) e del combustibile (superfici esterna ed interna) in funzione della quota assiale. Dal grafico si evince che entrambe le temperature soggette a vincoli di natura tecnologica (temperatura della guaina sulla superficie esterna, 528 °C, e temperatura massima del combustibile, 2040 °C) rispettano con ottima approssimazione i limiti di progetto, ben avvicinandosi ai valori attesi, previsti in fase di ridimensionamento della cella elementare.



**Figura 5.** Profili assiali delle temperature della barretta più calda.

### 3.3. *Analisi termomeccanica della barretta più sollecitata*

Analogamente a quanto effettuato per l'analisi termoidraulica della barretta più calda, si è provveduto ad analizzare la medesima barretta, assumendo che sia anche la più sollecitata durante l'intero ciclo di funzionamento del reattore, in un approccio sicuramente conservativo. I dati necessari per tale analisi, in aggiunta a quelli già riportati in Tabella VI, sono di seguito elencati in Tabella VII.

**Tabella VII.** Parametri per l'analisi termomeccanica della barretta più sollecitata.

Parametro	Valore
Arricchimento Pu atteso <sup>2</sup>	26%
Inventario di combustibile nel nocciolo [t]	8.36
Inventario di metalli pesanti (HM) nel nocciolo [t]	7.40
Pressione di progetto per il plenum dei gas di fissione [MPa]	5.0
Burnup di picco [MWd/kg <sub>HM</sub> ]	100
Burnup medio [MWd/kg <sub>HM</sub> ]	75.6

Da tali parametri si può evincere che il periodo di residenza del combustibile nel nocciolo, necessario al raggiungimento del BU previsto, è pari a 1860 giorni, ovvero 5.1 anni di funzionamento a piena potenza.

La salita in potenza del reattore porterà il sistema a dilatarsi termicamente, con una riduzione del gap fra guaina e combustibile. Per la barretta più calda – in corrispondenza della mezzeria, in cui il combustibile è alla massima temperatura, a differenza della guaina – questo effetto si stima ridurre gli iniziali 150 μm a circa 110 μm. In tali condizioni, il contatto fra combustibile e guaina avviene una volta raggiunti approssimativamente 29 MWd/kg<sub>HM</sub>. Da tale momento in poi, l'ulteriore dilatazione del combustibile avviene a scapito della guaina, imponendo su questa uno sforzo via via crescente, stimabile – a fine vita, sulla mezzeria della barretta più sollecitata – in una pressione di circa 17 MPa.

Aggiungendo a questi i 5 MPa della pressione dei gas di fissione (valore da progetto, che richiede un opportuno dimensionamento del plenum di raccolta di tali gas), si ottiene una pressione totale di circa 22 MPa.

Tale pressione deve essere contrastata dalla guaina, che svilupperà al suo interno delle tensioni membranali date da

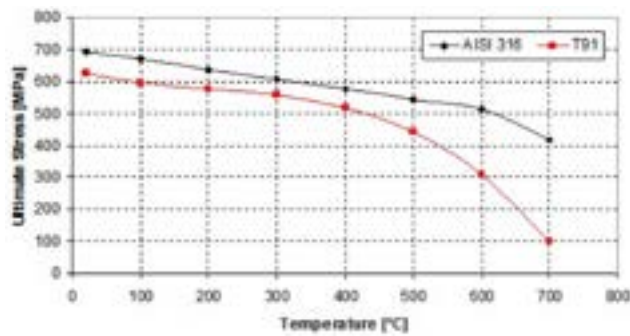
$$\sigma_{\theta} = 160 \text{ MPa}$$

$$\sigma_z = 80 \text{ MPa}$$

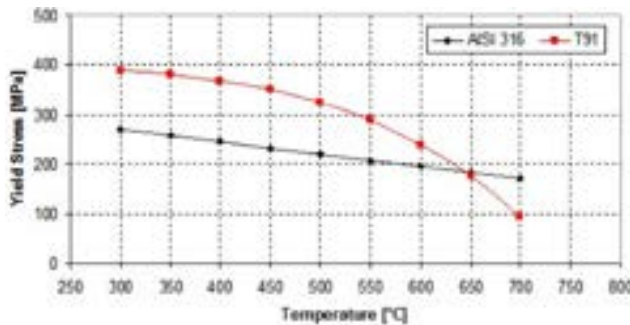
$$\sigma_r = 22 \text{ MPa}$$

Il principale di tali valori (così come il valore della tensione efficace,  $\bar{\sigma} = 168 \text{ MPa}$ ) risulta inferiore alla tensione limite per l'acciaio 15-15Ti (una variante del più comune AISI 316, stabilizzata con l'aggiunta di Titanio per migliorare la resistenza allo swelling indotto dall'irraggiamento neutronico), deducibile dalla lettura dei grafici di Figura 6 e 7.

<sup>2</sup> Si confronti il paragrafo 3.1.



**Figura 6.** Carico ultimo a rottura per gli acciai AISI 316 e T91.



**Figura 7.** Tensione di snervamento per gli acciai AISI 316 e T91.

## 4. Conclusioni

Il presente documento riporta le considerazioni, e le analisi neutroniche, termoidrauliche e termomeccaniche preliminari, svolte a supporto della concettualizzazione del nocciolo di una nuova configurazione di un reattore inteso alla dimostrazione della filiera dei reattori veloci di IV Generazione refrigerati a piombo liquido.

Partendo dalla configurazione di DEMO, analizzata nelle precedenti annualità dell'Accordo di Programma tra ENEA e Ministero dello Sviluppo Economico, sono stati analizzati i punti critici riconosciuti in tale configurazione – derivanti principalmente dalla volontà di ottenere una macchina capace di fungere al contempo da dimostratore e facility di irraggiamento – e modificati i principali parametri di nocciolo, giungendo così alla configurazione qui proposta per AFRODITE.

Dalle analisi preliminari condotte, di cui sono stati riportati nel testo i principali risultati, la configurazione proposta sembra soddisfare tutti gli obiettivi di dimostrazione, rispettando al contempo tutti i vincoli fissati ex-novo, coerentemente con l'obiettivo di semplificare le richieste tecnologiche per accelerare la realizzabilità del reattore.

Si riconosce ad ogni modo la necessità, nelle attività oggetto delle successive annualità dell'AdP, di approfondire le verifiche sulla configurazione qui proposta – includendo nello studio anche analisi dei principali transitori operativi ed incidentali caratteristici per reattori refrigerati a piombo –, arrivando ad una completa caratterizzazione del nocciolo di AFRODITE ed ultimando così il progetto concettuale dello stesso.