



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Definizione delle caratteristiche richieste ad un modulo di  
termomeccanica in un codice multifisica di dinamica tridimensionale  
per reattori termici

*M. Aufiero, S. Bortot, A. Cammi, S. Lorenzi, R. Ponciroli, M.E. Ricotti*



DEFINIZIONE DELLE CARATTERISTICHE RICHIESTE AD UN MODULO DI TERMOMECCANICA IN  
UN CODICE MULTIFISICA DI DINAMICA TRIDIMENSIONALE PER REATTORI TERMICI

M. Aufiero, S. Bortot, A. Cammi, S. Lorenzi, R. Ponciroli, M.E. Ricotti (Politecnico di Milano)

Novembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Fissione nucleare: metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata

Responsabile Progetto: Massimo Sepielli, ENEA

**Titolo**

**Definizione delle caratteristiche richieste ad un modulo di termomeccanica in un codice multifisica di dinamica tridimensionale per reattori termici**

**Ente emittente** CIRTEN - Politecnico di Milano

## PAGINA DI GUARDIA

**Descrittori**

**Tipologia del documento:**

**Collocazione contrattuale:** ACCORDO DI PROGRAMMA Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2010 Progetto 1.3.2.a: Fissione nucleare: Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata.

**Argomenti trattati:** Termomeccanica, Reattori nucleari ad acqua, Software

**Sommario**

Il documento definisce le caratteristiche richieste a un modulo di termomeccanica integrato in un codice multifisico di dinamica tridimensionale per reattori termici, attraverso la presentazione dei fenomeni fisici che devono essere trattati a livello sia di nocciolo che – in particolar modo – della barretta di combustibile, e l'analisi delle interazioni tra il modulo in esame e gli altri moduli di neutronica e termoidraulica. Sulla base di queste informazioni si indicano le linee guida per una progettazione concettuale del modulo attraverso un approccio "a blocchi". Sono infine descritti i potenziali codici per la realizzazione del modulo di termomeccanica, alcuni dei quali disponibili commercialmente, altri sviluppati da istituti di ricerca come parte di codici accoppiati. Al termine del documento si fornisce un esempio di modulo di termoelasticità inserito in un codice ad hoc sviluppato in un unico ambiente di calcolo.

**Note**

Allegato D al Deliverable PAR2010-CIRTEN-LD1-028  
Riferimento: CERSE-POLIMI RL 1450-1500/2011

Autori: M. Aufiero, S. Bortot, A. Cammi, S. Lorenzi, R. Ponciroli, M. E. Ricotti

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	05/12/11	NOME	G. Grasso	P. Meloni	M. Sepielli
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE	





**CIRTEN**

**Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare**

**POLITECNICO DI MILANO, DIPARTIMENTO DI ENERGIA  
Sezione INGEGNERIA NUCLEARE – CeSNEF**



**“Definizione delle caratteristiche richieste ad un modulo di  
termomeccanica in un codice multifisica di dinamica  
tridimensionale per reattori termici”**

**Autori**

Manuele Aufiero, Sara Bortot, Antonio Cammi, Stefano Lorenzi, Roberto Ponciroli, Marco Enrico Ricotti

**CERSE-POLIMI RL 1450-1500/2011**

**MILANO, Novembre 2011**

Lavoro svolto in esecuzione dell'Obiettivo 1.3 Attività D1  
AdP MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico- Piano Annuale di Realizzazione 2010  
Progetto 1.3.2.a “Fissione nucleare: Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di  
generazione evolutiva alimentati ad acqua pressurizzata”

## Sommario

<b>1. Introduzione</b> .....	5
<b>2. Modulo di termomeccanica per un codice di dinamica</b> .....	5
2.1. <i>Accoppiamento con altri moduli</i> .....	7
<i>Neutronica</i> .....	7
<i>Termoidraulica</i> .....	7
2.2. <i>Progettazione a blocchi del modulo T/M</i> .....	8
<b>3. Esempi di codici di termomeccanica</b> .....	10
3.1. <i>Codici commerciali</i> .....	10
<i>ABAQUS</i> .....	10
<i>ANSYS®</i> .....	11
3.2. <i>Codici accoppiati, parte termomeccanica</i> .....	12
<i>FAST: FRED</i> .....	12
<i>SAS4A: DEFORM4</i> .....	13
3.3. <i>Esempio di modulo termoelastico accoppiato in un codice multifisico</i> .....	15
<b>4. Conclusioni</b> .....	21

# 1. Introduzione

Un codice multifisico che si prefigge l'obiettivo di studiare e analizzare il comportamento dinamico tridimensionale di un reattore ad acqua leggera, oltre ai fenomeni fisici che riguardano la neutronica e la termoidraulica, deve trattare anche la modellizzazione del comportamento termomeccanico di nocciolo e in particolar modo della barretta di combustibile. Infatti la distribuzione termica all'interno della barretta e nei materiali strutturali e il cambiamento di geometria dovuta a variazioni di densità e sforzi, costituiscono una retroazione fondamentale per la dinamica del reattore.

Dopo aver valutato le fenomenologie fisiche da prendere in considerazione nel modulo di termomeccanica e aver individuato i flussi di dati che vengono trasferiti tra i vari modelli, verrà presentata una progettazione concettuale del modulo stesso. In seguito verranno descritti alcuni codici attualmente usati per la descrizione del problema termomeccanico, tra cui codici commerciali, codici accoppiati usati in alcuni istituti di ricerca e un codice sviluppato "ad hoc" dal Politecnico di Milano.

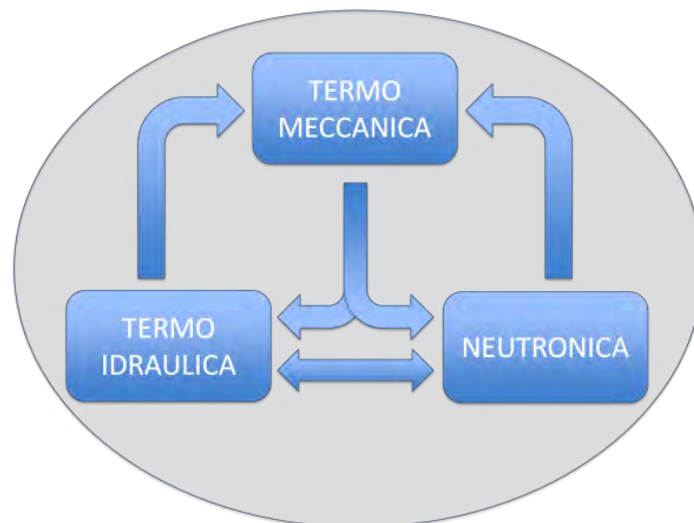


Figura 1: Moduli di un codice multifisico 3D per lo studio del comportamento dinamico di un reattore ad acqua leggera.

## 2. Modulo di termomeccanica per un codice di dinamica

Le fenomenologie che devono essere considerate in un modulo di termomeccanica, inserito in un codice multifisico che studi il comportamento dinamico di un reattore ad acqua leggera, sono varie e alquanto complesse. In primo luogo si deve ragionare nell'ottica di un accoppiamento con altri moduli (neutronica e termoidraulica) e per cogliere gli aspetti termomeccanici del nocciolo e

della barretta di combustibile i principali comportamenti da modellizzare sono fondamentalmente due: lo scambio termico all'interno della barretta, in particolare la distribuzione di temperatura nel combustibile e nella guaina, e la descrizione del campo di sforzi e deformazioni a seguito di carichi meccanici e termici. Per quanto riguarda lo stato di sforzo e deformazione, per gli scopi dinamici che si prefigge il modello generale è inizialmente possibile affrontare la descrizione con un modello di elasticità lineare; il modulo potrà essere successivamente raffinato introducendo altri aspetti meccanici quali la plasticità, lo scorrimento viscoso, lo *swelling*, l'insorgenza di cricche o altri effetti non lineari.

Tuttavia per una rappresentazione complessiva del nocciolo di un reattore è necessario tenere in considerazione non solo le interazioni che riguardano la singola barretta ma anche i materiali strutturali presenti quali supporti, griglie spaziatrici, ecc. Questo è dovuto alla necessità di poter studiare l'espansione radiale e assiale del nocciolo che permetterà al modulo di neutronica di calcolare le controeazioni dovute al cambio di geometria. Questo effetto di retroazione neutronica è sicuramente secondario in un reattore ad acqua leggera (dove sono più importanti effetti quali Doppler o variazioni della densità del moderatore/termovettore) rispetto ad un reattore con spettro veloce in cui i cambiamenti radiali e assiali influiscono in modo più consistente nell'economia neutronica. Nonostante ciò per una descrizione corretta del problema, è un effetto da non tralasciare, soprattutto a causa dell'inserzione di reattività dovuta alla variazione geometrica delle barre di controllo.

Per quanto riguarda lo scambio termico, la conduttanza dell'intercapedine e la sua eventuale chiusura devono essere modellizzate; la descrizione dell'espansione della guaina dovrà contemplare la possibile chiusura dell'intercapedine e il passaggio da uno scambio termico convettivo ad uno conduttivo. Allo stesso tempo, la conduttanza dell'intercapedine e lo stato di sforzo saranno influenzati dal progressivo rilascio dei gas di fissione.

Da un punto di vista termoidraulico una retroazione fornita dalla termomeccanica è il cambiamento dell'area di canale dovuta all'espansione della guaina che dovrebbe essere ricalcolata ad ogni passo temporale.

Input necessari per la risoluzione delle equazioni che descrivono le varie componenti del problema saranno i valori delle proprietà meccaniche (modulo di Young, coefficiente di Poisson, ecc), fisiche e termiche (densità, coefficiente di espansione termica, conducibilità, calore specifico, ecc) di ciascun materiale con le relative correlazioni.

L'analisi di alcuni effetti come l'insorgenza di cricche, fessurazioni, ristrutturazione, densificazione, rigonfiamento, coalescenza, deformazione visco-plastica non è strettamente necessaria all'interno di un modulo di termomeccanica inserito in un codice di simulazione dinamica. Per questi scopi sono necessari alcuni dati di input, all'inizio della simulazione, per una corretta valutazione dello stato della barretta di combustibile (informazioni sulla situazione isotopica e/o sulla situazione geometrica) ottenibili da codici di bruciamento o fuel performance. In un secondo momento si potrebbe valutare lo sviluppo di un modulo aggiuntivo che simuli le condizioni della barretta precedenti al transitorio in cui tutti gli effetti descritti verrebbero valutati al fine di dare una più accurata e realistica modellizzazione del comportamento della struttura.

### *2.1. Accoppiamento con altri moduli*

Di seguito verranno descritti i flussi di informazioni che devono intercorrere tra il modulo di termomeccanica e gli altri moduli di neutronica e termoidraulica (rappresentati in Figura 2).

#### *Neutronica*

Dal modulo di neutronica si dovrebbe ricavare il profilo radiale e assiale di potenza termica che viene rilasciato nel combustibile. A sua volta il modulo di termomeccanica deve fornire alla neutronica le temperature del combustibile, della guaina e dei materiali strutturali per poter aggiornare le sezioni d'urto di cattura, fissione, assorbimento e scattering che dipendono da queste temperature. Inoltre dovrebbe fornire le variazioni di geometria (in particolare le frazioni volumetriche) della barretta di combustibile, del canale e dell'elemento di combustibile che possono influenzare il Buckling dei materiali (in termini di densità dei componenti), il cambiamento di dimensione del nocciolo per il Buckling geometrico e l'effetto di espansione differenziale delle barre di controllo rispetto alla posizione del nocciolo (per l'influenza sulla reattività di queste).

#### *Termoidraulica*

Dal modulo di termoidraulica le informazioni necessarie sono essenzialmente le condizioni di scambio termico del termovettore e i campi di pressione, velocità e temperatura, in modo da poter calcolare il profilo di temperatura all'interno della barretta e valutare lo scambio termico nei materiali strutturali. D'altra parte, il modulo della termomeccanica deve fornire i dati delle

deformazioni del combustibile e soprattutto della guaina che possono far variare la sezione di passaggio del canale.

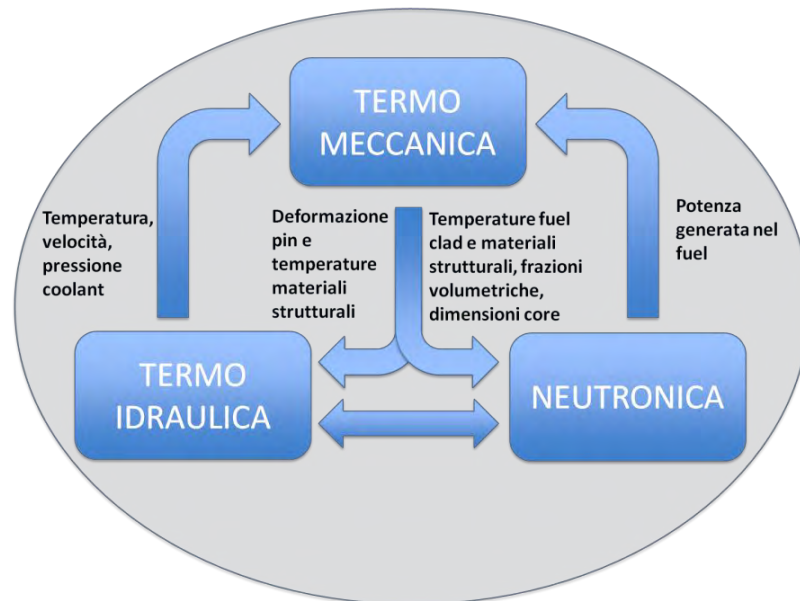


Figura 2: Informazioni (input/output) intercorrenti tra il modulo di termomeccanica e gli altri moduli.

## 2.2. Progettazione a blocchi del modulo T/M

In figura 3 è rappresentata una possibile progettazione concettuale del modulo di termomeccanica per quanto riguarda la barretta di combustibile. Un analogo schema è applicabile ai materiali strutturali.

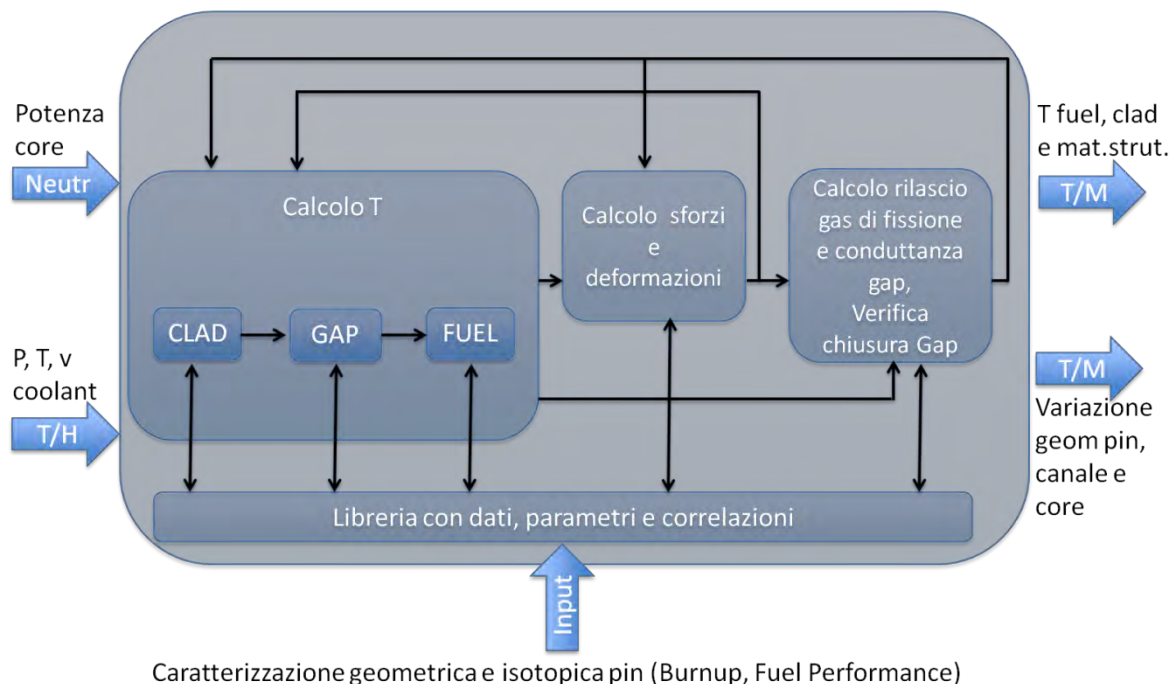
Inizialmente vengono acquisiti i dati di input provenienti dagli altri blocchi ovvero la potenza del nocciolo rilasciata nel combustibile per quanto riguarda la neutronica e le condizioni di scambio termico nel termovettore (pressione, temperatura e velocità) per quanto riguarda la termoidraulica. Inoltre per il modulo sono necessari alcuni parametri di composizione isotopica e caratterizzazione geometrica che possono essere calcolati come input da programmi di bruciamento e fuel performance o da un modulo dedicato allo studio delle condizioni della barretta precedenti al transitorio.

Il primo passaggio consiste nel calcolo delle temperature di guaina e del combustibile, considerando l'effetto della distribuzione della temperatura nell'intercapedine. Questa subroutine dovrà acquisire i dati da una libreria in cui saranno caricati i parametri fisici e termici in funzione della temperatura o altri fattori che possono influenzare tali valori.

Successivamente si calcola attraverso un modello di elasticità lineare lo stato di sforzo e deformazione del combustibile e guaina, interagendo sempre con la libreria dati per i parametri meccanici. Trovata la soluzione questa deve essere retroazionata al blocco del calcolo delle temperature in modo da trovare convergenza tra temperatura e deformazioni risolvendo il problema termoelastico.

Una volta trovata la convergenza a questo problema, una subroutine calcola la variazione della pressione dei gas di fissione, la variazione della conduttanza dell'intercapedine e la sua eventuale chiusura che comporterebbe un diverso approccio nella trattazione dello scambio termico e della deformazione basata sui punti di contatto tra combustibile e guaina.

Queste informazioni a loro volta dovranno essere riprese in considerazione dalle altre subroutine affinché l'errore residuo non sia al di sopra di un certo valore prestabilito. Una volta completato il passo temporale, i risultati fondamentali del modulo della termomeccanica (temperature e variazioni geometriche) verranno inviati ai moduli che interessano la neutronica e la termoidraulica.



Caratterizzazione geometrica e isotopica pin (Burnup, Fuel Performance)

Figura 3: Diagramma concettuale a blocchi del modulo di termomeccanica.

### 3. Esempi di codici di termomeccanica

Di seguito viene proposta una descrizione di due codici disponibili commercialmente che possono costituire la base dello sviluppo del modulo di termomeccanica. Inoltre vengono descritti due moduli di termomeccanica accoppiati all'interno di codici di carattere generale per lo studio del comportamento dinamico di noccioli per reattori nucleari sviluppati in due diversi centri di ricerca. Infine, viene proposto un modulo di termomeccanica accoppiato con neutronica e termoidraulica in un ambiente multifisico "ad hoc". Nel caso dei codici accoppiati vengono portati, a titolo esemplificativo, progetti che sono focalizzati su reattori a spettro veloce, in quanto proprio in questi sistemi la parte termomeccanica riveste un ruolo decisivo sia nel bilancio neutronico sia nella parte termoidraulica. L'approccio utilizzato in questi esempi può altresì essere applicato senza problemi a reattori ad acqua leggera.

#### 3.1. Codici commerciali

##### *ABAQUS*

ABAQUS è un programma avanzato di analisi agli elementi finiti non lineari (FEA) per lo studio della risposta strutturale, degli sforzi e della trasmissione del calore in ambiente ingegneristico [1]. Il codice implementa il metodo degli elementi finiti per risolvere l'equazione non lineare della termomeccanica in una, due o tre dimensioni usando elementi lineari o quadratici. ABAQUS è in grado di eseguire calcoli multiprocessore. ABAQUS permette l'implementazione di routine e modelli create dall'utente (attraverso il linguaggio FORTRAN) per modificare il codice e introdurre nuove fenomenologie descrittive del comportamento termomeccanico della barretta di combustibile e dei materiali strutturali.

Questo software è alla base di un codice di termomeccanica sviluppato all'INL (BISON), che ha come obiettivo lo studio multifisico del comportamento della barretta di combustibile (combustibile e guaina) durante condizioni stazionarie e di transitorio [2,3]. In questo codice la temperatura e gli spostamenti sono risolti in modo accoppiato e un algoritmo è dedicato alla modellizzazione del contatto pastiglia-guaina. Inoltre modelli studiati appositamente sono stati inseriti per gestire l'elasticità (anisotropa e isotropa), l'espansione termica, la plasticità e lo scorrimento viscoso.

Per quanto riguarda l'accoppiamento con altri codici, ABAQUS salva l'output in un database (\*.odb) per ogni step temporale.

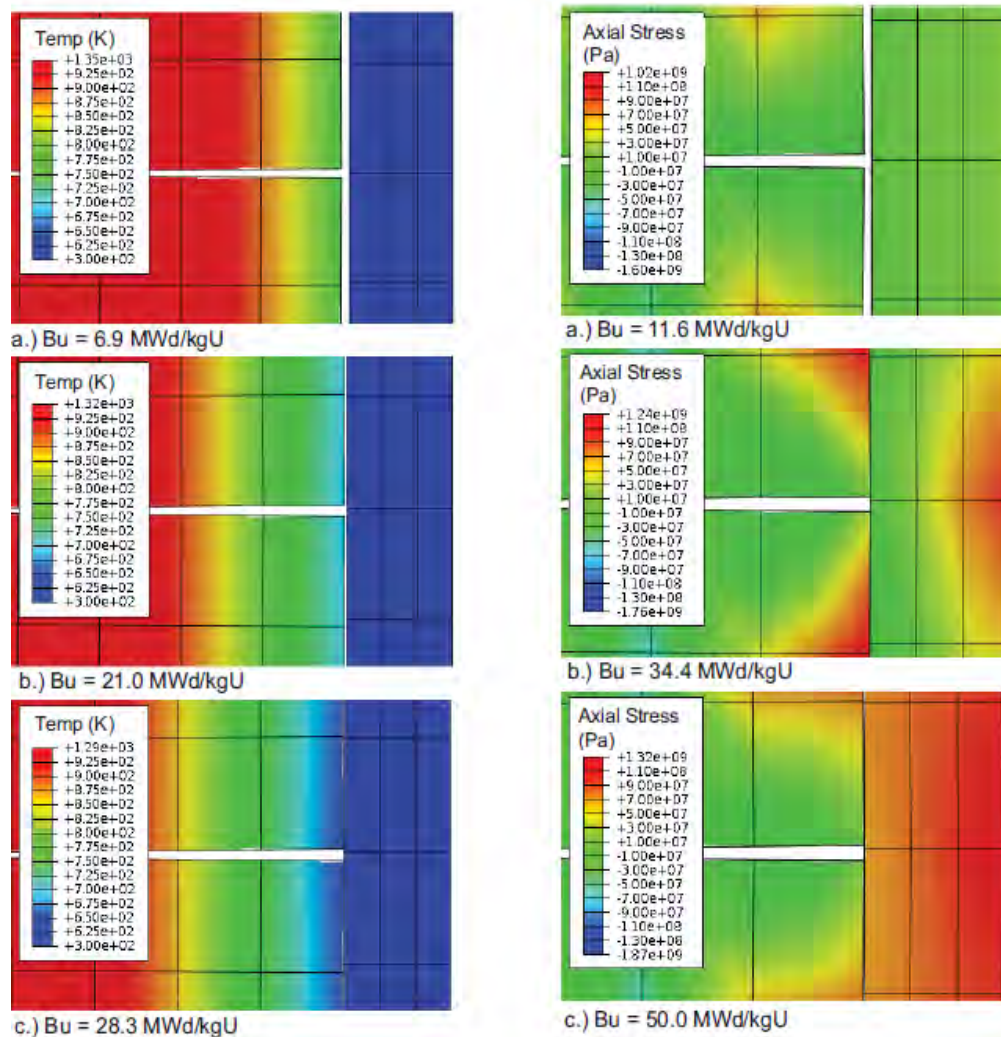


Figura 4: Profilo di temperatura (sinistra) e sforzi assiali (destra) calcolati con codice ABAQUS/BISON per diversi bruciamenti [2].

## ANSYS<sup>®</sup>

ANSYS<sup>®</sup> è un programma di analisi agli elementi finiti e in particolare ANSYS<sup>®</sup>/Mechanical viene usato per risolvere problemi strutturali e meccanici, termici e di scambio termico [4]. La divisione in elementi finiti permette al risolutore di generare una soluzione per ogni elemento che a sua volta verrà combinato per creare una soluzione globale. Inoltre ANSYS<sup>®</sup>/Mechanical offre la possibilità di gestire dei moduli di analisi e grafica per lo studio del problema [5].

All'interno del modulo esiste la possibilità di accoppiare il problema termico con quello meccanico, creando un modello termoelastico capace di sviluppare analisi statiche e dinamiche (transitori in tempo e analisi in frequenza).

In un'ottica di accoppiamento di codici, ANSYS® crea in output dei file binari per salvare i dati durante l'analisi. Lo sforzo necessario per accoppiare ANSYS® ad altri codici consiste nel creare un programma che interpreti i dati binari di ANSYS® e li manipoli in modo da renderli utilizzabili agli altri codici di neutronica e termoidraulica. Nel programma sono già presenti delle routine modificabili in linguaggio FORTRAN che permettono la lettura, la scrittura e la modifica dei file di output; inoltre è possibile creare un database (\*.cdb) che raccolga tutte le informazioni da esportare all'esterno del modulo [6,7].

Una caratteristica vantaggiosa di ANSYS® è la possibilità di accoppiare il modulo di termomeccanica con uno di fluidodinamica rappresentato da ANSYS® FLUENT.

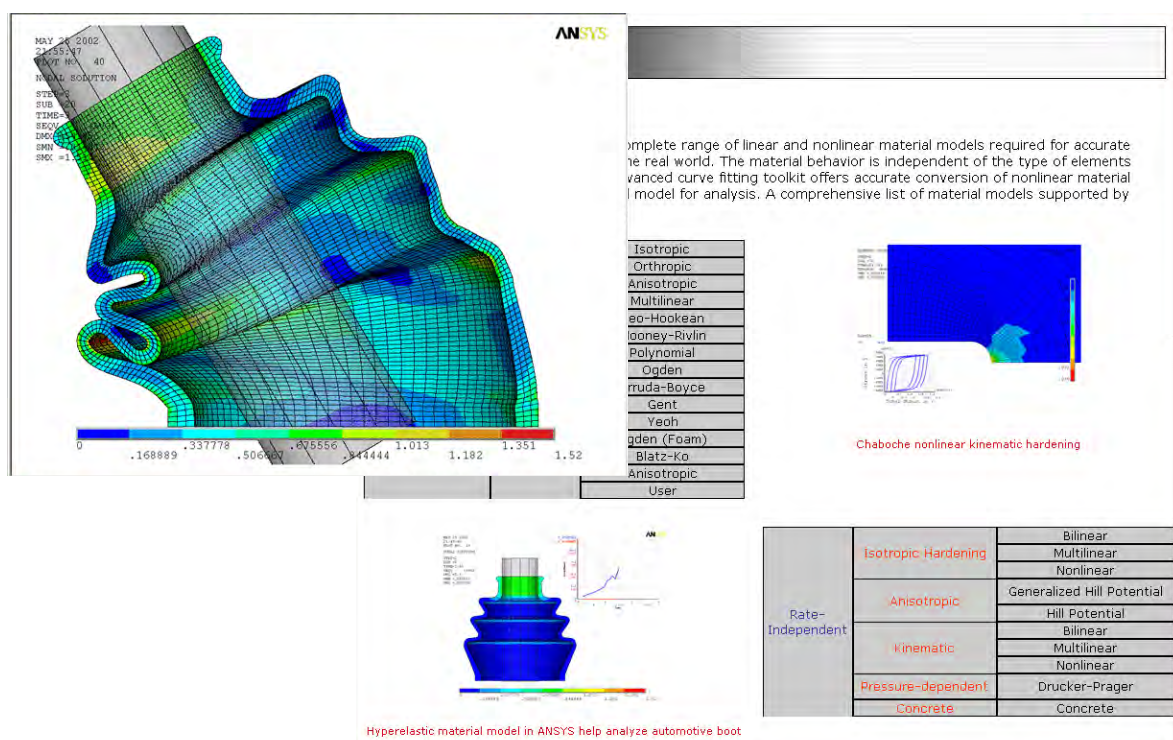


Figura 5: Ambiente di lavoro ANSYS® [5].

### 3.2. Codici accoppiati, parte termomeccanica

#### *FAST: FRED*

FAST (Fast-spectrum Advanced Systems for power production and resource management) è un progetto sviluppato al Paul Scherrer Institute (PSI), con lo scopo di creare uno strumento generale per lo studio del comportamento tridimensionale statico e dinamico dell'intero sistema reattore, focalizzato in particolare per i sistemi di quarta generazione a spettro veloce [8,9]. Il

codice sviluppato in FAST è il risultato dell'accoppiamento di moduli dedicati sui vari aspetti della modellizzazione del reattore:

- ERANOS per quanto riguarda la neutronica statica (principalmente creazioni di sezioni d'urto in caso di cinetica spaziale; profilo di potenza, parametri cinetici e coefficienti di reattività per cinetica puntiforme);
- PARCS per il comportamento cinetico della neutronica del reattore;
- TRACE per la parte termoidraulica;
- FRED per la termomeccanica.

Il codice di nostro interesse in questa trattazione è FRED per la parte di termomeccanica. Questo modulo si occupa di calcolare ad ogni passo temporale temperature, sforzi, deformazioni nella barretta di combustibile e nelle altre strutture (griglia, tubi generatore di vapore, vessel) oltre alla probabilità di cedimento della guaina.

#### *SAS4A: DEFORM4*

SAS4A è un codice sviluppato all'Argonne National Laboratory (ANL) per l'analisi di transitori di potenza e portata per reattori refrigerati a metallo liquido. SAS4A è formato da moduli che contengono modelli termoidraulici, neutronici e di fenomeni meccanici che descrivono la risposta del reattore, del fluido termovettore, degli elementi di combustibile e degli altri elementi strutturali in caso di transitori operazionali e incidentali.

Per quanto riguarda la descrizione termomeccanica, un modulo specifico, DEFORM4, è dedicato allo studio del comportamento della barretta di combustibile. Il codice sfrutta principalmente due metodi per caratterizzare la barretta:

- Utilizzo di correlazioni derivanti da un database di informazioni sperimentali;
- Descrizione fenomenologica del processo che deve essere modellizzato.

La regione del nocciolo viene divisa in varie zone: combustibile, riflettore, gas plenum (Figura 6) mentre per quanto riguarda l'interazione tra guaina e combustibile (Figura 7) si considerano tre condizioni:

- Assenza contatto
- Regime elastico di sforzo tra combustibile e guaina

- Regime plastico di sforzo tra combustibile e guaina

La descrizione geometrica della guaina e del combustibile è sia assiale che radiale.

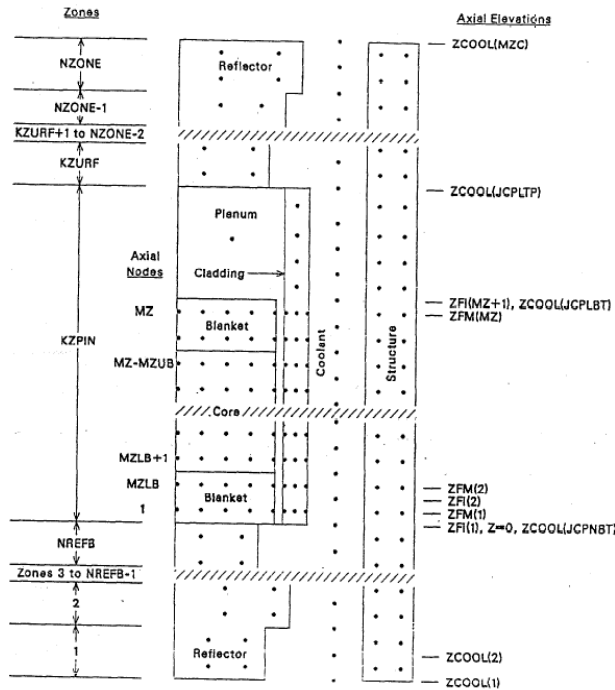


Figura 6: Discretizzazione del core in SAS4A

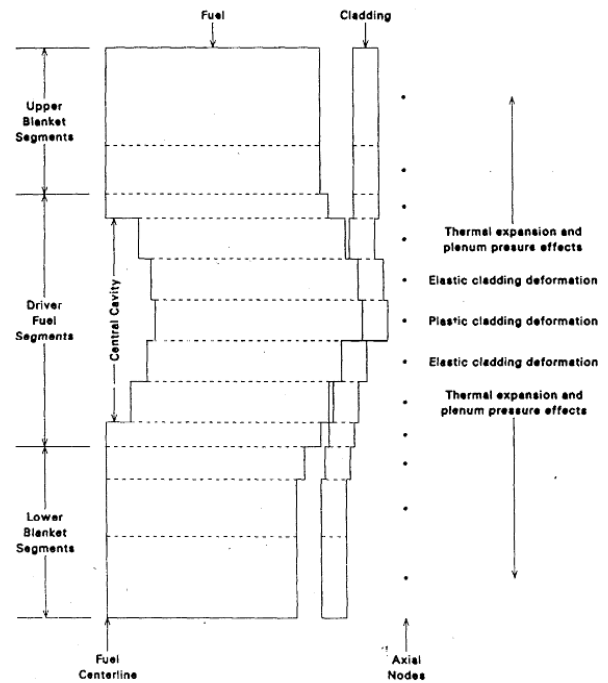


Figura 7: Rappresentazione dell'interazione combustibile/guaina in SAS4A

Una particolare attenzione è dedicata allo studio delle condizioni precedenti al transitorio in quanto la risposta della struttura è influenzata dalla “storia” della barretta (bruciamento, migrazione vuoti, crescita grani, rilascio di gas di fissione, chiusura intercapedine, vuoto centrale, swelling, ecc). Il codice simula l’irraggiamento precedente al transitorio attraverso una serie di cambiamenti di potenza a vari livelli e a diversi istanti temporali. Questo consente di considerare la storia operativa del reattore e i suoi effetti sullo stato fisico della barretta e porta ad una descrizione più realistica del comportamento termomeccanico della struttura. In Figura 8 vengono illustrati i fenomeni che vengono considerati in questa fase e la loro interazione tra di loro.

Nel trattamento termoelastico la guaina è considerata come un materiale perfettamente elastoplastico, in cui è possibile uno scorrimento plastico in risposta alle condizioni di temperatura e di sforzo; nel combustibile è considerata l’eventuale presenza di cricche e la loro propagazione.

L’interazione con gli altri moduli avviene attraverso l’uso di un blocco comune per lo scambio reciproco dei dati (temperature, pressione, variazioni geometriche).

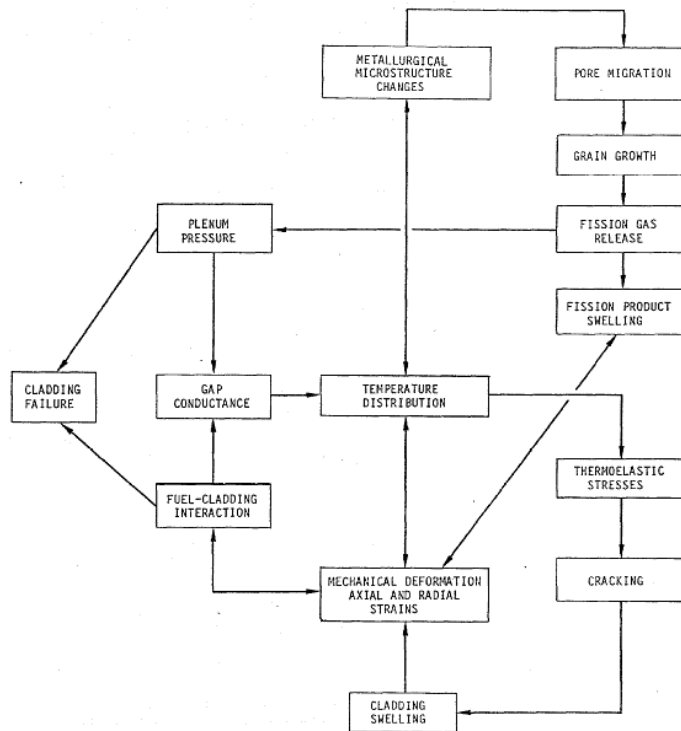


Figura 8: Interazioni tra i fenomeni presi in considerazione nella fase precedente al transitorio

### 3.3. Esempio di modulo termoelastico accoppiato in un codice multifisico

In alternativa all'accoppiamento tra moduli dedicati, si può pensare di realizzare un codice multifisico dove tutte le equazioni che descrivono il sistema sono contemporaneamente risolte in uno stesso ambiente di calcolo.

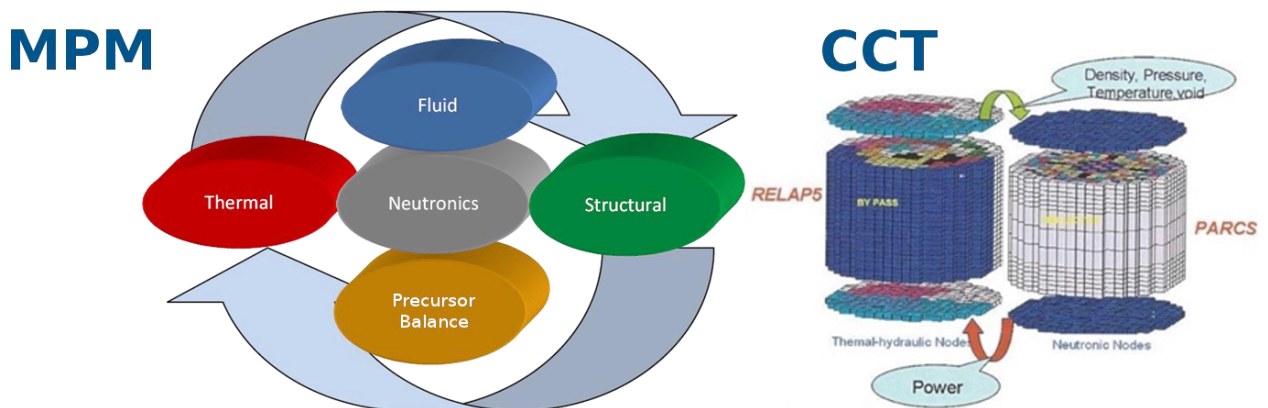


Figura 9: Approccio MPM (Multi-Physics Modelling) e approccio CCT (Coupled code Techniques).

A tal proposito si presenta un'estensione dell'approccio multifisico (MPM) sviluppato al Politecnico di Milano per l'analisi di nocciolo di reattori nucleari [10,11]. Il lavoro prende come

reattore di riferimento ELSY, ovvero un reattore a spettro veloce refrigerato al piombo ma l'approccio può essere facilmente esteso ad un reattore ad acqua leggera.

All'interno della medesima piattaforma di calcolo, in questo caso COMSOL Multiphysics® [12], lo schema di analisi proposto si basa sulla soluzione simultanea e accoppiata di equazioni alle derivate parziali che descrivono le diverse "fisiche" (trasmissione del calore, fluidodinamica, neutronica, comportamento termomeccanico, ecc) relative ad una barretta di combustibile e al fluido termovettore che la circonda. L'approccio MPM [13] ha come obiettivo l'accoppiamento di diversi fenomeni fisici che coinvolgono un reattore nucleare senza dover passare attraverso l'accoppiamento di diversi e differenti codici. In questo modo è possibile studiare le condizioni del reattore sia con analisi statiche sia con transitori operativi o incidentali.

La neutronica viene trattata con un modello di diffusione multigruppo, utilizzando le seguenti equazioni:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi_g}{\partial t} = \nabla \cdot D_g \nabla \phi_g - \Sigma_{ag} \phi_g - \sum_{g=1}^N \Sigma_{s,gg} \phi_g + \sum_{g'=1}^N \Sigma_{s,g'g} \phi_{g'} + \\ + (1-\beta) \chi_g \sum_{g'=1}^N (v \Sigma_f)_{g'} \phi_{g'} + \sum_{i=1}^6 f_{g,i} \lambda_i c_i(r,t) \quad g, g' = 1, \dots, N \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = -\lambda_i c_i(r,t) + \beta_i \sum_{g=1}^N \chi_g \sum_{g'=1}^N (v \Sigma_f)_{g'} \phi_{g'} \quad i = 1, \dots, 6 \quad (1.2)$$

$$\Sigma(T_f, T_1) = a_0 + a_1 T_f + a_2 T_1 \quad (1.3)$$

Per quanto riguarda la fluidodinamica le equazioni introdotte nel modello per la descrizione del fluido termovettore sono derivate dal modello standard k-ε.

$$\rho_1 \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho_1 (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla \cdot \left[ -p \mathbf{I} + (\eta + \eta_T) \left( \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \rho_1 k \mathbf{I} \right) \right] + \mathbf{F} \quad (1.4)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1.5)$$

$$\rho_1 \frac{\partial k}{\partial t} + \rho_1 \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] - \rho_1 \varepsilon + \eta_T \left[ \frac{1}{2} \left( \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right)^2 \right] \quad (1.6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho_1 \mathbf{u} \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left[ \left( \eta + \frac{\eta_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] - \frac{C_{\varepsilon 2} \rho_1 \varepsilon^2}{k} + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \eta_T \left[ \frac{1}{2} \left( \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right)^2 \right] \quad (1.7)$$

Per lo scambio termico si è adottato la seguente formulazione:

$$\rho_x C_{p,x} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot [-K_x \nabla T] = Q \quad (1.8)$$

$$\rho_l C_{p,l} \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot [-(K_l + K_T) \nabla T] = \rho_l C_{p,l} \mathbf{u} \cdot \nabla T \quad (1.9)$$

La parte significativa del lavoro è l'introduzione di un modulo per modellizzare il comportamento meccanico della barretta. Le seguenti equazioni dell'elasticità lineare sono state introdotte per considerare gli effetti di espansione termica del combustibile e della guaina:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{s}}{\partial t^2} = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \quad (1.10)$$

$$\boldsymbol{\epsilon} = \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{s}) + (\nabla \mathbf{s})^T] \quad (1.11)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C} : (\boldsymbol{\epsilon} - \alpha_{th}(T - T_{ref})\mathbf{I}) \quad (1.12)$$

dove:

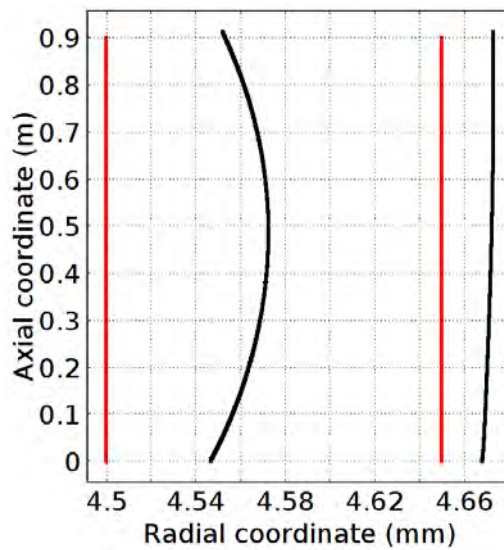
- $\rho$  è la densità del materiale;
- $\mathbf{s}$  è il vettore degli spostamenti;
- $\boldsymbol{\sigma}$  è il tensore degli sforzi di Cauchy;
- $\boldsymbol{\epsilon}$  è il tensore delle deformazioni;
- $\mathbf{C}$  è la matrice di rigidità;
- $\alpha_{th}$  è il coefficiente lineare di espansione termica.

Il coefficiente di espansione termica, come il modulo di Young e il coefficiente di Poisson (utilizzati per calcolare la matrice di rigidità  $\mathbf{C}$  sotto l'ipotesi di materiale isotropo) non vengono fatti dipendere dalla temperatura per semplificare la soluzione del problema. Le pastiglie di combustibile sono modellizzate come un'unica struttura continua, non prendendo in considerazione fenomeni come l'insorgenza di cricche, l'irraggiamento indotto, lo scorrimento viscoso o altri effetti meccanici.

Grazie alla tecnica di "moving mesh", è possibile distorcere dinamicamente la griglia di calcolo in modo che le deformazioni meccaniche inducano una ridefinizione della geometria ad ogni passo temporale. I principali "feedbacks" ottenuti sugli altri moduli sono la riduzione della resistenza termica dell'intercapedine e l'espansione del combustibile come retroazione neutronica.

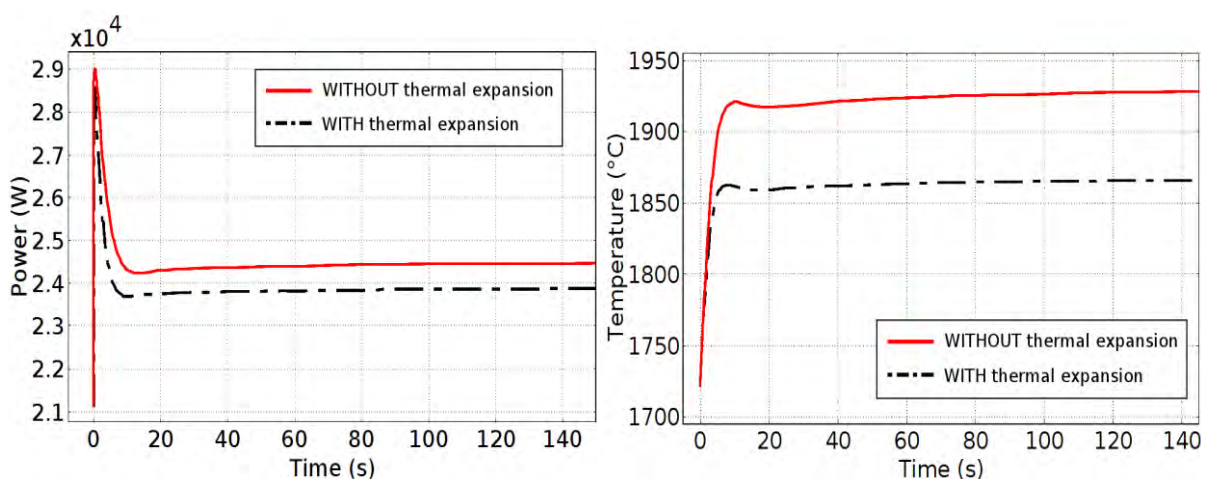
In Figura 10 è rappresentato il risultato di un'analisi statica ottenuta con il presente modello: si può vedere il raggio esterno del combustibile e il raggio interno della guaina a temperatura ambiente (linea rossa) e a piena potenza (linea nera). Si può notare come grazie a questa analisi,

è possibile descrivere la lunghezza dell'intercapedine a diverse quote e la variazione di questa in funzione della dilatazione dei materiali.



**Figura 10: Analisi statica, raggio esterno combustibile e raggio interno guaina in funzione della coordinata assiale (a temperatura ambiente, linea rossa, e in condizioni nominali di piena potenza, linea nera).**

In Figura 11 e 12 viene proposto il risultato di due transitori dinamici, un'inserzione di 80 pcm di reattività e un aumento di 35 °C della temperatura di ingresso del termovettore. Nelle figure a sinistra viene rappresentata la potenza mentre in quelle a destra la temperatura di picco nel combustibile. Si può notare la differenza nella risposta dinamica del sistema quando si considerano le espansioni termiche ottenute con il modello termoelastico e quando invece vengono trascurate.



**Figura 11: Risposta dinamica del sistema a seguito di un inserzione di 80 pcm di reattività: a sinistra la potenza, a destra la temperatura di picco del combustibile.**

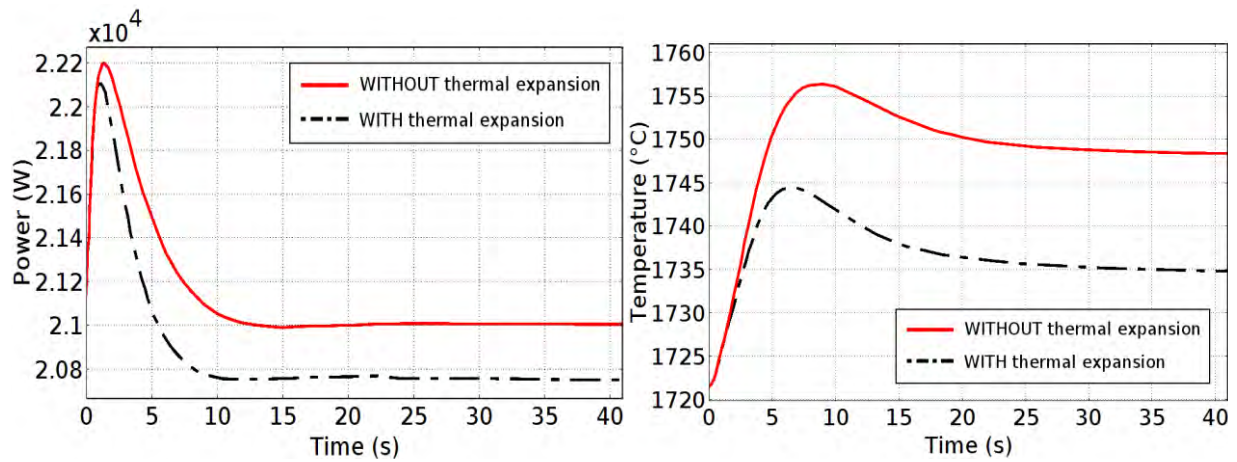


Figura 12: Risposta dinamica del sistema a seguito di un aumento di 35°C della temperatura di ingresso del termovettore: a sinistra la potenza, a destra la temperatura di picco del combustibile

## Nomenclatura

$a_0$ $a_1$ $a_2$	coefficienti equazione 1.3
$c_i$	concentrazione dei precursori dell'i-esimo gruppo
$C_p$	calore specifico
$C_{\epsilon 1}$	costante empirica modello k- $\epsilon$
$C_{\epsilon 2}$	costante empirica modello k- $\epsilon$
$C_\mu$	costante empirica modello k- $\epsilon$
$D$	Coefficiente di diffusione neutronica
$f_{g,i}$	frazione dei neutroni ritardati della i-esima famiglia emessi nell'g-esimo gruppo
$\mathbf{F}$	forze di volume
$\mathbf{I}$	matrice identità
$k$	energia cinetica turbolenta
$K$	conducibilità termica
$K_T$	conducibilità termica turbolenta
$p$	pressione fluido
$Pe$	numero di Peclet
$Pr_T$	numero di Prandtl turbolento

$Q$	sorgente potenza termica
$T$	temperatura
$\mathbf{u}$	vettore velocità del termovettore
$v$	velocità neutroni
$\beta$	frazione totale neutroni ritardati
$\beta_i$	frazione neutroni ritardati i-esimo gruppo
$\varepsilon$	rateo di dissipazione turbolenta
$\eta$	viscosità dinamica
$\eta_T$	viscosità turbolenta
$\lambda_i$	costante decadimento i-esimo precursore
$\nu$	numero medio di neutroni per evento di fissione
$\rho$	densità
$\sigma_\varepsilon$	costante empirica modello k- $\varepsilon$
$\sigma_k$	costante empirica modello k- $\varepsilon$
$\Sigma$	sezione d'urto
$\varphi$	flusso neutronico
$\chi_g$	frazione dei neutroni di fissione che nasce nel g-esimo gruppo

## 4. Conclusioni

In questo documento sono state poste le basi per la definizione delle caratteristiche richieste ad un modulo di termomeccanica all'interno di un codice multifisico di dinamica tridimensionale per reattori termici. Dopo aver descritto le fenomenologie fisiche che dovrebbero essere presenti in un nocciolo di reattore, sono state analizzate le varie interazioni tra il modulo in esame e gli altri moduli di neutronica e termoidraulica, mettendo in luce i dati richiesti e forniti dalla termomeccanica. Sulla base di queste informazioni, si è proceduto alla progettazione concettuale del modulo attraverso un approccio "a blocchi", in cui si evidenziano i compiti delle varie subroutine all'interno del modulo (calcolo delle temperature, degli sforzi, delle deformazioni ecc.) e le connessioni presenti.

Nella seconda parte del documento sono stati presentati alcuni potenziali codici per la realizzazione del modulo di termomeccanica; alcuni sono disponibili commercialmente (ANSYS<sup>®</sup>, ABAQUS), altri sviluppati da istituti di ricerca all'interno di codici accoppiati (FRED all'interno di FAST, DEFORM4 all'interno di SAS4A) e infine è stato fornito un esempio di modulo di termoelasticità inserito in un codice sviluppato ad hoc in un unico ambiente di calcolo.

## Bibliografia

- [1] [http://www.simulia.com/products/abaqus\\_fea.html](http://www.simulia.com/products/abaqus_fea.html)
- [2] R. L. Williamson, D. A. Knoll. “*Enhancing the ABAQUS Thermomechanics Code to Simulate Steady and Transient Fuel Rod Behavior*”. Proceedings of Top Fuel 2009. Paris, France, September 6-10, 2009, Paper 2072.
- [3] R. L. Williamson. “*Enhancing the ABAQUS thermomechanics code to simulate multipellet steady and transient LWR fuel rod behavior*”. Journal of Nuclear Materials 415 (2011) 74–83.
- [4] <http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Structural+Mechanics/ANSYS+%20Mechanical>
- [5] KTH, Department of Solid Mechanics. “*Introduction to a finite element analysis program: ANSYS*”.
- [6] “*ANSYS<sup>®</sup> mechanical APDL coupled-field analysis guide*”. ANSYS, Inc. SouthPointe 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.
- [7] “*ANSYS<sup>®</sup> mechanical APDL Programmer’s manual*”. ANSYS, Inc. SouthPointe 275 Technology Drive, Canonsburg, PA 15317.
- [8] K. Mikityuk et al. “*FAST: An advanced code system for fast reactor transient analysis*”. Annals of Nuclear Energy 32 (2005) 1613–1631
- [9] K. Mikityuk et al. “*FAST Code System: Review of Recent Developments and Near-Future Plans*”. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, October 2010, Vol. 132/102915.

- [10] L. Luzzi, A. Cammi, V. Memoli. “*The Multi-Physics Approach Applied to the Modelling and Analysis of the Generation IV Lead Fast Reactor*”. Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, 2011, pp. 1-43.
- [11] M. Aufiero, A. Cammi, C. Fiorina, L. Luzzi. “*Development of a single-channel multi-physics model for lead fast reactors*”. Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe 2011, Bovec, Slovenia, Sept.12-15, 2011.
- [12] COMSOL Multiphysics<sup>®</sup> 4.1, User’s Guide, COMSOL Inc., 2010.
- [13] A. Cammi, V. Di Marcello, L. Luzzi, V. Memoli. “*The Multi-Physics Modelling Approach Oriented to Safety Analysis of Innovative Nuclear Reactors*”. In: M. J. Acosta, (Ed.), *Advances in Energy Research*, Vol. V, Nova Science Publishers, Hauppauge, NY, 2011, pp. 171-214.