

# UNIVERSITÀ DI PISA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA

TESI DI LAUREA IN  
**INGEGNERIA NUCLEARE**

*Severe Accident Phenomena and  
Application of In-Vessel Retention Strategy to the  
International Reactor Innovative and Secure (IRIS):  
abstract*

RELATORI

Prof. Ing. *Francesco Oriolo*

Prof. Ing. *Sandro Paci*

Dott. Ing. *Mario Carelli*

Dott. Ing. *Lawrence E. Conway*

Dott. Ing. *Luca Oriani*

IL CANDIDATO

*Antonio Sanna*

Anno Accademico 2003-2004

## INDICE

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>3</b>
<b>1. CRITERI DI SUCCESSO DELL'IVR: MODI DI ROTTURA DEL VESSEL .....</b>	<b>6</b>
<b>2. RISK ORIENTED ACCIDENT ANALYSIS METHODOLOGY .....</b>	<b>9</b>
2.1. MODELLO DI CALCOLO.....	9
2.2. ELABORAZIONE DEI DATI .....	11
<b>3. ANALISI DEL REATTORE AP1000 .....</b>	<b>13</b>
3.1. INPUT PDFS .....	14
3.2. RISULTATI PER L'AP1000 .....	16
<b>4. ANALISI DEL REATTORE IRIS .....</b>	<b>17</b>
4.1. TRANSITION CASE.....	18
4.2. NATURAL CASE.....	20
4.3. ULPU CASE.....	22
4.4. POWER CASE.....	23
<b>5. CONCLUSIONI.....</b>	<b>24</b>

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION  
STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

## INTRODUZIONE

Nel 1975 fu pubblicato il primo significativo studio, il Reactor Safety Study WASH 1400, con lo scopo di rivalutare l'evoluzione e le conseguenze di una serie di incidenti ipotizzati che potessero condurre al danneggiamento ed alla fusione del core, con significativi rilasci all'esterno del contenimento. I risultati mostravano che la politica di sicurezza degli Stati Uniti doveva essere riesaminata.

In seguito all'incidente di TMI-2 nel 1979 fu valutata l'importanza delle sequenze incidentali che esulavano dagli incidenti base di progetto; questi erano supposti inverosimili in quanto l'associata probabilità di accadimento era al di sotto dei limiti stabiliti nella fase di Licensing.

L'incidente di Three Mile Island portò ad una nuova concezione delle sequenze incidentali, dimostrando che

- sequenze considerate precedentemente irrilevanti ai fini della sicurezza potevano divenire cause iniziatrici di sequenze severe;
- in presenza di un contenimento adeguatamente progettato, le conseguenze della fusione del core potevano essere limitate ai confini dell'impianto.

L'incidente di Chernobyl incrementò lo stato di tensione legato alla gestione ed alla considerazione delle sequenze incidentali severe durante la fase di Licensing.

A partire da questi incidenti, dunque, è sorta la necessità di un sistema o di una strategia per limitare le conseguenze degli incidenti severi.

### ***In-Vessel Retention Strategy***

L'approccio adottato nei reattori avanzati di tipo Westinghouse per minimizzare i rilasci radioattivi verso l'ambiente in seguito ad un incidente severo (definito come una sequenza di eventi che risulta nella fusione di una rilevante frazione del core), è quello di trattenere i composti radioattivi fusi all'interno del Reactor Pressure Vessel (RPV), che costituisce la prima barriera di protezione per il personale e la popolazione contro una significativa contaminazione. Questo approccio è comunemente indicato con il nome di In-Vessel Retention

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION  
STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

(IVR) strategy, ed è comune agli impianti passivi di tipo avanzato Westinghouse, cioè AP600, AP1000 e IRIS.

La rottura del vessel potrebbe infatti causare il riversamento e la distribuzione della massa fusa nel contenimento: in questo caso sarebbe necessario analizzare una serie di fenomeni (Core-Concrete Interaction, Ex-Vessel Steam Explosion, High Pressure Melt Ejection), nei vari scenari possibili. Tali fenomeni, detti “ex-vessel phenomena”, dipendono dalla geometria della reactor cavity e dalla massa fusa riversante. Se è presente acqua nella cavity, potrebbe verificarsi una esplosione di vapore, in grado di compromettere l’integrità del contenimento causando il rilascio di prodotti radioattivi nell’ambiente; d’altra parte, se la quantità di acqua contenuta nella cavity è ridotta, si potrebbe avere una rapida evaporazione, con successiva interazione della massa fusa con le strutture esterne al vessel: questo fenomeno porterebbe alla generazione di gas non-condensabili, come H<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub>, suscettibili di causare una rapida pressurizzazione del contenimento.

La filosofia adottata dalla Westinghouse per la gestione degli incidenti severi, alla base dell’IVR strategy, consiste quindi nel confinare la massa fusa all’interno del Reactor Vessel, al fine di evitare la circolazione e l’interazione della massa fusa con l’ambiente del contenimento. Deve però essere notato che questo tipo di approccio non è stato adottato da tutte le compagnie produttrici di impianti nucleari, e non è stato completamente accettato dal “regulatory body” negli Stati Uniti.

Le limitazioni di questa strategia risiedono, infatti, nelle assunzioni supposte per il successo dell’IVR:

- il sistema primario deve essere ormai completamente depressurizzato quando avviene la rilocalizzazione;
- la cavity è allagata fino all’altezza del suolo, in modo da garantire la rimozione del calore di decadimento attraverso la parete esterna del vessel;
- la geometria della cavity e i sistemi di emergenza garantiscono una sufficiente ricircolazione dell’acqua all’interno della cavity stessa e l’efflusso del vapore prodotto nel contenimento per poter essere ricondensato;
- la superficie esterna del vessel nella zona del lower head è tale da non interferire con la refrigerazione.

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

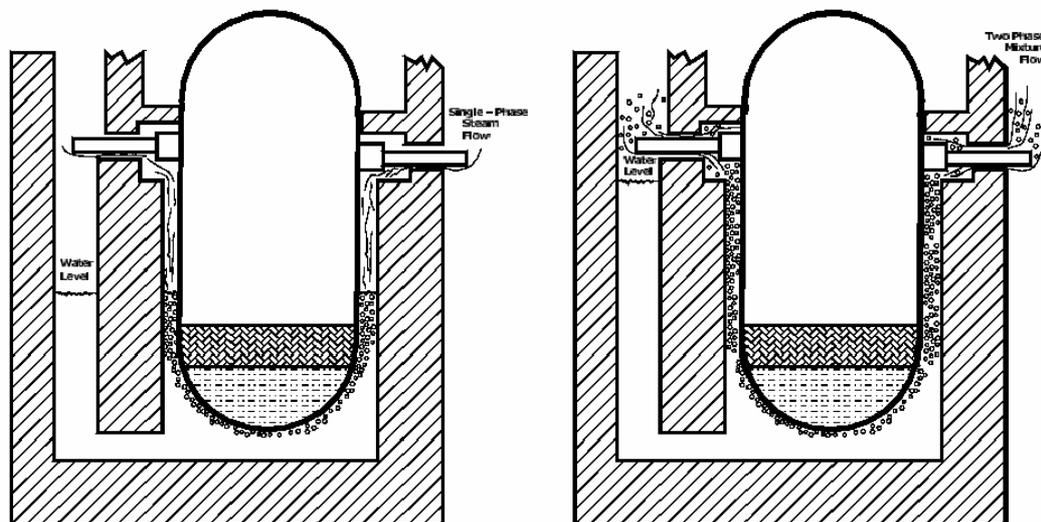
ABSTRACT

### Obiettivo della tesi

Nei precedenti reattori di tipo Westinghouse nei quali l'IVR strategy è stata adottata, due differenti soluzioni sono state applicate:

- AP600

La soluzione adottata in questo caso prevede la circolazione naturale dell'acqua; la particolare geometria garantisce che se il livello dell'acqua raggiunge il livello previsto, si crea un flusso bifase, che aumenta il coefficiente di scambio termico e garantisce la totale rimozione del calore di decadimento attraverso la parete esterna del vessel.

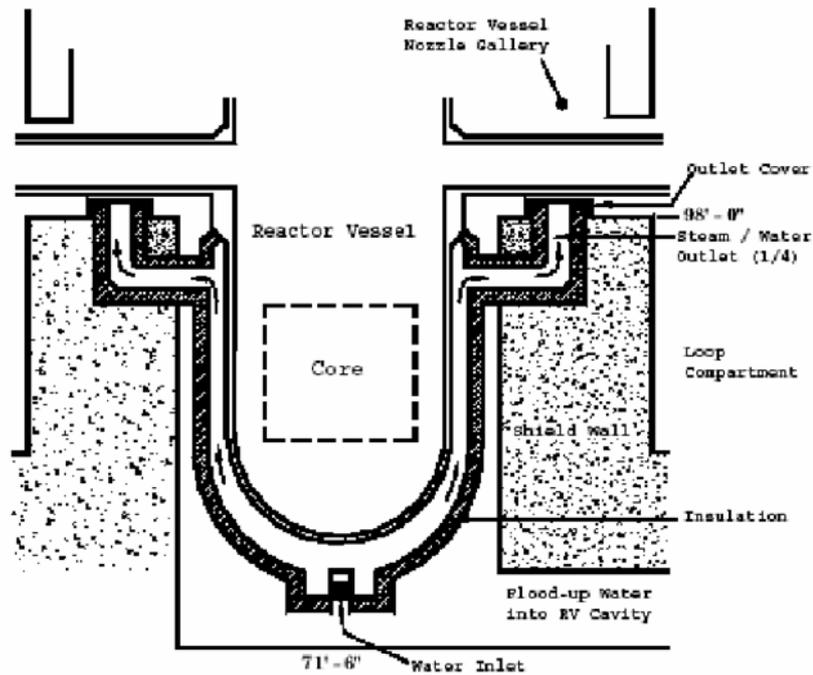


- AP1000

La circolazione è in questo caso di tipo assistito, in quanto è previsto un sistema volto ad aumentare la velocità delle bolle di vapore a contatto con la parete, migliorando il meccanismo di scambio termico; questo sistema (*insulation system*) è necessario per far fronte alla maggiore potenza termica dell'impianto AP1000, che comporta un più elevato calore di decadimento.

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT



L'obiettivo di questa tesi, condotta principalmente nel corso dei 7 mesi di permanenza presso il "Westinghouse Science and Technology Department" di Pittsburgh (PA), è quindi la determinazione del sistema di ricircolazione dell'acqua all'interno della cavity più appropriato tra le due attuali soluzioni progettate per l'AP600 e l'AP1000. Il sistema scelto deve garantire la rimozione del calore di decadimento in caso di rilocazione della massa fusa nel lower head e quindi il successo dell'IVR.

## 1. CRITERI DI SUCCESSO DELL'IVR: MODI DI ROTTURA DEL VESSEL

Il sistema di circolazione dell'acqua deve essere determinato in modo da garantire il successo dell'IVR strategy, cioè garantire che il vessel non subisca rottura; gli studi effettuati da Theofanous ed altri negli esperimenti ACOPO e ULPU hanno ricondotto la rottura del vessel a due possibili cause:

1. *Crisi termica*: la rilocazione della massa fusa, *corium*, inglobante il core e le strutture di supporto nel lower head produce un notevole incremento di temperatura alla parete del vessel; il flusso termico attraverso la parete del vessel prodotto dal calore di

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

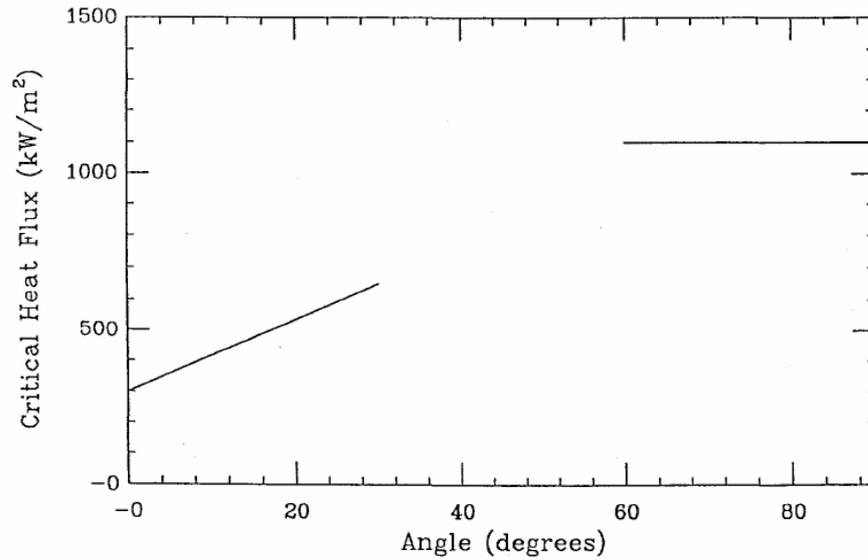
decadimento deve quindi essere smaltito tramite l'acqua circolante nella reactor cavity. Se la capacità di rimozione del calore è ridotta, l'acqua subirà una crisi termica durante la quale si raggiungerà il Critical Heat Flux (CHF), cioè il valore limite di transizione dalla rimozione del calore alla parete tramite uno strato di liquido in condizioni di ebollizione sub-nucleata, alla condizione di vapore alla parete provocando una drastica riduzione del coefficiente di scambio termico. Questo causerebbe un rapido incremento della temperatura della parete con conseguente perdita delle caratteristiche meccaniche della struttura e collasso del vessel. Se dunque il valore del flusso termico è inferiore al CHF  $\left( CHF_{FR} = \frac{CHF}{q''} > 1 \right)$ , la crisi termica è evitata.

2. *Crisi meccanica*: deve essere garantita la resistenza meccanica della struttura; lo spessore di equilibrio efficace della parete deve essere tale da supportare il peso delle strutture e del materiale fuso in esso contenuto. Lo spessore di equilibrio efficace è calcolato considerando la sola area dello spessore con temperatura al di sotto di un prefissato valore limite, oltre il quale le caratteristiche meccaniche del materiale sono considerate insoddisfacenti.

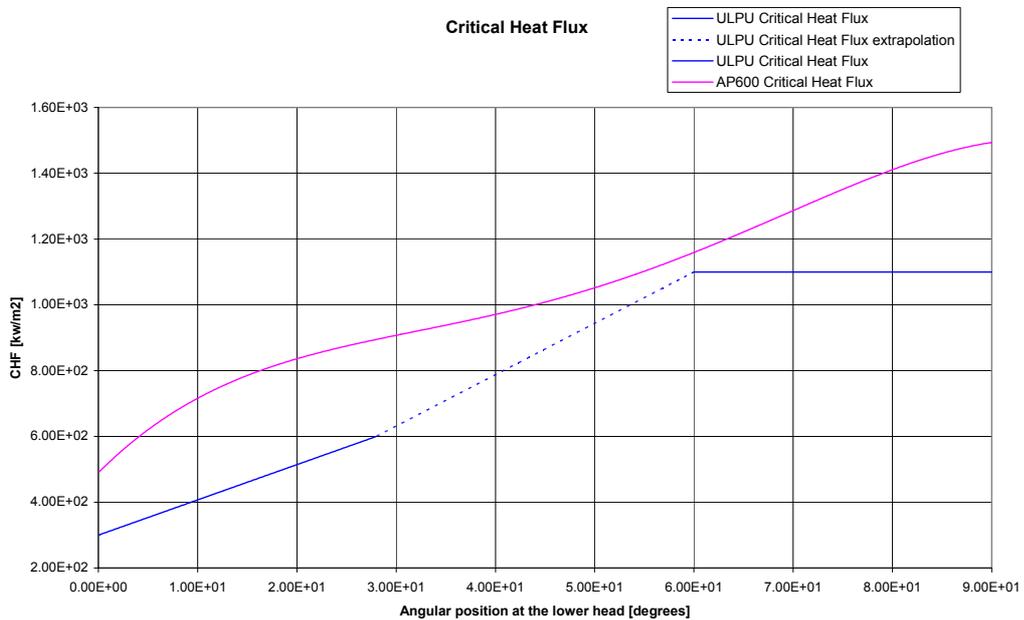
Il confronto dei criteri di rottura permette di concludere che se la crisi termica è evitata, la crisi meccanica non può comunque avere luogo, in quanto i valori limite imposti dal primo criterio risultano essere notevolmente più stringenti di quelli imposti dal secondo criterio.

Il valore del CHF per l'acqua contenuta nella cavity, è valutato tramite i risultati ottenuti negli esperimenti ULPU e ACOPO. Sono state usate tre differenti correlazioni secondo il tipo di circolazione:

1. *Assenza di circolazione*: questa correlazione, mostrata in figura, è stata ricavata sperimentalmente durante gli esperimenti ULPU, e prevede che l'acqua sia in condizione di ebollizione sub-nucleata; i gradienti termici non sono comunque in grado di generare moti circolatori naturali macroscopici.



2. *Circolazione naturale*: questo modello prevede che l'acqua sia posta in movimento dai soli gradienti di temperatura. I valori sperimentali ottenuti sono mostrati in figura dove sono confrontati con i valori del CHF in assenza di circolazione. Tale correlazione è stata usata per simulare la rimozione del calore per l'AP600.



SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

3. *Circolazione assistita*: questo modello prevede che l'acqua sia posta in movimento dai gradienti di temperatura, ma che la sua velocità sia incrementata dalla particolare geometria della struttura (*insulation system*).

La correlazione è identica a quella usata in caso di circolazione naturale, ma incrementata di un fattore 1.3, tranne che sul fondo del lower head, dove il fattore di moltiplicazione è pari a 1.2. tale correlazione è stata usata per descrivere il CHF per un reattore AP1000 dotato di insulation system.

La verifica dei criteri di rottura è quindi limitata alla verifica del Critical Heat Flux Ratio

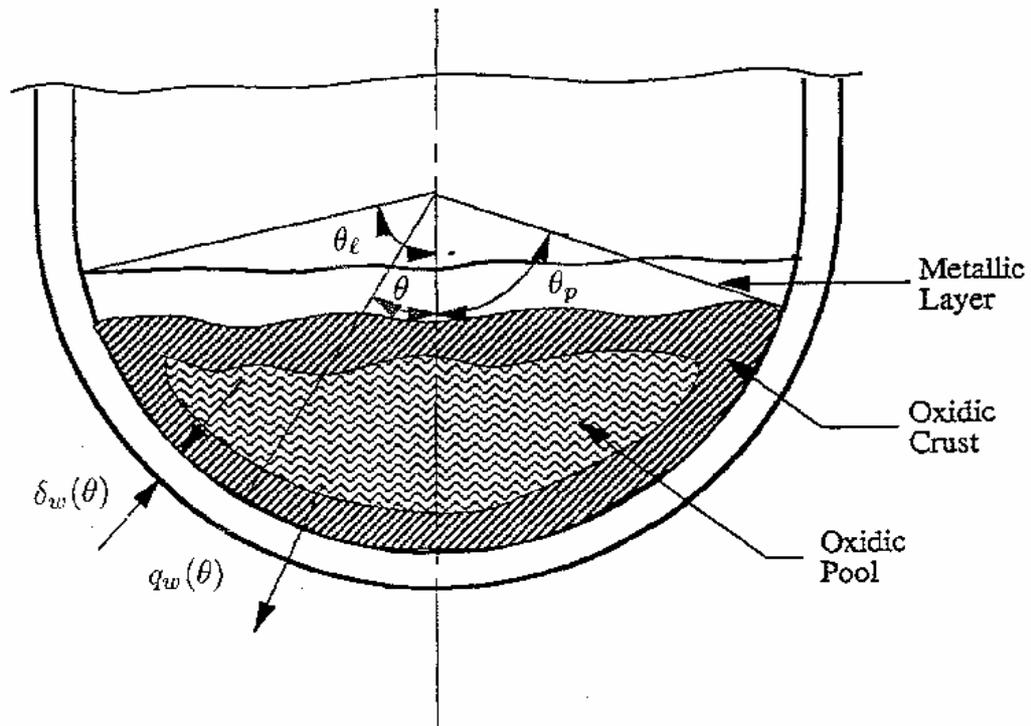
$\left( CHF_{FR} = \frac{CHF}{q''} \right)$ , il cui valore minimo deve essere pari a 1, in modo che il valore del CHF

risulti, per ogni posizione angolare, maggiore del flusso termico alla parete ( $q''$ ).

## 2. RISK ORIENTED ACCIDENT ANALYSIS METHODOLOGY

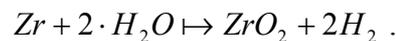
### 2.1. *Modello di calcolo*

Come descritto precedentemente, il criterio necessario per garantire il successo dell'In-Vessel Retention Strategy consiste nel verificare che il flusso termico alla parete sia minore del flusso termico critico (CHF). Il flusso termico alla parete è determinato attraverso una procedura semi-probabilistica, detta ROAAM (Risk Oriented Accident Analysis Methodology), il cui scopo è il calcolo di stabilite Probability Density Functions (PDFs).



La rilocazione del corium nel lower head, alla fine del transitorio, conduce alla stratificazione della massa fusa; possono essere individuate due distinte zone:

- *regione degli ossidi*: è principalmente composta di ossido di uranio ed ossido di zirconio; questo è prodotto durante lo scoprimento del core durante la violenta reazione esotermica tra lo Zircaloy e il vapore ad elevata temperatura:



Durante questa reazione è prodotto anche idrogeno allo stato gassoso, che potrebbe risultare esplosivo in presenza di idrogeno; per questa ragione, il contenimento di IRIS è stato inertizzato con azoto gassoso, incapace di reagire in forma esplosiva con l'idrogeno. La regione degli ossidi è composta di una zona centrale di materiale fuso, dove sono raggiunte elevatissime temperature, e di una zona periferica allo stato solido, detta *crosta*, la quale crea una barriera protettiva per il vessel. La regione degli ossidi occupa la regione inferiore del lower head.

- *strato metallico*: al di sopra della regione degli ossidi si trova lo strato metallico, composto principalmente dallo zirconio inossidato e dal metallo delle strutture fuse durante la rilocazione. Il suo spessore ha un notevole interesse in quanto influenza

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

notevolmente il *focusing effect*: il calore di decadimento generato nella regione degli ossidi è rimosso principalmente attraverso la crosta superiore, trasferendo quindi il calore allo strato metallico che provvederà a smaltirlo, attraverso la superficie superiore (per convezione, se l'acqua all'interno del vessel non è ancora completamente evaporata, o per irraggiamento, in caso contrario) e principalmente attraverso la parete del vessel all'acqua contenuta nella cavity. Se lo strato metallico ha un volume ridotto (e quindi un'altezza ridotta), il flusso termico alla parete aumenterà, in quanto distribuito su una superficie ridotta; la concentrazione di tensioni dovuta alla riduzione di spessore dello strato metallico è detta *focusing effect*.

## 2.2. *Elaborazione dei dati*

La metodologia ROAM combina due differenti approcci, in modo da sviluppare un'analisi semi-probabilistica:

- *analisi deterministica*: esegue una valutazione deterministica dei dati inseriti come valori specifici, sulla base di correlazioni termo-fluidodinamiche non accessibili alla consultazione;
- *elaborazione probabilistica dei dati*: esegue una elaborazione dei dati probabilistici in ingresso, in modo da creare i valori specifici necessari per l'analisi deterministica, ed i cui risultati sono nuovamente rielaborati in forma statistica.

Tale tipo di approccio è reso necessario dalla presenza di un'ampia gamma di possibili sequenze di incidenti severi.

I dati in ingresso sono raggruppati in due categorie:

- *dati deterministici*: comprendenti tutti i valori geometrici e termo-fluidodinamici necessari per l'analisi;
- *dati probabilistici* (input PDFs):
  - *final bounding state timing PDF*: è introdotta per tenere in considerazione dell'incertezza associata al tempo in cui è ultimata la rilocazione e la configurazione finale è raggiunta; ad essa è associato il calore di decadimento sviluppato nella regione degli ossidi, e quindi il flusso termico alla parete;

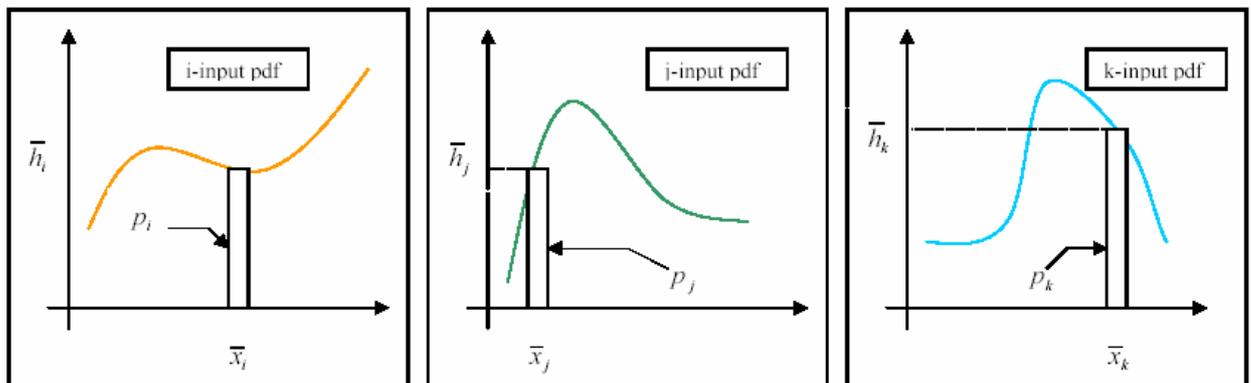
- Zirconium oxidation fraction PDF: tiene conto della incertezza sul grado di danneggiamento delle barre di zircaloy; essa influenza principalmente la quantità di zirconio nella regione degli ossidi e nello strato metallico;
- Steel mass PDF: valuta statisticamente la quantità di metallo che fonde e riloca nel lower head, posizionandosi al di sopra della regione degli ossidi.

Tutti gli altri valori suscettibili di incertezza sono stati introdotti come valori limite, in modo da sviluppare un'analisi conservativa.

I principali dati in uscita (output PDFs) elaborati dal programma sono:

- altezza della regione degli ossidi a partire dal fondo del vessel;
- altezza dello strato metallico a partire dalla superficie di interfaccia ossido-metallo;
- potenza termica volumetrica di decadimento;
- inverso del CHF in nella regione degli ossidi a diverse posizioni angolari;
- inverso del CHF nello strato metallico in condizioni di normale funzionamento;
- inverso del CHF nello strato metallico in condizioni adiabatiche.

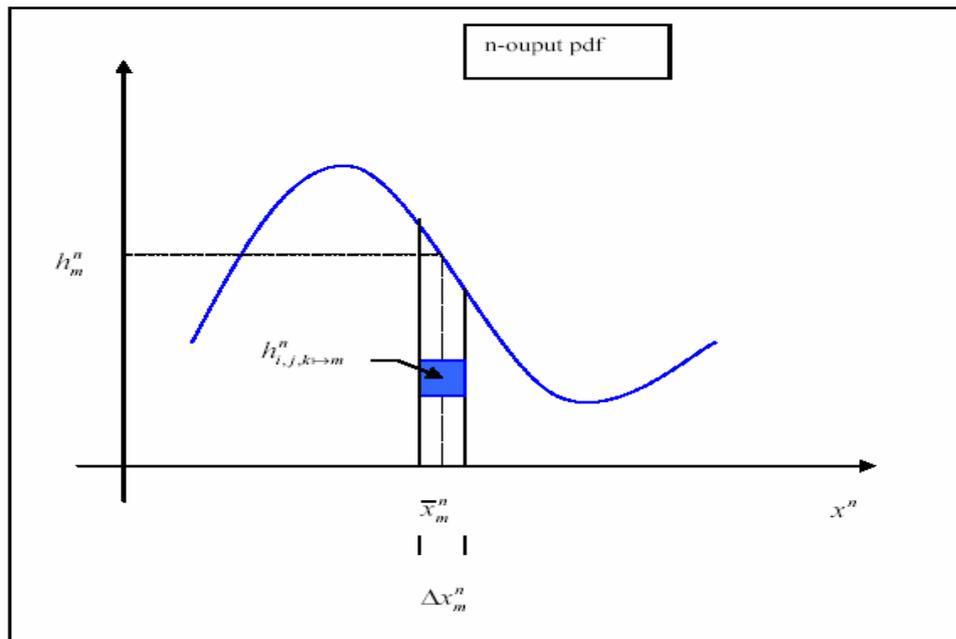
La metodologia ROAAM crea una serie di condizioni iniziali per l'analisi deterministica. Le tre PDFs usate come dati in ingresso (input PDFs) sono suddivise in una serie di intervalli, a ciascuno dei quali è associato un valore medio ed una probabilità media; il primo è introdotto nell'analisi deterministica, al fine di calcolare la configurazione associata a tali condizioni iniziali.



Tali distribuzioni costituiscono i dati in ingresso per la verifica del successo dell'IVR strategy.

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT



I dati in uscita, cui è associata una certa probabilità calcolata tramite le probabilità medie dei dati in ingresso, sono poi elaborati per ottenere distribuzioni probabilistiche dei valori in uscita (output PDFs).

### 3. ANALISI DEL REATTORE AP1000

L'analisi dei risultati ottenuti per il reattore AP1000 permette di ottenere un modello di confronto, su cui basarsi al fine di identificare gli effetti delle varie modifiche ed innovazioni introdotte nel reattore IRIS. Le "input PDFs" usate per IRIS modificano solo in parte le corrispondenti PDFs utilizzate per l'AP1000, dal momento che la corretta determinazione delle PDFs è successiva al completamento del Probabilistic Risk Assessment (PRA), non ancora ultimato per IRIS.

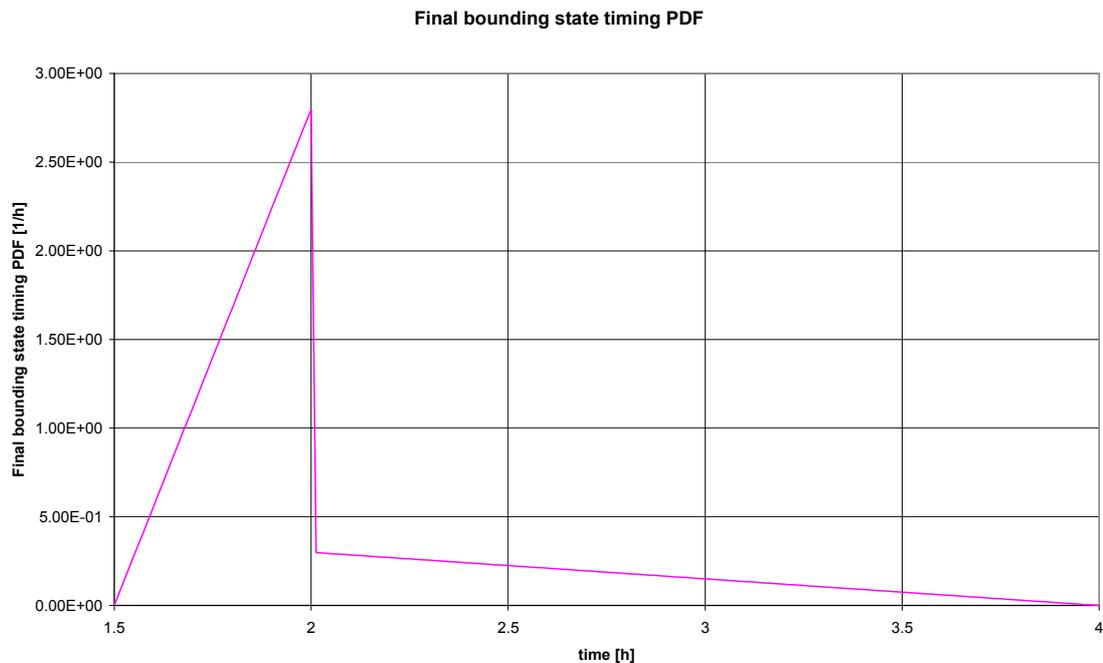
Tale analisi risulta essere dunque notevolmente conservativa, dal momento che i sistemi di emergenza per IRIS sono stati progettati focalizzando l'attenzione sui principi della sicurezza e della ridondanza; inoltre la maggiore quantità di acqua disponibile per la refrigerazione prima dello scoprimo del nocciolo, aumenta il tempo trascorso prima della rilocazione nel lower head, riducendo così il calore di decadimento da smaltire.

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

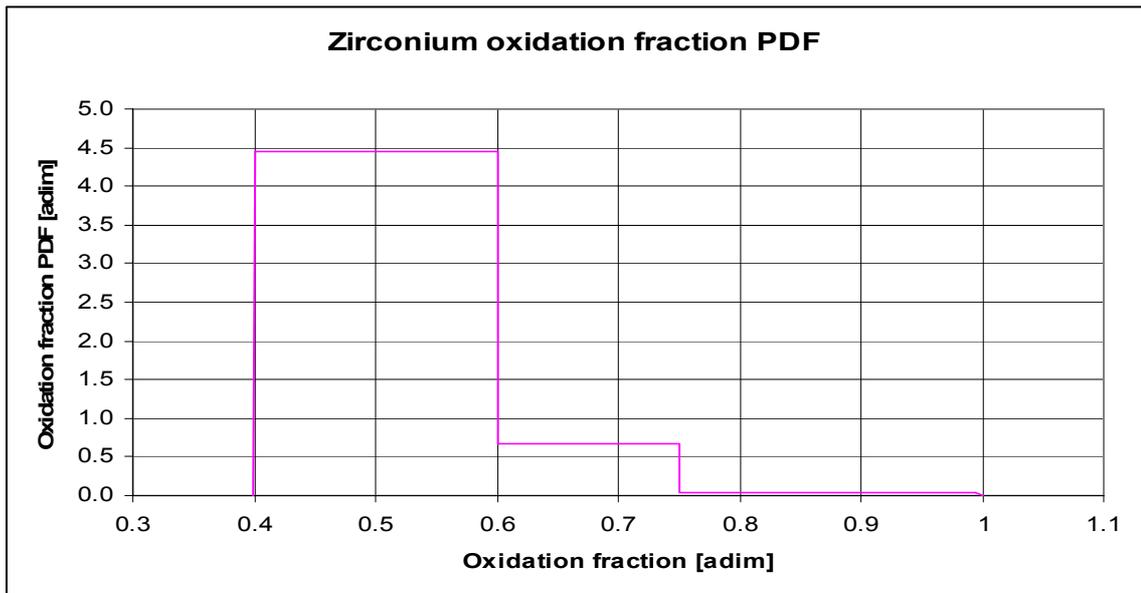
ABSTRACT

### 3.1. *Input PDFs*

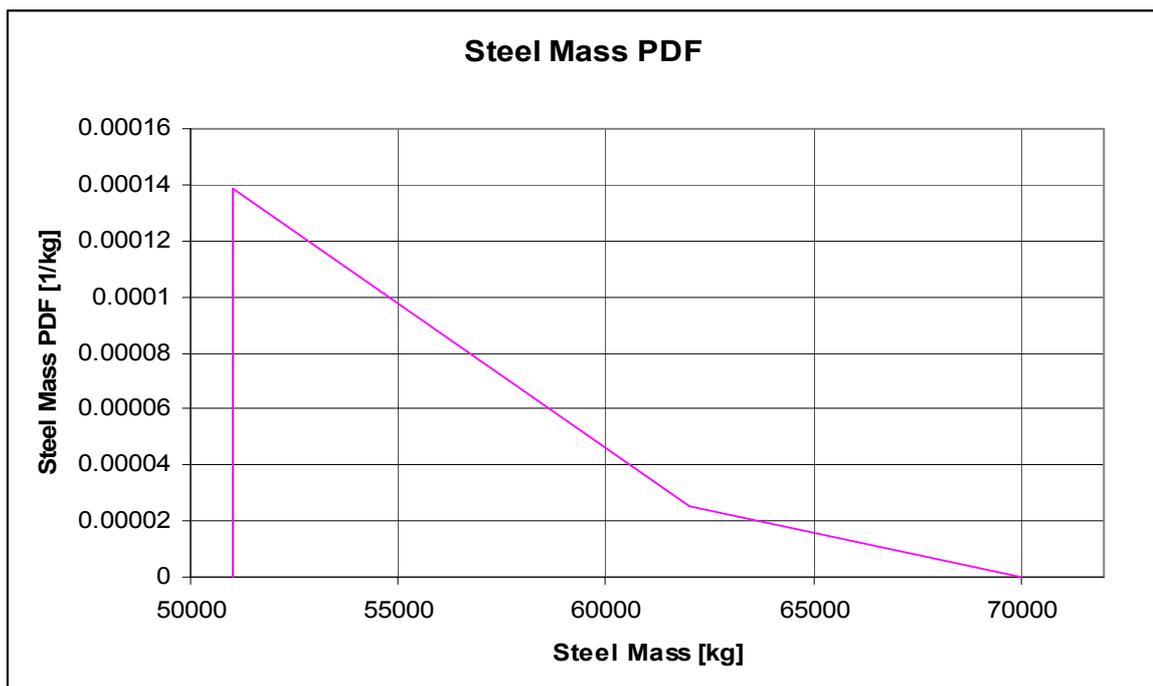
- Final bounding state timing PDF: tale PDF ipotizza che la rilocazione del corium nel lower head e lo stato stazionario siano raggiunti con probabilità pari al 70% in un tempo compreso tra i 90 ed i 120 minuti. La restante probabilità del 30% è distribuita linearmente per tenere in considerazione le sequenze incidentali più lente.



- Zirconium oxidation fraction PDF; si suppone che la frazione di barre ossidate causate dalla violenta reazione esotermica tra zircaloy e vapore ad elevata temperatura sia compresa tra il 40% e il 60% (con probabilità pari all'89%); sia compresa tra il 60% ed il 75% con probabilità pari al 10%; sia infine compresa tra il 75% ed il 100% con probabilità pari all'1%.



- Steel mass PDF; è supposta una probabilità pari al 90%, linearmente decrescente per una massa di metallo fuso compresa tra 51000 e 62000kg; è assegnata una probabilità del 10% linearmente decrescente per masse comprese tra 62000 e 70000kg.

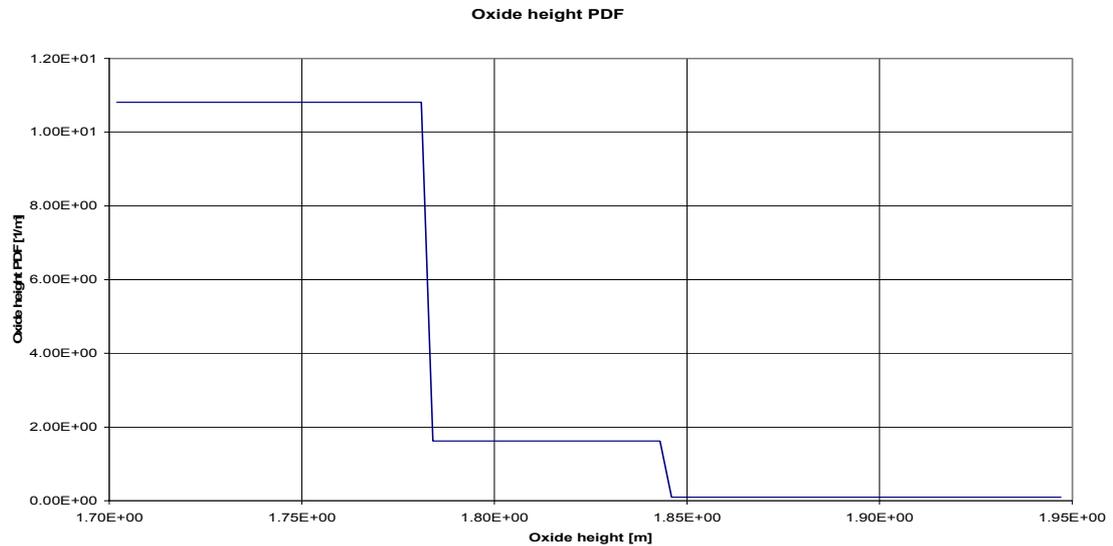


SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

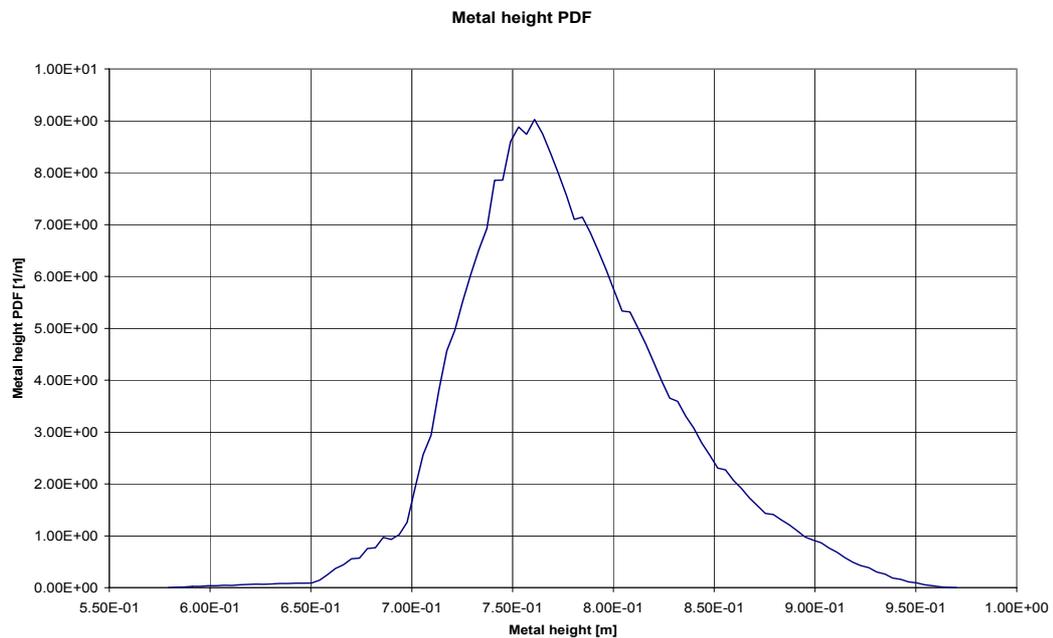
ABSTRACT

### 3.2. Risultati per l'AP1000

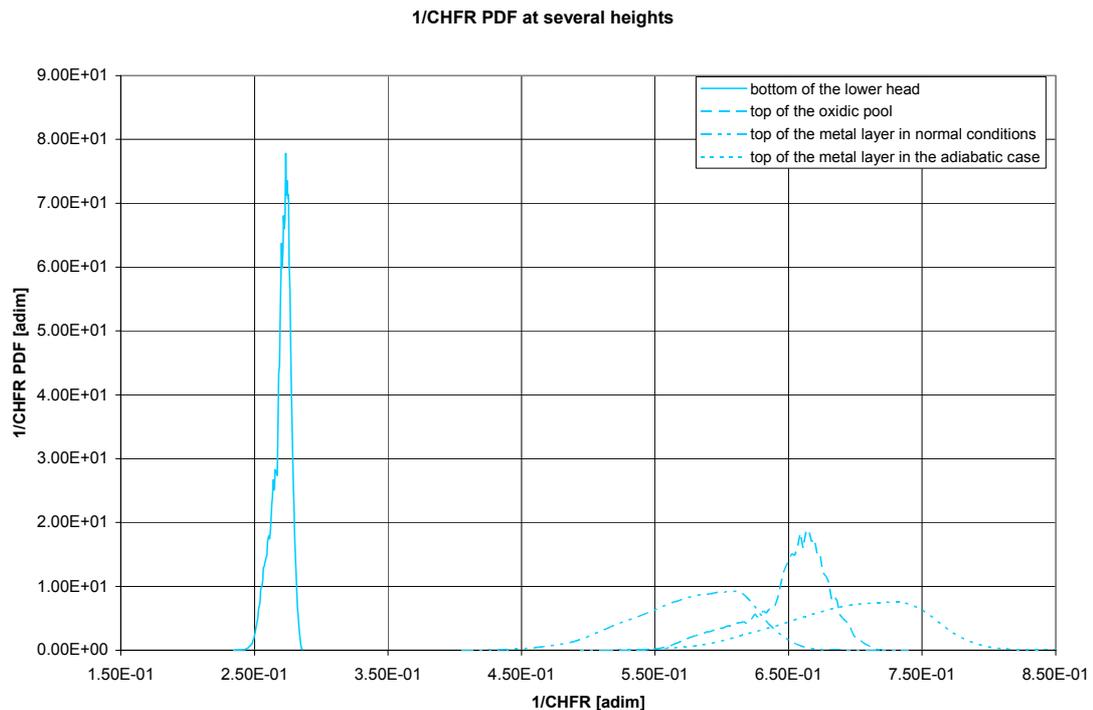
- Altezza della regione degli ossidi: tale PDF mostra un andamento del tutto simile alla PDF usata per valutare la frazione di camicie ossidate.



- Altezza dello strato metallico:



- Inverso del CHFR a diverse posizioni angolari: il valore limite del CHFR si ha all'estremità superiore dello strato metallico, sia in condizioni di normale funzionamento che in condizioni adiabatiche. Si può notare che, mentre sul fondo del vessel il CHFR ha un valore pressoché costante (l'ampiezza della curva è molto stretta), il CHFR alle altre posizioni subisce l'influenza coagente di diversi fattori, determinando una curva più piatta e di conseguenza più larga.



I valori limite necessari per la verifica della crisi termica per AP1000 sono quindi forniti dall'ultima PDF: se le condizioni adiabatiche sono supposte realistiche, il valore limite per l'inverso del CHFR è circa 0.8 ( $CHFR_{lim} \cong 1.25$ ), sensibilmente inferiore al valore critico (1.0). La crisi termica (e di conseguenza la crisi meccanica) per l'AP1000 è evitata se le condizioni necessarie per il successo dell'IVR sono rispettate.

#### 4. ANALISI DEL REATTORE IRIS

Per il reattore IRIS, sono stati studiati diversi casi, al fine di valutare gli effetti generati dalle diverse correlazioni ed assunzioni:

- Transition Case

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

- Natural Case
- ULPU Case
- Assisted Case
- Time Case
- Power case

I dati geometrici e termo-fluidodinamici sono identici per tutti i casi analizzati, così come le correlazioni utilizzate, ad eccezioni delle formule di calcolo del Critical Heat Flux, per cui le tre differenti espressioni (assenza di circolazione, circolazione naturale e circolazione assistita) sono state ipotizzate. I dati probabilistici in ingresso (input PDFs) sono state invece adattati, ove possibile, ai valori dell'IRIS,.

#### **4.1. Transition Case**

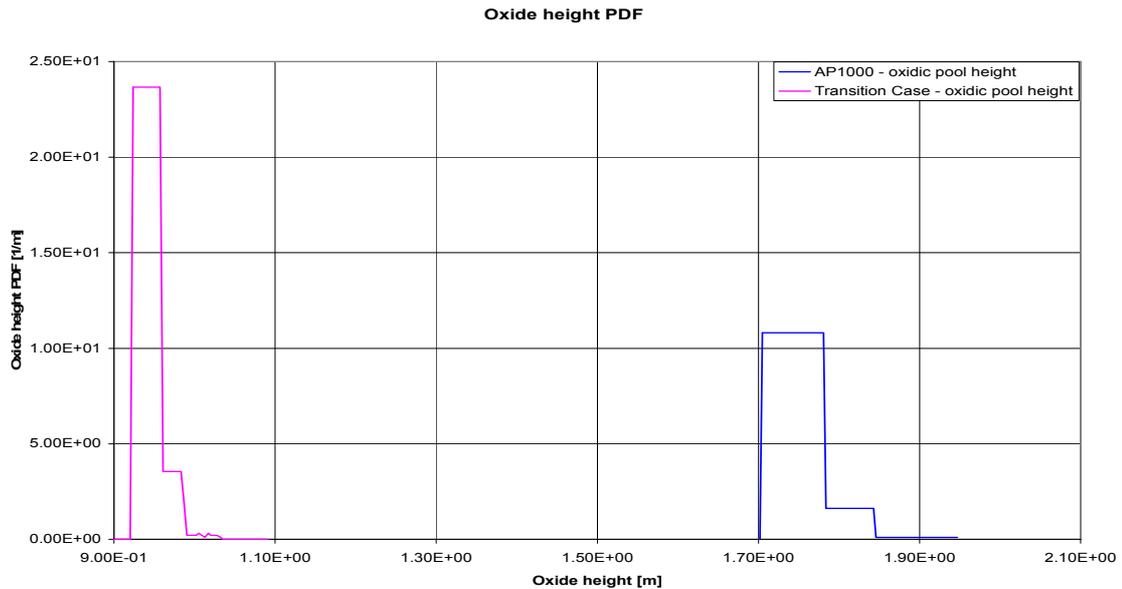
Le input PDFs sono le stesse utilizzate per l'AP1000; in particolare, la massa di metallo fuso fa riferimento ai dati dell'AP1000, creando una valutazione incorretta, il cui unico scopo è la determinazione degli effetti dovuti alla variazione dei dati geometrici e termo-fluidodinamici.

La correlazione per il calcolo del CHF è quella relativa alla circolazione naturale, del tipo usato per l'analisi nell'AP600, mentre per l'AP1000 è stata supposta una circolazione di tipo assistito.

Significative output PDFs sono quelle relative all'altezza della regione degli ossidi ed all'inverso del CHFR a diverse altezze.

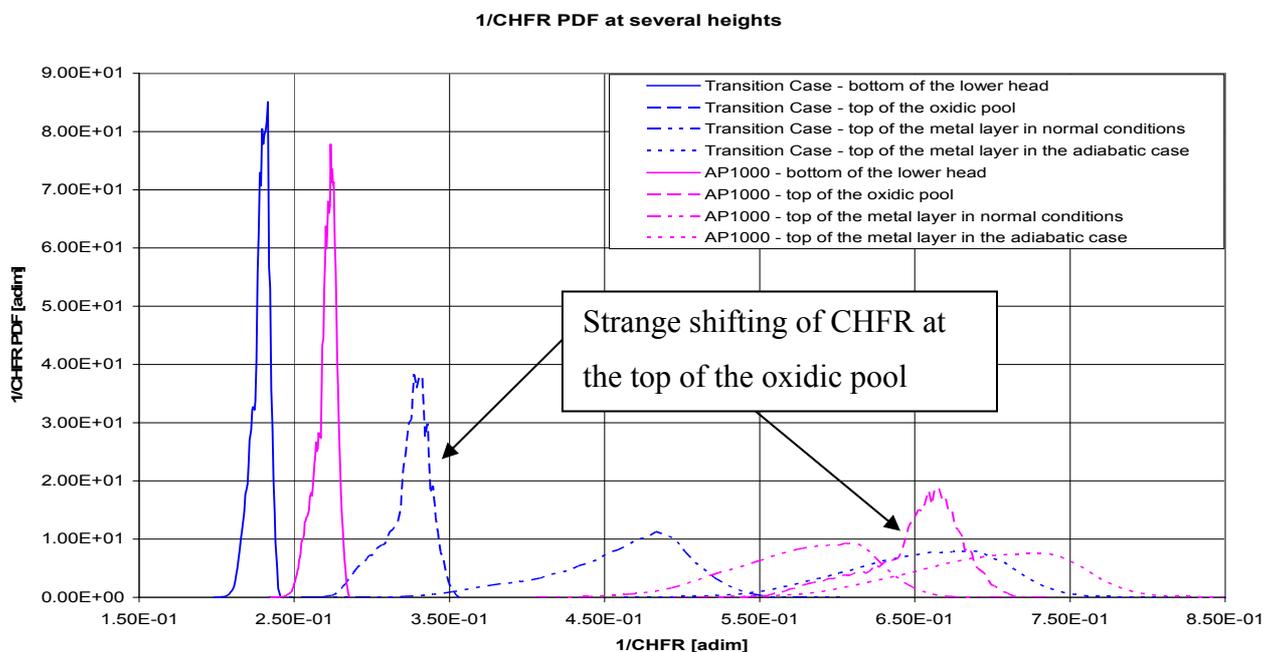
La prima mostra che le curve sono spostate verso sinistra per IRIS, indicando una riduzione dei valori; tale spostamento può essere imputato a due principali fattori:

1. incremento del raggio del lower head;
2. riduzione delle dimensioni del core.



Il secondo grafico mostra che le curve hanno subito uno spostamento verso sinistra, dovuto alle cause precedentemente indicate, ed anche alla riduzione della potenza termica del reattore, e quindi del calore di decadimento che deve essere smaltito.

Fa eccezione a tale comportamento verso sinistra la PDF relativa alla parte superiore della regione degli ossidi: mentre per l'analisi dell'AP1000 tale PDF ha valori maggiori della PDF relativa alla parte superiore dello strato metallico, per IRIS tali curve sono invertite.



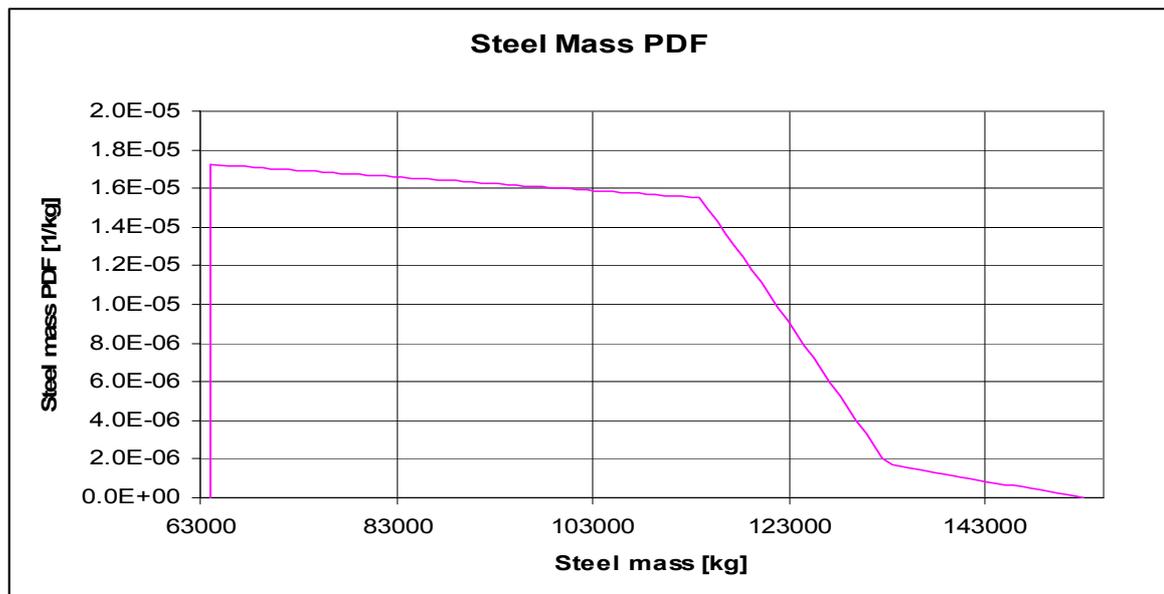
SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

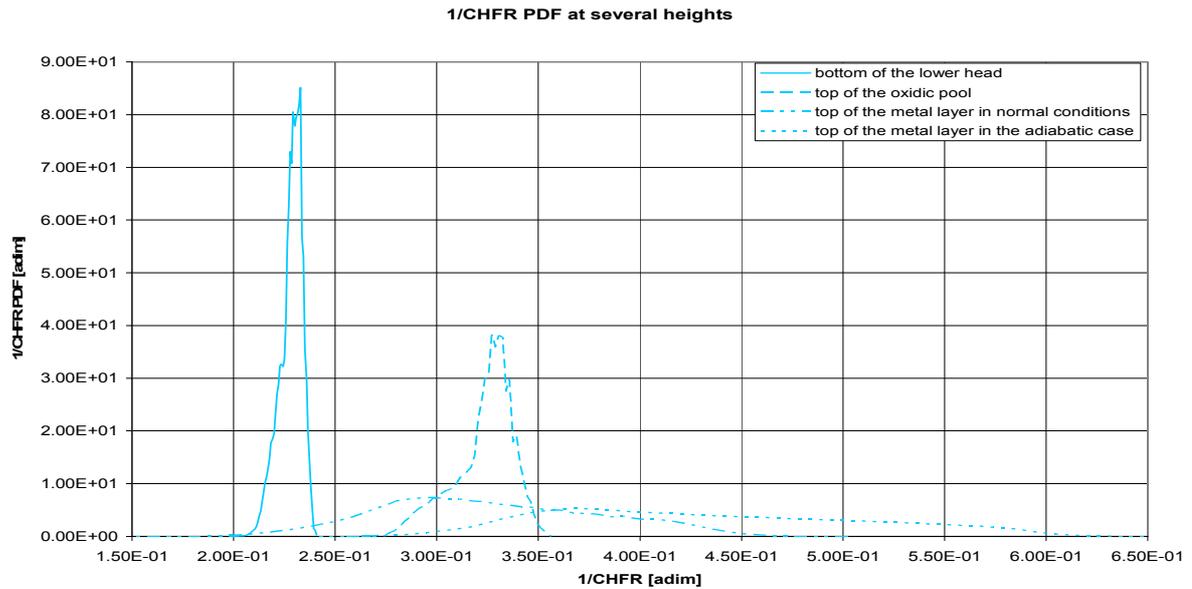
## 4.2. *Natural Case*

La correlazione per il CHF utilizzata in questa analisi è relativa alla circolazione naturale, la stessa usata nell'AP600. Le PDF ipotizzate per il tempo di rilocalizzazione e per la frazione di ossido sono identiche al caso precedente, mentre per quanto riguarda la PDF relative alla massa di metallo fusa, questa è stata determinata analizzando la differente configurazione del core e degli internals per IRIS.

È assegnata una probabilità dell'81.9% con distribuzione lineare decrescente tra 64000kg e 114000kg, per considerare la possibile fusione parziale del riflettore; una probabilità del 16.4% è assegnato per masse comprese tra 114000kg e 133000kg (che tiene in considerazione la possibile fusione del barrel); una probabilità dell'1.7% con distribuzione lineare decrescente (per valutare l'apporto degli internals posizionati al di sopra del core) per masse comprese tra 133000kg e 153000kg.



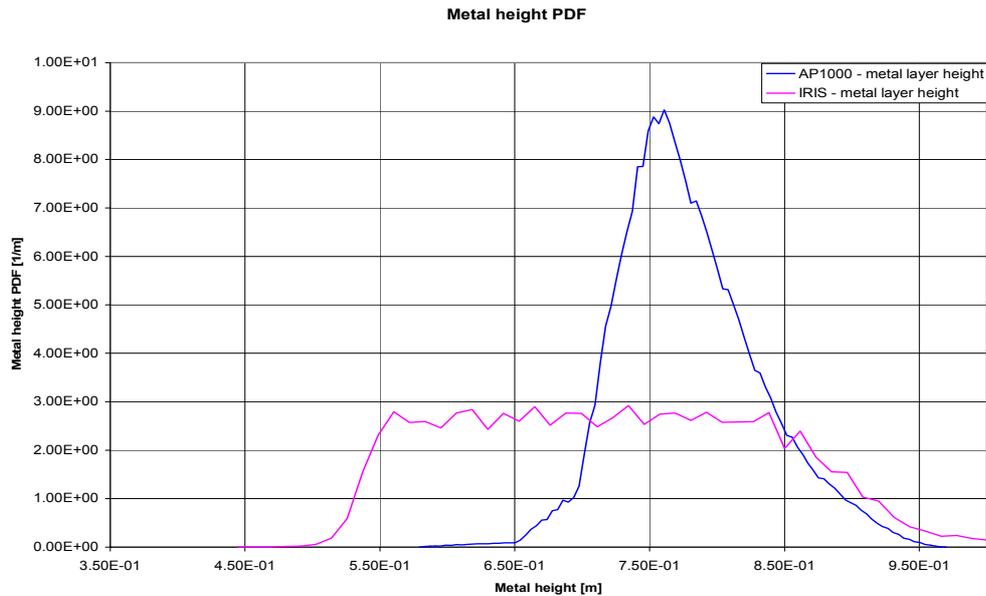
I risultati fondamentali relativi a tale caso mostrano valori dell'inverso del CHF notevolmente bassi, indicando che il rischio di insuccesso dell'IVR strategy è talmente basso da essere considerato irragionevole;



Il confronto con i casi precedenti mostra l'eliminazione del comportamento anomalo notato nel Transition Case; si nota inoltre che tutte le PDFs sono spostate verso sinistra, fornendo risultati decisamente migliori rispetto all'AP1000, benché sia stata usata la correlazione relativa alla circolazione naturale. D'interesse risulta l'analisi del confronto tra AP1000 e Natural Case relativa all'altezza dello strato metallico.

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

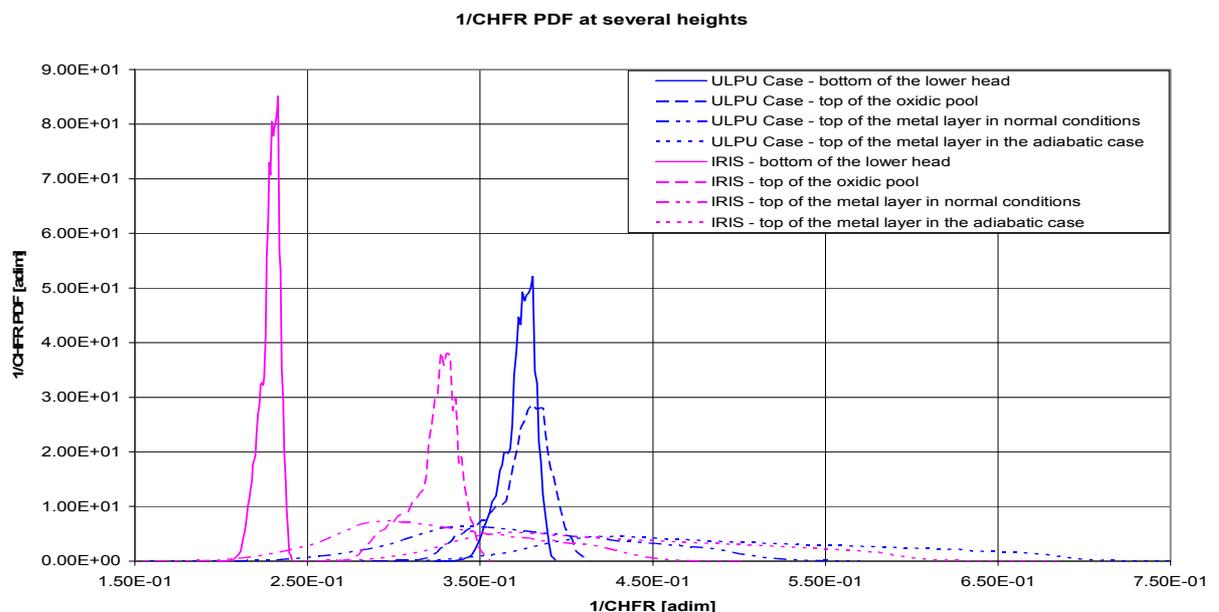
ABSTRACT



Questa mostra una curva molto più piatta e larga per IRIS; tale effetto è dovuto principalmente alla diversa Steel Mass PDF utilizzata.

### 4.3. *ULPU Case*

Questa analisi è stata sviluppata utilizzando la correlazione relativa all'assenza di circolazione. Tutti gli altri dati sono identici al caso precedente. I risultati mostrano che il CHFR è ancora decisamente maggiore di 1, e quindi il rischio di insuccesso dell'IVR strategy è irragionevole.



SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

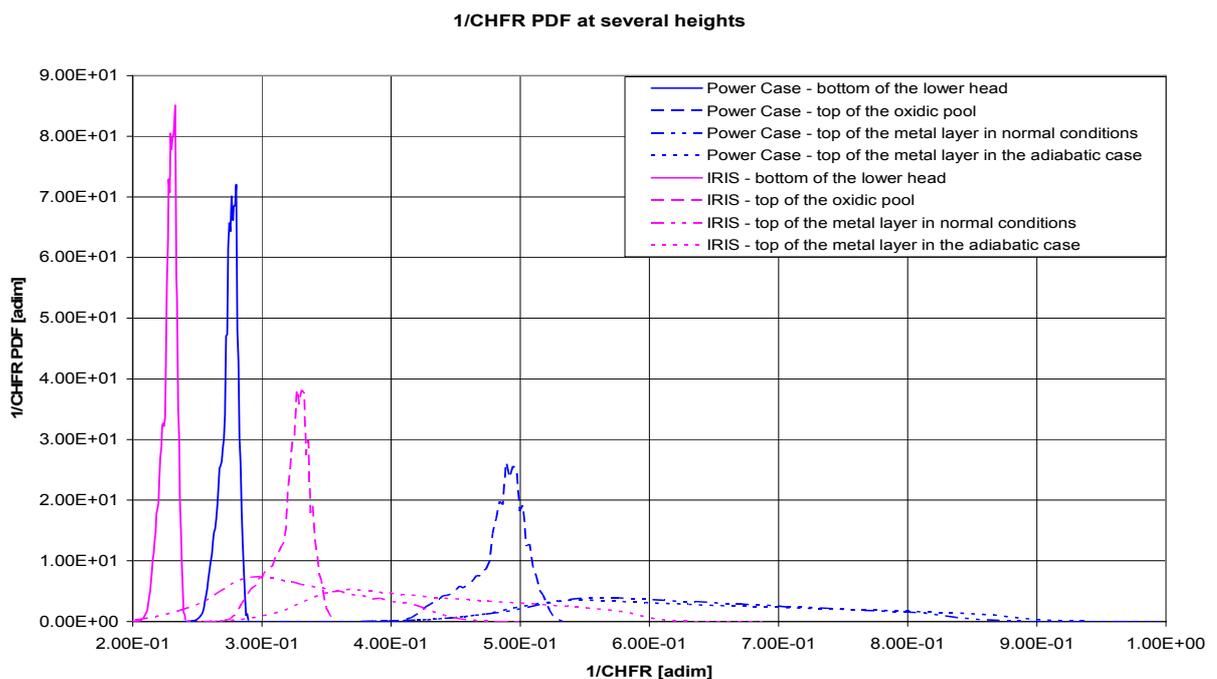
Come previsto, stavolta i valori dell'inverso del CHFR sono spostati verso destra rispetto al Natural Case, identificando condizioni peggiori, sebbene meno critiche che per l'AP1000.

#### 4.4. Power Case

Tale analisi presuppone una potenza per IRIS pari ad 1.5 volte la potenza reale: tale espediente permette di valutare gli effetti di una possibile escursione di potenza.

Anche in questo caso, è previsto il successo dell'IVR strategy, anche se il margine di rischio è abbastanza ridotto: i valori limite per l'verso del CHFR in condizioni normali ed adiabatiche sono rispettivamente 0.873 (CHFR=1.145) e 0.923 (CHFR=1.083).

Questi grafici mostrano che nei casi in cui il CHFR è più vicino ad 1, condizioni normali ed adiabatiche risultano pressoché identiche: ciò dipende dal fatto che ad elevate temperature, il calore rimosso per irraggiamento attraverso la superficie superiore risulta predominante rispetto a quello rimosso per convezione.



SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

## 5. CONCLUSIONI

L'In-Vessel Retention costituisce, per i reattori di tipo Westinghouse AP e IRIS, la metodologia prescelta per far fronte alle sequenze incidentali severe. Durante le sequenze incidentali severe, la strategia di gestione degli incidenti prevede l'allagamento della reactor cavity, sommergendo il vessel fino all'altezza della linea DVI (circa 7 metri dal fondo del vessel). L'acqua refrigera la superficie esterna del vessel e confina la massa fusa all'interno del reattore, prevenendo la rottura del lower head e la conseguente rilocazione della massa fusa nel contenimento. Il reattore IRIS è progettato per garantire l'In-Vessel Retention tramite la depressurizzazione e la refrigerazione della superficie esterna del vessel.

Requisiti necessari per il successo dell'IVR strategy sono:

- il sistema primario deve essere ormai completamente depressurizzato quando avviene la rilocazione;
- la cavity è allagata fino all'altezza del suolo, in modo da garantire la rimozione del calore di decadimento attraverso la parete esterna del vessel
- la geometria della cavity e i sistemi di emergenza garantiscono una sufficiente ricircolazione dell'acqua all'interno della cavity stessa e la liberazione del vapore prodotto nel contenimento per poter essere ricondensato;
- la superficie esterna del vessel nella zona del lower head è tale da non interferire con la refrigerazione.

Come descritto precedentemente, sono stati identificati due criteri di rottura:

- Crisi termica, causata da una forte riduzione del coefficiente di scambio termico tra la superficie esterna e l'acqua contenuta nella cavity;
- Crisi meccanica, dovuta alla perdita di resistenza della struttura conseguente alla riduzione di spessore della parete.

L'analisi dei risultati ottenuti nel corso della presente tesi mostra che il successo dell'IVR è garantito anche se è supposta la sola circolazione naturale dell'acqua nella reactor cavity, mostrando che il rischio di insuccesso per l'impianto IRIS è più improbabile che per l'AP1000, benché in quest'ultimo sia previsto l'insulation system, il cui scopo è quello di aumentare la

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION  
STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT

velocità delle bolle e quindi di migliorare il meccanismo di scambio termico. Tale differenza è principalmente dovuta alla minore potenza termica dell'impianto (e quindi al minore calore di decadimento che deve essere smaltito) e soprattutto alla maggiore superficie di scambio termico per IRIS, dovuta al più grande raggio del vessel.

SEVERE ACCIDENT PHENOMENA AND APPLICATION OF IN-VESSEL RETENTION  
STRATEGY TO THE INTERNATIONAL REACTOR INNOVATIVE AND SECURE (IRIS):

ABSTRACT