

## 8 CONCLUSIONI

Nel presente lavoro sono state analizzate le conseguenze di un evento di PTS (*Pressurized Thermal Shock*) originatosi a seguito di un MSLB (*Main Steam Line Break*) sulla possibilità di propagazione instabile di una cricca localizzata sulla parete del *vessel* di un WWER-1000/320. E' stata pertanto condotta un'analisi accoppiata fra un codice termoidraulico di sistema (Relap5) e un codice agli elementi finiti per calcoli strutturali (Ansys 5.7) con lo scopo di determinare i margini di sicurezza in relazione all'ingrignimento neutronico del materiale del RPV. Il modello per il codice di sistema riproduce l'impianto nucleare nel suo complesso, il modello agli elementi finiti la sola parete del *vessel*. Nei calcoli, sia termoidraulici che meccanici, è stata presa in considerazione la presenza del *cladding*.

I risultati termoidraulici dedotti dall'analisi Relap del transitorio sono stati utilizzati come dati di ingresso per il calcolo strutturale agli elementi finiti. Le sollecitazioni determinate con Ansys hanno permesso di effettuare un'analisi di meccanica della frattura tramite la tecnica della *Weight Function*, considerando inizialmente la presenza di una ipotetica cricca monodimensionale assiale superficiale, avente 3 differenti valori di profondità: 7 mm (cricca piccola), 73 mm (1/4 dello spessore del *vessel*), 196 mm (>1/2 dello spessore del *vessel*). Per tale analisi è stata presa in considerazione la presenza del *cladding*.

Sulla base delle raccomandazioni delle IAEA è stato studiato anche il comportamento di una cricca bidimensionale semiellittica superficiale su *vessel* senza *cladding*, considerando le stesse ampiezze della cricca infinita e rapporto di aspetto pari a 0.3 e 0.5.

Al fine di verificare e validare i risultati ottenuti si è proceduto ad eseguire uno studio delle condizioni di flusso nel *dowcomer* tramite il codice CFD Trio\_U, senza considerare lo scambio termico fra fluido e *vessel*. In particolare sono state studiate le condizioni di miscelamento del fluido allo scopo di verificare la correttezza dei risultati di meccanica della frattura tramite confronto con i risultati termoidraulici forniti da Relap. Il modello per il codice CFD riproduce il *downcomer* e la zona fluida inferiore del *vessel*. E' stato realizzato anche un modello Trio\_U più raffinato del precedente, comprendente una piastra forata che schematizza la sezione inferiore del *barrel*. Lo scopo di questa seconda simulazione è lo studio degli effetti del miscelamento indotto nel *plenum inferiore* sulla temperatura del fluido in prossimità della zona ove è posizionata la cricca.

Conducendo un'attività preliminare con modelli semplificati sono stati stabiliti i requisiti dei modelli numerici al fine di ottenere una adeguata valutazione sia della potenza scambiata tra la parete conduttiva ed il fluido primario sia delle tensioni termiche nel *vessel*.

Lo studio preliminare termoidraulico ha riguardato l'analisi dello scambio termico convettivo nel *downcomer* ed è stato condotto tramite i codici Relap e Trio\_U, prendendo a riferimento un transitorio termoidraulico riprodotto in maniera semplificata il fenomeno di raffreddamento indotto dal MSLB. I principali risultati (andamento temporale della potenza termica rimossa dalla parete e distribuzione di temperatura nello spessore) hanno permesso di stabilire per la nodalizzazione Relap del RPV la necessità di almeno 4 celle nello spessore del *cladding* (spaziatura fra i nodi di 1.75 mm).

Sono stati condotti dei calcoli preliminari anche con il codice strutturale al fine di stabilire la distribuzione nodale più adatta per garantire una stima adeguata delle sollecitazioni termiche e meccaniche. I risultati ottenuti hanno portato alla realizzazione di un modello tridimensionale in cui la nodalizzazione spaziale è disuniforme nella parete del *vessel* (9 nodi) e uniforme nello spessore del *cladding* (3 nodi).

Questo lavoro di tesi segue cronologicamente e sviluppa (ampliandola) l'analisi di PTS relativa ad impianti di tipo WWER-1000 condotta negli ultimi anni presso il DIMNP, [6], [8], [9],[12],[24]. Rispetto alle attività precedenti le peculiarità del presente lavoro possono essere riassunte nei seguenti punti:

- è stata considerata la presenza del *cladding* sia nel calcolo termoidraulico che nell'analisi di meccanica della frattura
- è stato sviluppato un modello semplificato per determinare i requisiti minimi cui devono soddisfare le celle della nodalizzazione Relap
- è stata analizzata la propagazione instabile di una cricca bidimensionale semiellittica superficiale seguendo le raccomandazioni dell'IAEA
- è stata effettuata una analisi di miscelamento del fluido nel *downcomer* tramite codice CFD.

I risultati ottenuti possono essere sintetizzati come segue:

- La rottura nel lato secondario dello *Steam Generator* numero 1 causa un sovra-raffreddamento del fluido primario, la cui temperatura passa in circa 90 secondi dal valore di regime di 562 K al valore minimo di 467 K (diminuzione di 95 K). Negli istanti successivi la temperatura del refrigerante tende a risalire limitando così la propagazione dell'onda termica di raffreddamento nella parete.
- La pressurizzazione del fluido primario si mantiene su valori elevati, passando dai 16 MPa operativi ad un valore minimo di 12.7 Mpa dopo circa 90 s dall'inizio del transitorio per poi risalire fino ad un valore massimo di 17.7 Mpa dopo circa 660 secondi. In termini di variazione percentuale la pressione minima risulta inferiore del 21% rispetto alla pressione operativa (16 Mpa), mentre la pressione massima supera la pressione operativa dell'11%.
- Lo shock termico dovuto al MSLB produce un forte raffreddamento ( $> 65^{\circ}\text{C}$  sulla superficie interna) su di una zona limitata della parete del *vessel*.
- L'onda termica di raffreddamento propaga all'incirca fino a metà spessore della parete, anche se la diminuzione di temperatura più marcata si verifica in una zona più limitata ( $<30\%$  dello spessore).
- Gli effetti combinati della diversa rigidità e dei diversi coefficienti di espansione termica caratteristici dell'acciaio inossidabile e dell'acciaio al carbonio fanno sì che lo shock termico produca le tensioni più elevate in corrispondenza dello spessore del *cladding*: le tensioni circonferenziali totali (somma delle sollecitazioni termiche e meccaniche) raggiungono il valore massimo di 446 MPa sulla superficie interna del *cladding* dopo 50 secondi dall'inizio del transitorio. Le sollecitazioni assiali raggiungono il valore massimo di 323 MPa, sempre nella stessa zona.
- La presenza del *cladding* in acciaio inossidabile comporta temperature all'apice della cricca più elevate rispetto al *vessel* "nudo", specialmente per le cricche meno profonde (i valori minimi di temperatura per *vessel* con *cladding* sono di 518 K, 549 K e 559 K per la cricca da 7, 73 e 196 mm rispettivamente; per *vessel* senza *cladding* si ottengono i valori di 510 K, 547 K e 558 K).

- Per la cricca monodimensionale i risultati di meccanica della frattura condotta tenendo in considerazione tre differenti profondità all’apice, 7 mm – 1/4 dello spessore della parete – 196 mm (>1/4 dello spessore della parete) , mostrano un adeguato margine di sicurezza rispetto alla temperatura critica ipotizzata per il materiale del *vessel* a fine vita (49°C ÷ 51°C). Il valore limite calcolato per la RNDT, relativo alla cricca da 73 mm, è infatti pari a 209°C.
- La cricca assiale da 196 mm propaga in maniera instabile indipendentemente dallo shock termico, in quanto il SIF dovuto al carico meccanico che la caratterizza supera i limiti di resistenza del materiale.
- L’introduzione del *cladding*, benché comporti un aumento del SIF rispetto al *vessel* “nudo” (da circa 57 MPa√m a 62 MPa√m per la cricca da 7 e da 162.4 MPa√m a 162.6 MPa√m per la cricca da 73 mm) determina un limitato incremento del margine di sicurezza (la RNDT passa da 208°C per il *vessel* senza *cladding* a 209°C per il *vessel* con *cladding*).
- I risultati di meccanica della frattura per la cricca bidimensionale mostrano un adeguato margine di sicurezza rispetto alla temperatura critica ipotizzata per il materiale del *vessel* a fine vita (49°C ÷ 51°C). Il valore limite calcolato per la RNDT, relativo ai punti di intersezione fra il fronte della cricca da 73 mm e la superficie del *vessel*, è infatti pari a 204 °C.
- La temperatura prevista dal codice Trio\_U nella zona ove è stata ipotizzata la presenza della cricca risulta più bassa rispetto a quanto previsto dal codice Relap, di circa 30° C.
- La presenza del *barrel* non determina variazione significativa nell’andamento della temperatura del fluido nella zona della cricca.

L’analisi dei risultati consente di effettuare alcune osservazioni:

- La presenza del *cladding*, nel caso del transitorio analizzato, evidenzia un effetto benefico in relazione alla propagazione instabile della cricca. Ciò grazie all’aumento della temperatura di parete determinato dall’introduzione del rivestimento. A causa della differenza nei valori di temperatura la tenacità a frattura è maggiore nel caso di RPV con *cladding* rispetto a RPV “nudo”, a parità di RNDT. L’effetto è maggiormente evidente per la cricca più piccola (7 mm) perché la differenza di temperatura all’apice è più marcata (8 gradi, contro 2 gradi per la cricca da 73 mm e 1 grado circa per la cricca da 196 mm). La tenacità elevata compensa in parte l’incremento dello *Stress Intensification Factor* determinato dalle elevate tensioni circonferenziali che si sviluppano nel *cladding*. L’effetto complessivo è in definitiva un aumento della RNDT, anche se di un solo grado nel caso del transitorio considerato, rispetto a *vessel* “nudo”.
- I valori particolarmente alti della RNDT limite ottenuta sono la conseguenza del fatto che la temperatura, specialmente nelle zone più profonde della parete, si mantiene come già detto su valori elevati, facendo sì che il materiale conservi un’elevata tenacità nonostante il SIF assuma valori di rilievo.
- E’ evidente la necessità di studiare le potenzialità di propagazione instabile anche per i difetti più piccoli, apparentemente meno pericolosi. Infatti, un difetto molto profondo produce un elevato valore dello *Stress Intensification Factor*, ma anche una diminuzione contenuta della tenacità a frattura (*critical SIF*) visto l’elevato valore della temperatura all’apice; un difetto più superficiale, caratterizzato da una temperatura all’apice più bassa, produce un valore minore del

SIF ma anche una diminuzione più elevata della tenacità a frattura. I difetti meno profondi sono inoltre più probabili e localizzabili più difficilmente tramite controlli non distruttivi.

- Per la cricca bidimensionale l'elevato gradiente termico esistente fra la zona superficiale della parete del *vessel* e la zona interna determina, a parità di RNDT, valori più bassi della tenacità del materiale nei punti del fronte della cricca prossimi alla superficie rispetto a quelli posti in prossimità dell'apice. Ciò implica che la condizione di propagazione instabile nei punti superficiali si raggiunge per RNDT inferiori rispetto alla RNDT corrispondente alla propagazione instabile all'apice. Per questo motivo la cricca bidimensionale da 73 mm tende a propagare prima (cioè per valori inferiori di RNDT) in direzione assiale piuttosto che in direzione ortogonale alla parete.
- La nodalizzazione Relap, così come è stata costruita, tende a favorire gli effetti del miscelamento fra fluido relativamente freddo proveniente dalla *Cold Leg* numero 1 e fluido più caldo proveniente dalle altre *Cold Legs*. Conseguenza di ciò è una sovrastima della temperatura del fluido nella zona alta del *downcomer*, mentre nella zona bassa i valori di temperatura presentano un accordo maggiore con quanto previsto da Trio\_U. Il mescolamento del fluido risulta in definitiva meno marcato di quanto ipotizzato da Relap. L'ipotesi formulata è che gli effetti del minor miscelamento sui risultati di meccanica della frattura consistano in una riduzione nella temperatura all'apice di una eventuale cricca presente sotto la *Cold Leg* ed in un aumento del 10% nel valore del corrispondente *Stress Intensification Factor*, con una conseguente diminuzione del margine di sicurezza [9].
- La presenza del *barrel* non determina fenomeni di miscelamento nella zona ove è stata ipotizzata la cricca grazie all'elevata distanza del difetto dalla zona di perturbazione, che si localizza prevalentemente nel *plenum inferiore*.

Con la prospettiva di migliorare l'analisi di PTS è auspicabile che venga eseguito un calcolo accoppiato Trio\_U – Ansys, in modo da avere un termine di confronto con i risultati ottenuti con il codice di sistema Relap. Il calcolo CFD deve tener conto dello scambio termico, pertanto un suo sviluppo richiede la possibilità di sostenere elevate richieste computazionali (computer in parallelo). E' importante inoltre sviluppare un transitorio termoidraulico più complesso, che preveda per esempio l'entrata in funzione degli ECCS (il cui contributo alla diminuzione della temperatura del fluido in ingresso nel *downcomer* potrebbe determinare un raffreddamento più sostenuto della parete) o la rottura su più linee vapore. Per quanto riguarda l'analisi di meccanica della frattura, può essere conveniente sviluppare un modello di cricca bidimensionale *sub-cladding*, che tenga conto dell'effetto delle tensioni residue ed eventualmente che venga calcolata in campo elasto-plastico.