

7 STUDIO DEL MISCELAMENTO DEL FLUIDO PRIMARIO NEL DOWNCOMER DEL REATTORE TRAMITE CODICE CFD TRIO

7.1 INTRODUZIONE

Nell'ambito dell'ingegneria nucleare il termine miscelamento (*coolant mixing*) definisce tutti quei fenomeni determinati da modifiche locali di un parametro scalare, per esempio la temperatura, la concentrazione di boro ecc; la cui variazione spaziale e temporale può avere notevole effetto sulla cinetica neutronica o sulle sollecitazioni meccaniche cui sono soggetti i componenti del reattore.

Lo scopo del presente capitolo è quello di studiare gli effetti del possibile miscelamento del fluido primario entrante nel *vessel* dalle *Cold Legs* sui risultati di meccanica della frattura, con particolare riferimento all'andamento dello *Stress Intensification Factor*. Difatti il fluido in ingresso dalla *Cold Leg* numero 1, raffreddato a seguito del MSLB, potrebbe miscelarsi nel *downcomer* col fluido relativamente più caldo proveniente dalle altre *Cold Legs*; si verrebbe così a determinare una temperatura media del fluido più elevata in prossimità di una ipotetica cricca, con conseguente raffreddamento meno intenso della parete.

L'analisi è stata condotta utilizzando il codice CFD Trio_U, con il quale è stato realizzato un modello riprodotto la parte inferiore del *downcomer* e della zona fluida del reattore (fig 7.1 -7.2). Il calcolo è stato condotto senza considerare lo scambio termico fra fluido e *vessel*, imponendo condizioni di parete adiabatica alla zona conduttiva.

L'elevata portata in gioco (4574 Kg/s di portata nominale per le *Cold Legs*) e l'elevato contenuto entalpico del fluido in ingresso nel *downcomer* ($1.262 \cdot 10^6$ J/Kg) fa sì difatti che la potenza termica trasferita dalla parete sia sufficientemente piccola da non comportare effetti di miscelamento dovuti al gradiente di temperatura assiale del fluido (cfr. par. 5.3.1, fig. 5.12); si può notare inoltre che l'elevata portata in gioco rende trascurabile il miscelamento dovuto ad eventuali effetti di galleggiamento. Un calcolo che prenda in considerazione lo scambio termico è senz'altro possibile ma richiede lo studio di una nodalizzazione appropriata e di notevoli risorse di calcolo (elaboratori in parallelo).

E' stato realizzato un modello Trio_U del *downcomer* più raffinato del precedente, comprendente la parte inferiore forata del *barrel*, la cui funzione è quella di consentire l'ingresso del fluido dal *plenum inferiore* al nocciolo del reattore. Tale zona è stata simulata nella nodalizzazione tramite una piastra spessa 0.2 m e dotata di 37 fori di diametro 0.24 m. Lo scopo del suddetto modello è quello di verificare gli effetti della presenza del *barrel* e del conseguente miscelamento indotto nella regione del *plenum inferiore* sulla temperatura del fluido in prossimità della zona ove è posizionata la cricca. Le sezioni di ingresso del fluido sono stati opportunamente dimensionate in modo da garantire la stessa portata volumetrica iniziale per tutte le 4 *Cold Legs* ($6.1 \text{ m}^3/\text{s}$ all'inizio del transitorio termoidraulico). Come condizione ai limiti è stato imposto al fluido in ingresso proveniente dalle *Cold Legs* il campo di velocità e di temperatura (in funzione del tempo) determinato con il codice Relap. Ciò ha consentito di determinare la temperatura del refrigerante in prossimità della cricca sotto condizioni analoghe a quelle esistenti nello studio effettuato con il codice di sistema. Per il modello generale (senza piastra forata) è stato adottato un transitorio di 750 secondi mentre per il caso contenente la piastra il transitorio è stato limitato a 190 secondi, visto il più elevato numero di nodi e il conseguente incremento dei tempi di calcolo. Nel paragrafo seguente (par. 7.2) si riportano i dettagli delle due nodalizzazioni, mentre nei paragrafi successivi viene sviluppata l'analisi dei risultati. Le immagini riportate nel presente capitolo sono state ottenute tramite il software di post-processing MESH-TV, integrato nel kernel del codice Trio_U.

7.2 NODALIZZAZIONE DEL VESSEL

7.2.1 nodalizzazione del downcomer senza barrel

Le figure 7.1 e 7.2 mostrano una vista complessiva e un particolare della nodalizzazione del *downcomer* (senza piastra forata). La zona rossa rappresenta la parete del *vessel* mentre la zona blu rappresenta il fluido. Il *cladding* e le zone coniche dei bocchelli non sono state modellate.

Per realizzare i due modelli descritti in questo paragrafo e nel paragrafo successivo è stato utilizzato il software di pre-processing X-PREPRO, utilizzabile insieme al kernel del codice Trio_U.

X-Prepro consente di realizzare modelli basati su di una mesh strutturata ortogonale; la griglia è costituita cioè da parallelepipedi (volumi di controllo) con le facce orientate concordemente agli assi del sistema di riferimento cartesiano. La mesh strutturata ortogonale rappresenta il metodo più facile ed immediato per discretizzare un dominio di calcolo. Difatti essa unisce la facilità con la quale è possibile realizzare semplici modelli ad un costo computazionale esiguo, molto minore, a parità di volumi di controllo utilizzati, rispetto a quello richiesto da una griglia non strutturata. Svantaggio di tale approccio è la difficoltà nella realizzazione di modelli particolarmente complessi: linee e superfici non ortogonali agli assi cartesiani, superfici curve ecc. mostrano il caratteristico andamento a gradini. Il metodo utilizzato per discretizzare le equazioni di bilancio (massa, momento ed energia) è il VDF (VDF = Volumes Differences Finis); quest'ultimo si basa sull'integrazione delle equazioni di conservazione sulle celle della mesh strutturata. Le incognite scalari (pressione, temperatura) vengono calcolate al centro delle celle mentre le variabili vettoriali (velocità) vengono calcolate al centro delle facce (cfr. par. 1.4.4, capitolo 1).

Il modello è stato ricavato partendo da un dominio parallelepipedo costituito da 90x90x58 celle; in totale sono stati utilizzati 26457 elementi (38425 nodi) nella zona fluida e 25861 elementi (41009 nodi) nella zona solida.

In direzione x e y le celle hanno dimensione (lato) 0.077 m e 0.088 m rispettivamente. Con la prospettiva di implementare un calcolo conduttivo le celle sono state raffinate secondo l'asse z nella parte superiore del *vessel*, dove è stata ipotizzata la presenza della cricca (fig 7.1). In tale zona le celle presentano una lato di 0.066 m. La parte centrale del *downcomer* presenta invece celle più ampie (lato da 0.11 a 0.34 m), al fine di contenere le dimensioni del modello e risparmiare risorse di calcolo.

I bocchelli di ingresso non sono stati prolungati molto oltre le loro reali dimensioni. Studi effettuati presso il DIMNP hanno difatti permesso di constatare che il fluido proveniente dalle *Cold Legs*, anche se pienamente sviluppato, viene comunque perturbato nel momento in cui, entrando ad elevate velocità, impatta sul *downcomer*. Risulta pertanto inutile e comunque non conveniente dal punto di vista computazionale realizzare un tale modello.

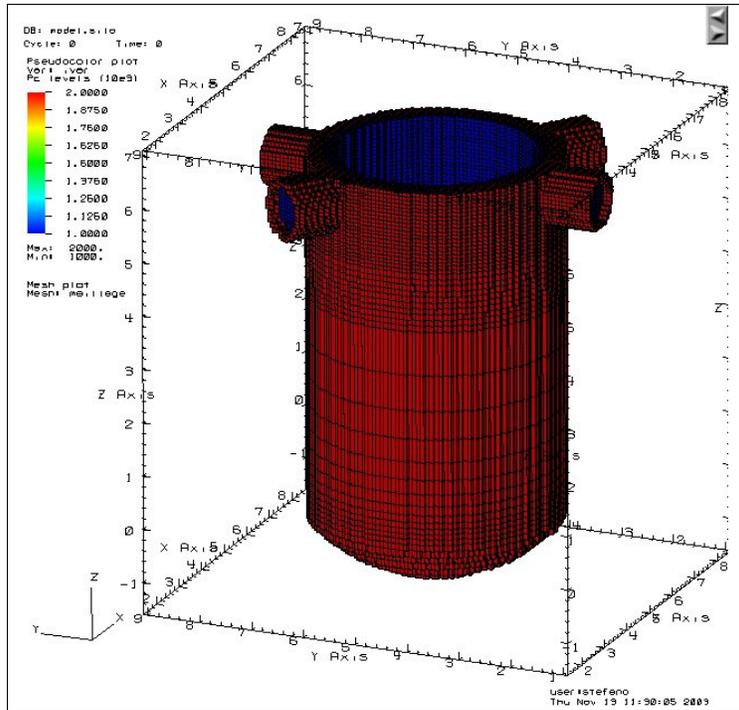


Fig. 7.1 vista della griglia X-PREPRO del downcomer utilizzata per il calcolo Trio_U

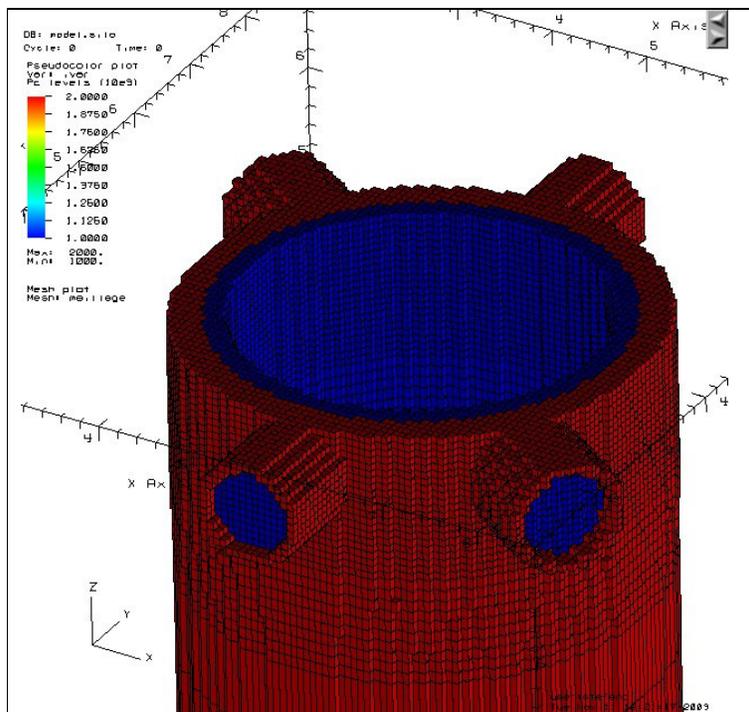


Fig. 7.2 particolare della griglia X-PREPRO del downcomer utilizzata per il calcolo Trio_U

7.2.2 nodalizzazione del downcomer con barrel

La figura 7.3 rappresenta una sezione assiale del *vessel* (effettuata con un piano contenente gli assi delle *Cold Leg* numero 2 e 3) nel quale si nota la piastra forata simulante la parte inferiore del *barrel*. In figura 7.4 si può osservare invece la sezione ortogonale della piastra forata. Nelle figure la zona arancione rappresenta il fluido mentre la zona rossa rappresenta la parete del *vessel*. Subito sopra la piastra è presente un volume libero necessario per consentire l'espansione del fluido e per impostare le condizioni al contorno. Il modello è stato ricavato partendo da un dominio parallelepipedo costituito da 107x107x58 celle; in totale sono state utilizzate 49127 elementi (65863 nodi) nella zona fluida e 37207 elementi (55884 nodi) nella zona solida. In direzione x e y le celle hanno dimensione (lato) 0.065 m e 0.075 m rispettivamente. Come evidenziato nel par. 7.2.1 le celle sono state raffinate secondo l'asse z nella parte superiore (lato di 0.07 m), dove si è ipotizzata la presenza della cricca. La parte centrale del *downcomer* presenta invece elementi più ampi (lato di 0.1 m), al fine di risparmiare risorse di calcolo. La griglia è stata rastremata anche in corrispondenza della piastra, spessa 0.2 m e dotata di 37 fori di diametro 0.24 m, nel cui spessore sono state inserite 2 celle. Anche in questo caso non sono state modellate le zone coniche dei bocchelli e il *cladding*. In appendice H è possibile osservare i files X-PREPRO di creazione della mesh per entrambi i modelli. La tabella 7.1 mostra le caratteristiche riassuntive delle nodalizzazioni Trio_U.

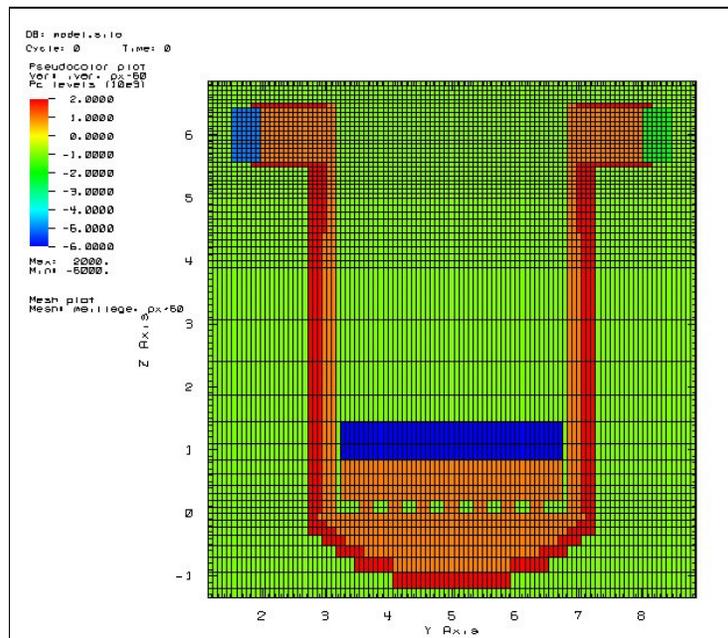


Fig. 7.3 sezione ortogonale rappresentante la nodalizzazione del RPV con barrel (piastra forata)

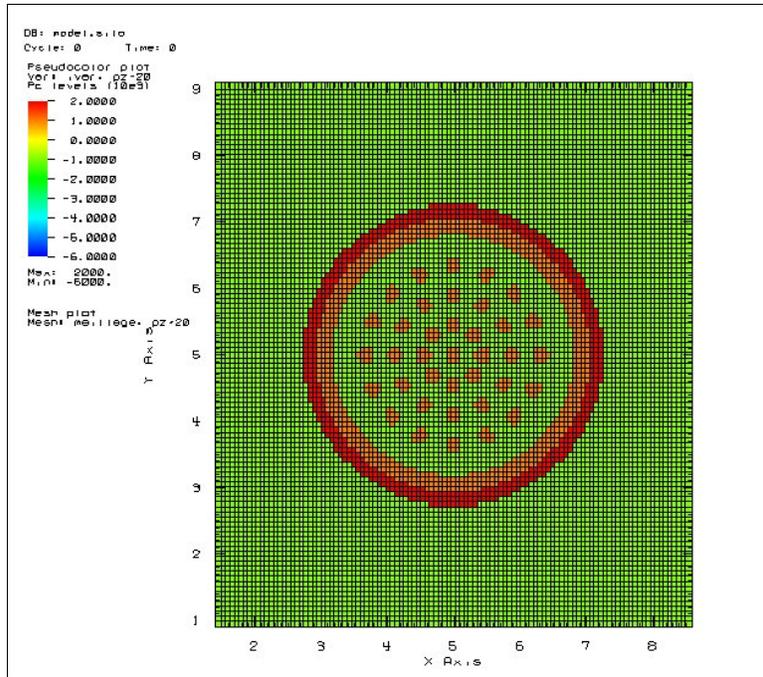


Fig. 7.4 nodalizzazione della piastra forata

Downcomer senza barrel	Numero di celle (x,y,z) 90 x 90 x 58		
	Downcomer		
	fluido: 26457 elementi 38425 nodi		solido: 25861 elementi 41009 nodi
	Lato cella direzione x : 0.077 m	Lato cella direzione y : 0.088 m	Lato cella direzione z : 0.066÷0.34 m
Downcomer con barrel	Numero di celle (x,y,z) 107 x 107 x 58		
	Downcomer		
	fluido: 49127 elementi 65863 nodi		solido: 37207 elementi 55884 nodi
	Lato cella direzione x : 0.065 m	Lato cella direzione y : 0.075 m	Lato cella direzione z : 0.07÷0.1 m
Lato cella direzione z nel barrel : 0.1 m			

Tab. 7.1 sommario delle caratteristiche della nodalizzazione Trio_U

7.3 ANALISI DEI RISULTATI PER IL DOWNCOMER SENZA BARREL

7.3.1 andamento del profilo di temperatura

Nelle figure seguenti (fig 7.5–7.7) si riportano le immagini relative all'andamento del profilo di temperatura nella zona fluida del *downcomer*, fino a 410 secondi dall'inizio del transitorio. La temperatura del fluido all'istante iniziale è stata assunta pari a 562 K. In primo piano il bocchello dal quale entra il fluido raffreddato a seguito del MSLB. Si può facilmente osservare che il fenomeno di raffreddamento appare limitato alla zona sottostante tale bocchello. Nella parte alta del *downcomer* subito sotto l'ingresso della *Cold Leg* numero 1 non si notano effetti di mescolamento rilevanti; nella zona più bassa invece, sotto la metà del *downcomer*, si vede bene la formazione e l'evoluzione di ampi vortici di temperatura, che lasciano presupporre la presenza di un più marcato mescolamento fra zone fluide a temperatura diversa. Dalle figure si può osservare che il valore minimo di temperatura, pari a 466 K, si raggiunge dopo circa 90 secondi dall'inizio del transitorio. Come avremo modo di analizzare meglio in seguito 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 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.

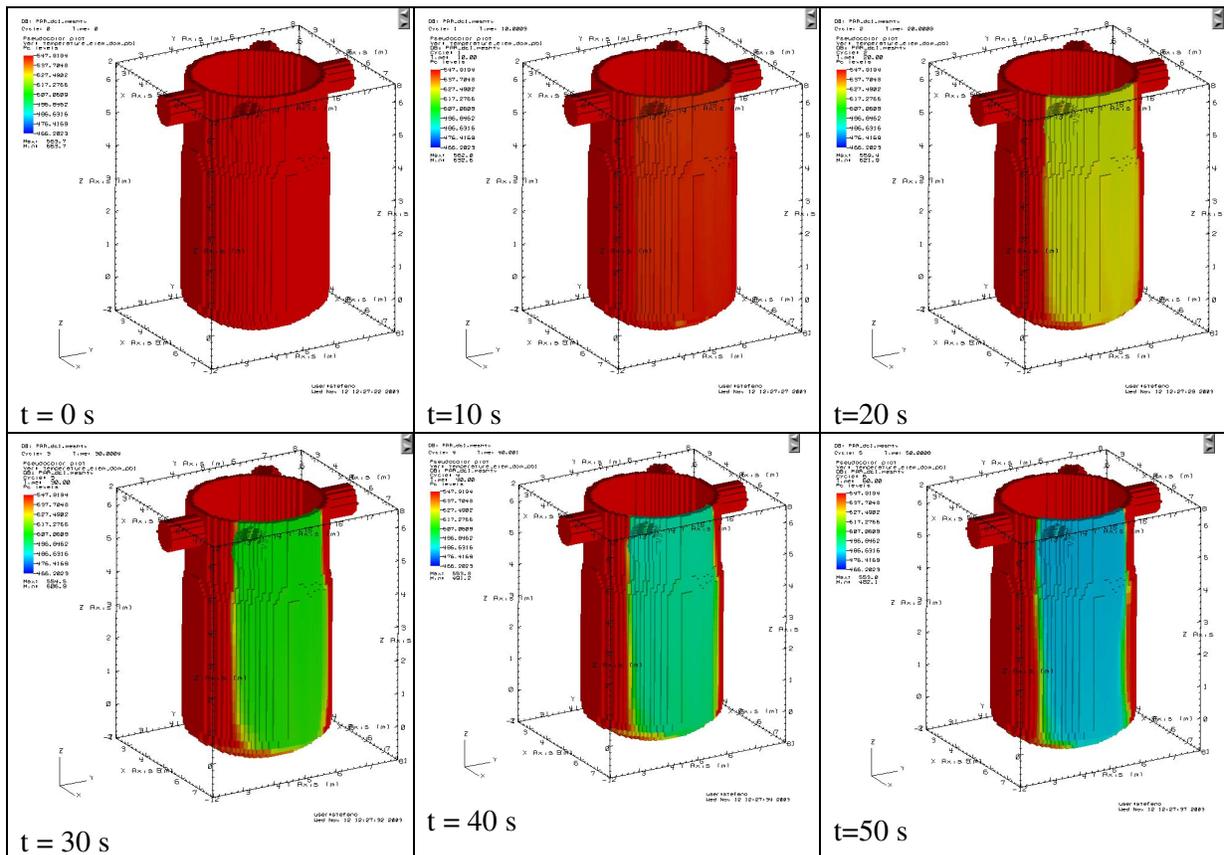


Fig.7.5 Andamento del profilo di temperatura nella zona fluida del downcomer a vari istanti

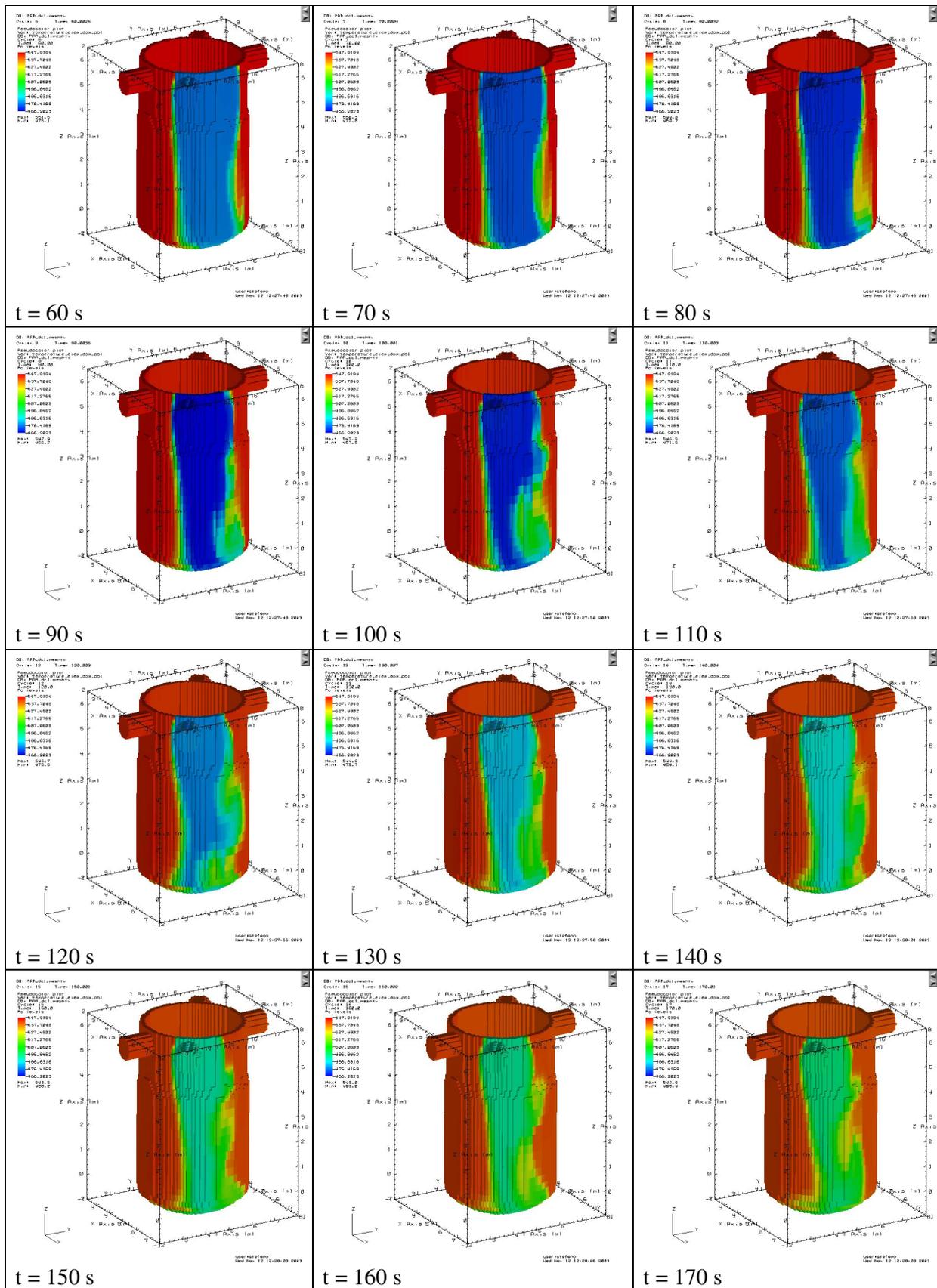


Fig.7.6 Andamento del profilo di temperatura nella zona fluida del downcomer a vari istanti

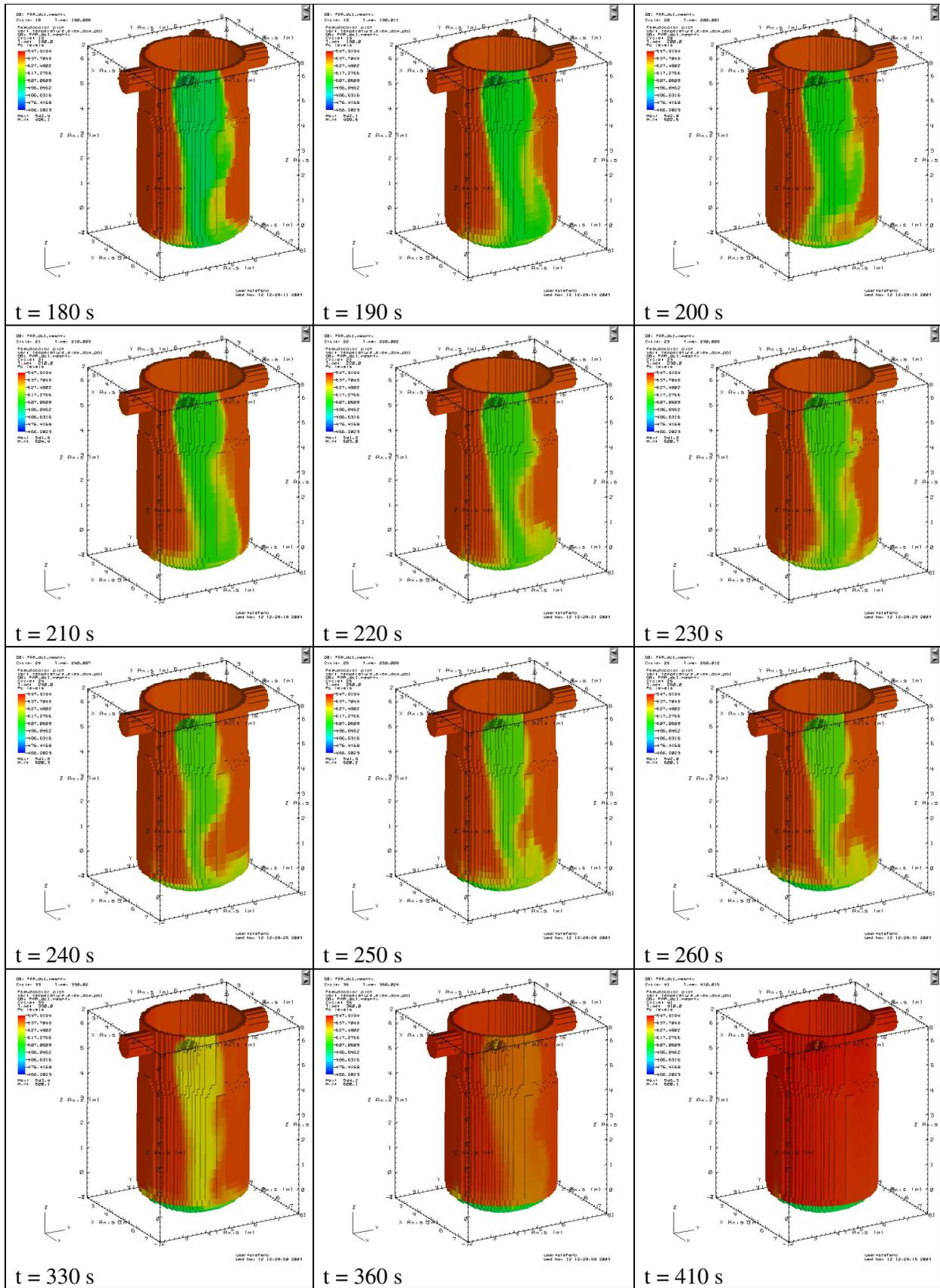


Fig.7.7 Andamento del profilo di temperatura nella zona fluida del downcomer a vari istanti

7.3.2 andamento del profilo di temperatura in prossimità della cricca ipotizzata

Le figure seguenti (fig. 7.8 – 7.9) mostrano una sezione del *downcomer* in prossimità della zona ove è stata supposta la presenza della cricca. I grafici riportano la distribuzione di temperatura fino a 170 secondi dall'inizio del transitorio. Si può notare come il fenomeno di raffreddamento interessi una parte limitata del *vessel* (circa 1/4) e come nell'istante in cui il raffreddamento è più marcato (intorno a 90 -100 secondi dall'inizio del transitorio) la zona più interessata sia localizzata in corrispondenza della *Cold Leg* numero 1. La figura fig 7.10 riporta l'andamento in funzione del tempo della temperatura del fluido (misurata con Trio_U) nella zona ove è stata posta la cricca confrontata con l'analoga temperatura determinata con il codice Relap. Si nota effettivamente il valore inferiore di temperatura calcolata con Trio_U (la temperatura rimane simile fino a 40 secondi; da 40 secondi in poi il codice CFD calcola una temperatura inferiore di circa 30 °C). Il mescolamento del fluido (freddo proveniente dalla CL 1 e caldo proveniente dalle altre *Cold Legs*) risulta pertanto meno marcato di quanto ipotizzato da Relap. Studi condotti recentemente presso il DIMNP [9] permettono di ipotizzare 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*. A titolo di esempio, con la prospettiva di implementare uno studio accoppiato CFD→FEM per stimare al meglio l'andamento del KI, si riporta in figura 7.11 l'andamento del SIF per l'apice della cricca bidimensionale da 16 mm ottenuto apportando le correzioni sopra menzionate. A fronte di un aumento del valore massimo del SIF (da 85 MPa√m a 93 MPa√m) si ha una diminuzione del margine di sicurezza dal momento che la RNDT passa da 214 a 180 °C (variazione di circa 30 gradi).

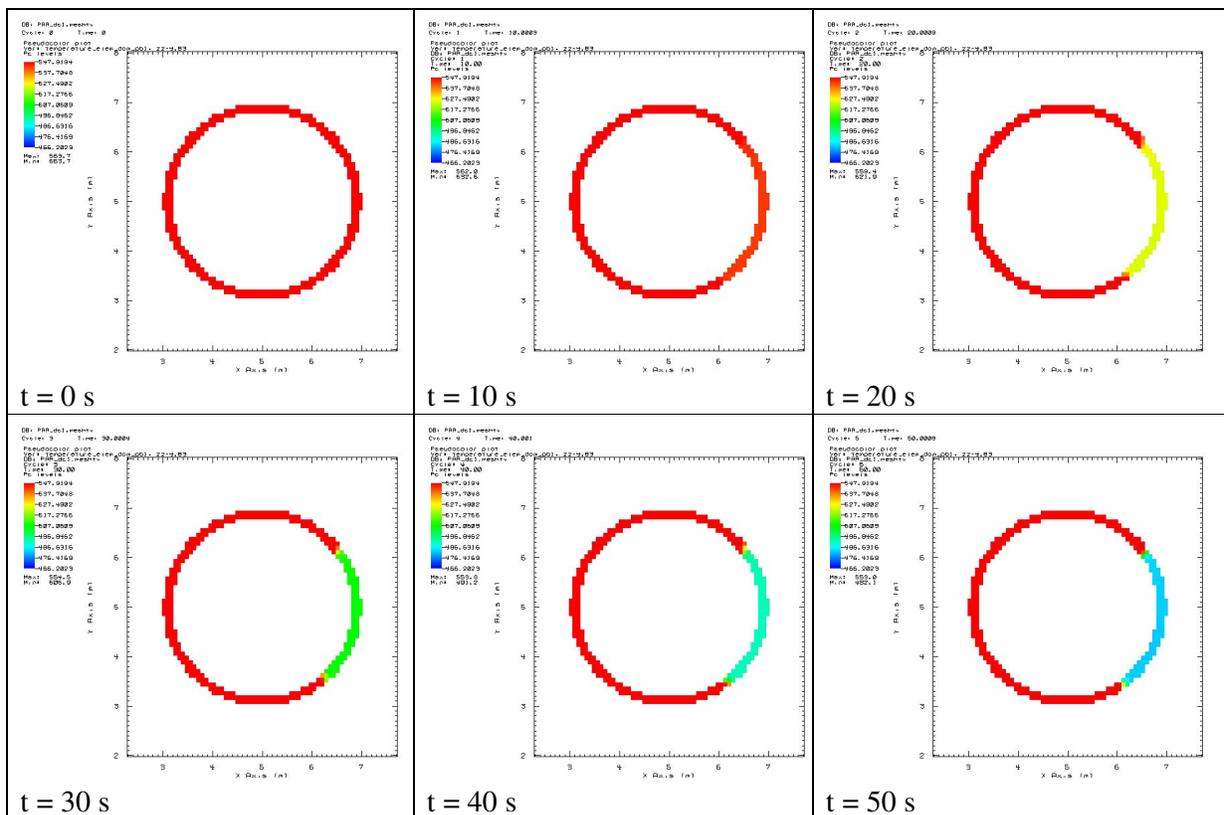


Fig. 7.8 andamento della temperatura in una sezione del *downcomer* (in prossimità della cricca ipotizzata)

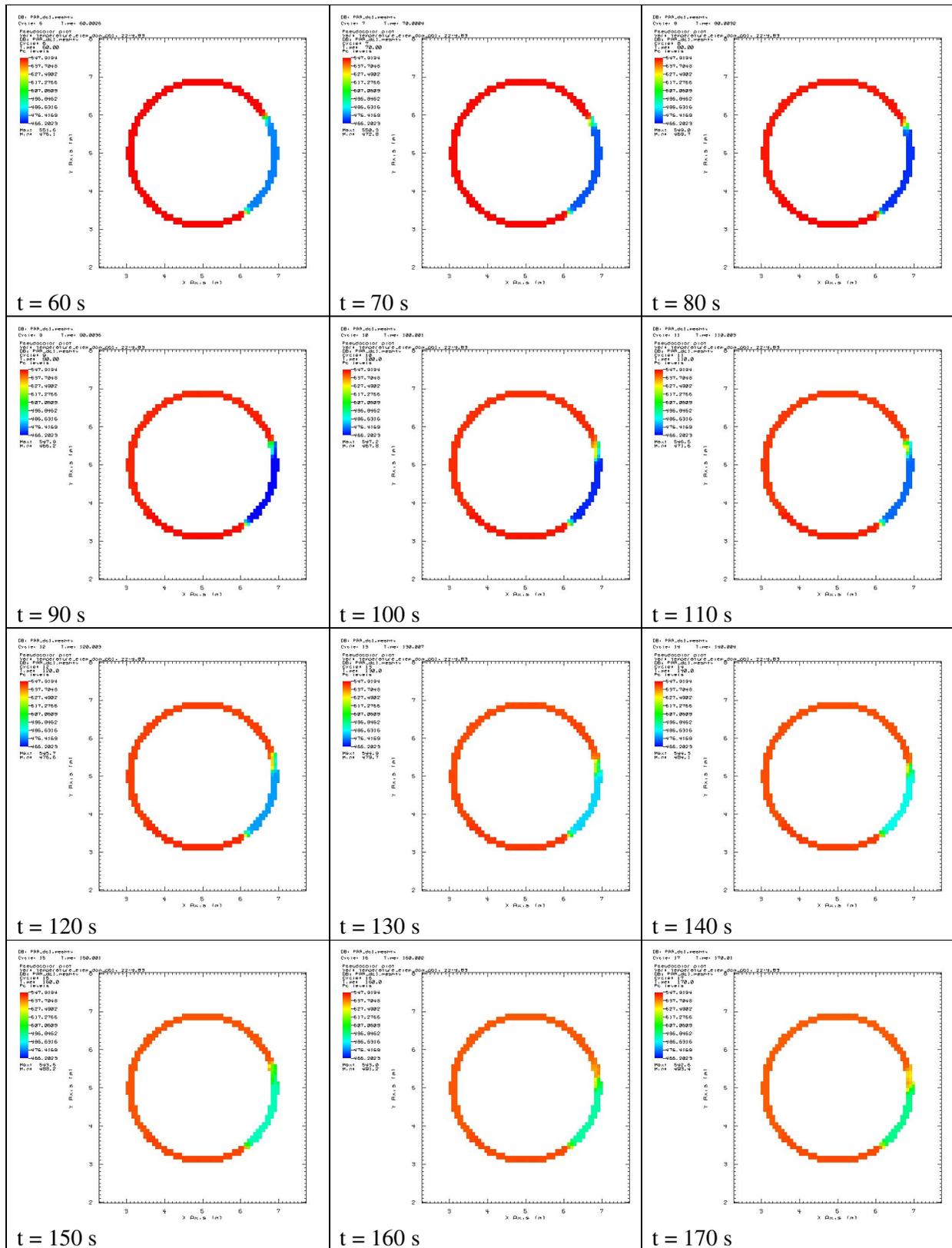


Fig. 7.9 andamento della temperatura in una sezione del downcomer (in prossimità della cricca ipotizzata)

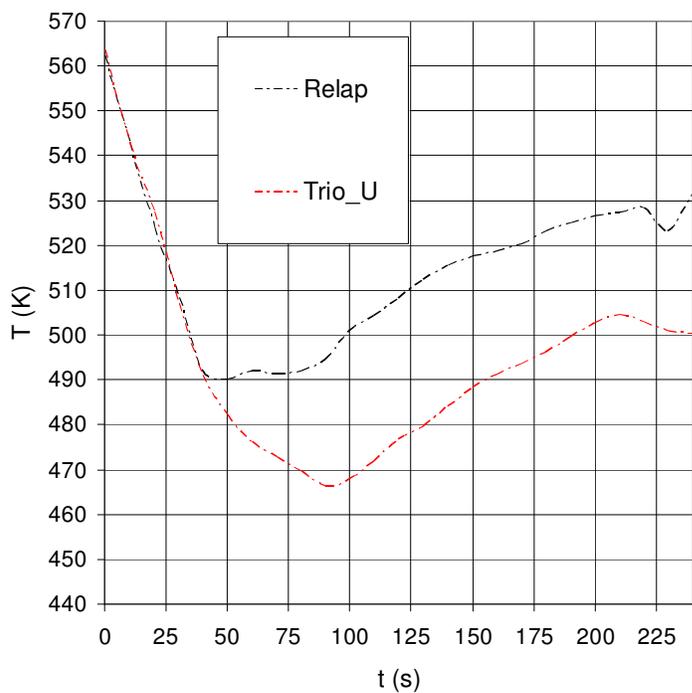


Fig. 7.10 andamento del profilo di temperatura del fluido in prossimità della cricca determinato con il codice di sistema Relap5 e con il codice CFD Trio_U

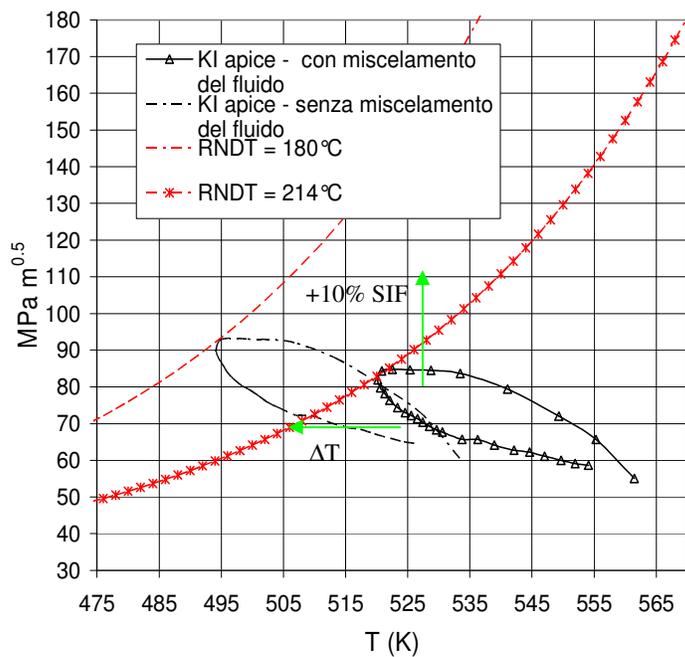


Fig.7.11 correzione alla curva del SIF in base agli effetti del miscelamento studiati con Trio_U

7.4 ANALISI DEI RISULTATI PER IL DOWNCOMER CON BARREL

7.4.1 andamento del profilo di temperatura

Nelle figure seguenti (fig 7.12-7.13) si riportano le immagini relative all'andamento del profilo di temperatura nella zona fluida del modello Trio_U dotato di piastra forata (simulante la parte inferiore del *barrel*), fino a 160 secondi dall'inizio del transitorio. In primo piano il bocchello dal quale entra il fluido raffreddato a seguito del MSLB. La presenza della piastra non perturba la distribuzione di temperatura. Come già notato nel paragrafo 7.3.1 si osserva che il fenomeno di raffreddamento è limitato alla zona sottostante la CL 1. Nella parte alta del *downcomer*, non si notano effetti di mescolamento rilevanti; nella zona più bassa invece, sotto la metà del *downcomer*, si vede bene la formazione e l'evoluzione di ampi vortici, che lasciano presupporre la presenza di un più marcato mescolamento fra zone fluide a temperatura diversa. Il valore minimo di temperatura, pari a 466 K come per il modello senza piastra, si raggiunge dopo circa 90 secondi dall'inizio del transitorio. La figura fig 7.14, riportante il confronto fra le temperature del fluido in prossimità della cricca determinate con Trio_U (per i due modelli) e con il codice Relap, mette in evidenza che la presenza del *barrel* non determina variazione significativa nell'andamento della temperatura in tale zona; ciò deriva dalla elevata distanza della cricca dalla zona di perturbazione indotta dalla presenza della piastra forata.

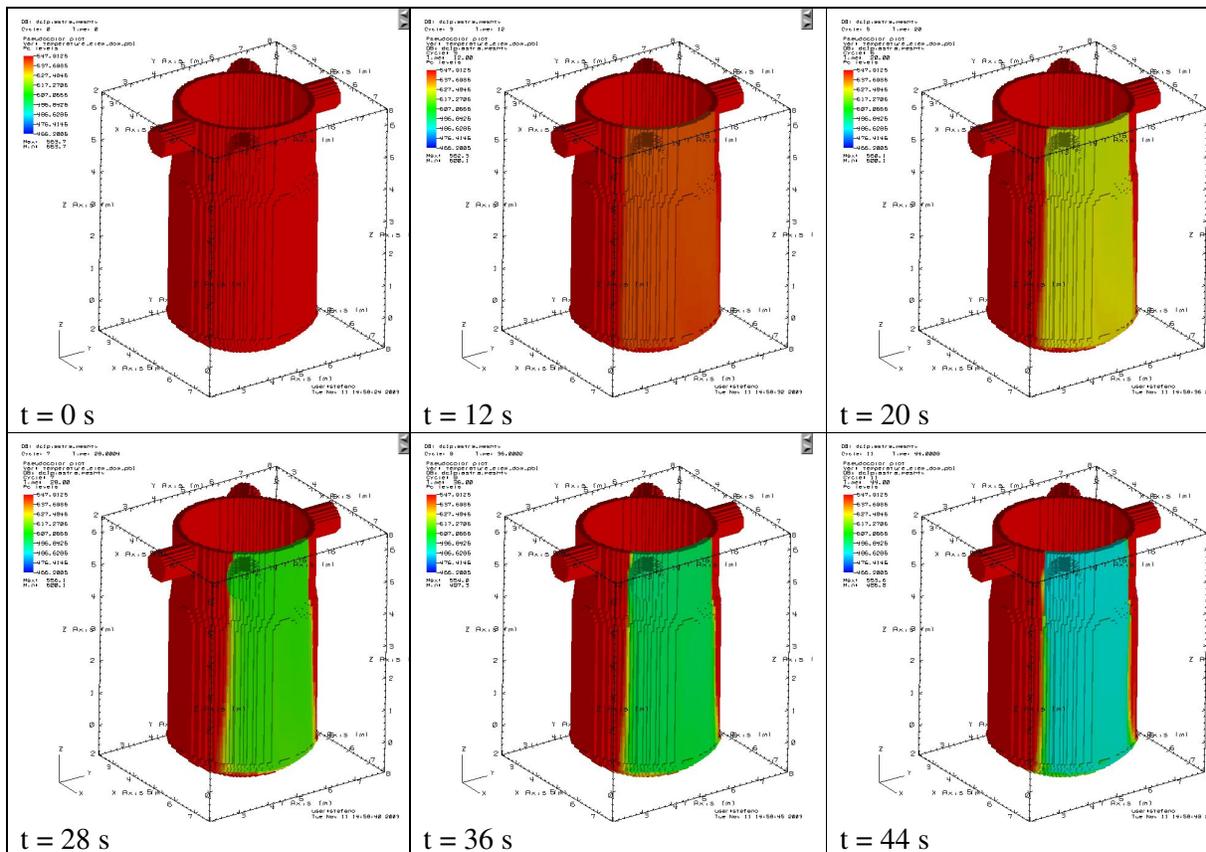


Fig. 7.12 andamento del profilo di temperatura nella zona fluida del downcomer con barrel a vari istanti

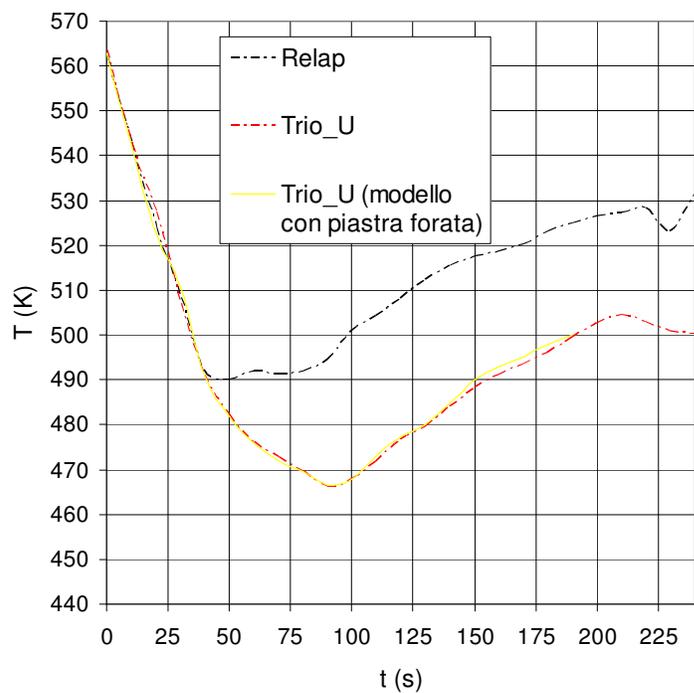


Fig. 7.14 andamento della temperatura del fluido in prossimità della cricca

7.4.2 andamento del profilo di temperatura in una sezione assiale del downcomer

Le figure seguenti (fig 7.15 – 7.16) mostrano una sezione del *downcomer* effettuata con un piano parallelo all'asse *z* e passante per le *Cold Legs* 2 e 3. Si può notare qualitativamente l'effetto indotto dalla presenza della piastra forata, che determina la formazione di ampi vortici di temperatura e zone ad elevato mescolamento nel *plenum inferiore* man mano che il fluido freddo tende ad interessare la zona. L'effetto può osservarsi anche nella figura 7.17 che riporta una sezione della piastra.

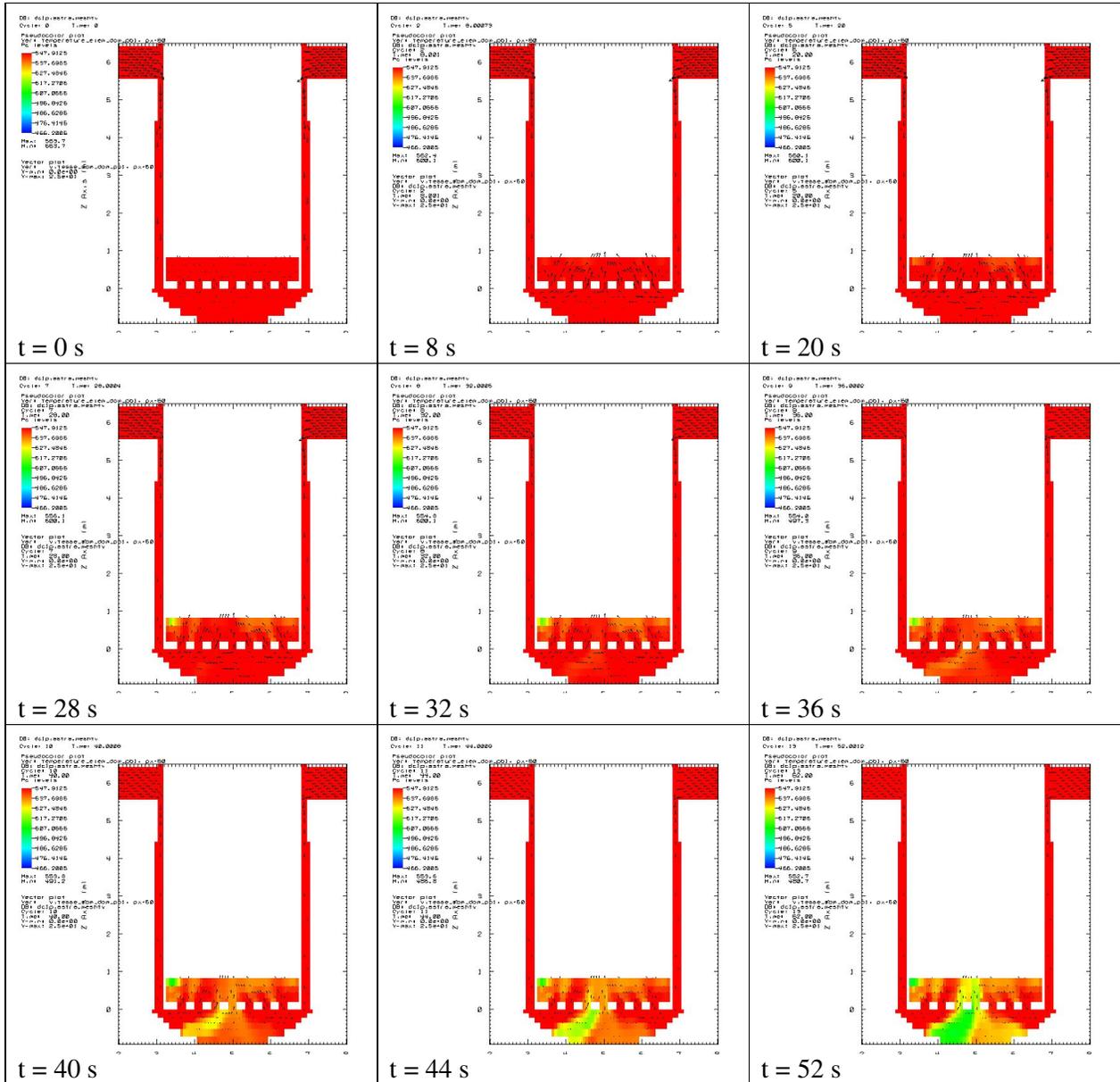


Fig.7.15 andamento della temperatura del fluido in una sezione ortogonale del downcomer

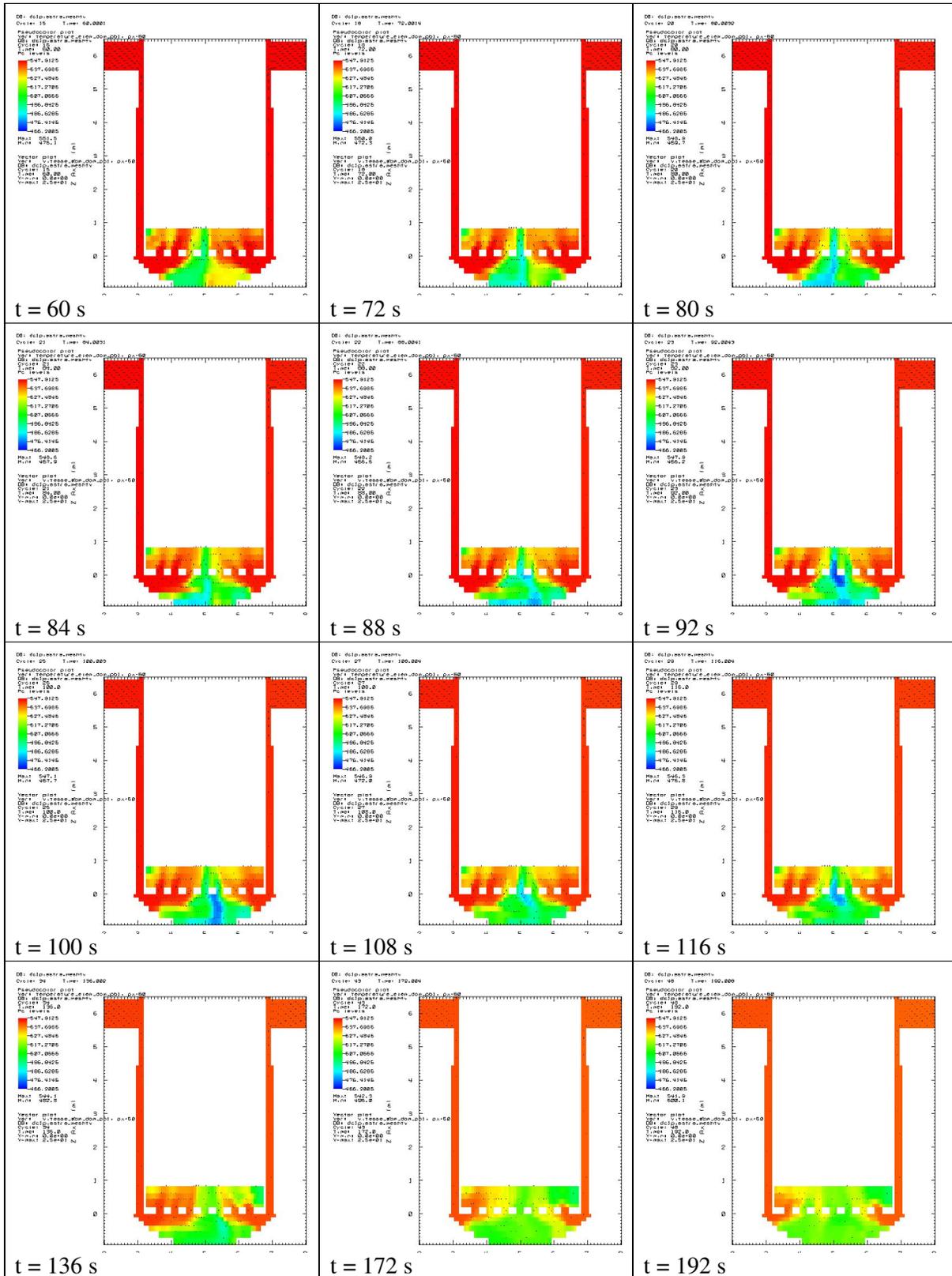


Fig.7.16 andamento della temperatura del fluido in una sezione ortogonale del downcomer

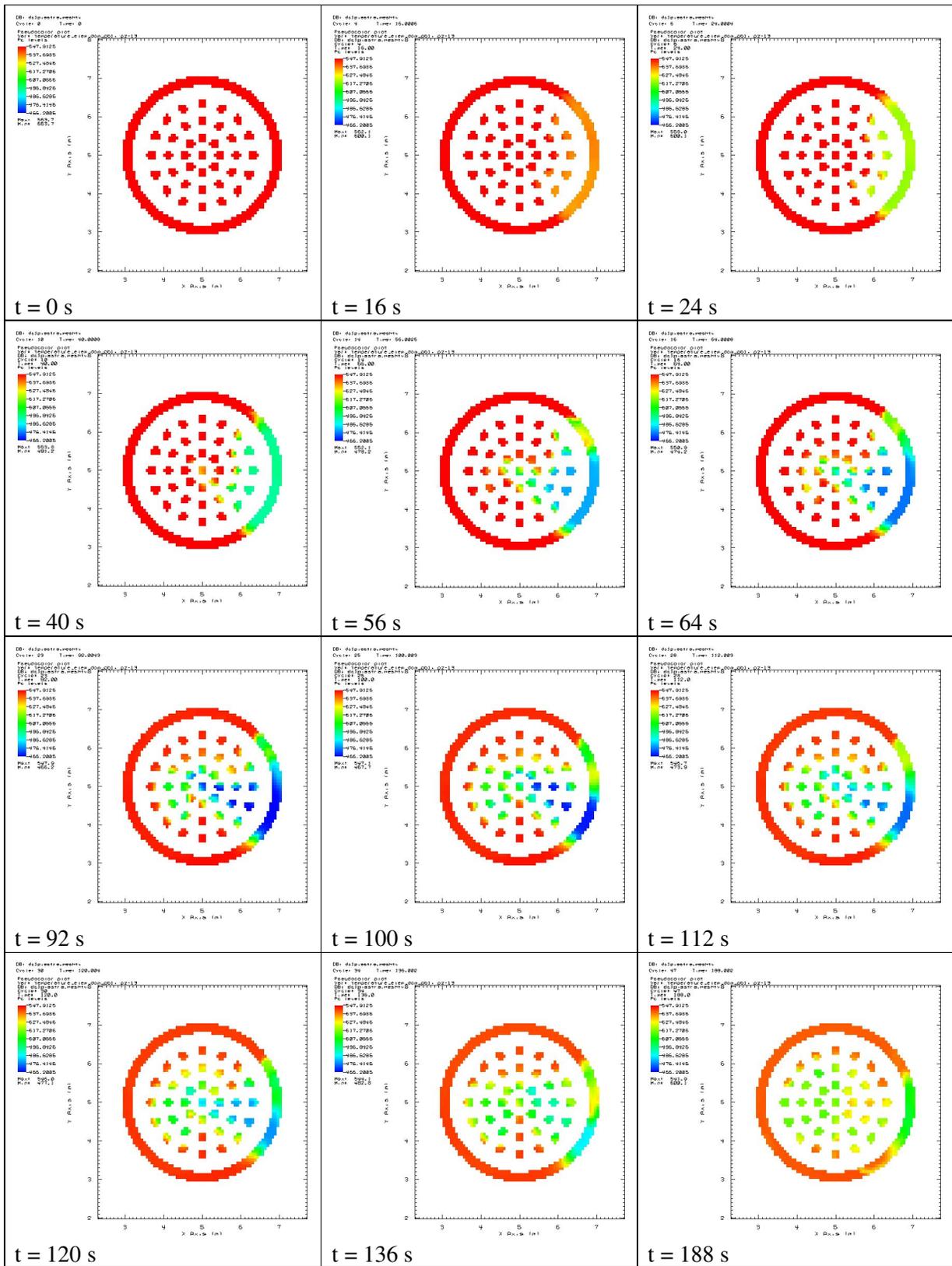


Fig. 7.17 andamento della temperatura in una sezione della piastra forata