



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



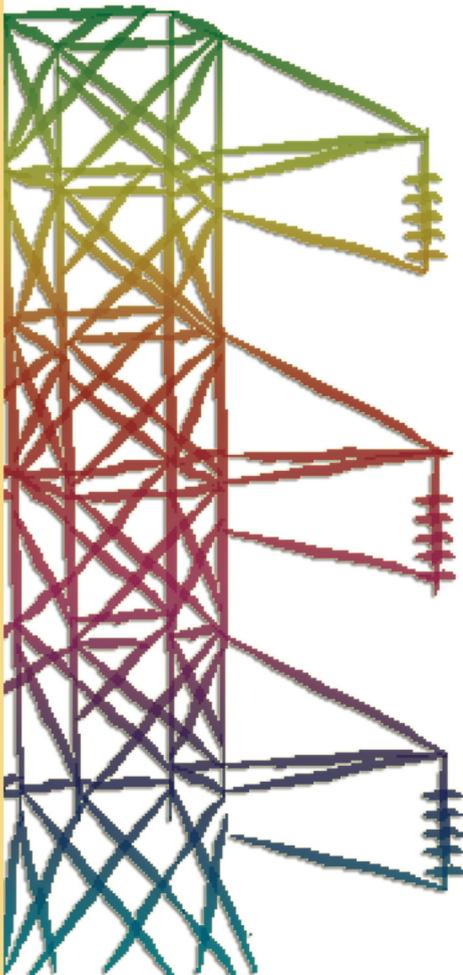
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

### **Analisi semplificata del transitorio conseguente all'ipotetica rottura di uno dei tubi del DHR tramite il codice SIMMER III**

**W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, D. Pellini**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA SISTEMA ELETTRICO

Analisi semplificata del transitorio conseguente all'ipotetica rottura  
di uno dei tubi del DHR tramite il codice SIMMER III

*W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, D. Pellini*



ANALISI SEMPLIFICATA DEL TRANSITORIO CONSEGUENTE ALL'IPOTETICA ROTTURA DI UNO  
DEI TUBI DEL DHR TRAMITE IL CODICE SIMMER III

W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, D. Pellini (CIRTEN)

Luglio 2008

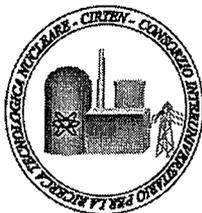
Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA



**CIRTEN**  
**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO**  
**PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

**UNIVERSITA' DI PISA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA NUCLEARE E DELLA  
PRODUZIONE**

**Analisi semplificata del transitorio conseguente all'ipotetica rottura di  
uno dei tubi del DHR tramite il codice SIMMER III**

**W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, D. Pellini**

**CIRTEN CERSE-UNIFI RL 1070/2008**

**PISA, Luglio 2008**

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP3 punto B dell'AdP ENEA-MSE del 21/06/07  
Tema 5.2.5.8 – "Nuovo Nucleare da Fissione".*

## Sommario

Questo documento è stato redatto dal CIRTEN nell'ambito dell'attività di R&S riguardante il programma triennale italiano sul nuovo nucleare da fissione. In particolare, esso fa parte della linea progettuale 3, punto B (Tecnologie LFR: realizzazione e commissioning sezione di prova DHR e analisi pre-test), inerente ai "Reattori innovativi di quarta generazione".

L'oggetto del lavoro riguarda l'esecuzione di uno studio preliminare, realizzato tramite il codice SIMMER III, finalizzato all'acquisizione di indicazioni circa gli andamenti delle variabili più significative delle varie componenti, quali ad esempio pressione e temperatura, in caso di rottura del singolo tubo della sezione di prova prevista nell'apparecchiatura CIRCE per lo studio del DHR del reattore ELSY. In particolare,

Lo studio è stato effettuato sviluppando un modello semplificato della sezione di prova ed ha preso in esame gli effetti derivanti da una ipotetica rottura a ghigliottina di uno dei tubi del DHR. A tale scopo, sono stati presi a riferimento diversi parametri, quali: tre diverse profondità di rottura del tubo, rottura in corrispondenza di una sezione in cui è presente liquido oppure vapore all'interno del tubo, due differenti possibili volumi del collettore di mandata dell'acqua nel DHR e due differenti pressioni di iniezione dell'acqua all'interno del DHR.

Dai risultati ottenuti si è visto che il vessel dell'apparecchiatura CIRCE, contenente LBE, non è soggetto a particolari sovrappressioni che possano costituire pericolo per la sua integrità. All'interno del tubo nel quale viene iniettata l'acqua si hanno, invece, oscillazioni di pressione che possono raggiungere valori di picco di circa 20 bar. Una rottura del tubo contenente vapore di acqua risulta essere meno pericolosa ai fini delle oscillazioni di pressione all'interno del tubo stesso.

# Indice

## Sommario

<b>1. Descrizione della sezione di prova contenente lo scambiatore.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Modelli sviluppati per le simulazioni con il codice SIMMER III.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Risultati ottenuti.....</b>	<b>7</b>
<b>3.1 Confronto tra le simulazioni 1, 2 e 3.....</b>	<b>7</b>
<i>3.1.1 Andamento delle pressioni all'interno del vessel.....</i>	<i>7</i>
<i>3.1.2 Andamento delle pressioni all'interno del tubo di acqua.....</i>	<i>14</i>
<b>3.2 Simulazioni 4, 5 e 6.....</b>	<b>24</b>
<i>3.2.1 Confronto tra le simulazioni 1 e 4.....</i>	<i>24</i>
<i>3.2.2 Confronto tra le simulazioni 2 e 5.....</i>	<i>26</i>
<i>3.2.3 Confronto tra le simulazioni 3 e 6.....</i>	<i>27</i>
<b>3.3 Simulazione 7 e confronto con la simulazione 1.....</b>	<b>29</b>
<i>3.3.1 Andamento delle pressioni all'interno del vessel.....</i>	<i>29</i>
<i>3.3.2 Andamento delle pressioni all'interno del tubo di acqua.....</i>	<i>30</i>
<b>3.4 Simulazioni 8, 9 e 10.....</b>	<b>34</b>
<i>3.4.1 Simulazione 8 e suo confronto con la simulazione 1.....</i>	<i>34</i>
<i>3.4.2 Simulazione 9 e suo confronto con la simulazione 2.....</i>	<i>39</i>
<i>3.4.3 Simulazione 10 e suo confronto con la simulazione 3.....</i>	<i>41</i>
<b>4. Conclusioni.....</b>	<b>45</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>46</b>

## 1. Descrizione della sezione di prova contenente lo scambiatore

Nell'ambito dello studio e dello sviluppo delle tecnologie per il reattore europeo refrigerato a piombo ELSY è prevista una campagna sperimentale che verrà realizzata mediante l'inserimento di una sezione di prova nell'apparecchiatura CIRCE (v. Figura 1), installata presso il Centro di Ricerca ENEA del Brasimone.

Lo scambiatore di calore, per lo studio del comportamento del DHR di ELSY, verrà collocato all'interno del contenitore S100 dell'apparecchiatura CIRCE, come mostrato in Figura 1. Esso è formato da un fascio tubiero circondato da una gonna cilindrica di diametro esterno pari a 335 mm. Ciascun tubo risulta in realtà composto da tre tubi coassiali (v. Figura 2):

1. il tubo più interno, di diametro pari a 5.89 mm e lunghezza pari a 4869 mm, permette il flusso dell'acqua, inizialmente ad una temperatura compresa nell'intervallo tra 60°C e 80°C, che da un collettore posto sulla sommità dello scambiatore stesso viene convogliata verso il basso, per poi risalire verso l'alto;
2. il tubo intermedio, di diametro interno pari a 14.83 mm e lunghezza pari a 4544 mm, permette il flusso del vapore convogliandolo in un'apposita "camera" posta al di sotto della zona di raccolta dell'acqua;
3. il tubo più esterno, di diametro interno pari a 21.74 mm, lunghezza pari a 4502 mm crea una regione anulare con spessore pari ad 1 mm, che contiene elio a pressione atmosferica, circolante all'interno di un circuito ad esso dedicato.

Al di sopra della gonna che circonda i tubi è posto un vaso di espansione riempito parzialmente di LBE (v. Figura 1). Il vaso di espansione è in comunicazione, tramite la regione superiore contenente il gas di copertura, ad un contenitore di argon che rappresenta il "volume morto" dell'apparecchiatura. Il volume complessivo di argon risulta essere pari a circa 1.746 m<sup>3</sup>, mentre quello di LBE è pari a 7.576 m<sup>3</sup>.

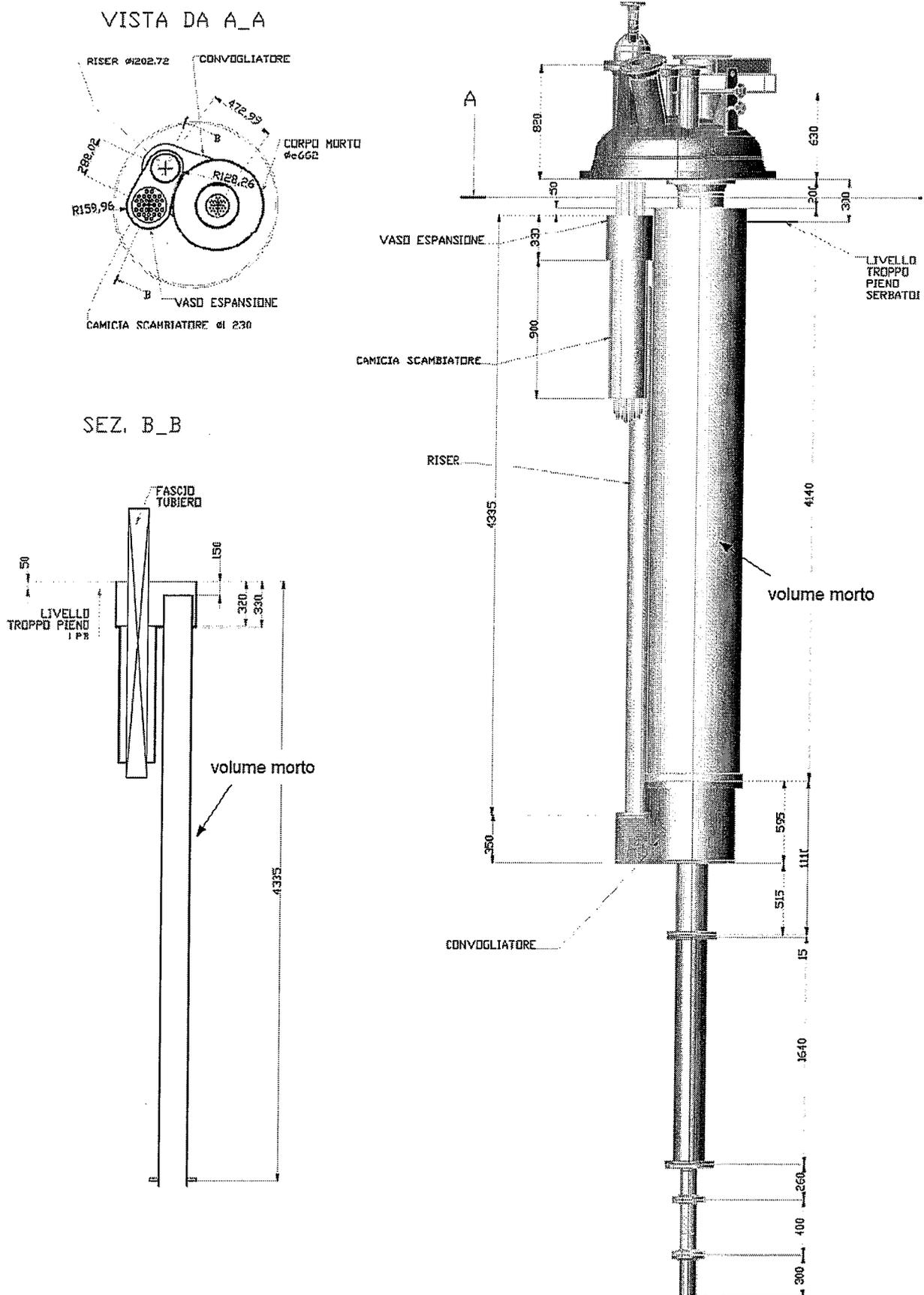


Figura 1. Schema semplificato dei componenti interni dell'apparecchiatura CIRCE

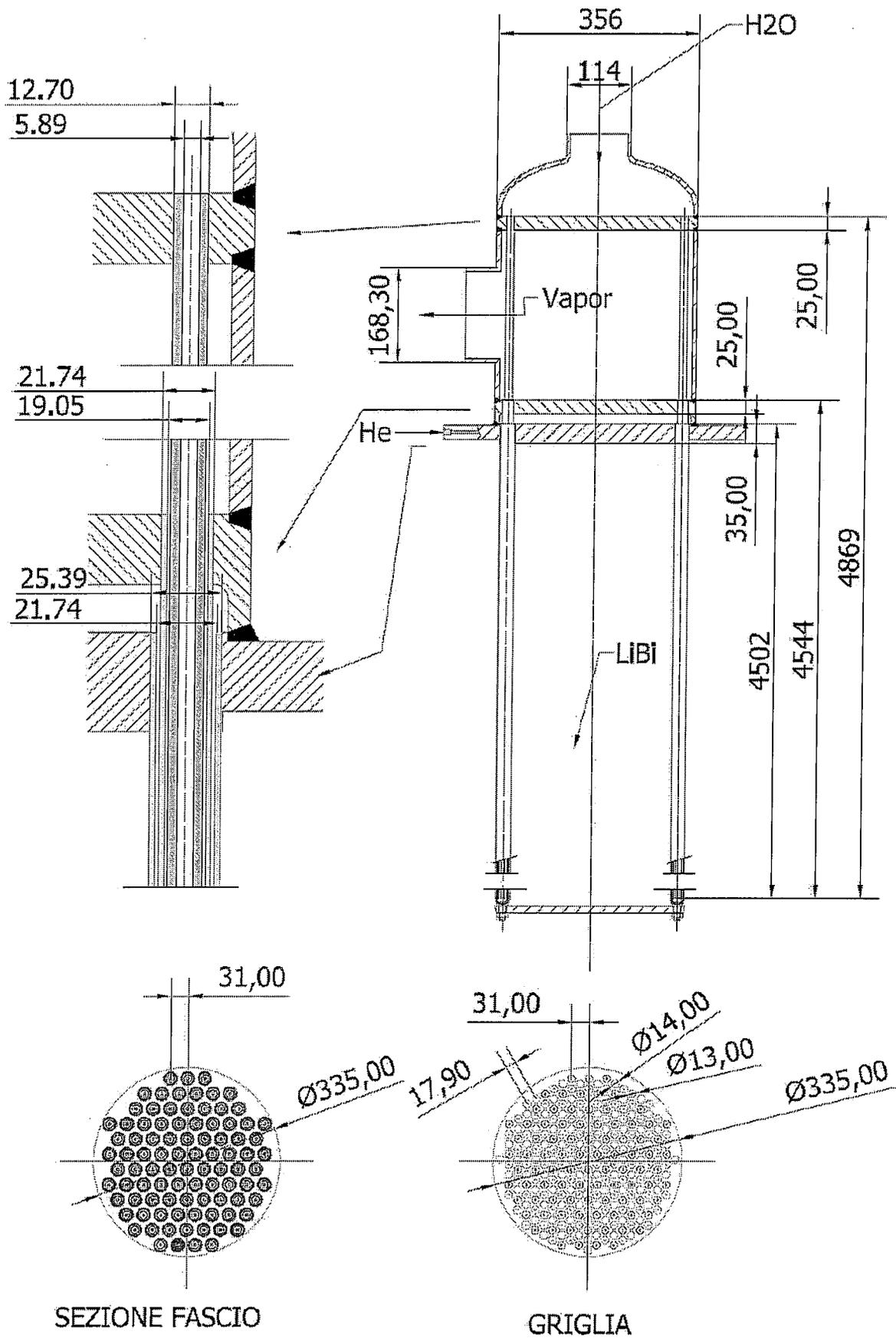


Figura 2. Rappresentazione schematica dello scambiatore di calore previsto in CIRCE

## 2. Modelli sviluppati per le simulazioni con il codice SIMMER III

Il codice utilizzato per questo studio è il SIMMER III, già utilizzato nelle analisi di pre-test e di post-test della prima e della seconda prova condotta sull'apparecchiatura LIFUS 5 [1, 2] ed utilizzato per calcoli previsionali inerenti l'analisi di sicurezza dell'apparecchiatura CIRCE [2]. Come già visto in precedenza [1] l'apparecchiatura CIRCE è caratterizzata da una geometria fortemente asimmetrica, i cui principali elementi di asimmetria sono costituiti dal "volume morto" di argon e dai tubi della sezione dello scambiatore previsto per le prove inerenti il DHR di ELSY.

Tali asimmetrie hanno reso necessario un lavoro preliminare di semplificazione della geometria reale e di messa a punto di un modello che tenga conto di diverse ipotesi introdotte al fine di ricondurre il sistema ad una geometria cilindrica bidimensionale. In particolare:

1. i volumi totali di argon e di LBE vengono conservati;
2. il "volume morto" viene schematizzato attraverso una regione anulare;
3. il tubo nel quale si verifica la rottura è posto in posizione centrale;
4. viene considerato solo la parte interna del tubo contenente acqua nel quale si verifica la rottura;
5. vengono considerate indipendentemente le due condizioni con acqua in fase liquida ed in fase vapore all'interno del tubo;
6. viene trascurato il possibile effetto combinato che potrebbe esserci a seguito della rottura dalla contemporanea presenza di acqua in fase liquida e vapore e di elio nei tre volumi coassiali.

In Figura 3 vengono riportati i modelli geometrici semplificati utilizzati per le simulazioni, con indicate le pressioni e le temperature iniziali dei vari componenti considerati. In particolare, il dominio di calcolo contiene le seguenti parti della sezione di prova:

- la piscina di LBE, schematizzata come unico recipiente cilindrico;
- il volume di argon sopra il pelo libero dell'LBE ed il volume di argon racchiuso nel volume morto (regione anulare attorno al tubo);
- il tubo contenente inizialmente acqua immerso all'interno dell'LBE fino alla relativa sezione di rottura a ghigliottina, schematizzato come descritto nei punti 3 e 4 del precedente elenco;
- la parete del tubo, di spessore pari a 3.405 mm, schematizzata attraverso una regione di "non calcolo";
- il collettore di acqua posto al di sopra del fascio tubiero, schematizzato come un recipiente cilindrico nel quale è contenuto un dato volume di acqua; non essendo disponibili dati precisi al riguardo, sono stati presi a riferimento due casi: 20 l e 80 l.

La discretizzazione spaziale del dominio è stata ottenuta suddividendolo radialmente in 38 intervalli e assialmente in 54. L'LBE occupa radialmente le posizioni da 1 a 38 ed assialmente quelle da 1 a

39; l'argon contenuto all'interno del "volume morto" è rappresentato dalla porzione di dominio compresa radialmente tra le posizioni 31 e 33 ed assialmente tra le posizioni 6 e 39, mentre l'argon di copertura è compreso nella porzione di dominio tra le posizioni radiali 3 e 38 ed assiali 40 e 46; il collettore è incluso radialmente tra le posizioni 1 e 8 ed assialmente tra la 53 e la 54.

L'analisi preliminare è stata condotta attraverso uno studio parametrico che ha preso a riferimento tre diverse posizioni assiali di rottura del tubo dello scambiatore, considerate nel tratto rettilineo, simulate mediante tre diverse profondità di immersione della tubazione di iniezione. Sono state condotte due serie di prove basate su due differenti condizioni incidentali: la prima serie è stata incentrata sull'iniezione di acqua in fase liquida all'interno dell'LBE, considerando due volumi del collettore di acqua pari, rispettivamente, a 20 e 80 l; la seconda serie, invece, è stata incentrata sull'iniezione di solo vapore all'interno dell'LBE. Per quest'ultima serie di prove è stato considerato il solo collettore da 20 l.

In particolare, per ogni serie di prove, i tre casi presi in esame per la profondità di immersione della sezione di rottura sono i seguenti:

- iniezione di acqua a 3600 mm, corrispondente ad una rottura nella parte più bassa del tubo;
- iniezione di acqua a 1800 mm, corrispondente ad una rottura nella parte intermedia del tubo;
- iniezione di acqua a 900 mm, corrispondente ad una rottura nella parte alta del tubo, quindi più vicino alla superficie libera di LBE ed alla zona di argon.

Per ciascun caso sono state messe a punto opportune nodalizzazioni: per il caso con iniezione a 3600 mm le celle contenenti acqua sono quelle comprese tra le posizioni assiali dalla 7 alla 52, per il caso a 1800 mm sono quelle comprese dalla 24 alla 52 ed infine per il caso a 900 mm sono quelle comprese dalla 33 alla 52. Radialmente il tubo occupa solo la prima fila di celle ed ha un raggio di 2.945 mm. La matrice delle simulazioni effettuate per lo studio parametrico è riportata in tabella 1.

Simulazione	Pressione di iniezione dell'acqua [bar]	Profondità della rottura dal pelo libero di LBE [mm]	Diametro del tubo sottoposto a rottura [mm]	Temperatura di iniezione dell'acqua [°C]	Volume del Collettore di acqua [l]
1	1 (+ battente)	3600	5.89	60	20
2	1 (+ battente)	1800	5.89	60	20
3	1 (+ battente)	900	5.89	60	20
4	1 (+ battente)	3600	5.89	60	80
5	1 (+ battente)	1800	5.89	60	80
6	1 (+ battente)	900	5.89	60	80
7	2.5(+battente)	3600	5.89	60	20
8	1 (vapore)	3600	5.89	120	20
9	1 (vapore)	1800	5.89	120	20
10	1 (vapore)	900	5.89	120	20

Tabella 1. Matrice delle simulazioni effettuate

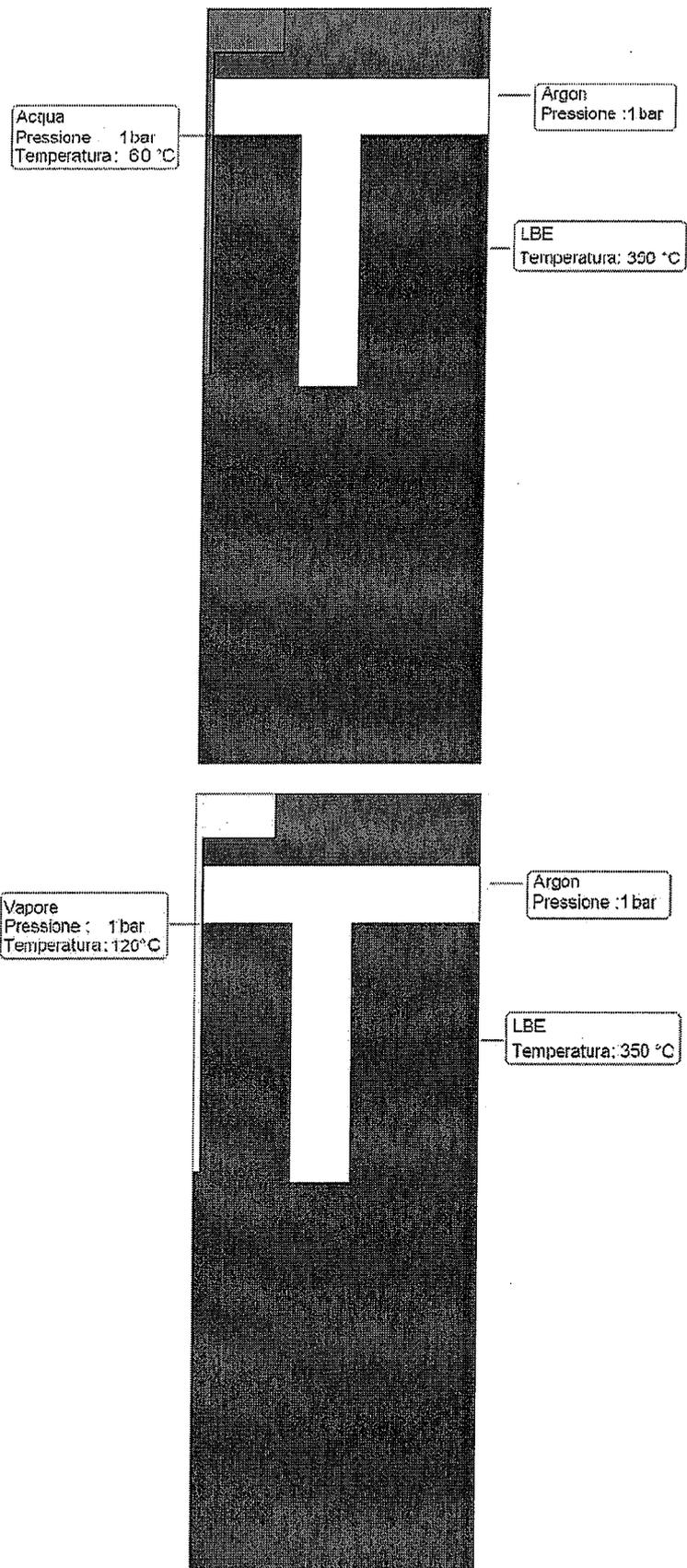


Figura 3. Rappresentazione schematica dei domini di calcolo sviluppati

### 3. Risultati ottenuti

#### 3.1 Confronto tra le simulazioni 1, 2 e 3

##### 3.1.1 Andamento delle pressioni all'interno del vessel

La prima analisi comparativa è stata condotta prendendo a riferimento un collettore di acqua di 20 l. Per tali simulazioni, come risulta dalla Tabella 1, sono state scelte le seguenti condizioni di prova:

- profondità di rottura del tubo di acqua: 3600, 1800 e 900 mm;
- temperatura dell'acqua: 60° C
- diametro del tubo di acqua: 5.89 mm;
- temperatura LBE: 350° C;
- pressione dell'argon: 1 bar.

Per il confronto tra gli andamenti temporali della pressione all'interno del volume contenente LBE ed argon sono state prese a riferimento tre diverse posizioni assiali ovvero la 6 che si trova in metallo liquido al di sotto del punto di rottura, la 35 in prossimità del pelo libero di LBE e la 44 posta invece in argon. Per quanto riguarda le posizioni radiali sono state scelte la 3, posta sulla parete esterna del tubo, la 18 posta nella regione compresa tra il tubo ed il corpo morto, la 30 posta sulla parte interna della regione anulare del corpo morto ed, infine, la 36 posta nella zona tra il corpo morto e la parete del vessel. Le dodici celle prese in esame sono indicate in Figura 4.

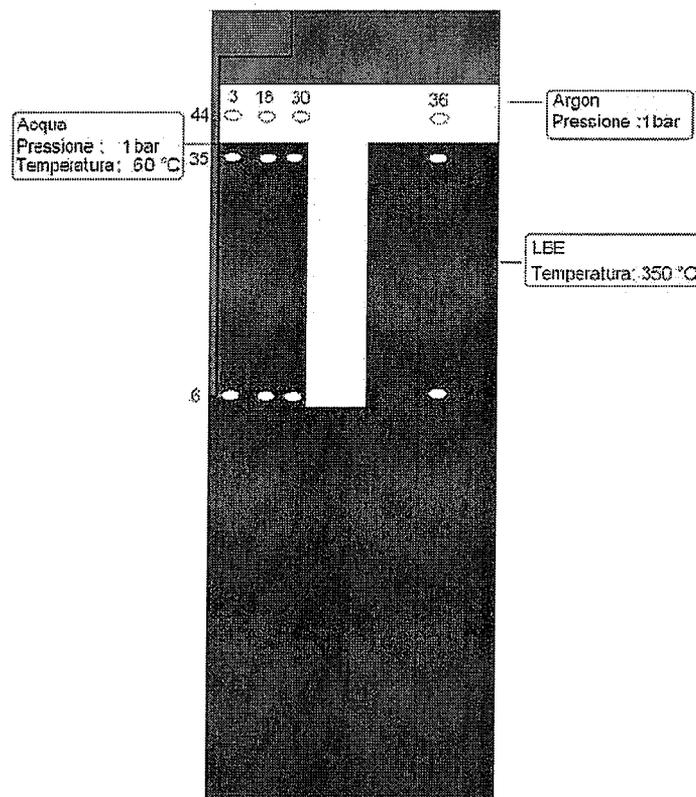


Figura 4. Posizione delle celle considerate per i confronti delle simulazioni

Nelle Figure dalla 5 alla 7 vengono analizzati gli effetti della rottura del tubo ad una profondità di 3.6 m all'interno del vessel. La rottura del tubo del DHR provoca la comparsa di un picco di pressione nell'LBE che risulta più elevato nelle celle più vicine alla sezione di rottura stessa (v. Figura 5). In particolare, contestualmente all'istante di rottura del tubo (ovvero a 0.5 s), nella cella (3, 6) si raggiunge un massimo di pressione pari a 4.75 bar, mentre all'aumentare della distanza radiale dalla rottura tale picco risulta smorzato raggiungendo 4.6 bar nella cella (36, 6). L'effetto della rottura ovviamente è mitigato, oltre che radialmente, anche assialmente: esaminando sia le celle poste più vicine al pelo libero dell'LBE (celle assiali 35) che le celle poste in argon (celle assiali 44) si nota che il picco visto in precedenza nelle celle assiali 6 è notevolmente ridotto fino a scomparire del tutto nella zona gas (v. Figura 6 e Figura 7).

Ovviamente, anche esaminando le celle poste in prossimità del fondo del vessel, i cui andamenti di pressione non sono stati riportati per brevità, si osserva il medesimo effetto di riduzione fino alla progressiva scomparsa del picco.

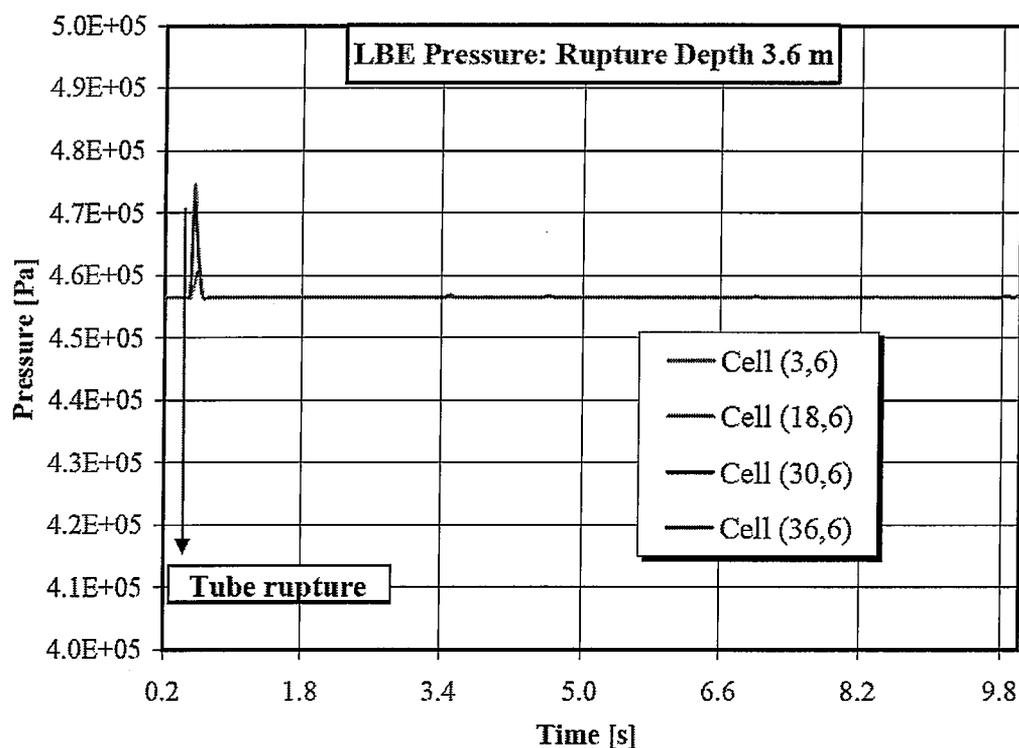


Figura 5. Andamento temporale della pressione nell'LBE per una rottura a 3.6 m di profondità (posizione assiale 6)

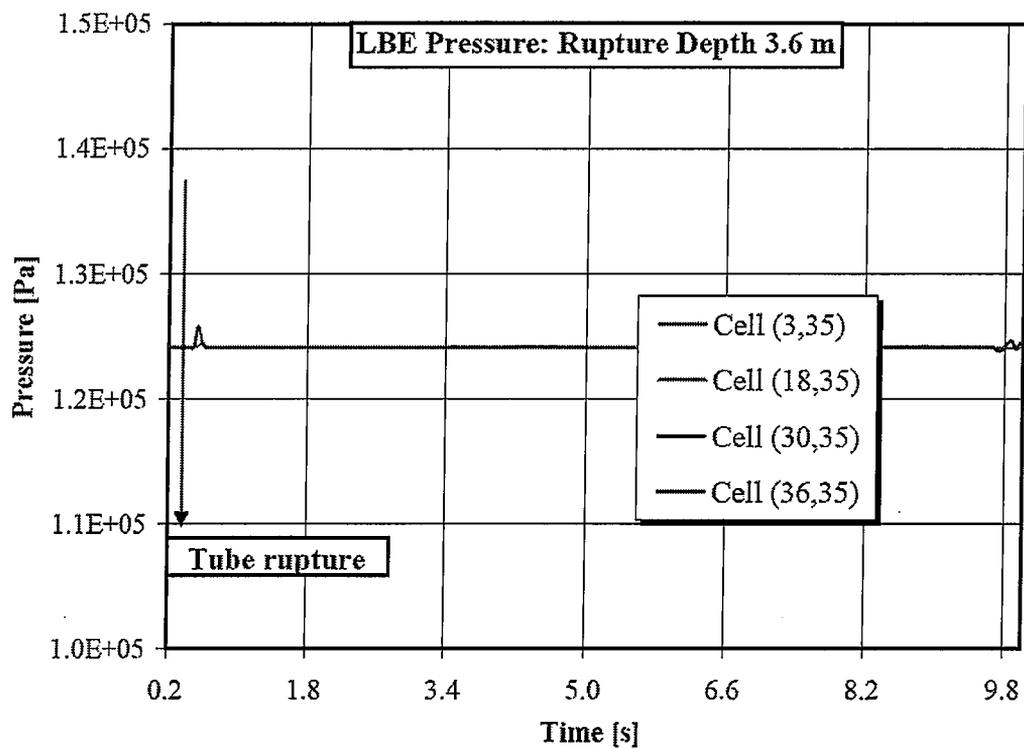


Figura 6. Andamento temporale della pressione nell'LBE per una rottura a 3.6 m di profondità (posizione assiale 35)

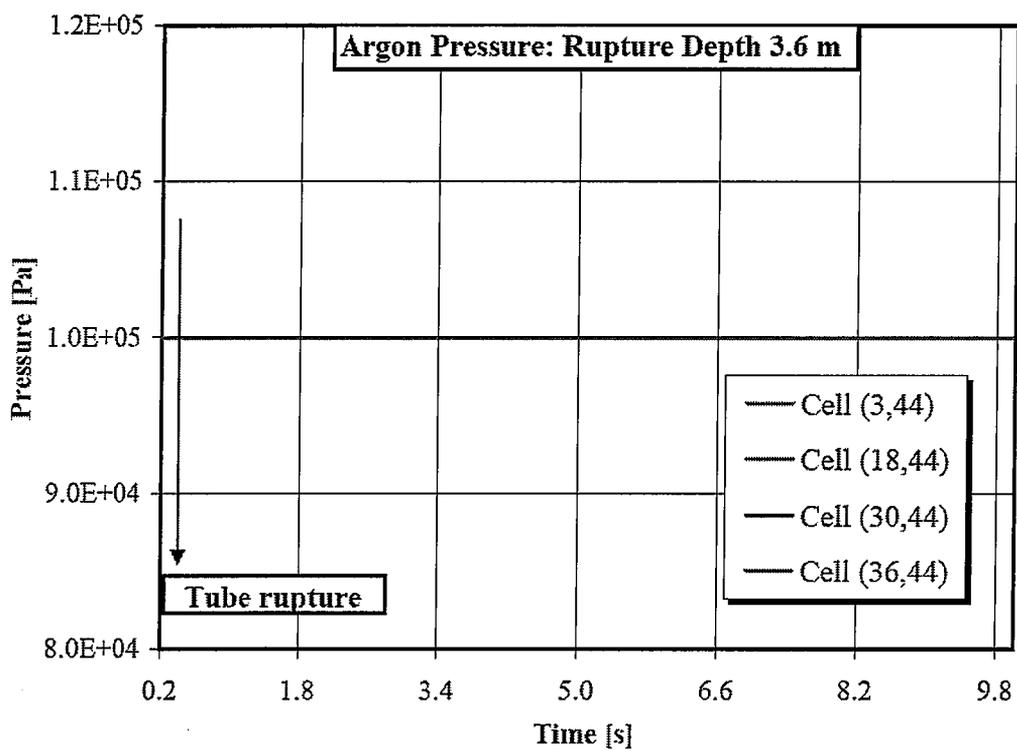


Figura 7. Andamento temporale della pressione nell'argon per una rottura a 3.6 m di profondità (posizione assiale 44)

Nelle Figure dalla 8 alla 10, vengono riportati gli andamenti della pressione all'interno del vessel, per le stesse celle analizzate in precedenza, corrispondenti ad una rottura posta ad una profondità di 1.8 m.

E' possibile notare che quanto emerso dall'analisi per una rottura posta a 3.6 m di profondità, viene sostanzialmente confermato anche in questo caso, ovvero allontanandosi sia radialmente che assialmente dal punto di rottura, si ha un'attenuazione dei picchi del transitorio di pressione. Tuttavia per questa profondità di rottura, il codice prevede un'oscillazione di pressione di 0.2 bar di ampiezza nelle celle con posizione assiale 6 e 35, non riscontrato nel caso di rottura a 3.6 m di profondità.

Nelle tre celle in zona argon non si nota alcun effetto della rottura, come già visto precedentemente.

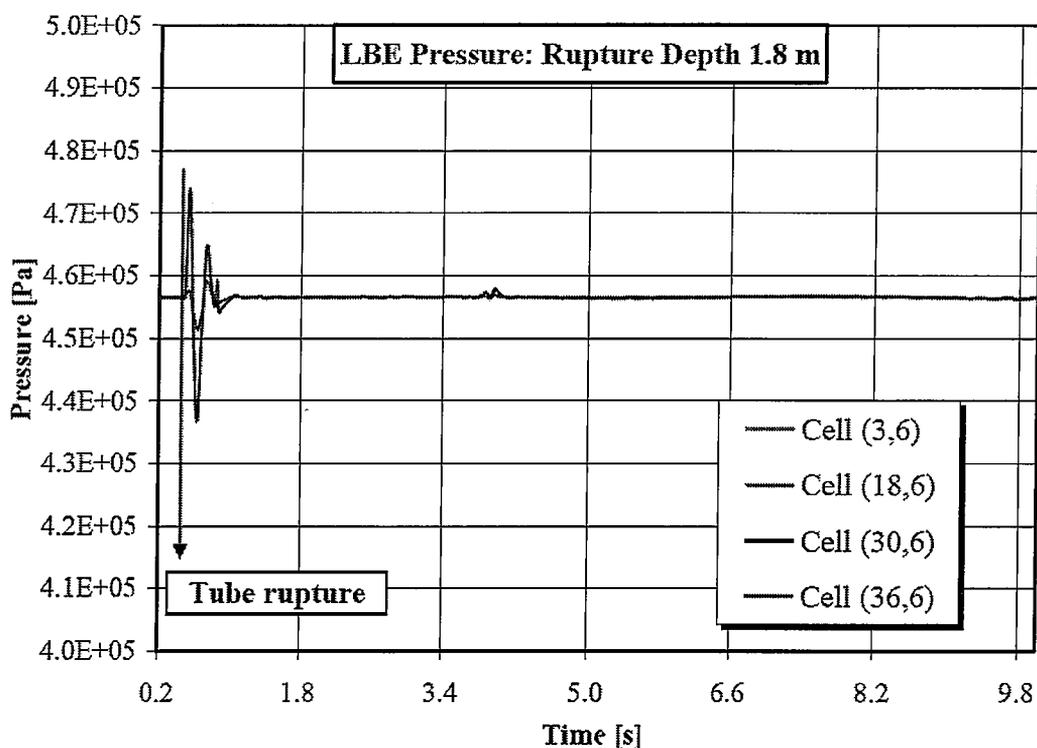


Figura 8. Andamento temporale della pressione nell'LBE per una rottura a 1.8 m di profondità (posizione assiale 6)

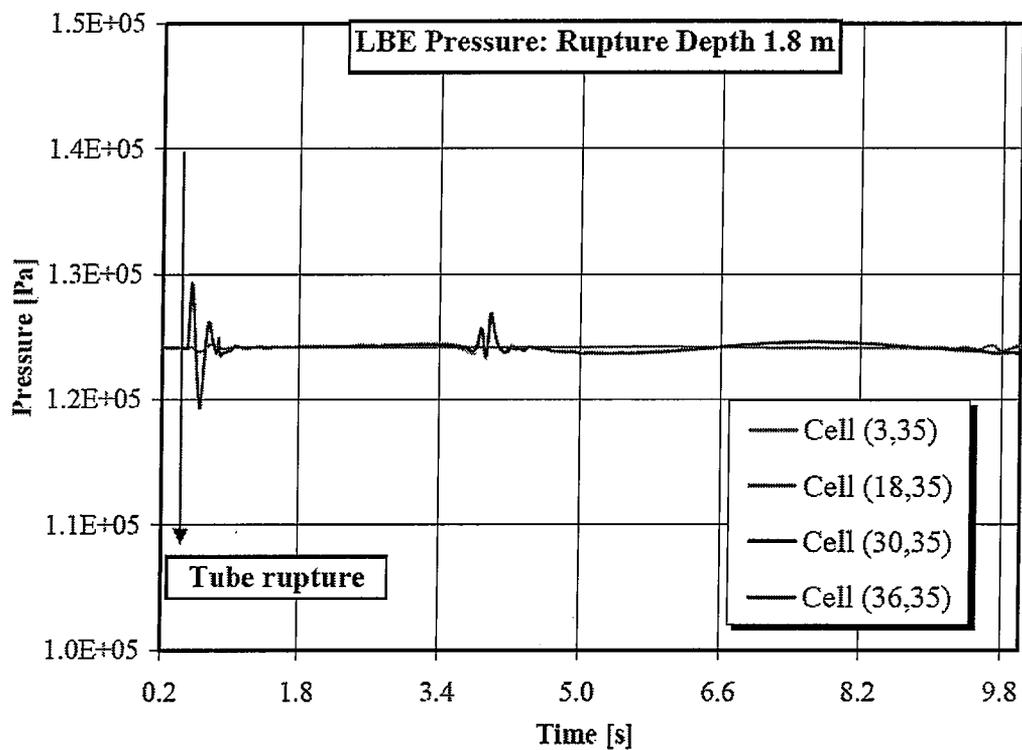


Figura 9. Andamento temporale della pressione nell'LBE per una rottura a 1.8 m di profondità (posizione assiale 35)

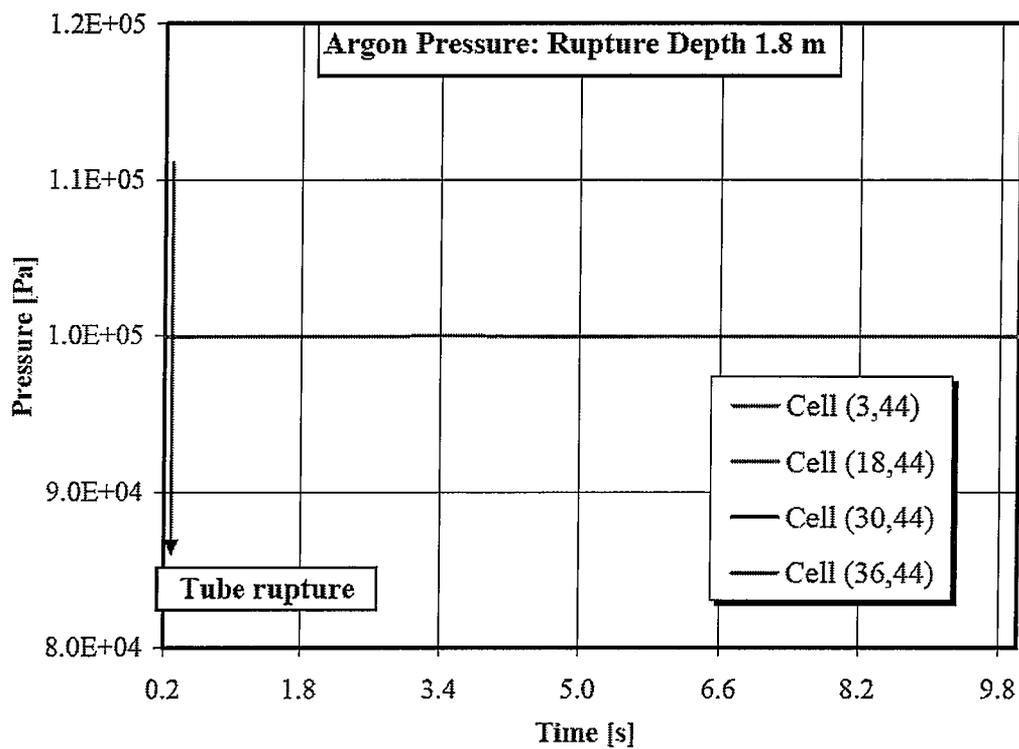


Figura 10. Andamento temporale della pressione nell'argon per una rottura a 1.8 m di profondità (posizione assiale 44)

Nelle Figure dalla 11 alla 13 sono riportati infine gli andamenti della pressione all'interno del vessel per una rottura ipotizzata a 0.9 m di profondità. Dall'analisi delle figure si nota come in questo caso, essendo la rottura più vicina al pelo libero dell'LBE, l'effetto della rottura è meno marcato rispetto agli altri due casi presi in esame precedentemente. Anche per questa profondità di rottura si conferma il fatto che aumentando sia la distanza assiale che quella radiale dalla rottura si ha un'attenuazione delle variazioni di pressione.

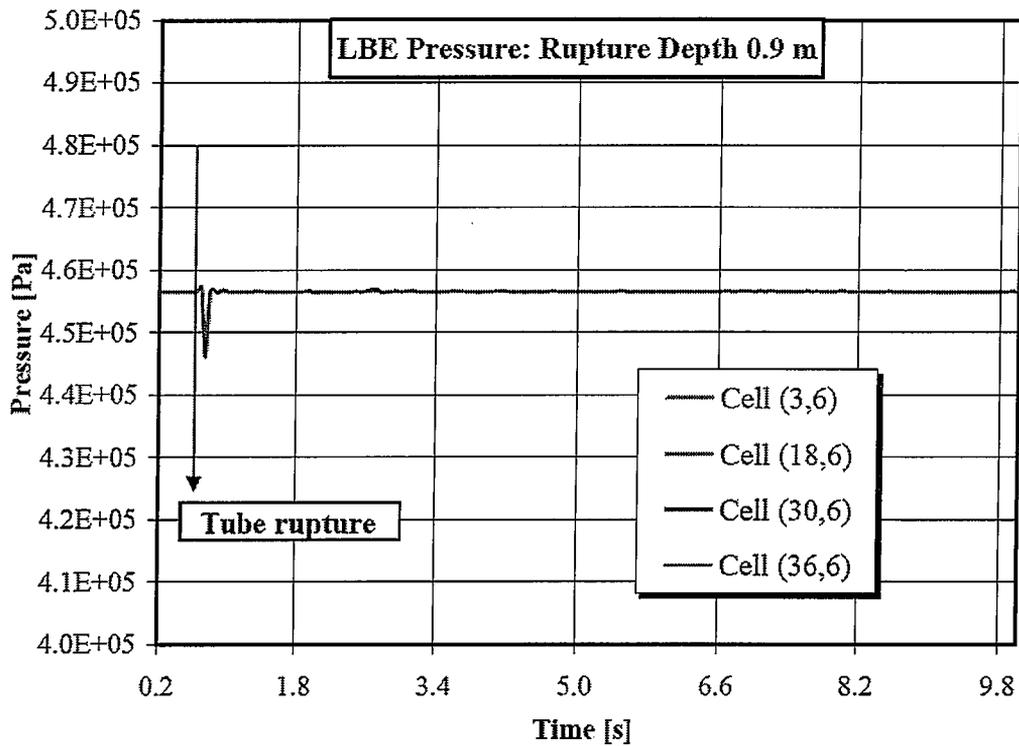


Figura 11. Andamento temporale della pressione nell'LBE per una rottura a 0.9 m di profondità (posizione assiale 6)

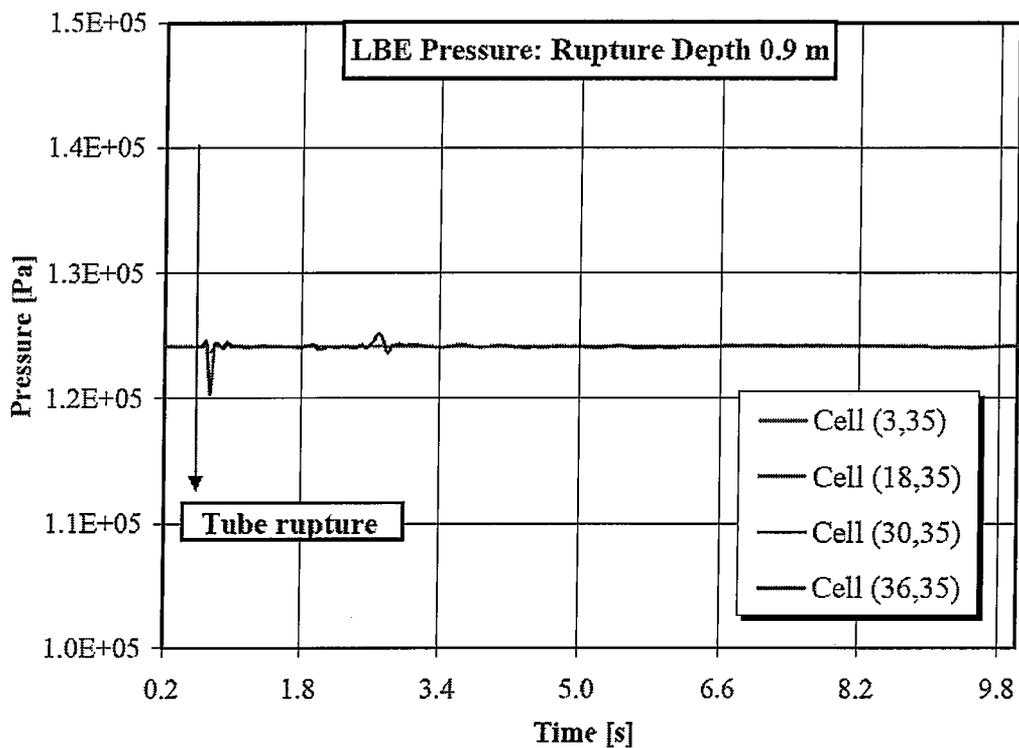


Figura 12. Andamento temporale della pressione nell'LBE per una rottura a 0.9 m di profondità (posizione assiale 35)

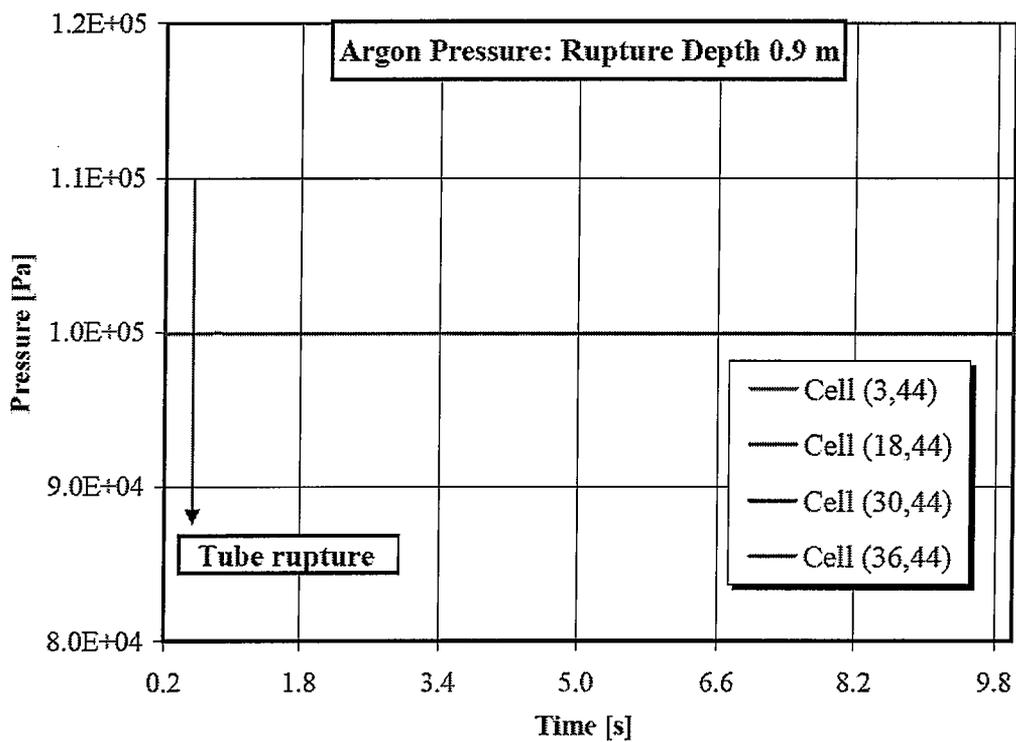


Figura 13. Andamento temporale della pressione nell'argon per una rottura a 0.9 m di profondità (posizione assiale 44)

### 3.1.2 Andamento delle pressioni all'interno del tubo di acqua

Per valutare l'andamento della pressione all'interno del tubo sono state considerate le stesse condizioni di prova riportate nel paragrafo 3.1.1.

Il confronto tra gli andamenti di pressione è stato effettuato prendendo a riferimento due celle assiali (cella(1, 35) e cella (1, 44)) poste a diverse profondità all'interno del tubo, ovvero rispettivamente a 20 cm al di sotto del pelo libero dell'LBE e a 17 cm al di sopra (6.2 e 6.71 m dal fondo del vessel).

In Figura 14 ed in Figura 15 vengono riportati i confronti degli andamenti ottenuti per entrambe le celle per le tre differenti profondità di rottura esaminate.

In entrambe le figure si nota un andamento della pressione all'interno del tubo di acqua fortemente oscillatorio per tutte e tre le profondità di iniezione. Dall'analisi di queste figure risulta che il valore massimo dei picchi di pressione tende a crescere all'aumentare della profondità della sezione di rottura. Infatti dalla Figura 14, nel caso di rottura del tubo a 3.6 m di profondità, nella cella (1, 35) si nota la presenza di un picco di pressione che raggiunge circa 12 bar a 6.5 s.

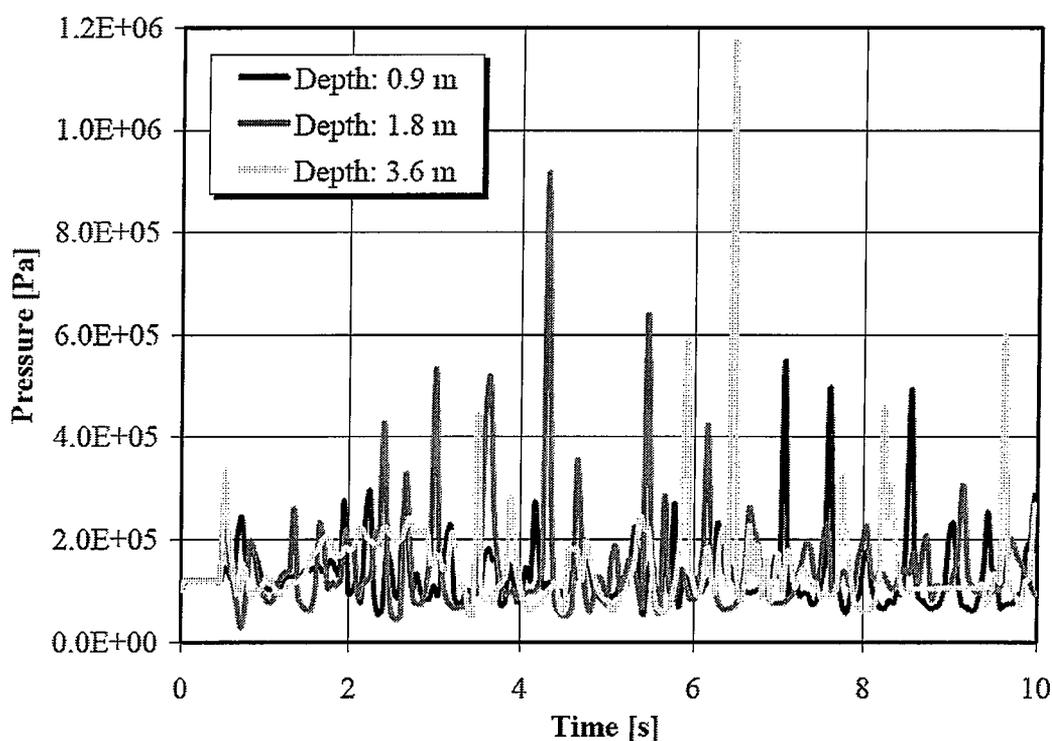


Figura 14. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua (cella (1, 35))

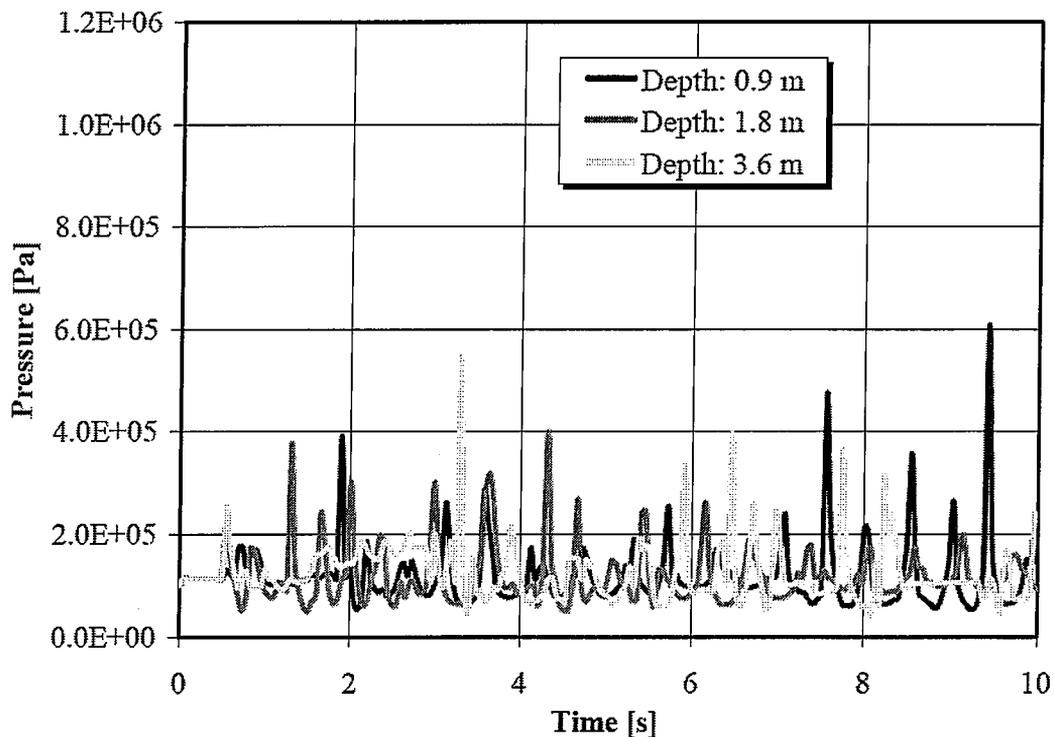


Figura 15. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua (cella 44)

Per il caso di rottura del tubo a 1.8 m dal pelo libero di LBE, il codice valuta nella cella (1, 35) un numero di picchi di pressione concentrato nell'intervallo temporale tra 2 e 6.5 s con valori massimi che generalmente sono compresi tra 4 e 6 bar anche se si nota la presenza di un picco a circa 4.5 s che si attesta intorno ai 9.2 bar. Anche in questo caso nella cella (1, 44) i suddetti picchi risultano avere valori inferiori, con un massimo a 4.5 s che raggiunge appena i 4 bar.

Per il caso di rottura del tubo a 0.9 m di profondità, i picchi di pressione più alti si registrano nell'intervallo tra i 7 ed i 10 s e, contrariamente a quanto visto in precedenza, l'andamento ed il valore dei picchi di pressione rimane lo stesso sia per la cella (1, 35) che per la cella (1, 44).

Le oscillazioni di pressione previste dal codice nel tubo che subisce la rottura sono spiegabili attraverso l'analisi dei fenomeni che avvengono all'interno del tubo stesso. Al momento della rottura, che nella simulazione avviene dopo 0.5 s di stazionario iniziale, la pressione all'interno del tubo ha un valore pari a quella presente nel collettore (1 bar) più la pressione del battente gravimetrico. La pressione dell'LBE, invece, è data dalla pressione dell'argon di copertura (1 bar) più quella derivante dal battente gravimetrico del metallo liquido. L'acqua all'interno del tubo, in ciascuno dei 3 casi considerati, risulta, quindi, avere una pressione inferiore a quella del Pb-Bi; il  $\Delta P$  tra acqua ed LBE si attesta a circa 2.5 bar per il caso di rottura a 3.6 m, a 2.1 bar per una rottura a 1.8 m ed a 2 bar per il caso di rottura a 0.9 m.

Al momento della rottura, perciò, il metallo liquido tende a risalire all'interno del tubo di acqua, dando origine ad una serie di fenomeni strettamente correlati tra loro che possono essere spiegati in modo più dettagliato analizzando le frazioni volumetriche di acqua, di gas e di LBE liquido e solido all'interno delle celle (1, 35) e (1, 44), già prese a riferimento per il confronto delle pressioni riportate in Figura 14 e Figura 15.

Esaminando gli andamenti delle suddette frazioni volumetriche nell'intervallo compreso tra 0.5 e 2 s, relativi al caso di rottura a 3.6 m di profondità, si nota che l'LBE risale nel tubo fino a raggiungere la cella (1, 35) in circa 0.95 s (v. Figura 16). Non appena l'LBE entra in contatto con l'acqua, si verificano contemporaneamente diversi fenomeni:

1. l'acqua a contatto con l'LBE dà origine ad una rapidissima formazione di vapore, assorbendo calore dell'LBE stesso;
2. il raffreddamento dell'LBE dà luogo alla formazione di uno strato solido che separa l'LBE fuso dal vapore;
3. a circa 1 s lo strato solido comincia a fondere grazie al calore fornito dall'LBE liquido in contatto con esso, che nel frattempo ha continuato la sua ascesa all'interno del tubo.

Dopo 1 s la quantità di vapore che si forma nella cella cresce linearmente in modo assai rapido, mentre la quantità di acqua decresce con la stessa velocità di formazione del vapore. In pochi centesimi di secondo la quantità di vapore raggiunge il valore massimo contestualmente al valore minimo della quantità di acqua. Deve essere notato che, dopo 1.05 s, l'andamento della frazione del vapore e quello della frazione dell'LBE liquido sono complementari tra loro.

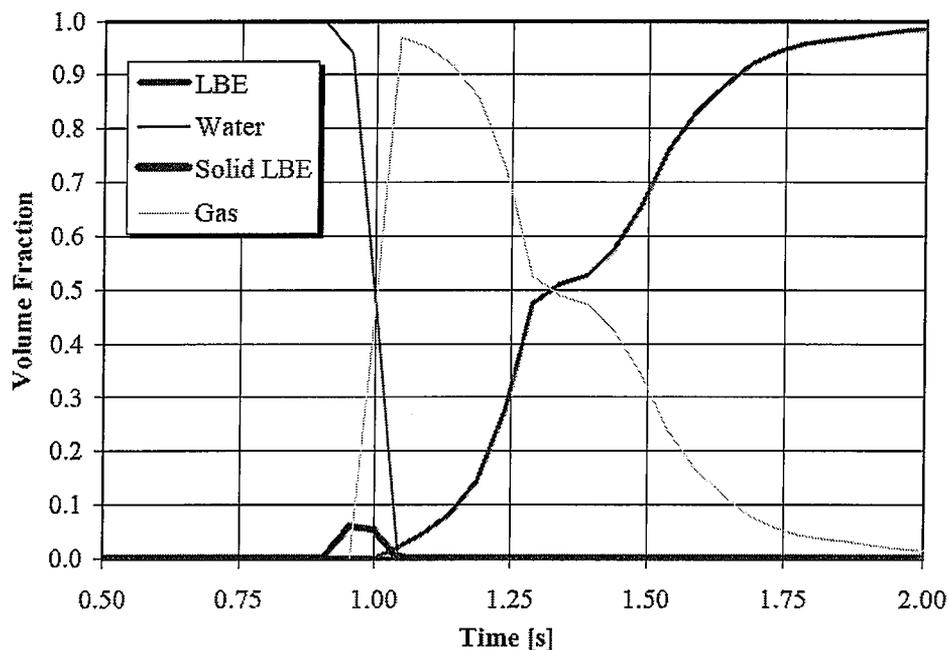


Figura 16. Andamento temporale delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1,35), per una rottura a 3.6 m di profondità

Analizzando il transitorio su 10 s, riportato in Figura 17 e Figura 18, si osserva che sia nella cella (1, 35) che nella cella (1, 44) l'andamento della frazione volumetrica di vapore risulta complementare a quelli relativi all'LBE e all'acqua. E', inoltre, da sottolineare il fatto che la presenza di acqua e la formazione di vapore sono contestuali alla formazione di uno strato solido di LBE. In particolare, l'andamento della frazione di LBE risulta essere ciclico con picchi massimi che si attestano circa a 3 s, a 7 s ed oltre i 10 s (frequenza di circa 3 Hz).

In particolare, da un punto di vista fenomenologico sono attesi i seguenti eventi interconnessi tra di loro:

- l'LBE, a causa della sua maggiore pressione, tende a risalire all'interno del tubo;
- durante la risalita dell'eutettico si assiste, in corrispondenza dell'interfaccia tra LBE ed acqua, ad una interazione tra questi due liquidi con formazione intermittente di vapore d'acqua e di crosta di LBE;
- la formazione di vapore tende a pressurizzare l'interno del tubo e a isolare termicamente la crosta di LBE dall'acqua in fase liquida;
- la crosta di LBE solida riscaldata dall'LBE liquido fonde, mentre il vapore lascia il suo posto all'acqua in fase liquida.

Analizzando la Figura 18 si osserva che le oscillazioni nella cella (1, 44) tendono ad attenuarsi con il passare del tempo.

Confrontando poi gli andamenti delle frazioni volumetriche di acqua, vapore, LBE liquido e solido ottenute dalle simulazioni 2 e 3 (rottura del tubo rispettivamente ad 1.8 ed a 0.9 m), i cui risultati sono riportati nelle figure dalla 19 alla 22, si nota già come nella simulazione 2 riferita alla cella (1, 35) si abbia un andamento ciclico dell'ingresso di LBE all'interno della cella con picchi intorno a 0.95 che tendono a diminuire con il passare del tempo (v. Figura 19). Nella simulazione 3 questo effetto non è presente e l'LBE entra all'interno della cella in modo più continuo anche se fortemente oscillatorio (Figura 21).

Diversi sono i risultati ottenuti nella cella (1, 44): in entrambi i casi la presenza di metallo liquido all'interno della cella è fortemente ridotta (v. Figura 20 e Figura 22). Infatti nella simulazione 2 (v. Figura 20) si osserva un picco della frazione volumetrica di LBE, pari a 0.68, compreso tra 4 e 6 s, mentre per la simulazione 3 (v. Figura 22) il picco più significativo, pari ad una frazione volumetrica di circa 0.9, è compreso tra 1 e 3 s. Deve essere osservato che, per queste due simulazioni, nella cella (1, 44) la quantità di LBE solidificato è maggiore rispetto a quanto trovato nella simulazione 1. Ciò è spiegabile dal fatto che la quantità di metallo liquido che risale in tale cella durante le oscillazioni di pressione è tanto minore quanto minore è la profondità di rottura del tubo. L'evaporazione dell'acqua, perciò, riesce a far solidificare una maggiore frazione di metallo

liquido. Ovviamente, l'effetto è più marcato nella simulazione 3 in quanto la rottura è ipotizzata in una posizione più vicina al pelo libero del metallo liquido.

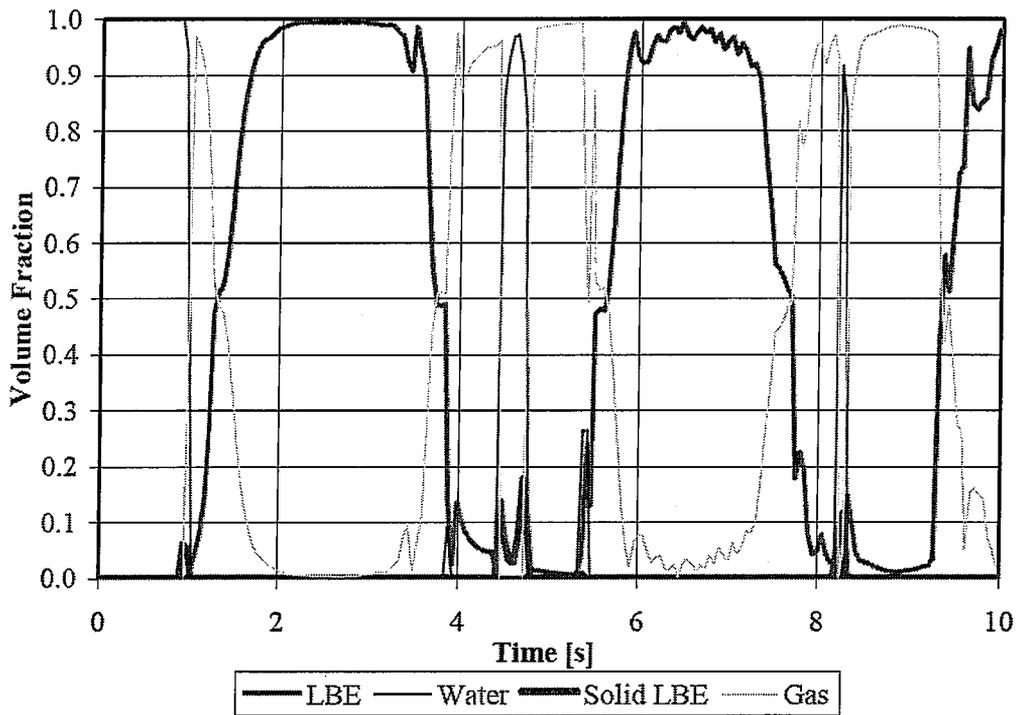


Figura 17. Andamento temporale delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1,35), per una rottura a 3.6 m di profondità

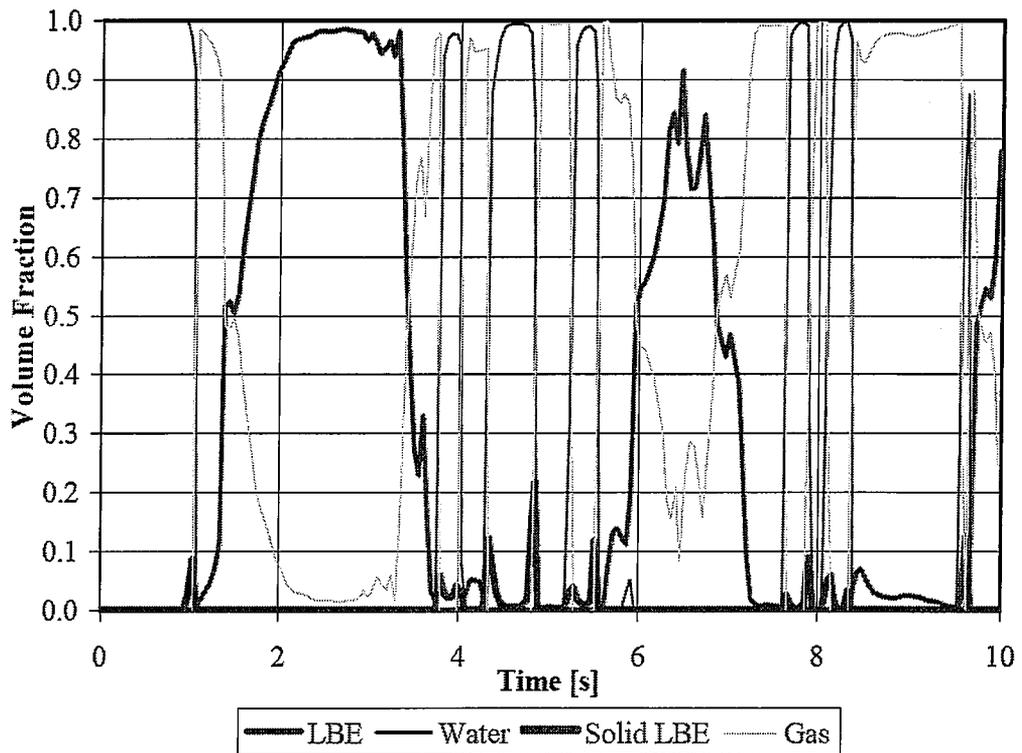


Figura 18. Andamento temporale delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1,44), per una rottura a 3.6 m di profondità

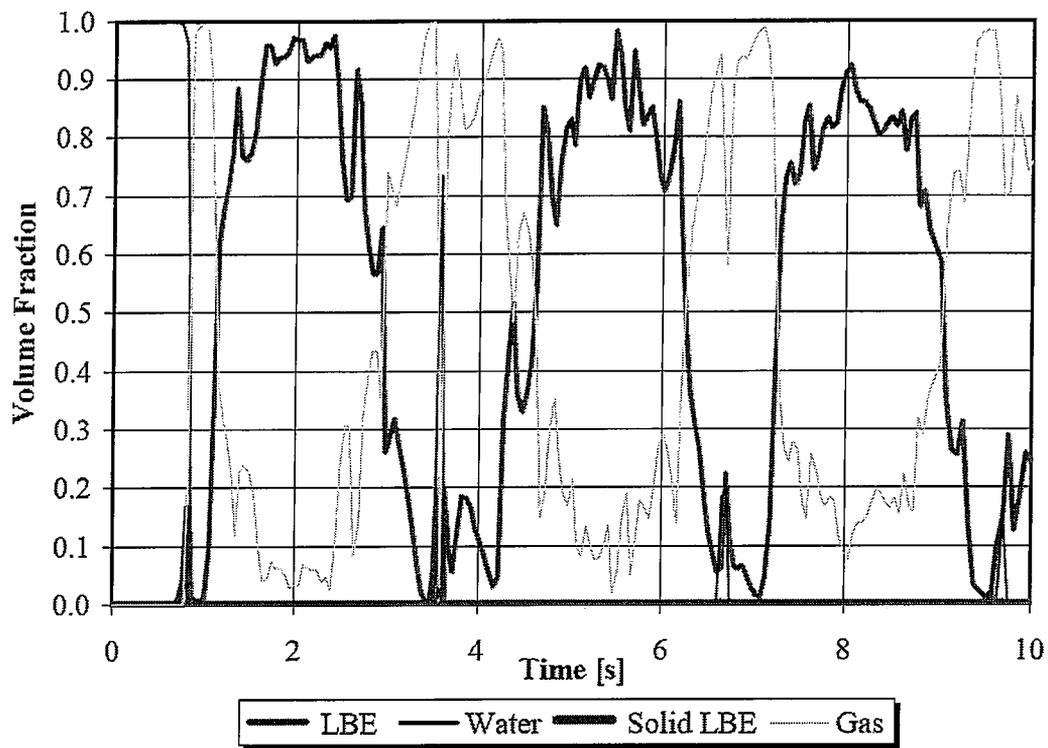


Figura 19. Andamento temporale delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1,35), per una rottura a 1.8 m di profondità

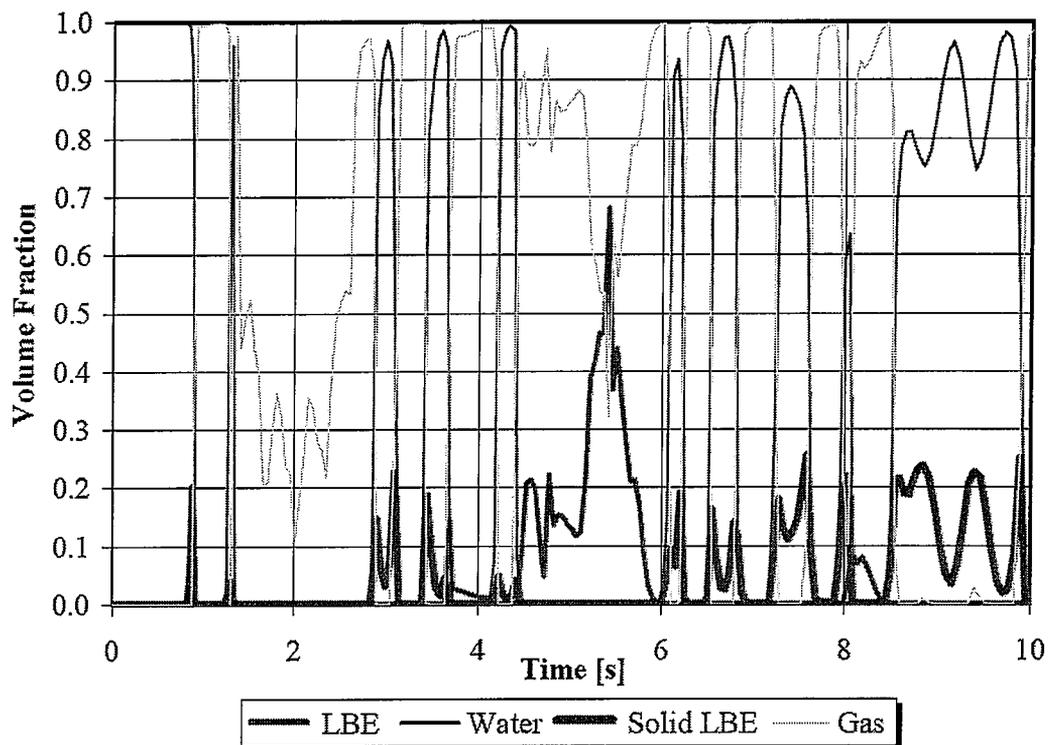


Figura 20. Andamento temporale delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1,44), per una rottura a 1.8 m di profondità

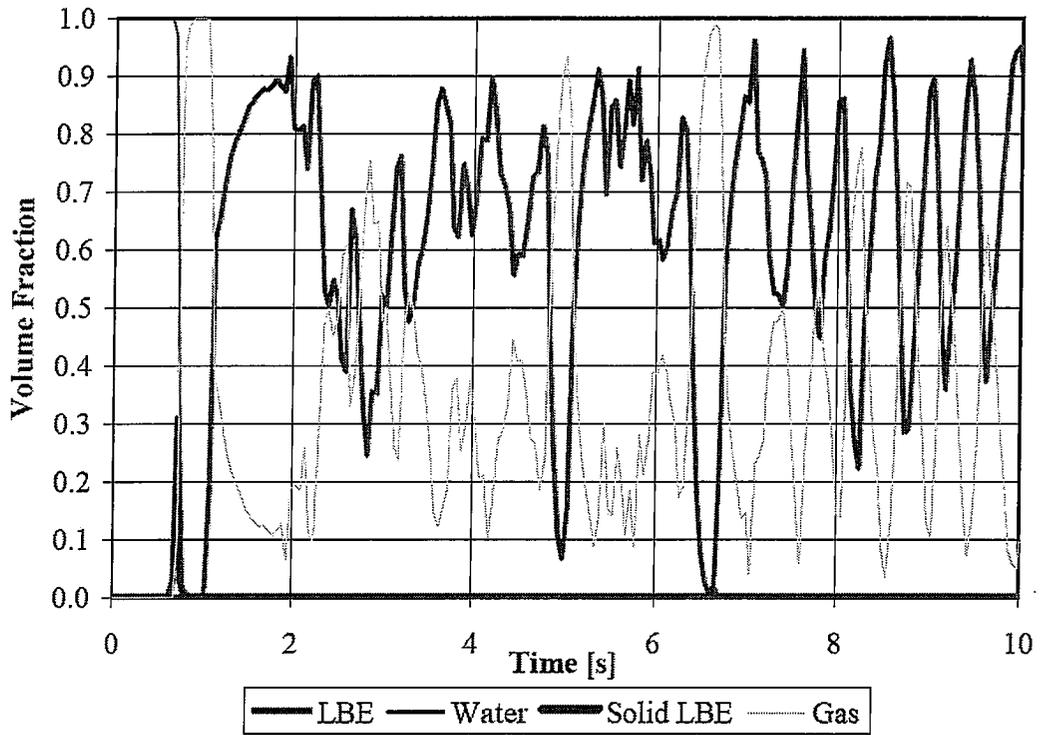


Figura 21. Andamento temporale delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1,35), per una rottura a 0.9 m di profondità

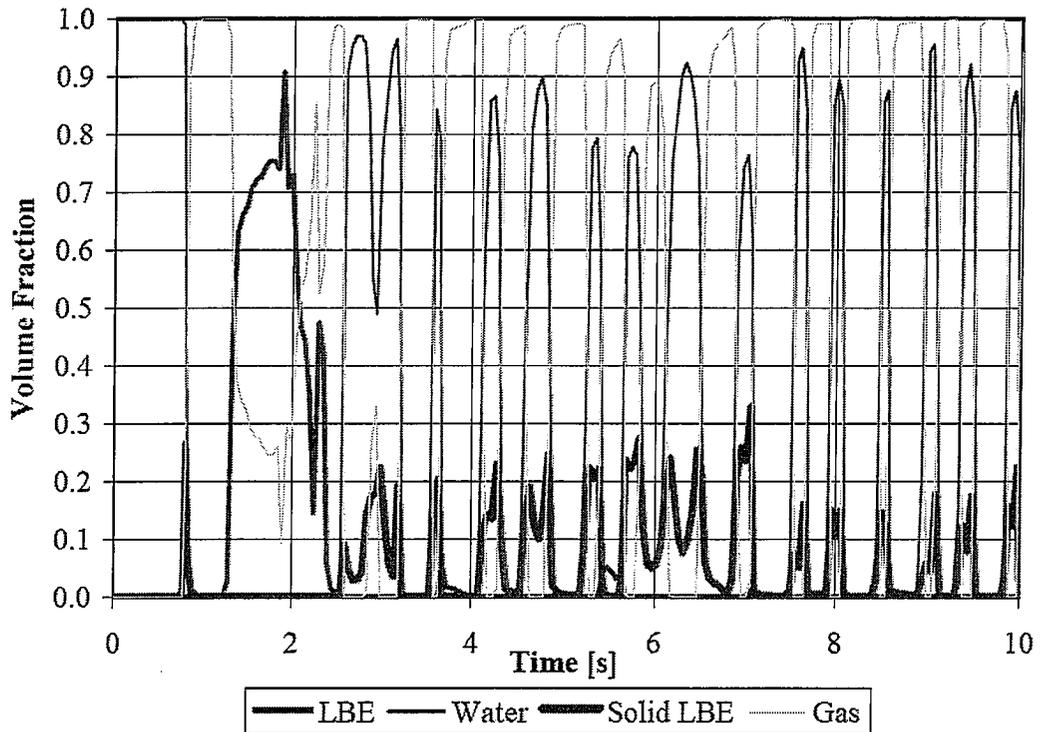


Figura 22. Andamento temporale delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1,44), per una rottura a 0.9 m di profondità

Esaminando in parallelo gli andamenti delle temperature dell'LBE, dell'acqua e del vapore per la cella (1, 35), insieme alle relative frazioni volumetriche, per una rottura del tubo posta a 3.6 m di profondità (v. Figure 23-27) si ha la conferma di quanto affermato in precedenza. Infatti, dalla Figura 23 è possibile notare che il volume della cella presa in esame per i primi 0.95 s è completamente occupato da acqua in fase liquida a 60 °C. Durante questo intervallo temporale, nella cella non sono presenti né LBE, né vapore, quindi le temperature corrispondenti a queste frazioni volumetriche sono, rispettivamente, 124 e 60 °C (v. Figure 24-26). Non appena l'LBE viene in contatto con l'acqua nelle celle poste ad un'altezza inferiore rispetto alla (1, 35), si ha contemporaneamente la formazione di una piccola quantità di LBE solido e di vapore che spinge verso l'alto la massa di acqua contenuta all'interno del tubo. Nella cella quindi si ha una prima temporanea presenza di LBE solidificato; vapore ed acqua che si portano ad una temperatura di circa 100 °C. Successivamente, l'LBE liquido riesce a salire ulteriormente attraverso il tubo che occupa completamente la cella. Inizia così il ciclo oscillatorio dell'LBE all'interno del tubo già descritto in precedenza. Come si evince dalla Figura 27, il vapore prodotto tende ad essere in equilibrio termico con l'LBE liquido, infatti entrambi seguono all'incirca lo stesso andamento e raggiungono gli stessi valori.

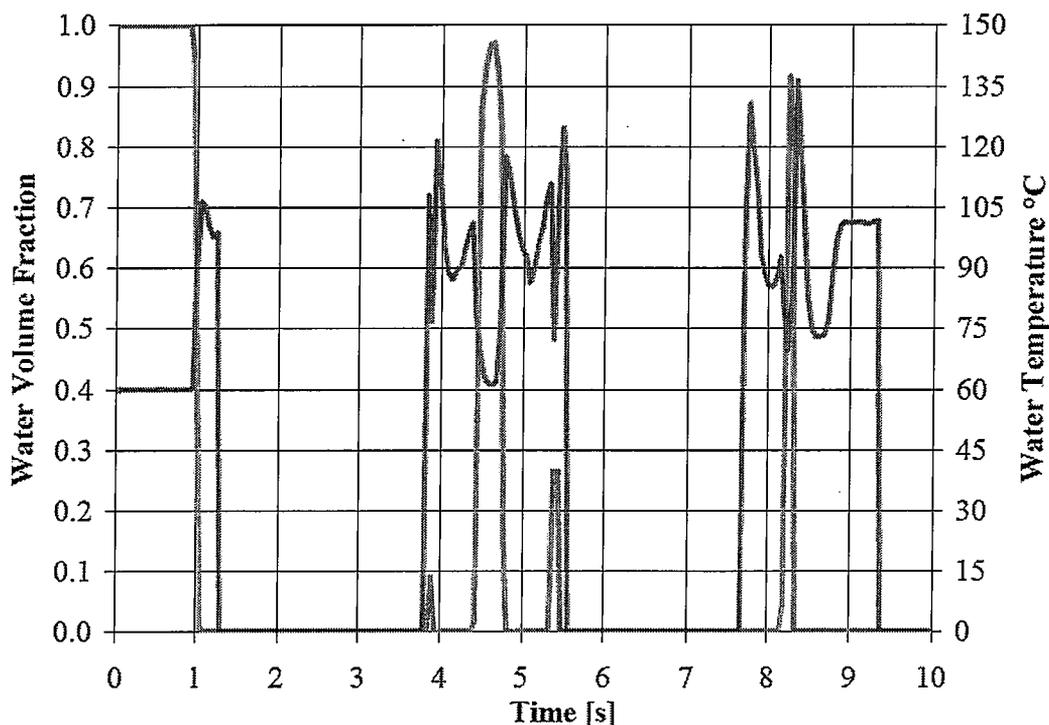


Figura 23. Andamenti della temperatura (linea blu) e della frazione volumetrica di acqua (linea arancione) all'interno della cella (1, 35) per una rottura del tubo posta a 3.6 m di profondità

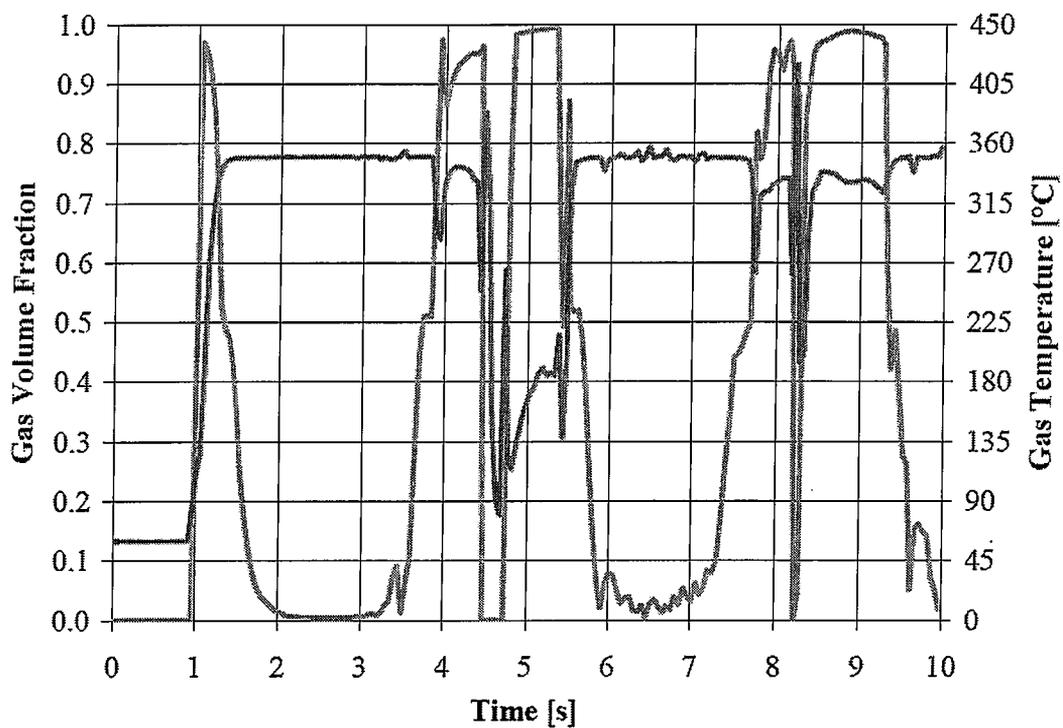


Figura 24. Andamenti della temperatura (linea blu) e della frazione volumetrica di vapore (linea arancione) all'interno della cella (1,35) per una rottura del tubo posta a 3.6 m di profondità

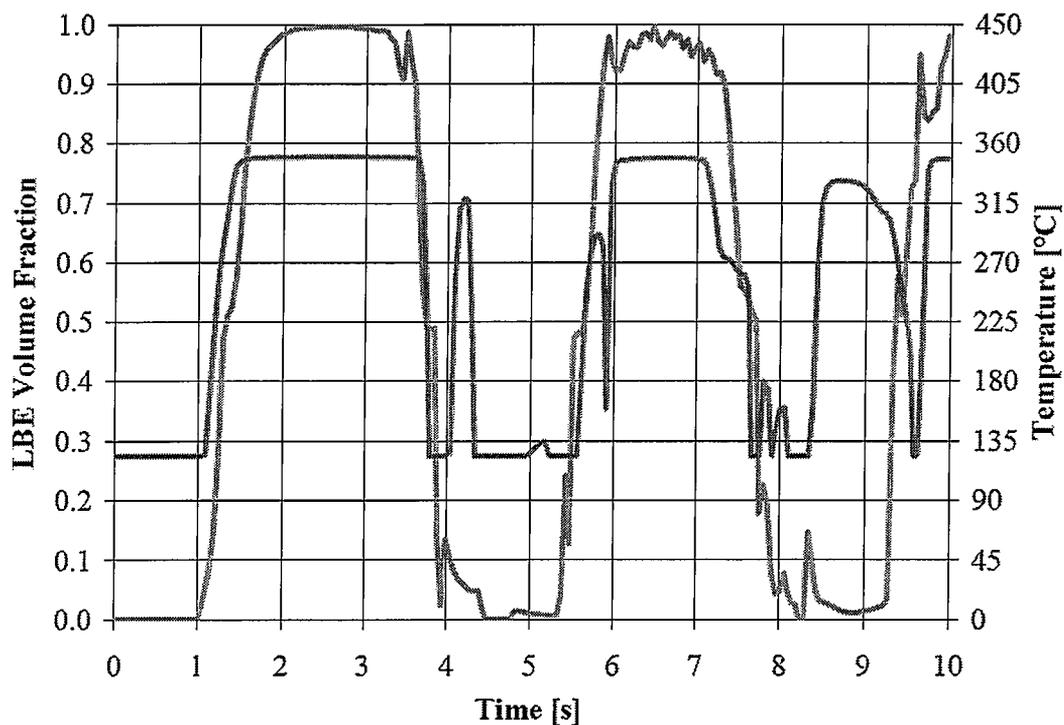


Figura 25. Andamenti della temperatura (linea blu) e della frazione volumetrica di LBE (linea arancione) all'interno della cella (1,35) per una rottura del tubo posta a 3.6 m di profondità

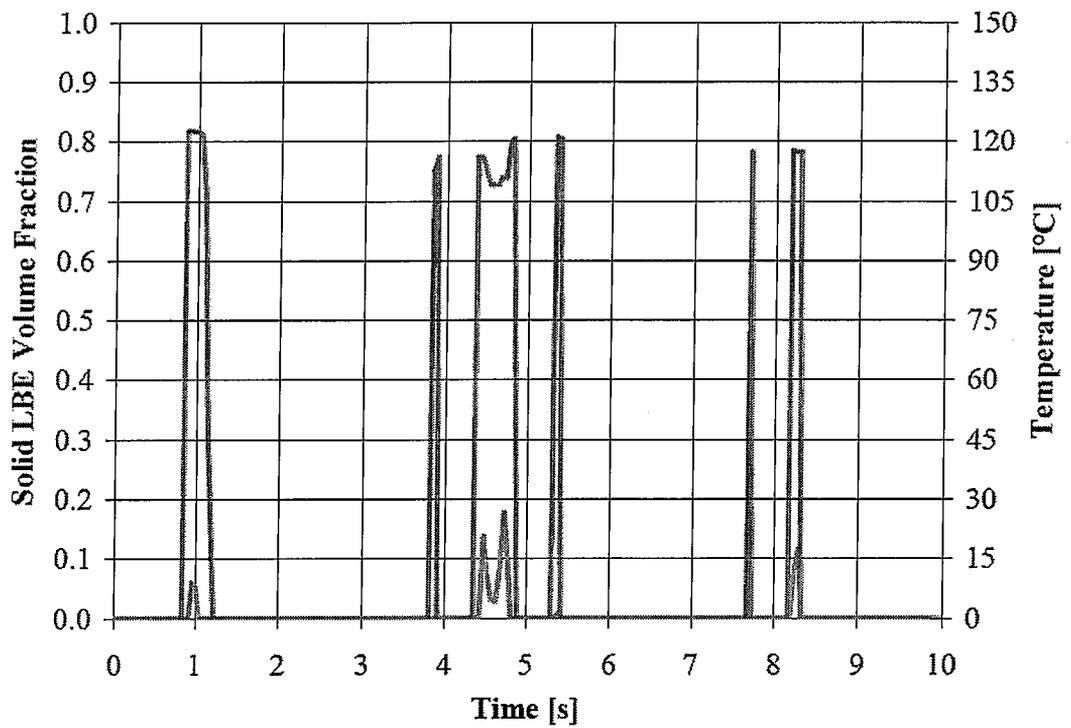


Figura 26. Andamenti della temperatura (linea blu) e della frazione volumetrica di LBE (linea arancione) all'interno della cella (1,35) per una rottura del tubo posta a 3.6 m di profondità

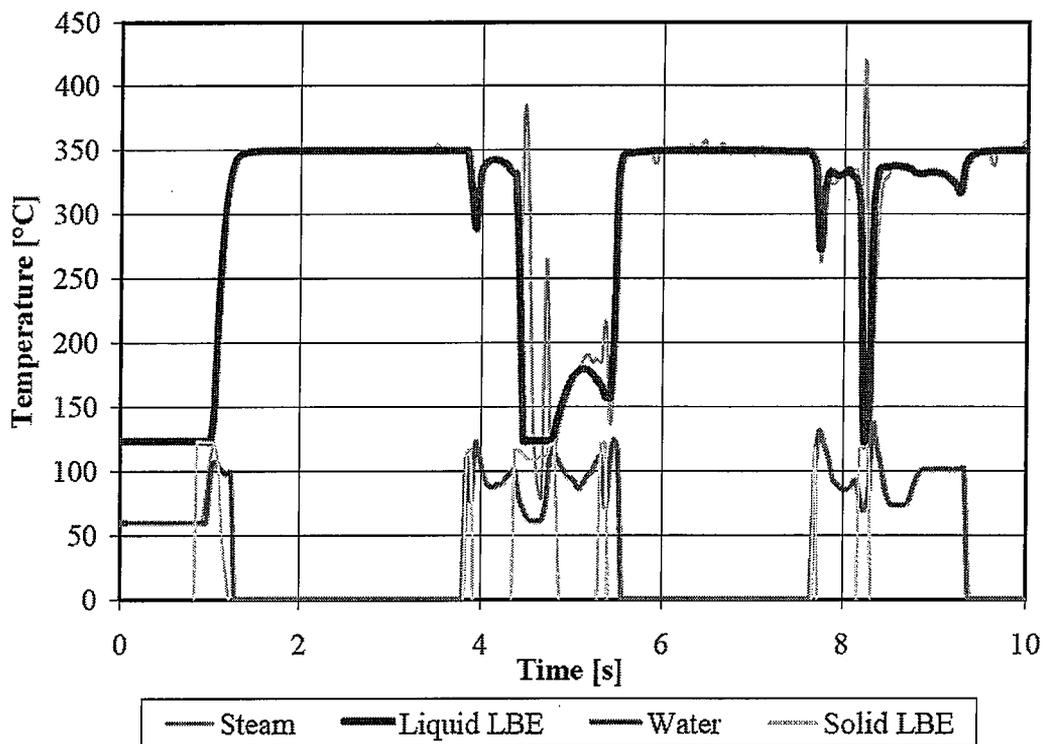


Figura 27. Andamenti della temperatura dell'acqua, del vapore, dell'LBE liquido e solidificato nella cella (1, 35)

### 3.2 Simulazioni 4, 5 e 6

Non essendo disponibile il dato esatto riguardante il volume del collettore di acqua, è stata effettuata una serie di simulazioni (n. 4, 5 e 6 di Tabella 1) con un volume del collettore dell'acqua pari a 80 l. In questo modo si è cercato di avere informazioni circa il possibile differente comportamento del sistema per due diversi volumi del collettore che potessero rappresentare un limite inferiore (20 l) ed un limite superiore (80 l). Le condizioni di prova, riguardanti la profondità di rottura del tubo di acqua, la temperatura dell'acqua e dell'LBE e la pressione dell'argon, sono uguali a quelle relative alle simulazioni 1, 2 e 3.

Dato che la rottura del tubo non provoca variazioni di pressione significative nel vessel contenete l'LBE, nel seguito si è scelto di riportare solo il confronto tra gli andamenti di pressione all'interno del tubo, tra le simulazioni 1 e 4, 2 e 5, 3 e 6, prendendo a riferimento le stesse due celle assiali (cella (1, 35) e cella (1, 44)) già considerate nel paragrafo 3.1.2. Si è, inoltre, tralasciato di mostrare gli andamenti delle frazioni volumetriche dei vari componenti, in quanto il fenomeno risulta essere assai simile a quanto riportato nel paragrafo 3.1.2 e differisce leggermente soltanto nei valori raggiunti.

#### 3.2.1 Confronto tra le simulazioni 1 e 4

In Figura 28 ed in Figura 29 sono riportati gli andamenti della pressione ottenuti dalle simulazioni per un volume del collettore pari a 20 l e per un volume del collettore di 80 l, con una profondità di rottura del tubo pari a 3.6 m, rispettivamente nelle celle (1,35) ed (1,44).

E' possibile osservare (v. Figura 28) che gli andamenti delle pressioni risultano simili per ambedue i volumi del collettore, anche se in generale nell'andamento di pressione corrispondente al collettore da 20 l si notano picchi più alti che raggiungono quasi i 12 bar, anche se, generalmente, per il caso con il collettore da 80 l si ha un numero maggiore di picchi.

Esaminando la Figura 29, si nota che anche per il collettore da 80 l, in analogia con quanto accade per un collettore da 20 l, le oscillazioni vengono smorzate all'aumentare della distanza dal pelo libero dell'LBE, raggiungendo valori massimi di circa 6 bar. In questo caso però i picchi ottenuti dalla simulazione 4 raggiungono valori leggermente più alti di quelli ottenuti dalla simulazione 1, anche se la differenza tra i valori massimi raggiunti si attesta sempre entro circa 0.5 bar.

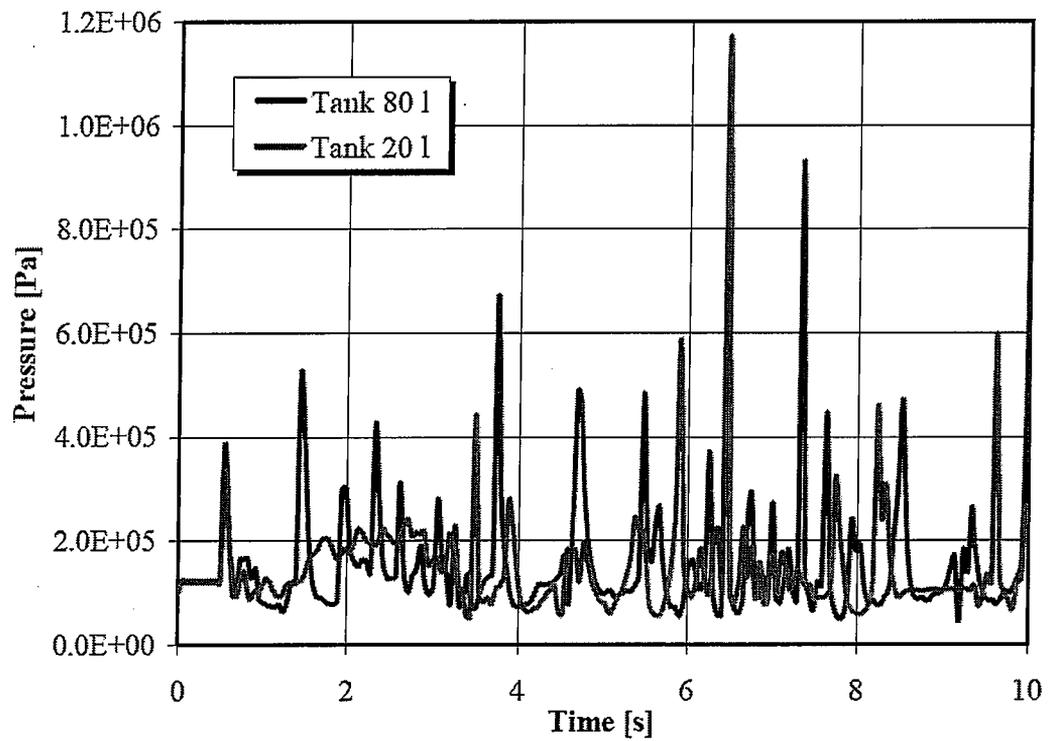


Figura 28. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua nella cella (1, 35) per una profondità di rottura pari a 3.6 m

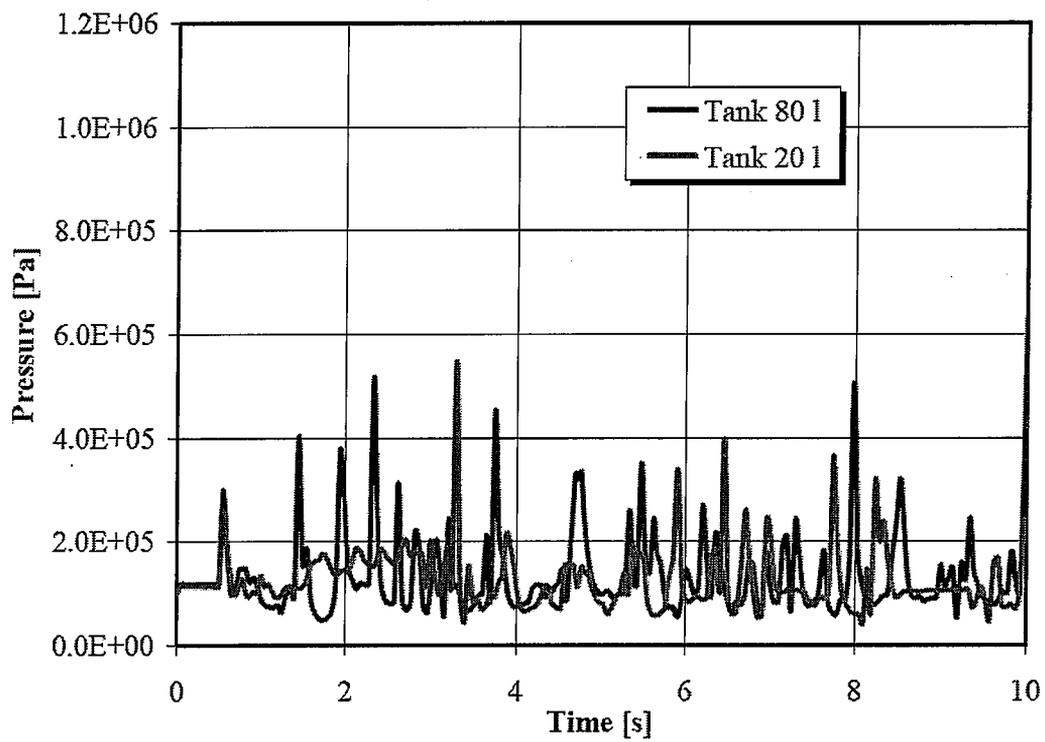


Figura 29. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua nella cella (1, 44) per una profondità di rottura pari a 3.6 m

### 3.2.2 Confronto tra le simulazioni 2 e 5

In Figura 30 ed in Figura 31 sono riportati gli andamenti della pressione delle simulazioni effettuate per entrambi i volumi del collettore per il caso di iniezione ad 1.8 m di profondità. Analogamente a quanto fatto in precedenza, le celle esaminate sono rispettivamente la (1, 35) e la (1, 44).

Dalla Figura 30 si osserva che, come già emerso nel confronto tra le simulazioni 1 e 4, gli andamenti delle pressioni sono simili, raggiungendo, con un volume del collettore pari a 20 l, picchi con valori massimi più alti di quelli presenti nel caso di collettore da 80 l.

Tuttavia, esaminando la Figura 31 relativa alla pressione nella cella (1,44) si nota che, sebbene in generale si abbia uno smorzamento delle oscillazioni, la riduzione dei picchi si verifica fino a circa 5 s, mentre a circa 5.2 s ed a 7.85 s si nota la presenza di due picchi, rispettivamente di 11.2 e 16.4 bar non rilevati nella cella (1,35).

Dopo gli 8 s, entrambe le simulazioni evidenziano andamenti di pressioni simili, con picchi lievemente smorzati.

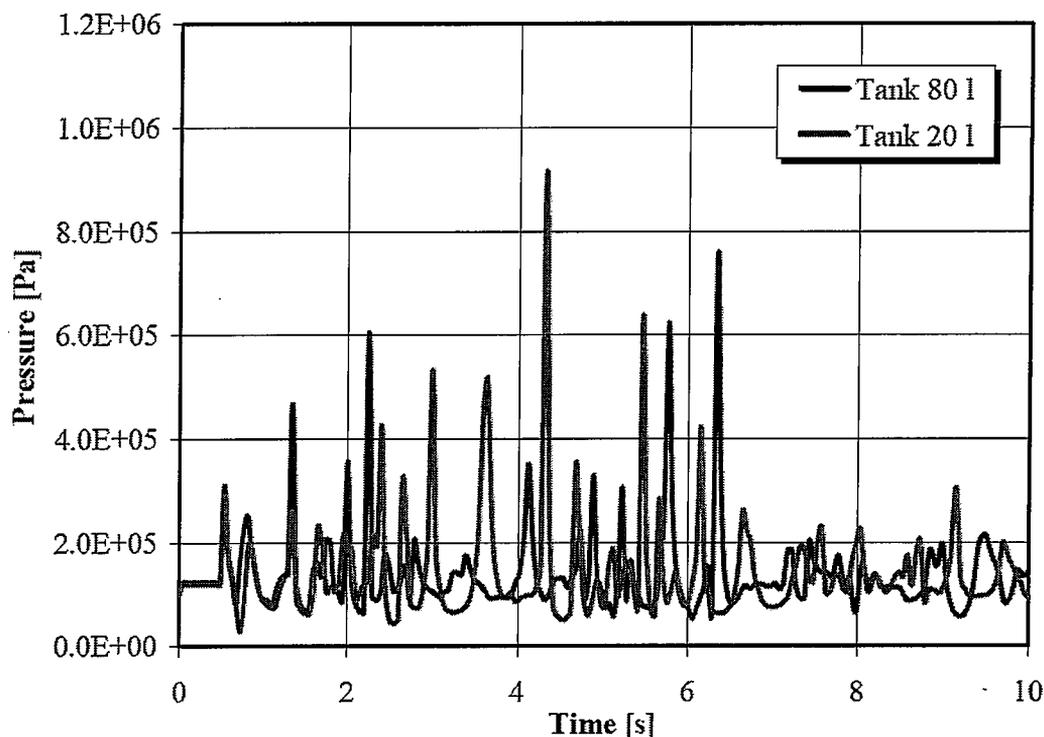


Figura 30. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua nella cella (1, 35) per una profondità di rottura pari a 1.8 m

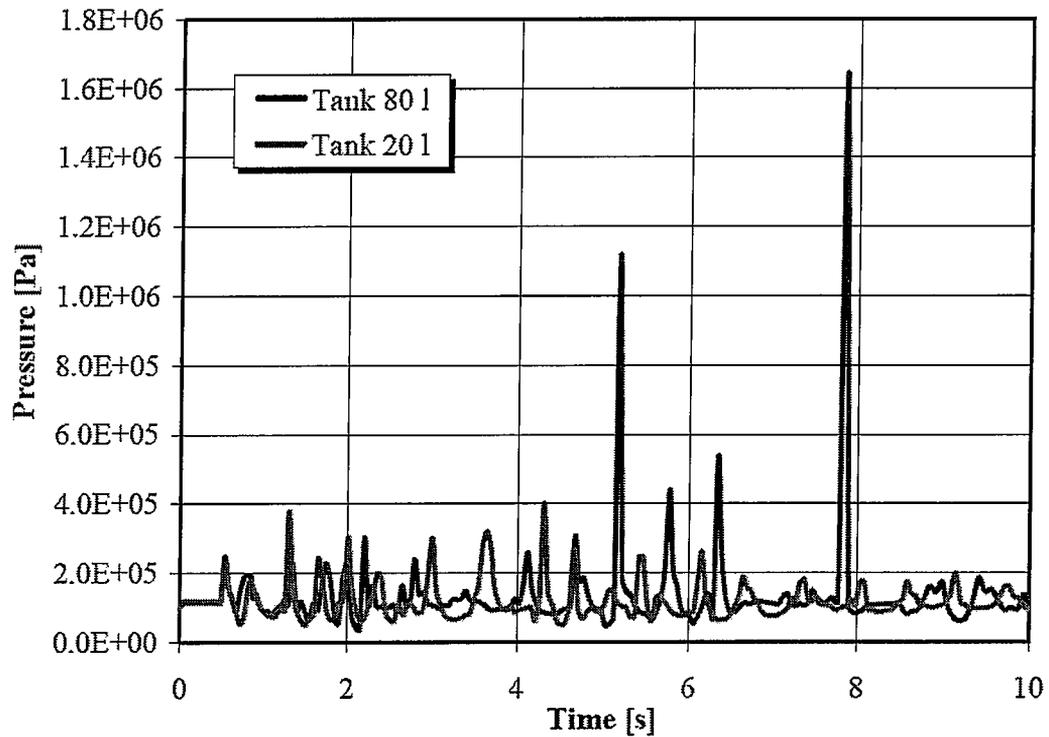


Figura 31. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua nella cella (1, 44) per una profondità di rottura pari a 1.8 m

### 3.2.3 Confronto tra le simulazioni 3 e 6

In Figura 32 ed in Figura 33 sono riportati gli andamenti della pressione delle simulazioni effettuate per una profondità di rottura pari a 0.9 m con i due volumi del collettore. Le celle esaminate sono ancora la (1, 35) e la (1, 44).

Sia la Figura 32 che la Figura 33 mettono in luce il fatto che, se la rottura avviene più vicino al pelo libero di LBE, i valori massimi raggiunti dai picchi di pressione sono notevolmente minori rispetto a quelli osservati nelle simulazioni riportate nei paragrafi 3.2.1 e 3.2.2: infatti, il massimo valore raggiunto si attesta entro i 6 bar. Inoltre, sia per il collettore da 20 l che per il collettore da 80 l, si nota che gli andamenti della pressione, in particolare nella cella (1,44), sono quasi coincidenti durante i primi 7 s, mentre negli istanti successivi si osserva una presenza di picchi più alti per il caso con un volume del collettore pari a 20 l.

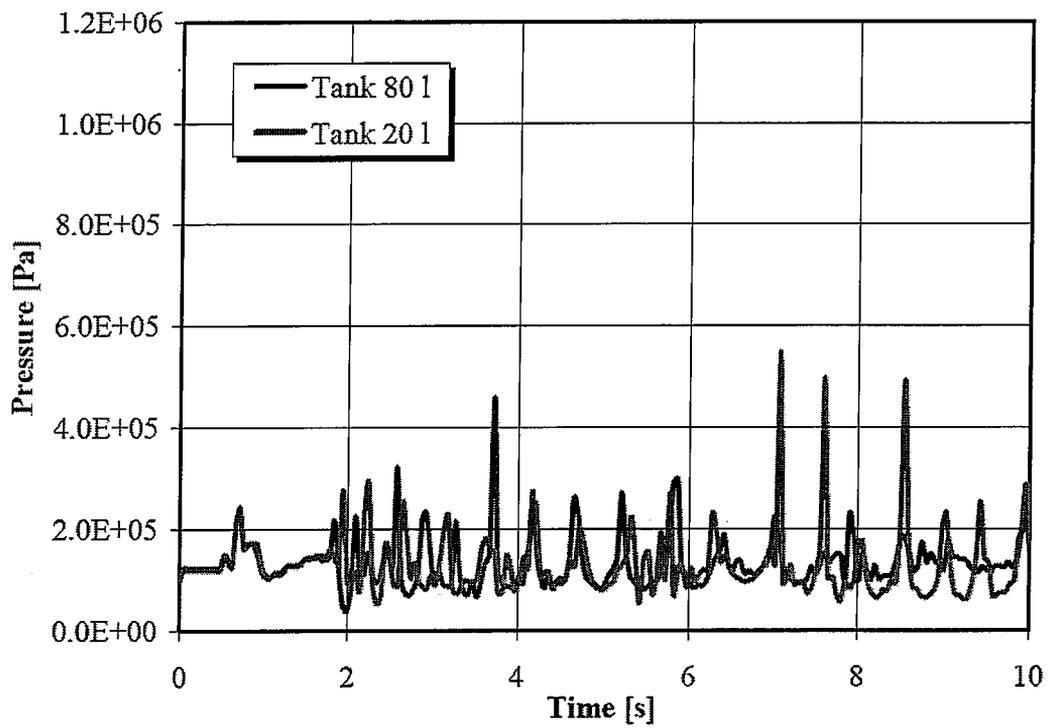


Figura 32. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua nella cella (1, 35) per una profondità di rottura pari a 0.9 m

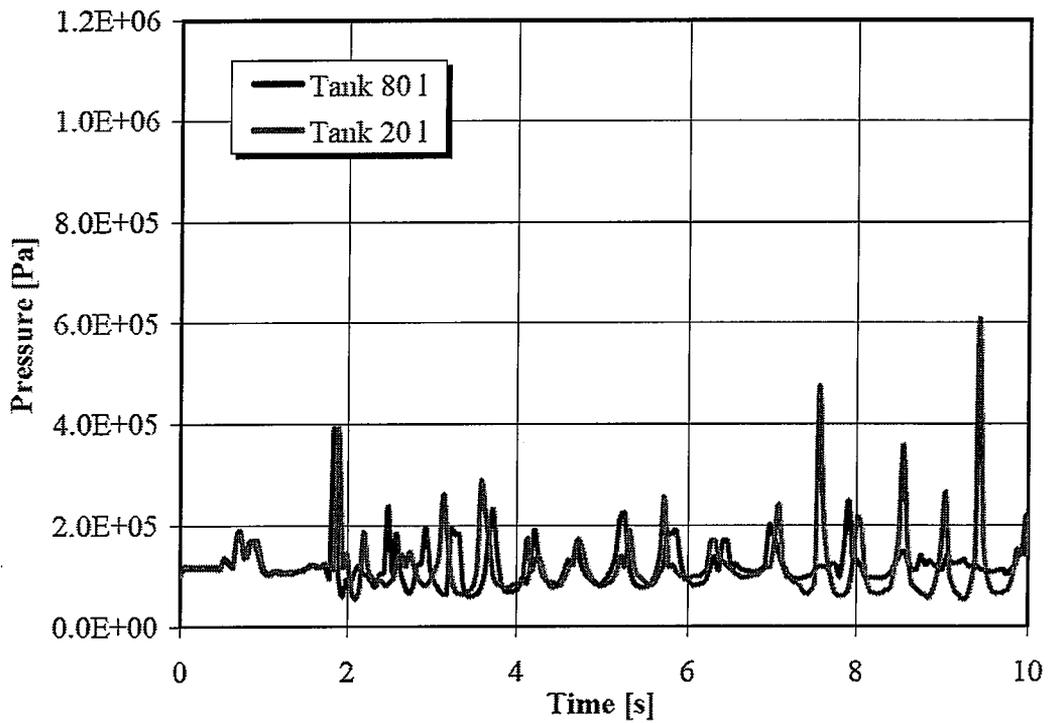


Figura 33. Andamento della pressione all'interno del tubo di acqua nella cella (1, 44) per una profondità di rottura pari a 0.9 m

### 3.3 Simulazione 7 e confronto con la simulazione 1

#### 3.3.1 Andamento delle pressioni all'interno del vessel

La simulazione n.7 è stata eseguita considerando una pressione di iniezione dell'acqua pari a 2.5 bar. Le condizioni scelte per il test sono le seguenti (cfr. anche Tabella 1):

- profondità di rottura del tubo di acqua: 3600 mm;
- temperatura dell'acqua: 60° C
- diametro del tubo di acqua: 5.89 mm;
- temperatura LBE: 350° C;
- volume del collettore di acqua: 20 l;
- pressione dell'argon: 1 bar.

Al fine di presentare l'andamento della pressione all'interno del vessel, che peraltro non ha evidenziato particolari problemi, è stato scelto di mostrare il confronto tra i valori nelle quattro celle in posizione assiale 6 (v. Figura 4), che risultano essere tra le più rappresentative in quanto vicino alla zona di rottura e quindi maggiormente sollecitate dall'onda di pressione. Inoltre, è stato eseguito il confronto tra i risultati della simulazione 1 e 7 per la cella (3, 6). Tali andamenti vengono mostrati rispettivamente in Figura 34 ed in Figura 35.

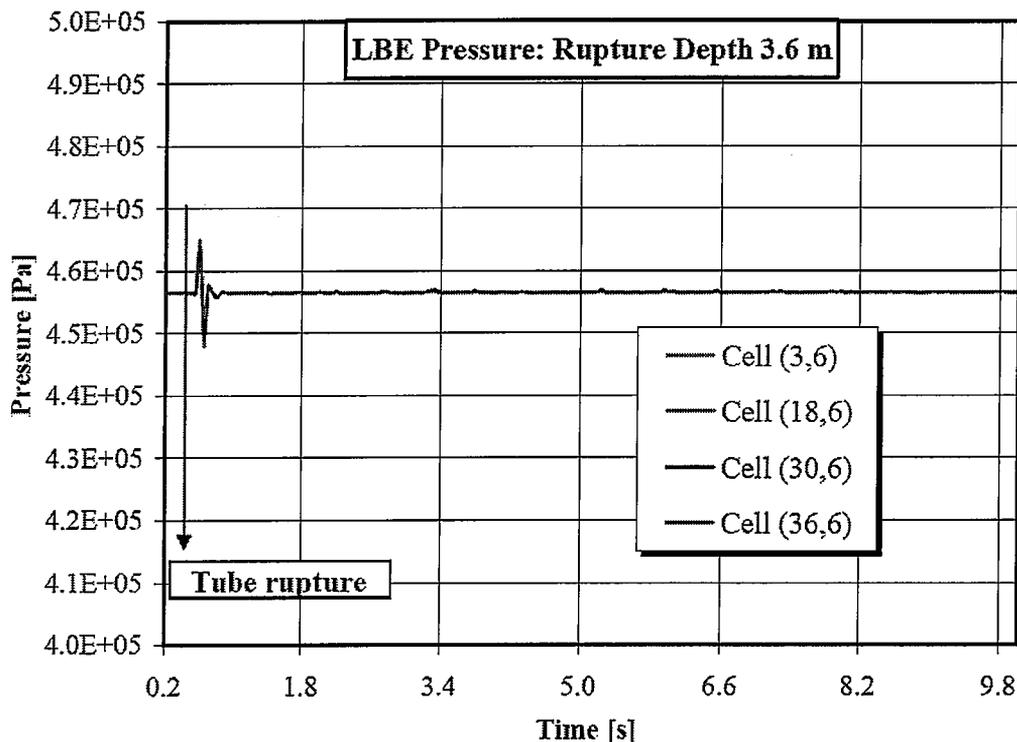


Figura 34. Andamento della pressione all'interno del vessel per una rottura a 3.6 m di profondità (LBE, posizione assiale 6)

Dalla Figura 34 si nota, per le quattro celle considerate, un comportamento del tutto analogo a quanto visto con una pressione di iniezione dell'acqua pari a 1 bar: anche in questo caso il vapore

che si forma al momento del contatto tra metallo liquido e acqua provoca un'onda di pressione che tende ad attenuarsi all'aumentare della distanza dal punto di rottura. Deve essere osservato che, con una pressione di iniezione pari a 2.5 bar, i valori massimi raggiunti dalla pressione sono inferiori rispetto a quanto trovato per le stesse celle con la simulazione n.1. Tale fenomeno è più chiaramente osservabile in Figura 35, nella quale viene riportato il confronto tra gli andamenti della pressione rilevati dalle simulazioni 1 e 7 per la sola cella (3, 6). E' possibile vedere che, al momento della rottura del tubo, in entrambe le simulazioni si rileva un aumento di pressione che risulta essere di 0.1 bar superiore nel caso della simulazione 1, anche se entrambi i massimi esibiscono all'incirca la stessa tempistica: il massimo infatti si attesta su 4.75 bar a 0.55 s per la simulazione 1 e su 4.65 bar a 0.59 s per la simulazione 7.

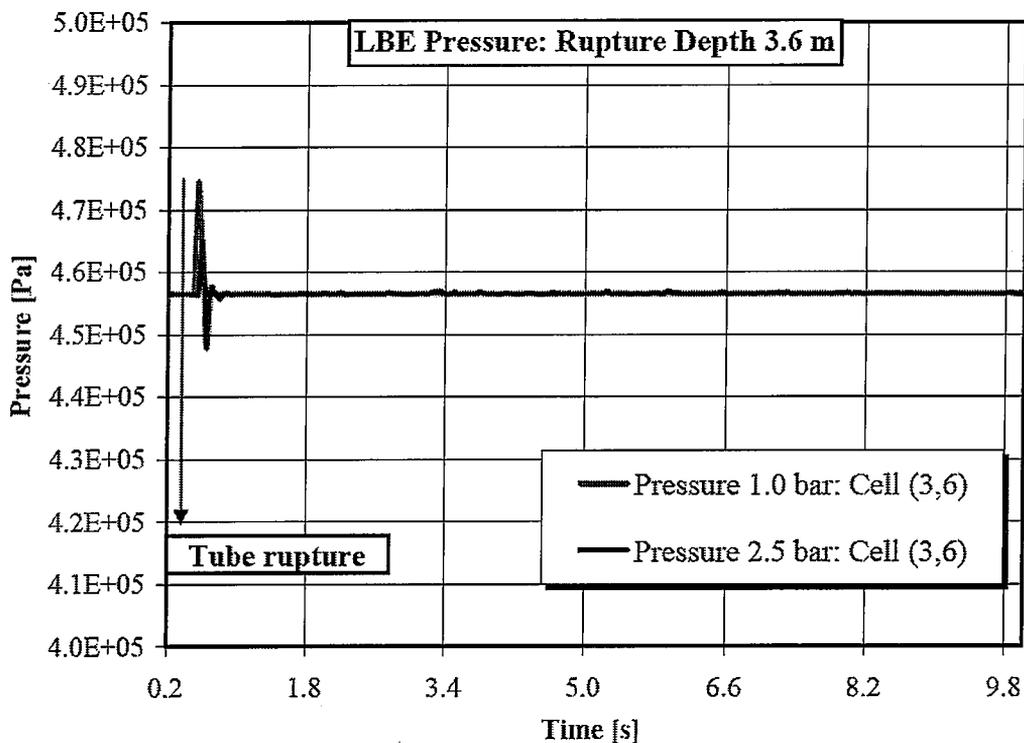


Figura 35. Andamento della pressione all'interno del vessel per una rottura a 3.6 m di profondità (LBE, posizione assiale 6) per le due pressioni di iniezione dell'acqua considerate

### 3.3.2 Andamento delle pressioni all'interno del tubo di acqua

In Figura 36 ed in Figura 37 sono riportati gli andamenti della pressione all'interno del tubo ottenuti nelle simulazioni 1 e 7 per le celle (1, 35) ed (1, 44). L'andamento della pressione all'interno del tubo di acqua risulta fortemente oscillatorio e caratterizzato da una successione di picchi che assumono valori massimi inferiori all'aumentare della distanza dal punto di rottura per entrambe le pressioni di iniezione considerate. Tuttavia deve essere sottolineato il fatto che, con una pressione di iniezione pari ad 1 bar, i valori massimi raggiunti dai picchi di pressione risultano essere maggiori,

sia nella cella (1,35) che nella cella (1,44), di quelli ottenuti prendendo a riferimento una pressione di iniezione pari a 2.5 bar (v. Figura 36 e Figura 37).

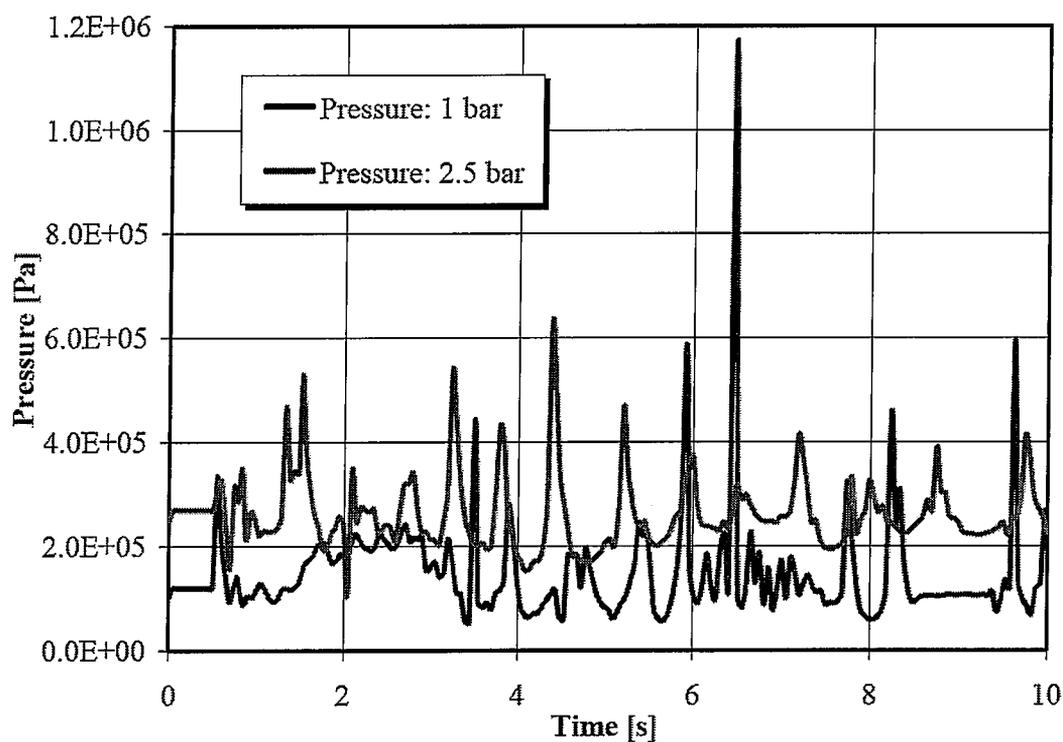


Figura 36. Andamento della pressione all'interno del tubo per una rottura a 3.6 m di profondità per le due pressioni di iniezione dell'acqua considerate (cella (1,35))

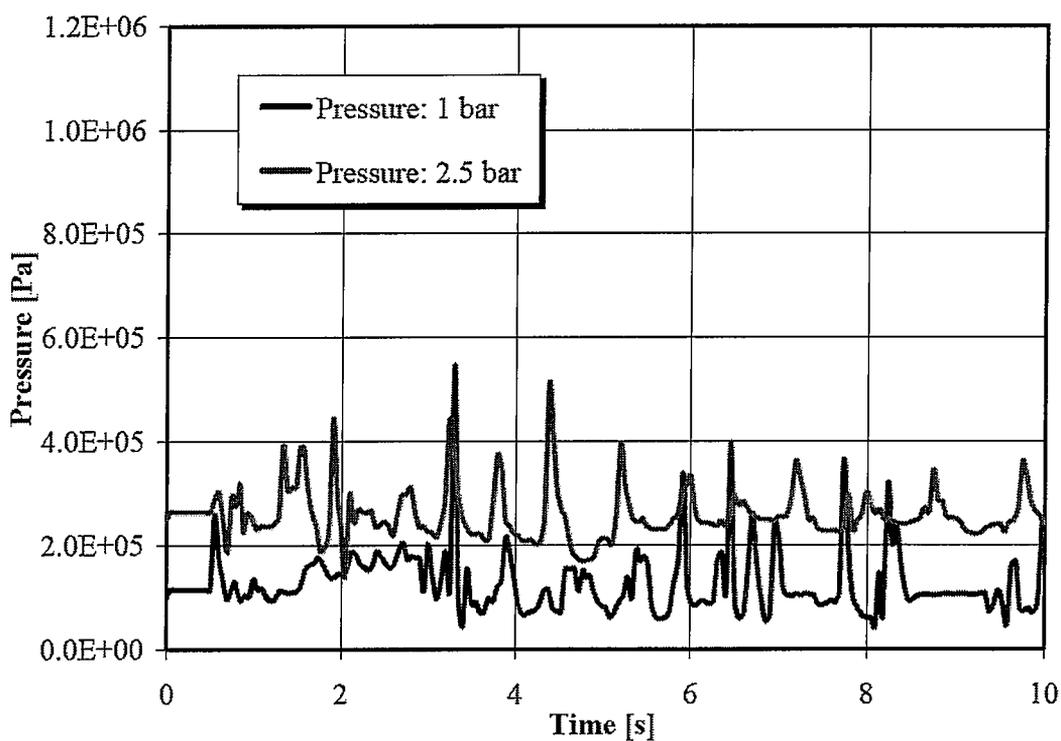


Figura 37. Andamento della pressione all'interno del tubo per una rottura a 3.6 m di profondità per le due pressioni di iniezione dell'acqua considerate (cella (1,44))

Questo comportamento è dovuto alla minore differenza di pressione tra quella di iniezione dell'acqua e quella nell'LBE in corrispondenza della sezione di rottura che determina un rientro meno rapido dell'LBE nel tubo.

Analizzando infatti le Figure da 38 a 40 si nota che la fenomenologia dell'interazione è la stessa di quella vista nel paragrafo 3.1.2, sebbene la quantità di metallo liquido all'interno della cella sia notevolmente inferiore nel caso di pressione di iniezione pari a 2.5 bar. Ciò è dovuto al fatto che in condizioni di equilibrio delle pressioni il pelo libero di LBE all'interno del tubo risulta ad una quota di circa 1.5 m al di sotto della quota del pelo libero di LBE all'interno del vessel. In assenza di interazione tra LBE ed acqua, la cella (1,35) risulterebbe teoricamente piena di sola acqua liquida. Ovviamente, l'interazione tra i due liquidi comporta, a causa delle conseguenti oscillazioni di pressione all'interno del tubo, la presenza di una quantità ridotta di LBE all'interno della cella. Il metallo liquido che raggiunge la cella (1, 35) tende poi a solidificare velocemente.

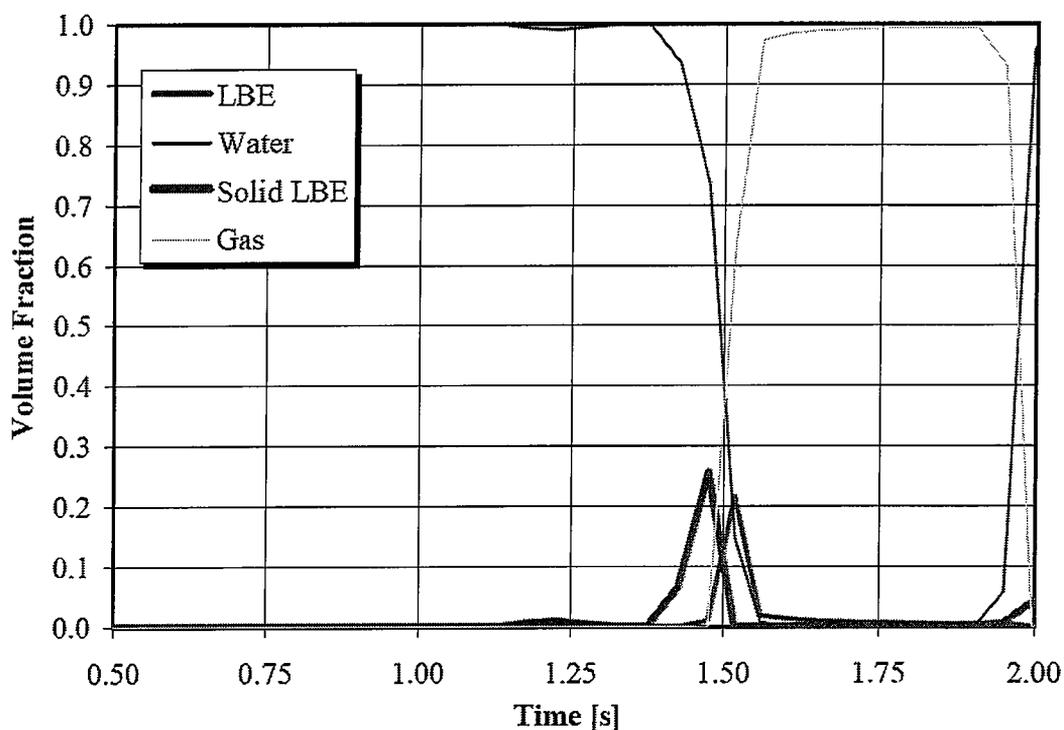


Figura 38. Andamento delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1, 35) per una profondità di rottura pari a 3.6 m nell'intervallo temporale compreso tra 0.5 e 2 s

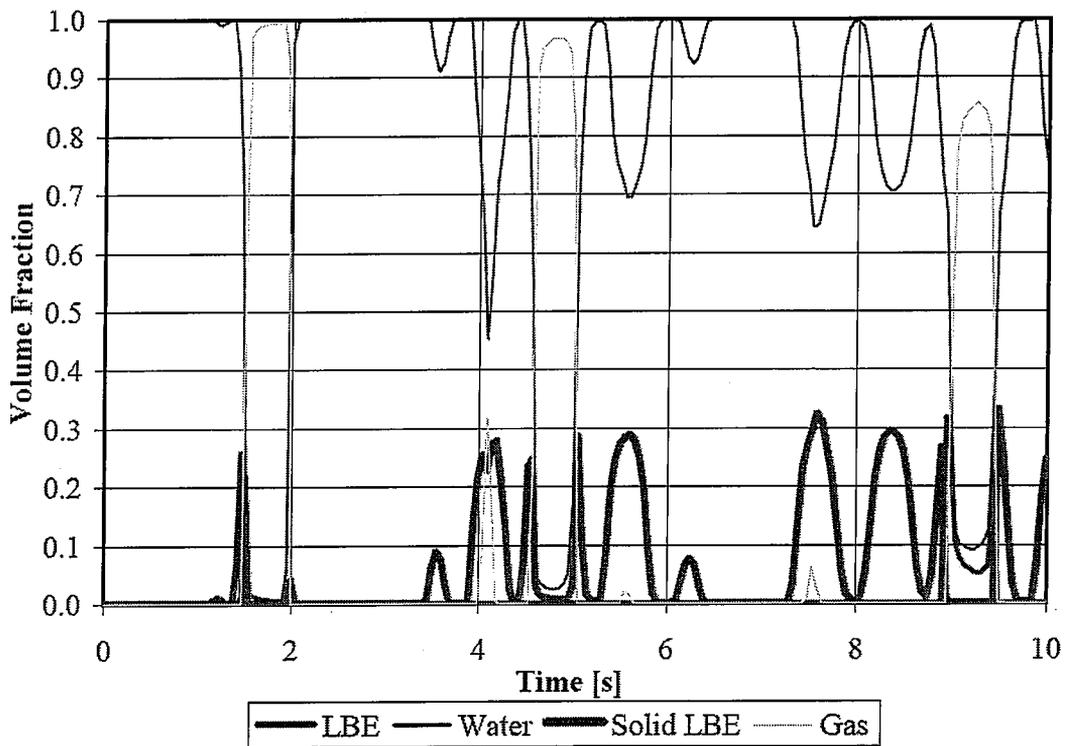


Figura 39. Andamento delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1, 35) per una profondità di rottura pari a 3.6 m nell'intervallo temporale compreso tra 0 e 10 s

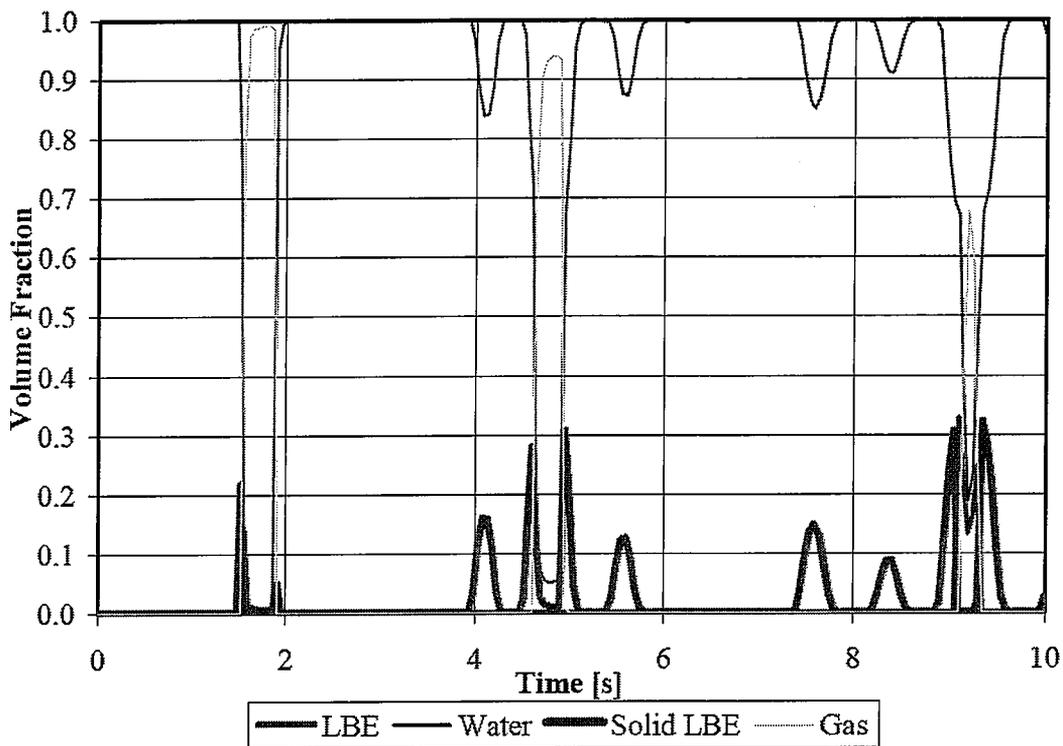


Figura 40. Andamento delle frazioni volumetriche di LBE liquido e solido, di acqua e di gas nella cella (1, 44) per una profondità di rottura pari a 3.6 m nell'intervallo temporale compreso tra 0 e 10 s

### 3.4 Simulazioni 8, 9 e 10

L'ultimo gruppo di simulazioni (n.8, 9 e 10 della matrice riportata in Tabella 1) è relativo alla configurazione del sistema nella quale il tubo è riempito inizialmente di acqua in fase vapore alla pressione di 1 bar ed alla temperatura di 120 °C, invece che acqua sotto raffreddata. Il volume del collettore è pari a 20 l.

Le condizioni di prova scelte sono state, dunque, le seguenti:

- profondità di rottura del tubo di vapore: 3600 mm; 1800 mm; 900 mm;
- temperatura del vapore: 120° C
- diametro del tubo di vapore: 5.89 mm;
- temperatura LBE: 350° C;
- pressione dell'argon: 1 bar.

Anche in questo caso l'andamento della pressione all'interno del vessel non ha evidenziato nessun valore di pressione potenzialmente pericoloso per l'integrità del vessel stesso ed ancora una volta ha mostrato notevoli analogie con quanto già riportato nel paragrafo 3.1.1; di conseguenza, per brevità, è stato scelto di non riportare i grafici relativi agli andamenti della pressione nel vessel.

E' stato riportato in seguito il confronto tra le simulazioni 1 e 8, 2 e 9, 3 e 10, prendendo a riferimento le stesse due celle assiali (cella (1, 35) e cella (1, 44)) già considerate nel paragrafo 3.1.2. In tal modo è stato possibile evidenziare le differenze tra gli andamenti di pressione nel caso che il tubo sia riempito inizialmente con acqua o con vapore, al fine di identificare le condizioni potenzialmente più gravose per il sistema.

#### 3.4.1 Simulazione 8 e suo confronto con la simulazione 1

La prima simulazione di questo gruppo ha preso a riferimento una rottura a ghigliottina del tubo contenente vapore posta a 3.6 m di profondità.

Come è possibile osservare dalla Figura 41, l'andamento della pressione sia nella cella (1, 35) che nella cella (1, 44), risulta essere oscillatorio. Tali oscillazioni, che raggiungono un valore massimo di 2.34 bar, tendono ad essere decrescenti con il passare del tempo. In particolare, l'andamento della pressione nella cella (1, 35) è simile a quello che si ha nella cella (1, 44), ma con valori mediamente superiori durante tutto il transitorio. L'andamento della pressione è spiegabile esaminando le frazioni volumetriche del gas e dell'LBE sia nella cella (1, 35) che nella cella (1, 44). In entrambe le celle all'inizio del transitorio è presente solo il vapore surriscaldato. Non appena avviene la rottura (0.5 s, v. Figura 41), il metallo liquido comincia a risalire, grazie alla differenza di pressione tra l'interno del tubo ed il battente di LBE nel punto di rottura, arrivando in circa 1 s alla cella (1,35). Da questo momento la quantità di LBE all'interno della cella aumenta rapidamente spingendo il

vapore verso il collettore. Quando la cella è completamente riempita di LBE si registra il massimo valore di pressione. Una volta che la pressione del vapore diventa superiore a quella dell'LBE si ha nuovamente l'ingresso del vapore all'interno della cella, per poi di nuovo diminuire e dare origine alle oscillazioni cicliche riscontrabili nelle Figure da 42 a 44. Ovviamente, in questo caso, nelle celle non si ha formazione di LBE solidificato.

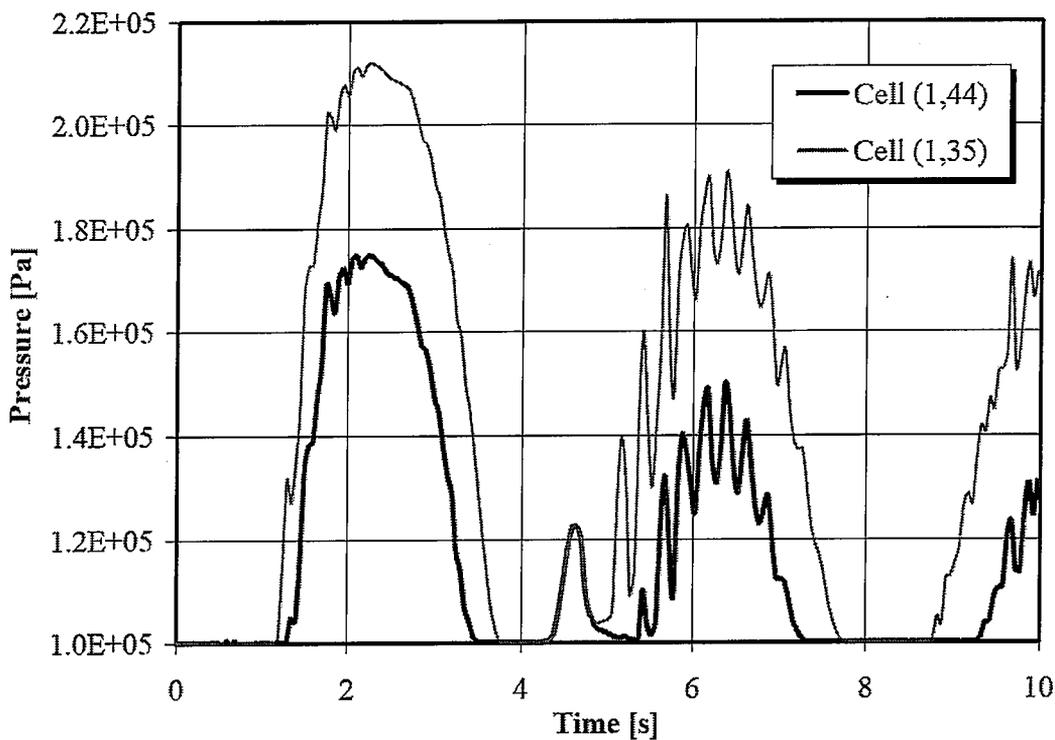


Figura 41. Andamento della pressione nelle celle (1, 35) e (1, 44) per una profondità di rottura pari a 3.6 m

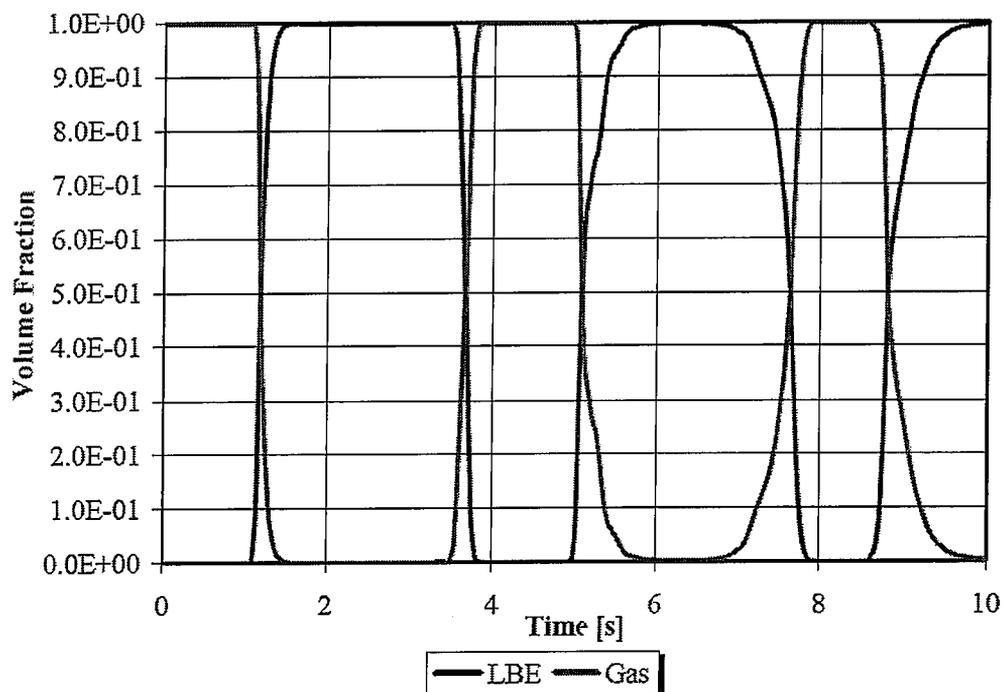


Figura 42. Frazione volumetrica di vapore ed LBE nella cella (1,35)

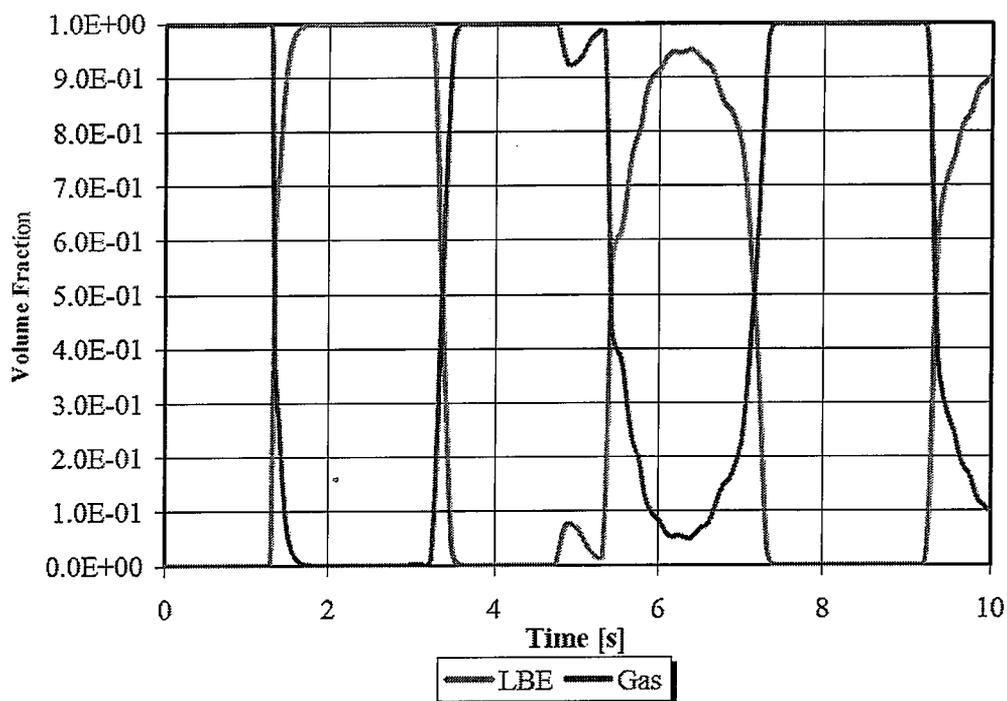


Figura 43. Frazione volumetrica di vapore ed LBE nella cella (1,44)

In Figura 44 sono riportati gli andamenti temporali della temperatura dell'LBE e del vapore all'interno delle due celle considerate; è possibile osservare che la temperatura del metallo liquido e quella del vapore seguono lo stesso andamento. La presenza di periodi temporali in cui la temperatura dell'LBE si abbassa ben al di sotto dei 350 °C è dovuta al fatto che in corrispondenza

di tali periodi l'LBE non è presente in tali celle; il codice SIMMER in tal caso fornisce ugualmente un valore di temperatura per l'LBE che però non è da considerarsi realistico.

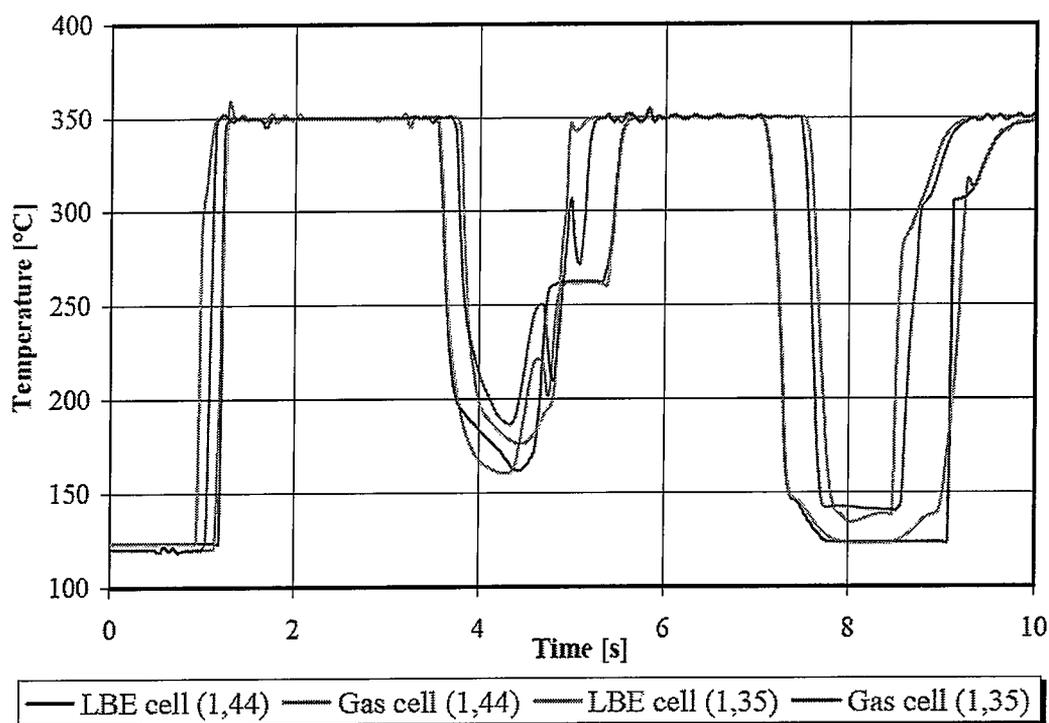


Figura 44. Andamenti della temperatura del vapore e dell'LBE nelle celle considerate

In Figura 45 ed in Figura 46 sono riportati i confronti tra gli andamenti della pressione, per la stessa profondità di rottura, relativi alla presenza di acqua o di vapore all'interno del tubo. Si può osservare che, in presenza di acqua, la pressione in entrambe le celle segue un andamento fortemente oscillatorio, caratterizzato da picchi che possono superare 12 bar. In presenza di vapore le oscillazioni di pressione risultano essere fortemente smorzate rispetto a quelle osservate con acqua in fase liquida, seppure in entrambi i casi si ha la stessa "linea di tendenza" per entrambe le celle considerate. E' quindi possibile dedurre che la presenza del vapore smorza le oscillazioni in modo considerevole, costituendo di fatto un "ammortizzatore" per le oscillazioni prodotte dal contatto tra metallo liquido e acqua.

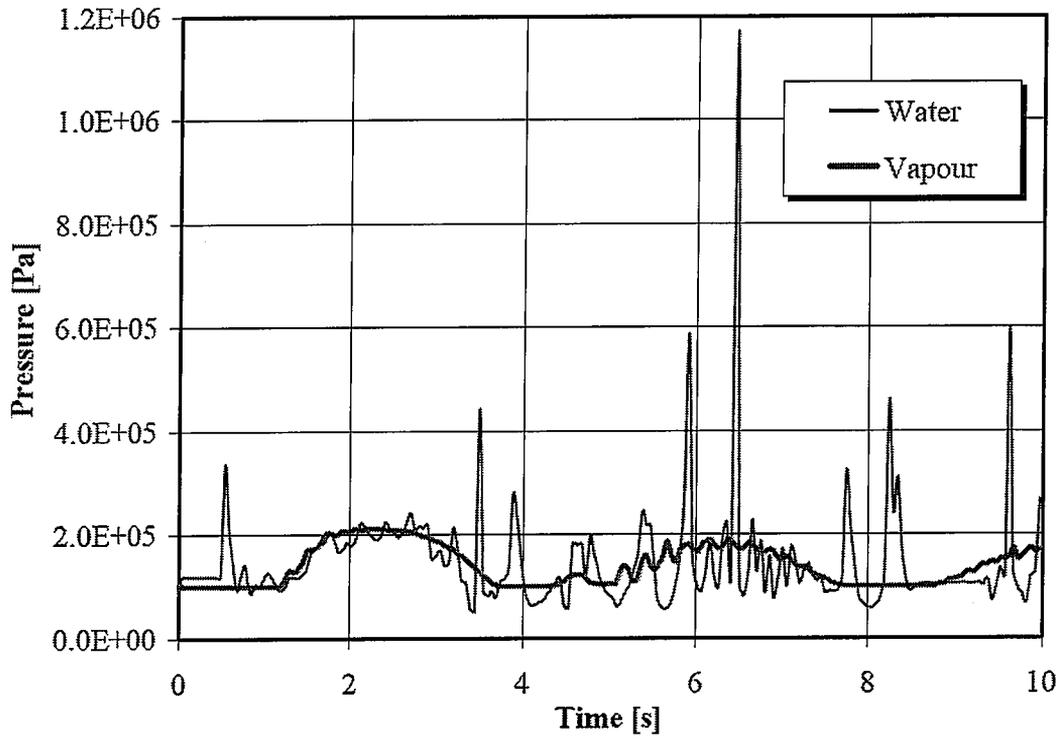


Figura 45. Confronto tra gli andamenti della pressione nella cella (1,3 5) nel caso di rottura del tubo di acqua o del tubo di vapore ad una profondità pari a 3.6 m

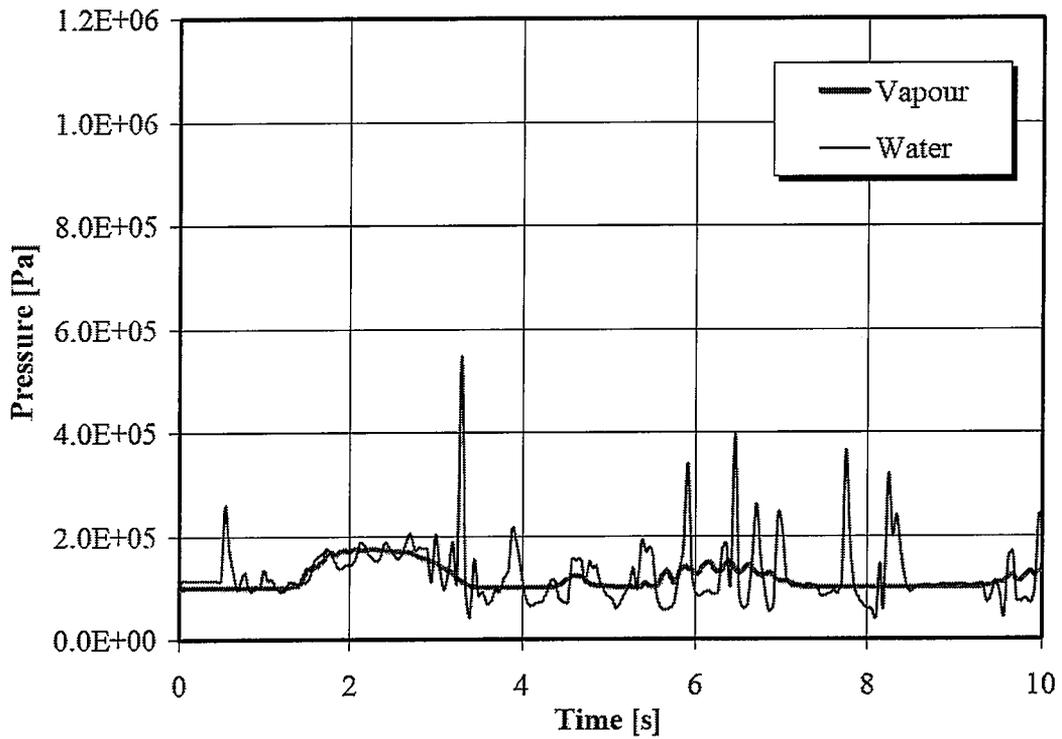


Figura 46. Confronto tra gli andamenti della pressione nella cella (1, 44) nel caso di rottura del tubo di acqua o del tubo di vapore ad una profondità pari a 3.6 m

### 3.4.2 Simulazione 9 e suo confronto con la simulazione 2

La simulazione 9 ha preso a riferimento una rottura a ghigliottina del tubo contenente vapore posta ad 1.8 m di profondità.

Analogamente a quanto già visto nel paragrafo 3.3.1, l'andamento della pressione sia nella cella (1, 35) che nella cella (1, 44) (v. Figura 47), risulta essere oscillatorio, con valori massimi intorno a 1.8 bar per la cella (1, 35) ed a 1.5 bar per la cella (1,44), e decrescente con il passare del tempo.

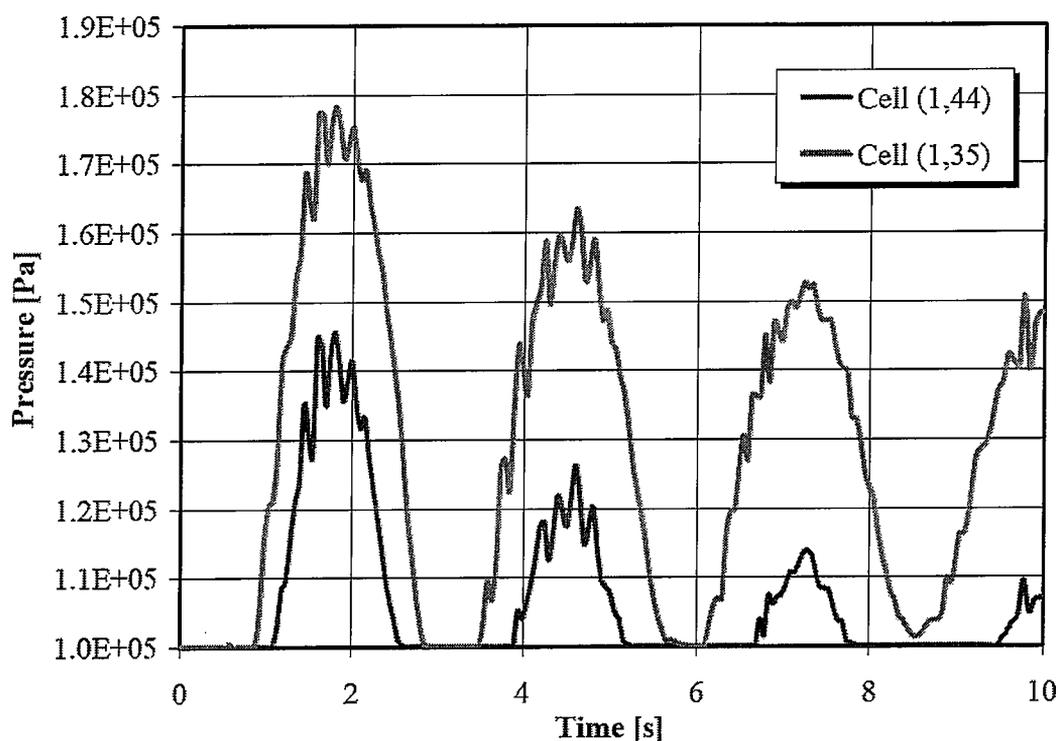


Figura 47. Andamento della pressione nelle celle (1, 35) e (1, 44) per una profondità di rottura pari a 1.8 m

Nel seguito si è scelto di riportare solo il confronto tra gli andamenti di pressione relativi alle simulazioni 2 e 9, in quanto la fenomenologia legata agli andamenti delle frazioni volumetriche è del tutto analoga a quanto riportato nel paragrafo 3.3.1.

Come si osserva dalla Figura 48 e dalla Figura 49, le oscillazioni presenti nella simulazione 2 vengono notevolmente smorzate anche se, per questa profondità di rottura, si nota un leggero “sfasamento” tra gli andamenti della pressione nelle simulazioni 2 e 9, non rilevato nel caso di rottura a 3.6 m di profondità.

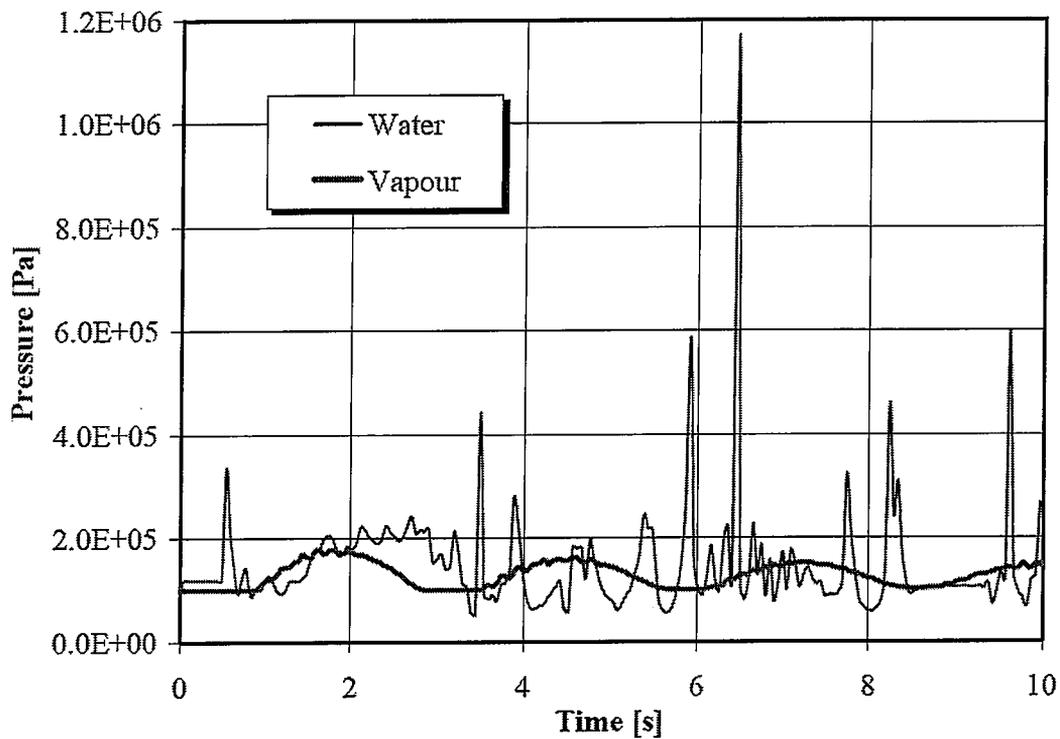


Figura 48. Confronto tra gli andamenti della pressione nella cella (1, 35) nel caso di rottura del tubo di acqua o del tubo di vapore ad una profondità pari a 1.8 m

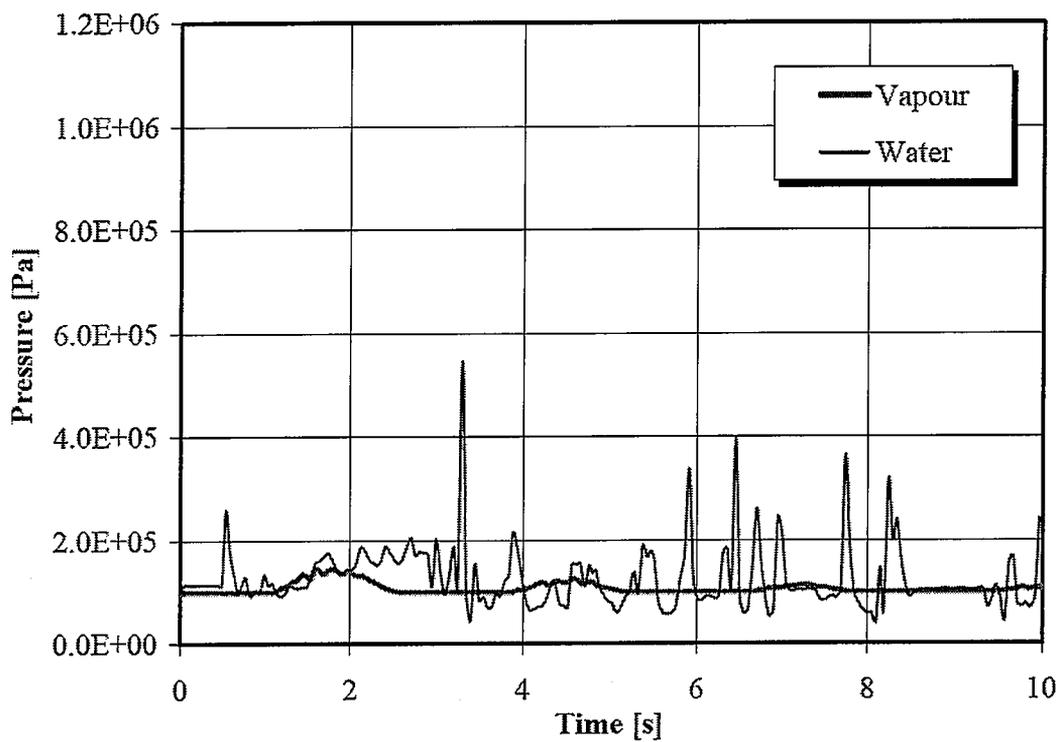


Figura 49. Confronto tra gli andamenti della pressione nella cella (1, 44) nel caso di rottura del tubo di acqua o del tubo di vapore ad una profondità pari a 1.8 m

### 3.4.3 Simulazione 10 e suo confronto con la simulazione 3

La profondità di rottura del tubo considerata in questa ultima simulazione (n. 10) è pari a 0.9 m di profondità.

Diversamente da quanto visto nei paragrafi 3.3.1 e 3.3.2, osservando la Figura 50 si nota che l'andamento della pressione è oscillatorio solo nella cella (1, 35), mentre nella cella (1, 44) si osserva un picco massimo di circa 1.1 bar che rappresenta l'aumento di pressione più importante, visto che quello che si verifica intorno ai 3 s risulta quasi impercettibile. Le oscillazioni di pressione rilevate nella cella (1, 35), che raggiungono un valore massimo di 1.42 bar intorno a 1.2 s, tendono ad essere convergenti con il passare del tempo verso il valore medio di 1.25 bar. Di conseguenza, per questa profondità di rottura, l'andamento della pressione nella cella (1, 44) non segue l'andamento della pressione previsto nella cella (1,35). Ciò è spiegabile in quanto, essendo la rottura più vicina al pelo libero dell'LBE nel vessel, l'oscillazione del metallo liquido all'interno del tubo risulta meno ampia rispetto a quella che si ottiene con una profondità di rottura pari a 3.6 m ed il livello di LBE arriva alla cella (1,44) solo negli istanti iniziali.

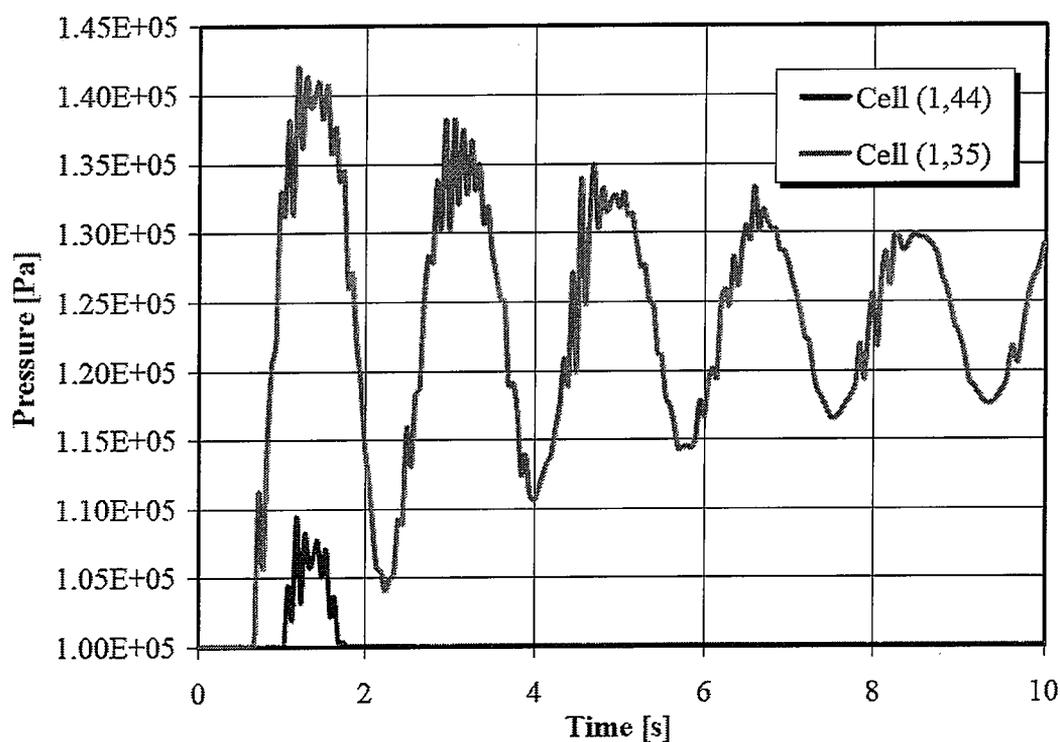


Figura 50. Andamento della pressione nelle celle (1, 35) e (1, 44) per una profondità di rottura pari a 0.9 m

Per quanto riguarda invece il confronto degli andamenti temporali delle pressioni tra le simulazioni 3 e 10 (v. Figura 51 e Figura 52) deve essere notato che lo stretto legame, osservato nel paragrafo 3.3.1, tra l'andamento della pressione in presenza di acqua ed in presenza di vapore per questa profondità di rottura risulta meno evidente.

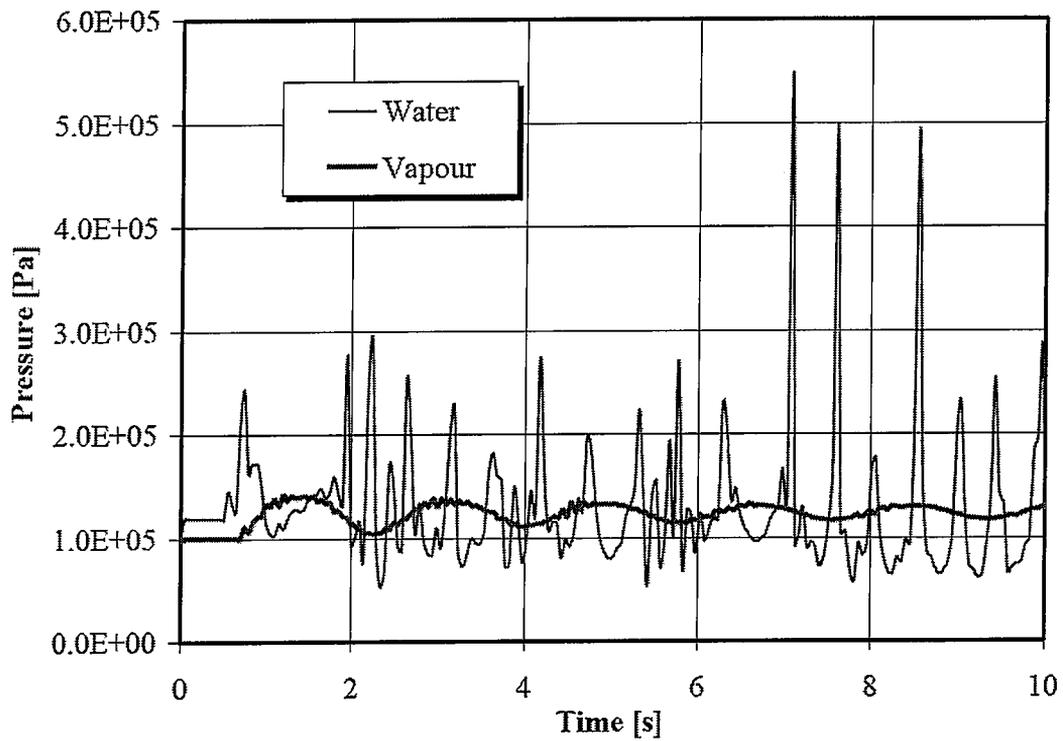


Figura 51. Confronto tra gli andamenti della pressione nella cella (1, 35) nel caso di rottura del tubo di acqua o del tubo di vapore ad una profondità pari a 0.9 m

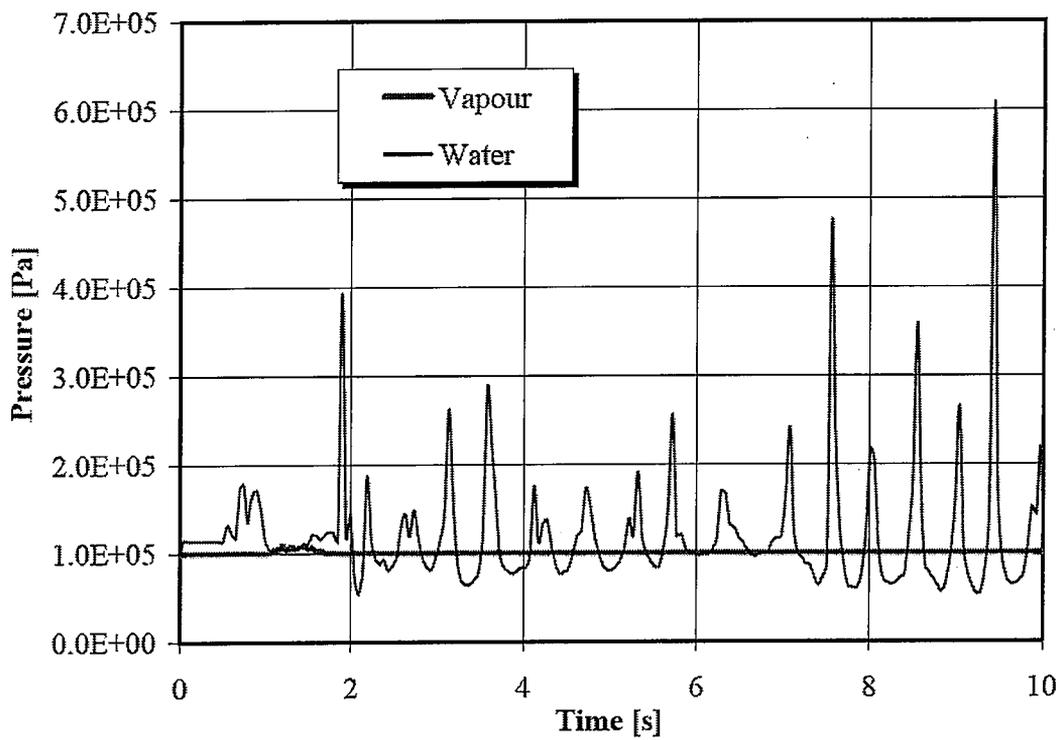


Figura 52. Confronto tra gli andamenti della pressione nella cella (1, 44) nel caso di rottura del tubo di acqua o del tubo di vapore ad una profondità pari a 0.9 m

L'andamento della pressione è direttamente connesso con gli andamenti delle frazioni volumetriche del gas e dell'LBE presenti sia nella cella (1, 35) che nella cella (1, 44) e riportate nelle Figure 53 e 54. E' possibile infatti vedere che all'interno della cella (1, 35) il vapore, che fino a circa 0.5 s la riempie completamente, viene sostituito dall'LBE: in tal modo quindi si hanno due andamenti complementari. L'oscillazione di entrambe le frazioni tende ad esaurirsi con il passare del tempo, raggiungendo, per l'LBE, un valore prossimo ad 1 tra gli 8 ed i 10 s. Per quanto riguarda la cella (1, 44), in accordo con quanto già visto per la pressione, si ha un riempimento solo parziale della cella da parte dell'LBE che raggiunge il picco massimo di circa 0.83 ad 1.4 s ed un altro picco di 0.31 a circa 3 s, ovvero proprio in corrispondenza del leggero aumento di pressione visto in precedenza.

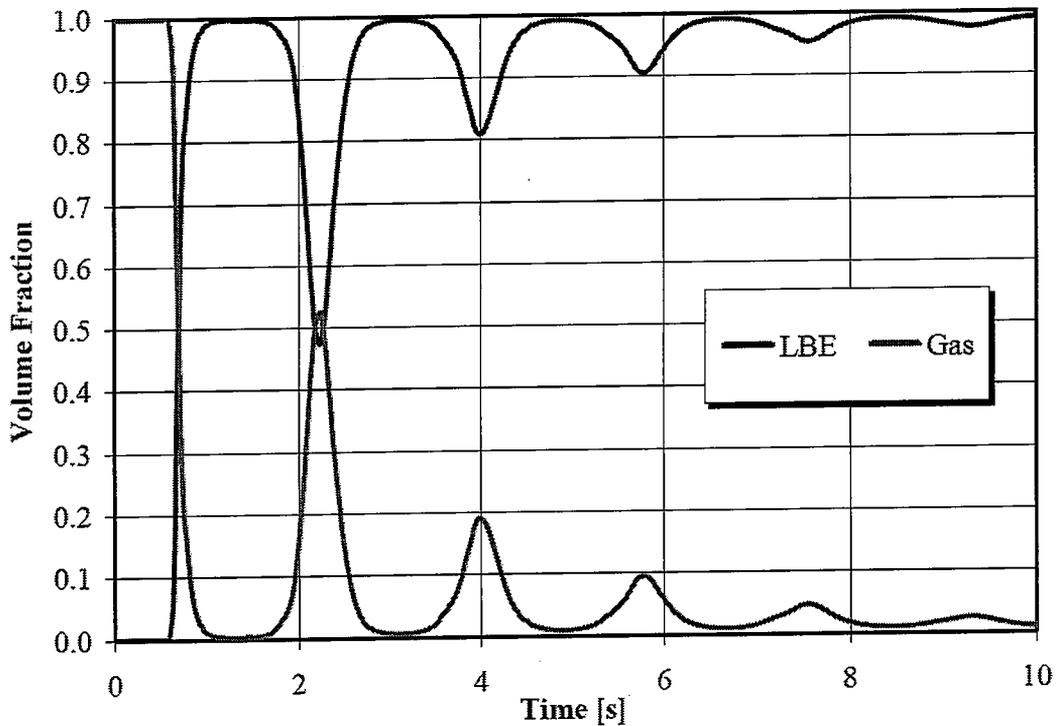


Figura 53. Frazione volumetrica di vapore ed LBE nella cella (1, 35)

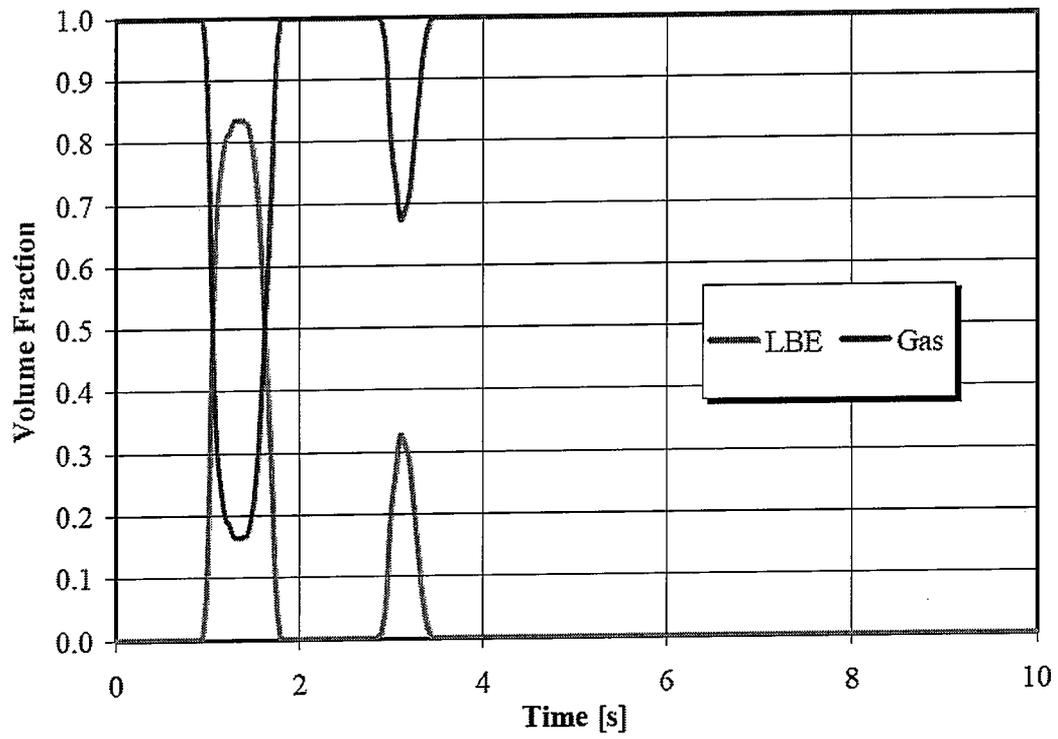


Figura 54. Frazione volumetrica di vapore ed LBE nella cella (1, 44)

## 4. Conclusioni

Nel presente rapporto sono stati illustrati i risultati ottenuti dall'analisi dei calcoli parametrici eseguiti con il codice SIMMER III, finalizzata all'ottenimento di informazioni utili per l'esame del transitorio dovuto ad un'ipotetica rottura di un tubo del DHR previsto nel reattore ELSY ed il cui prototipo sarà inserito nella sezione di prova dell'apparecchiatura CIRCE.

I modelli geometrici adottati per lo studio parametrico hanno richiesto diverse ipotesi semplificative in modo da potersi riportare ad una geometria con simmetria cilindrica. Sono state considerate diverse condizioni di prova ottenute variando un parametro alla volta, in modo da poter effettuare un confronto diretto tra le varie simulazioni. Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle simulazioni è emerso che:

- la pressione all'interno del vessel non raggiunge valori tali da superare la pressione di progetto per nessuna delle condizioni considerate, essendo le sovrappressioni al massimo dell'ordine di decimi di bar;
- all'interno del tubo si hanno oscillazioni di pressione con picchi che possono superare i 10 bar e che debbono essere tenuti in considerazione in fase di progettazione, anche se in realtà non costituiscono una minaccia per l'integrità del tubo progettato per resistere a pressioni di circa 100 bar;
- al diminuire della pressione di iniezione dell'acqua i picchi di pressione originati all'interno del tubo, a seguito dell'interazione con l'LBE, assumono valori maggiori;
- nel caso in cui vi sia solo vapore all'interno del tubo, tali picchi vengono smorzati e di conseguenza il vapore funge da ammortizzatore per le oscillazioni.

Sebbene i risultati di questi calcoli non evidenzino particolari problematiche connesse con sovrappressioni all'interno del vessel e del tubo in cui è avvenuta la rottura, bisogna tener conto che in questo lavoro non si è tenuto conto del possibile effetto "domino" che l'interazione LBE-acqua potrebbe provocare sui tubi del DHR adiacenti a quello rotto.

## **Bibliografia**

- [1] W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, D. Pellini, *“Analisi della prova n.1 eseguita sull'apparecchiatura LIFUS 5”*, RL 1128, DIMNP-Pisa, Novembre 2006.
- [2] A. Ciampichetti, L. Mansani, *“Experimental test program and test set-up on the basis of the design needs of the LBE/water interaction”*, ET-S-R-001, 12 Maggio 2006.
- [3] W. Ambrosini, N. Forgione, F. Oriolo, D. Pellini, *“Analisi parametriche relative all'interazione LBE-acqua in supporto alle condizioni operative di CIRCE ed alla specifica sperimentale della prova n. 2 da eseguire sull'apparecchiatura LIFUS 5”*, RL 1150, DIMNP- Pisa, Maggio 2007.