

3. METODOLOGIA DI ANALISI SECONDO LE IAEA GUIDELINES

3.1 INTRODUZIONE

Nel 1990 l'IAEA (*International Atomic Energy Agency*) ha iniziato un programma di assistenza ai paesi dell'Europa dell'Est per la valutazione della sicurezza di alcuni tipi di centrali nucleari (WWER 440/230, WWER 440/213, WWER 1000 e RBMK). A tale scopo ha pubblicato nell'Aprile del 1997 le “*Guidelines on Pressurized Thermal Shock Analysis for WWER Nuclear Plants*” [5], documentazione che può essere presa come punto di riferimento per l'analisi di PTS. Le “*Guidelines*” stabiliscono una serie di raccomandazioni per condurre una analisi di integrità del RPV in caso di PTS; tali raccomandazioni derivano da esperienze operazionali, stato dell'arte attuale e risultati di ricerche e studi condotti dai paesi membri. Lo scopo dell'analisi di PTS è quello di dimostrare l'integrità strutturale del *vessel* utilizzando metodi di calcolo realistici ma comunque pesati con opportuni fattori di sicurezza. In particolare occorre dimostrare con una analisi conservativa che durante la vita operativa dell'impianto non si verifica propagazione instabile di un difetto ipotizzato, per un set completo opportunamente scelto di transitori anticipati e incidenti ipotizzati (vedi oltre). Nei paragrafi successivi viene descritto in linea di massima l'approccio consigliato dalle “*Guidelines*” per l'analisi di PTS, con particolare riferimento, visto lo scopo del presente lavoro, alla sezione relativa all'analisi strutturale e di meccanica della frattura.

3.2 SEQUENZE INCIDENTALI DA CONSIDERARE NELL'ANALISI DI PTS

L'approccio più completo suggerito dalle “*Guidelines*” per determinare le possibili sequenze incidentali da considerare nell'analisi di PTS è quello di effettuare una analisi di tipo probabilistica (metodologia dell'albero degli eventi) in modo da individuare quegli specifici transitori che più contribuiscono al rischio totale. In un approccio deterministico, caso del presente lavoro, è consigliata la scelta di un DBA (*Design Basic Accident*) opportuno, sulla base dell'esperienza operativa accumulata nell'esercizio dei WWER. Nell'analisi deterministica devono essere considerati i fattori che possono avere conseguenza sui carichi termici e meccanici agenti nel *downcomer* durante l'incidente. Fra questi per esempio:

- la temperatura finale del fluido nel *downcomer*
- il rateo di diminuzione della temperatura
- il raffreddamento non uniforme del RPV (effetti di miscelamento, *cold plums* ecc.)
- il livello della pressione nel sistema primario

I transitori termoidraulici che possono dar luogo al PTS e che devono essere considerati nell'analisi fanno riferimento ai seguenti gruppi di eventi:

- LOCA (*Loss of Coolant Accident*)
- PORV del pressurizzatore bloccata in posizione di apertura

- incidenti di perdita di refrigerante fra sistema primario e sistema secondario (per esempio rottura dei tubi del generatore di vapore)
- perdite rilevanti nel circuito secondario: rientrano in questa categoria gli eventi derivanti da depressurizzazione del lato secondario del generatore di vapore; tali eventi determinano una significativa diminuzione di temperatura del fluido primario. Fra questi il MSLB (caso del presente lavoro), l'apertura spuria della valvola di *by-pass* (BRU-K) o della valvola di scarico in atmosfera (BRU-A), l'apertura spuria della valvola di sicurezza del generatore di vapore, una rottura nella linea della *feed water* e così via
- messa in funzione non prevista dei sistemi di emergenza (ECCS) ad alta pressione: questo evento può determinare un aumento improvviso di pressione nel RPV
- raffreddamento incidentale della parte esterna del RPV.

In base alla frequenza di accadimento gli eventi precursori del PTS vengono suddivisi in due categorie:

- transitori anticipati (*Anticipated Transients*): sono deviazioni relativamente frequenti (probabilità maggiore di 10^{-2} per reattore-anno) dalle condizioni di normale esercizio; sono determinati da malfunzionamenti di un componente o da errore dell'operatore. Questo tipo di transitori non ha conseguenze sull'integrità strutturale del RPV tali da dover fermare l'impianto
- incidenti ipotizzati (*Postulated Accidents*): sono deviazioni a basse probabilità di accadimento (meno di 10^{-2} per reattore-anno) dalle condizioni di normale esercizio; vengono utilizzati per il progetto dell'impianto (DBA = *Design Basic Accident*).

3.3 DATI IMPORTANTI PER L'ANALISI DI PTS

Le “*Guidelines*” stabiliscono una serie di sistemi e di dati relativi all'impianto che devono essere tenuti in adeguata considerazione vista la loro possibile influenza sull'analisi di PTS. Per quanto riguarda i sistemi dell'impianto possiamo menzionare i seguenti:

- sistema di refrigerazione del reattore
- pressurizzatore e sistema di controllo della pressione
- ECCS (sistema di refrigerazione di emergenza)
- linea principale del vapore
- sistema dell'acqua di alimento.

Per quanto riguarda il *vessel* devono essere prese in considerazione fra le altre cose:

- caratteristiche del materiale base e del materiale delle saldature; zona termicamente alterata e *cladding*

- trattamenti termici
- caratteristiche geometriche di saldature, bocchelli ecc.

Le “*Guidelines*” raccomandano di effettuare una mappatura del *vessel* per determinare la fluenza neutronica nelle varie zone del RPV (tramite appropriati codici di calcolo e dosimetria in esercizio): l’irraggiamento neutronico ha difatti notevole rilevanza sull’analisi dal momento che determina aumento della temperatura di transizione fragile-duttile.

Dal punto di vista dell’analisi termoidraulica viene raccomandato di tenere in considerazione l’effetto dell’entrata in funzione degli ECCS nell’ambito dell’incidente che produce il PTS. Tale sistema deve essere supposto funzionare alla massima portata e alla minima temperatura così da produrre il maggior raffreddamento possibile. L’iniezione ad alta pressione del fluido di emergenza nelle *Cold Legs* potrebbe determinare il fenomeno delle “*Cold Plumes*” (il fluido freddo iniettato dagli ECCS può scendere nel *downcomer* senza miscelarsi immediatamente con il fluido caldo ivi presente e determinare un raffreddamento localizzato della parete). In tal caso le “*Guidelines*” raccomandano di tenere in considerazione gli effetti delle disuniformità nel campo di temperatura e nel coefficiente di scambio del refrigerante nonché gli effetti di una eventuale stratificazione termica. Le disuniformità potrebbero anche determinarsi a seguito dell’iniezione nel *downcomer* del fluido contenuto negli accumulatori.

L’analisi termoidraulica deve essere condotta con appropriati codici di calcolo qualificati (di sistema o CFD ove occorre per esempio prevedere fenomeni tridimensionali complessi quali gli effetti sulla distribuzione di temperatura della stagnazione del fluido nel circuito primario); deve poter prevedere tutti i fenomeni sopra menzionati di raffreddamento non uniforme che sono rilevanti per l’analisi di PTS, e deve fornire i dati di ingresso per l’analisi strutturale. Devono essere tenute in considerazione sia l’azione dell’operatore, che si suppone agire in accordo alle procedure previste (in tal caso la sua azione può avere impatto favorevole sull’andamento del PTS), sia le condizioni operative dell’impianto al momento dell’incidente (per esempio la potenza alla quale opera il reattore al momento dell’incidente).

Per quanto riguarda l’analisi strutturale i dati relativi al materiale del RPV che devono essere noti sono:

- proprietà termiche ed elastiche ($E, \nu, \lambda, \alpha, c_p \dots$) del metallo base del *vessel*, del materiale del *cladding* e delle saldature
- proprietà meccaniche e parametri di meccanica della frattura ($R_p, R_m \dots$) per il metallo base del *vessel*, per il *cladding* e per le saldature, che devono essere espressi in funzione del tempo operativo dell’impianto e della fluenza neutronica.

3.4 RACCOMANDAZIONI PER L’ANALISI STRUTTURALE E DI MECCANICA DELLA FRATTURA

L’obiettivo dell’analisi strutturale è quello di valutare, sulla base dei carichi meccanici e termici determinati dal transitorio termoidraulico, il valore dello *Stress Intensification Factor* (KI) per opportuni difetti ipotizzati. Devono essere considerate nell’analisi le eventuali tensioni residue (per il *cladding* e per le saldature) e gli eventuali fenomeni plastici presenti. Il campo di tensioni deve essere calcolato in funzione del tempo tramite metodi analitici (per casi semplici) o con metodi agli elementi finiti (FEM). Nella maggior parte dei casi possono essere utilizzati i metodi della

meccanica della frattura lineare elastica, anche se per le condizioni più critiche (specialmente per *vessel con cladding*) è raccomandata una analisi elasto-plastica tramite l'integrale J.
I difetti ipotizzati possono essere superficiali o *sub-cladding*; in particolare:

- per *vessel senza cladding* (*uncladded vessel*) si considera una cricca superficiale semiellittica con profondità (semiasse minore) fino a 1/4 dello spessore del RPV e con rapporto di aspetto (a/c = rapporto fra il semiasse minore e il semiasse maggiore dell'ellisse) variabile da 0.3 a 0.7 (fig. 3.1)

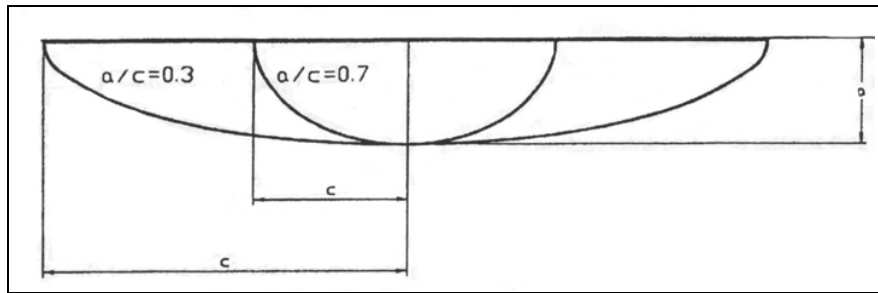


Fig. 3.1 cricca superficiale semiellittica per vessel senza cladding

- per *vessel con cladding* si considera una cricca ellittica o semiellittica sotto la superficie del *cladding* con profondità fino a 1/4 dello spessore del RPV e con rapporto di aspetto (a/c o $2a/c$) variabile da 0.3 a 0.7 (fig. 3.2)

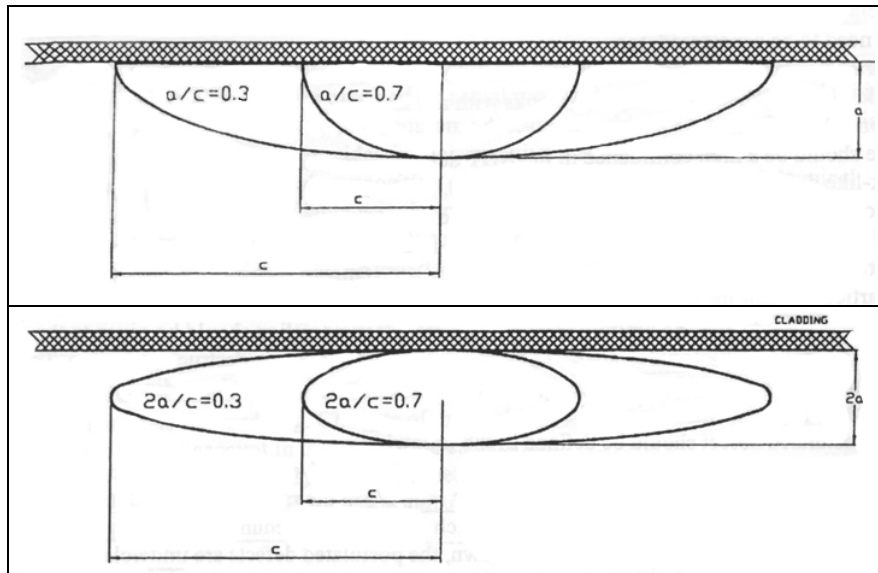


Fig. 3.2 cricca superficiale semiellittica ed ellittica non passante per vessel con cladding

- per vessel con *cladding* per il quale non vi sono sufficienti informazioni sulle caratteristiche del *cladding* stesso si considera una cricca semiellittica passante con profondità fino a 1/4 dello spessore del RPV e con rapporto di aspetto (a/c) variabile da 0.3 a 0.7 (fig.3.3).

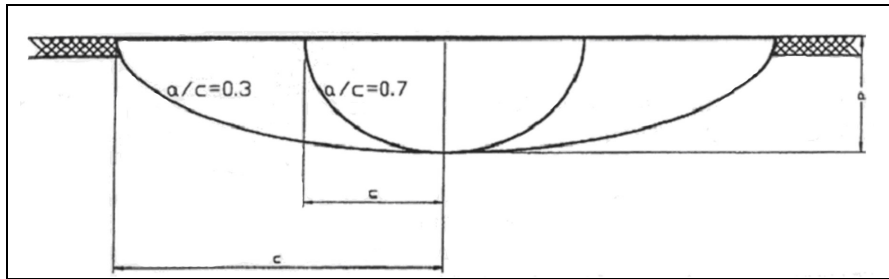


Fig. 3.3 cricca superficiale semiellittica passante per vessel con cladding

Il valore dello *Stress Intensification Factor* deve essere valutato per il punto della cricca caratterizzato dai carichi più elevati e confrontato con la tenacità a frattura del materiale (K_{Ic}). In genere è sufficiente valutare il K_I nel punto più interno della cricca (apice) e nel punto di intersezione del fronte del difetto con la superficie libera del RPV (per vessel senza cladding) oppure nel punto di intersezione del fronte del difetto con la superficie di contatto vessel-cladding (per vessel con cladding).

Per dimostrare l'integrità del vessel per uno specifico transitorio termoidraulico le "Guidelines" impongono (nell'ambito della LEFM, *Linear Elastic Fracture Mechanic*) il soddisfacimento della relazione

$$n_k \cdot K_I(T, n_a \cdot a) \leq K_{Ic}(T) \quad (1)$$

dove K_I è lo *Stress Intensification Factor* valutato all'apice o nel punto di intersezione del fronte del difetto con la superficie libera del RPV, K_{Ic} è la tenacità a frattura, rappresentata dalla curva di riferimento (*lower bound fracture toughness reference curve*) espressa in funzione della temperatura relativa $T-T_k$, dove T è la temperatura valutata all'apice della cricca (o comunque nel punto dove viene calcolato il K_I) e T_k è la temperatura critica di infragilimento (*Reference Temperature Nil Ductility Transition* o RNDT), ottenuta tramite la prova Charpy. L'andamento del K_{Ic} può essere dedotto dalla ampia letteratura disponibile; per esempio in base alla normativa di riferimento russa¹ si assume:

$$K_{Ic} = \min\{ 26 + 36e^{0.02(T-T_k)}, 200 \} \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2} \quad (2)$$

Questa curva, analoga alla "curva da un milione di dollari" delle ASME, è ottenuta come involucro inferiore (*lower bound fracture toughness curve*) di una notevole mole di risultati sperimentali; il limite dei 200 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ deriva dal fatto che per valori di K_{Ic} superiori a 150 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ occorrono provini di notevoli dimensioni, il che comporta una sperimentazione complessa e costosa. L'andamento del K_{Ic} è riportato in figura 3.4.

¹ PNAE G-7-002-86, *Standards for Strength Evaluation of Component and Piping of Nuclear Power Plants – Energoatomizdat, Moscow (1989) (in Russian)*

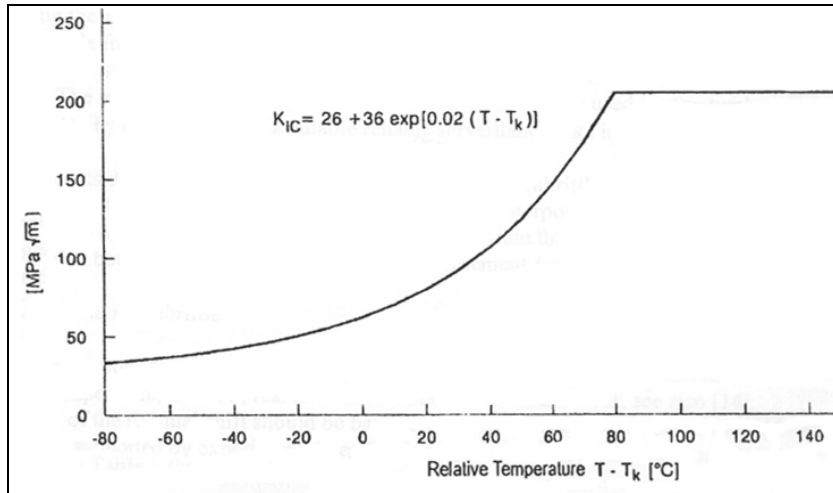


Fig.3.4 andamento del KI critico secondo la curva di riferimento russa

I parametri n_k e n_a sono fattori di sicurezza che tengono conto delle incertezze nell'analisi di PTS. Il calcolo del KI, secondo la (1), deve essere effettuato come se la cricca fosse più grande, ovvero come se avesse semiassa minore $n_a a$; il valore ottenuto deve essere poi incrementato del fattore n_k ; il K_{Ic} deve essere calcolato per una temperatura RNDT più bassa di un fattore ΔT tabellato. I fattori di sicurezza, riportati nella tabella 4.1, dipendono dal tipo di transitorio termoidraulico e dalla dimensione del difetto considerato.

fattore di sicurezza	difetti fino a 1/4 dello spessore della parete			difetti piccoli (<1/4 dello spessore della Parete)			
	normale operazione	transitorio anticipato	incidente ipotizzato	normale operazione	transitorio anticipato	incidente ipotizzato ^b	
n_k	2	$\sqrt{2}$	1	2	$\sqrt{2}$	1	$\sqrt{2}$
n_a	1	1	1	2	2	2	1
ΔT °C	30	30	0	30	20	10	10

^b deve essere scelto il set che fornisce i risultati più gravosi

Tab. 3.1 fattori di sicurezza da utilizzare per la verifica di integrità del vessel

Le “Guidelines” raccomandano di tener conto dei meccanismi di degrado delle proprietà meccaniche del vessel che determinano l'aumento della temperatura critica del materiale durante l'esercizio; a tal proposito la temperatura T_k viene calcolata come somma di vari contributi:

$$T_k = T_{k0} + \Delta T_t + \Delta T_n + \Delta T_f \quad (3)$$

dove T_k è la temperatura critica di infragilimento ad inizio vita, ΔT_t l'aumento di temperatura dovuto ai carichi termici, ΔT_n l'aumento di temperatura dovuto alla fatica e ΔT_f l'aumento di temperatura dovuto all'irraggiamento neutronico. Le “Guidelines” consigliano i metodi appropriati di scelta per ognuno di questi parametri.

Per quanto riguarda la presentazione dei risultati le “Guidelines” impongono di riportare per ogni sequenza termoidraulica analizzata il comportamento del materiale (KI e K_{Ic}) in funzione della temperatura; un esempio può essere osservato in figura 3.5.

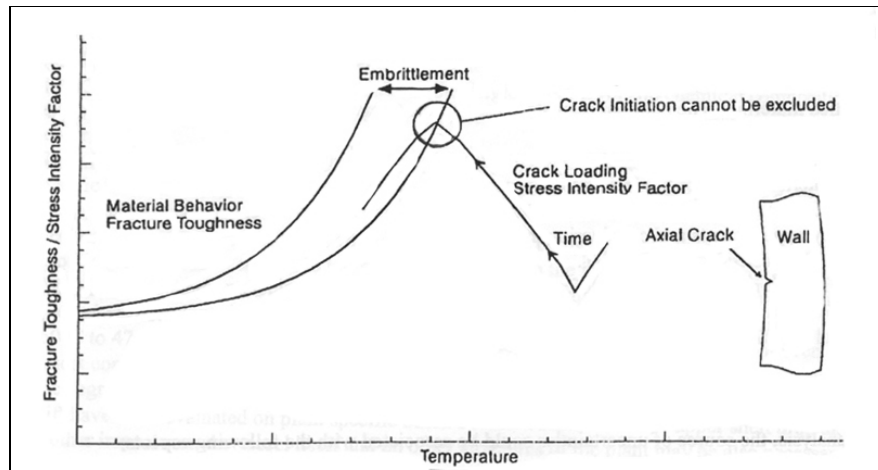


Fig. 3.5 valutazione della propagazione instabile

Il valore massimo ammissibile della temperatura critica di infragilimento per la sequenza incidentale considerata si determina imponendo la tangenza fra la curva dello *Stress Intensification Factor* e la curva della tenacità a frattura. Se le sequenze incidentali sono più di una occorre prendere come temperatura critica il più piccolo dei valori ottenuti per l'intero set analizzato. Nel caso in cui si debba tener conto di effetti di pretensionamento a caldo (*warm prestress*) si determina l'intersezione fra il punto corrispondente all'80% del valore di picco dello *Stress Intensification Factor* e la curva della tenacità a frattura. La temperatura critica corrispondente costituisce il valore massimo ammissibile per il materiale. La differenza fra la massima temperatura critica ammissibile così determinata e la temperatura critica (per esempio a fine vita) del *vessel* costituisce il margin di sicurezza per l'infragilimento del materiale del RPV.

Dopo aver delineato i requisiti cui devono soddisfare i codici termoidraulici e strutturali necessari per effettuare l'analisi di PTS, le "Guidelines" riportano (in Appendice I) l'elenco degli eventi che possono dar luogo a PTS e la loro suddivisione nelle due categorie descritte al paragrafo 3.2 (*Anticipated Transients* e *Postulated Accidents*). A tal proposito e con riferimento al presente lavoro, l'evento di MSLB che determina l'aumento della rimozione del calore fra lato primario e lato secondario del generatore di vapore rientra nella categoria degli incidenti ipotizzati, e viene descritto in particolare al punto 5.5 dell'Appendice I: "*Increase in heat removal by the secondary side – spectrum Cif steam system piping break inside and outside of containment*". Sulla base di tale osservazione si sono scelti gli opportuni fattori di sicurezza per la verifica di integrità del vessel (capitolo 6).