



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Caratterizzazione sperimentale dell'interazione metallo liquido pesante – acqua e qualifica rottura generatore di vapore LFR

*N. Forgione, N. Montagnani, E. Semeraro, A. Del Nevo, R. Giammusso,
A. Ciampichetti*



CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DELL'INTERAZIONE METALLO LIQUIDO PESANTE -
ACQUA E QUALIFICA ROTTURA GENERATORE DI VAPORE LFR

N. Forgione, N. Montagnani, E. Semeraro (CIRTEN)
A. Del Nevo, R. Giammusso, A. Ciampichetti (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, Gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Nuovo nucleare da fissione: collaborazioni internazionali e sviluppo competenze in
materia nucleare

Responsabile Progetto: Paride Meloni, ENEA

Titolo

Caratterizzazione sperimentale dell'interazione metallo liquido pesante – acqua e qualifica rottura generatore di vapore LFR

Descrittori

Tipologia del documento: Rapporto Tecnico
Collocazione contrattuale: Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca “Nuovo nucleare da fissione”
Argomenti trattati: Termoidraulica
 Calcolo agli elementi finiti
 Tecnologia dei metalli liquidi
 Reattori Nucleari Veloci

Sommario

Il presente lavoro di ricerca è relativo allo studio dell'interazione metallo liquido pesante-acqua, d'interesse per le analisi di sicurezza dei reattori veloci di quarta generazione refrigerati con piombo liquido. La prima parte del lavoro ha riguardato il supporto fornito all'ENEA per la scelta delle modifiche da apportare all'apparecchiatura LIFUS 5. Successivamente, è stata effettuata una serie di simulazioni di pre-test per valutare l'influenza di alcuni parametri operativi sul fenomeno dell'interazione, in modo da dare supporto alla scelte delle modifiche da effettuare e alle condizioni al contorno da definire per le future prove sperimentali. Le modifiche effettuate per aggiornare l'apparecchiatura sperimentale LIFUS5 sono descritte distinguendo tra modifiche al “layout” dell'apparecchiatura (incluse le strutture di supporto), alla strumentazione, al sistema di controllo e ai sistemi di interfaccia.

Note

* Autori:

N. Forgiione, N. Montagnani, E. Semeraro (CIRTEN)


A. Del Nevo, R. Giammusso, A. Ciampichetti (ENEA)




Copia n.

In carico a:

| | | | | | | |
|------|-------------|------------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 2 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 1 | | | NOME | | | |
| | | | FIRMA | | | |
| 0 | EMISSIONE | 09/09/2011 | NOME | A. Del Nevo * | M. Tarantino | P. Meloni |
| | | | FIRMA | <i>[Signature]</i> | <i>[Signature]</i> | <i>[Signature]</i> |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | | REDAZIONE | CONVALIDA | APPROVAZIONE |

| | | | | | |
|--|---|------------------|----------------------|------------------|-----------------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione NNFISS – LP3 - 031 | Rev. 0 | Distrib. R | Pag. 2 | di 93 |
|--|---|------------------|----------------------|------------------|-----------------|

(Pagina lasciata intenzionalmente bianca)

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 3 | 93 |

SOMMARIO ESTESO


Il presente lavoro di ricerca è relativo allo studio dell'interazione metallo liquido pesante-acqua, d'interesse per le analisi di sicurezza dei reattori veloci di quarta generazione refrigerati con piombo liquido.

La prima parte del lavoro ha riguardato il supporto fornito all'ENEA per la scelta delle modifiche da apportare all'apparecchiatura LIFUS 5, al fine di ridurre le asimmetrie presenti e, quindi, le incertezze di calcolo, per procedere ad una qualifica più accurata del codice di calcolo SIMMER, utilizzato per le analisi termoidrauliche. Una revisione critica della strumentazione, basata sull'esperienza acquisita attraverso le precedenti campagne sperimentali, ha inoltre consentito di formulare una proposta sulle misure da effettuare durante gli esperimenti, fornendo indicazioni dettagliate sul posizionamento degli strumenti.

Successivamente, è stata effettuata una serie di simulazioni di pre-test per valutare l'influenza di alcuni parametri operativi sul fenomeno dell'interazione, in modo da dare supporto alla scelte delle modifiche da effettuare e alle condizioni al contorno da definire per le future prove sperimentali. Inoltre, è stata applicata l'utility di post-processing BFCAL ai risultati dei calcoli eseguiti con il SIMMER per ricavare alcune grandezze energetiche di interesse per il fenomeno dell'interazione metallo liquido-acqua.

Le modifiche effettuate per aggiornare l'apparecchiatura sperimentale LIFUS5 e raggiungere gli obiettivi preposti, inclusi gli standard di qualità richiesti, per le prossime campagne sperimentali previste nell'ambito dei progetti Europei THINS e LEADER, sono descritte distinguendo tra modifiche al "layout" dell'apparecchiatura (incluse le strutture di supporto), alla strumentazione, al sistema di controllo e ai sistemi di interfaccia.


Infine, è stato sviluppato uno studio termoidraulico delle possibili conseguenze derivanti da un incidente di Steam Generator Tube Rupture (SGTR), ovvero conseguente alla rottura di una tubazione compresa nel fascio tubiero di uno degli otto generatori di vapore del reattore ELSY. Lo studio di tale transitorio incidentale è stato realizzato tramite il codice SIMMER

| | | | | | |
|--|---|------------------|----------------------|------------------|-----------------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione NNFISS – LP3 - 031 | Rev. 0 | Distrib. R | Pag. 4 | di 93 |
|--|---|------------------|----------------------|------------------|-----------------|


nella sua versione bidimensionale. Da tale studio è stato possibile evidenziare le oscillazioni di pressione che nascono a seguito dell'interazione all'interno del metallo liquido, potenzialmente pericolose per l'integrità dello stesso generatore di vapore. In particolare, sono stati analizzati il flusso d'acqua rilasciato nel metallo liquido, i picchi di pressione legati alla vaporizzazione dell'acqua, l'energia cinetica acquisita dal piombo e il lavoro di compressione subito dal gas di copertura.

INDICE

| | |
|---|-----------|
| SOMMARIO ESTESO | 3 |
| LISTA DELLE FIGURE | 7 |
| LISTA DELLE TABELLE | 12 |
| 1 DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ..... | 13 |
| 1.1 Ambito | 13 |
| 1.2 Obiettivo | 14 |
| 1.3 Struttura del report | 14 |
| 2 APPARECCHIATURA SPERIMENTALE LIFUS 5..... | 16 |
| 2.1 Descrizione di LIFUS 5 | 16 |
| 2.2 Modifiche della configurazione di LIFUS 5 | 16 |
| 3 CALCOLI DI PRE-TEST..... | 22 |
| 3.1 Modelli 2D e 3D adottati per le simulazioni SIMMER | 22 |
| 3.2 Matrici delle prove effettuate | 25 |
| 3.3 Risultati ottenuti per il modello bi-dimensionale | 27 |
| 3.3.1 <i>Frazione di gas di copertura.....</i> | <i>27</i> |
| 3.3.2 <i>Diametro dell'orifizio dell'iniettore.....</i> | <i>34</i> |
| 3.3.3 <i>Temperatura dell'acqua iniettata.....</i> | <i>36</i> |
| 3.3.4 <i>Pressione di iniezione.....</i> | <i>39</i> |
| 3.3.5 <i>Temperatura dell'LBE.....</i> | <i>40</i> |
| 3.4 Risultati ottenuti per il modello tri-dimensionale | 41 |
| 3.5 Applicazione del BFCAL | 47 |
| 4 AGGIORNAMENTI TECNICI A LIFUS-5..... | 58 |
| 4.1 Configurazione di LIFUS5 | 58 |

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 6 | 93 |


| | | |
|----------|--|-----------|
| 4.2 | Strumentazione di LIFUS5 | 62 |
| 4.3 | Controllo e acquisizione dati | 62 |
| 4.4 | Sistema di riscaldamento con cavi scaldanti | 63 |
| 5 | ANALISI DELL'INCIDENTE SGTR NEL REATTORE ELSY..... | 64 |
| 5.1 | Il programma ELSY | 64 |
| 5.2 | Caratteristiche del generatore di vapore del reattore ELSY | 64 |
| 5.3 | Incidente di “Steam Generator Tube Rupture” | 69 |
| 5.4 | Matrice delle simulazioni e dominio di calcolo | 70 |
| 5.5 | Analisi dei risultati | 73 |
| 5.5.1 | <i>Portata massica di acqua uscente dall'iniettore.....</i> | <i>74</i> |
| 5.5.2 | <i>Pressurizzazione del GV.....</i> | <i>79</i> |
| 5.5.3 | <i>Energia cinetica del piombo</i> | <i>82</i> |
| 5.5.4 | <i>Impulso di pressione sulla parete superiore del GV.....</i> | <i>84</i> |
| 5.5.5 | <i>Lavoro di compressione subito dal gas di copertura.....</i> | <i>86</i> |
| 6 | CONCLUSIONI..... | 89 |
| | BIBLIOGRAFIA..... | 92 |

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 7 | 93 |


LISTA DELLE FIGURE

| | |
|---|----|
| <i>Figura 2.1. P&I dell'apparecchatura LIFUS 5.</i> | 19 |
| <i>Figura 2.2. Possibili disposizioni delle termocoppie.</i> | 20 |
| <i>Figura 2.3. Modello agli elementi finiti del serbatoio LIFUS-5.</i> | 20 |
| <i>Figura 2.4. Posizione ottimale degli strain gauge.</i> | 21 |
| <i>Figura 3.1. Modello utilizzato per la simulazione numerica</i> | 22 |
| <i>Figura 3.2. Sezione mediana del modello tri-dimensionale usato dal codice SIMMER IV.</i> | 24 |
| Figura 3.3. Viste del modello tri-dimensionale adottato per la simulazione. | 24 |
| <i>Figura 3.4. Dominio geometrico SIMMER con la posizione delle celle dove sono stati raccolti i dati di temperatura (giallo), di pressione (giallo) e di portata di acqua iniettata (blu ciano).</i> | 25 |
| <i>Figura 3.5. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19)</i> | 28 |
| <i>Figura 3.6. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni</i> | 28 |
| <i>Figura 3.7. Andamenti temporali della pressione in diverse zone del serbatoio S1</i> | 30 |
| <i>Figura 3.8. Andamenti temporali della pressione in diverse zone del serbatoio S1</i> | 30 |
| <i>Figura 3.9. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19)</i> | 30 |
| <i>Figura 3.10. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti frazioni di gas di copertura nella fase iniziale del transitorio.</i> | 31 |
| <i>Figura 3.11. Contour-plot della temperatura dell'LBE</i> | 32 |
| <i>Figura 3.12. Contour-plot della temperatura dell'LBE</i> | 32 |
| <i>Figura 3.13. Contour-plot della temperatura dell'LBE</i> | 33 |
| <i>Figura 3.14. Contour-plot della temperatura dell'LBE</i> | 33 |
| <i>Figura 3.15. Andamenti temporali della portata dell'acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti frazioni di gas di copertura.</i> | 33 |


| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 3.16. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell’ugello di iniezione.</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 3.17. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell’ugello di iniezione nella fase iniziale del transitorio.....</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 3.18. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell’ugello di iniezione.</i> | <i>35</i> |
| <i>Figura 3.19. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell’ugello di iniezione nella fase iniziale del transitorio.....</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 3.20. Andamenti temporali della portata di acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell’ugello di iniezione.</i> | <i>36</i> |
| <i>Figura 3.21. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature di acqua iniettata.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 3.22. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature di acqua iniettata nella fase iniziale del transitorio.....</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 3.23. Andamenti temporali della temperatura dell’LBE nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature di acqua iniettata.</i> | <i>38</i> |
| <i>Figura 3.24. Andamenti temporali della portata di acqua iniettata al variare della temperatura dell’acqua di iniezione temperatura.....</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 3.25. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti pressioni di iniezione.</i> | <i>39</i> |
| <i>Figura 3.26. Andamenti temporali della portata dell’acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti pressioni di iniezione.</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 3.27. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature dell’LBE.....</i> | <i>40</i> |
| <i>Figura 3.28. Andamenti temporali della portata dell’acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti temperature dell’LBE.....</i> | <i>41</i> |
| <i>Figura 3.29. Confronto degli andamenti temporali della pressione nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale nella zona vicina al punto di iniezione.</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 3.30. Confronto degli andamenti temporali della pressione nella prima parte del transitorio nella zona vicina al punto di iniezione.....</i> | <i>42</i> |
| <i>Figura 3.31. Confronto degli andamenti temporali della pressione nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale nella zona del gas di copertura.</i> | <i>43</i> |

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 9 | 93 |


| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 3.32. Confronto degli andamenti temporali della pressione nella prima parte del transitorio nella zona del gas di copertura.....</i> | <i>43</i> |
| <i>Figura 3.33. Confronto degli andamenti temporali della pressione nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale all'interno del canale di iniezione.....</i> | <i>44</i> |
| <i>Figura 3.34. Confronto degli andamenti temporali della temperatura nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale nella zona vicina al punto di iniezione.</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 3.35. Confronto degli andamenti temporali della temperatura.....</i> | <i>45</i> |
| <i>Figura 3.36. Confronto degli andamenti temporali della temperatura nel caso.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 3.37. Confronto degli andamenti temporali della portata di acqua iniettata.....</i> | <i>46</i> |
| <i>Figura 3.38. Contour-plot della frazione di volume di LBE per la valutazione dell'evoluzione della bolla nel caso di iniezione ad alta pressione.</i> | <i>48</i> |
| <i>Figura 3.39. Contour-plot della frazione di volume di LBE per la valutazione dell'evoluzione della bolla nel caso di iniezione a bassa pressione.</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 3.40. Andamento della velocità dell'LBE nel caso ad alta pressione.</i> | <i>49</i> |
| <i>Figura 3.41. Andamento dell'energia cinetica all'interno della zona del gas di copertura e dell'LBE.....</i> | <i>50</i> |
| <i>Figura 3.42. Andamento temporale del lavoro di compressione totale e per unità di volume di gas nel periodo precedente alla rottura della bolla di iniezione</i> | <i>51</i> |
| <i>Figura 3.43. Andamento dei vettori di velocità dopo che la bolla di refrigerante</i> | <i>52</i> |
| <i>Figura 3.44. Andamenti temporali della potenza di compressione totale e per unità di volume.</i> | <i>53</i> |
| <i>Figura 3.45. Andamento temporale dell'energia cinetica totale e per unità di volume di LBE del sistema metallo liquido-gas di copertura nei due casi analizzati.</i> | <i>54</i> |
| <i>Figura 3.46. Confronto degli andamenti temporali dell'energia meccanica con quelli delle sue componenti all'interno della zona del gas di copertura.....</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 3.47. Confronto degli andamenti del lavoro di compressione e dell'energia cinetica nel caso a bassa pressione di iniezione.</i> | <i>55</i> |
| <i>Figura 3.48. Analisi delle scale temporali della pressione, dell'energia cinetica e del lavoro di compressione.</i> | <i>56</i> |
| <i>Figura 4.1. Configurazione LIFUS 5, vecchio (a) e nuovo (b) sistema di serraggio della flangia superiore del vessel.....</i> | <i>59</i> |
| <i>Figura 4.2. Sezione di prova predisposta per l'installazione di 70 termocoppie ad acquisizione veloce.....</i> | <i>59</i> |

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 10 | 93 |

| | |
|--|-----------|
| <i>Figura 4.3. Nuovo sistema di iniezione.....</i> | <i>60</i> |
| <i>Figura 4.4. Lavorazione del vessel S1 per montaggio bocchello e flangia inferiore della nuova linea di iniezione acqua.....</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 4.5. Particolare dell'accoppiamento tra la nuova linea coassiale di iniezione acqua e carico e scarico metallo liquido e il la parte inferiore del vessel S1.</i> | <i>61</i> |
| <i>Figura 5.1. Schema del reattore ELSY.....</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 5.2. Sezione trasversale del generatore di vapore.</i> | <i>67</i> |
| <i>Figura 5.3. Sezione verticale del generatore di vapore.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 5.4. Collegamento del fascio tubiero con i collettori.....</i> | <i>68</i> |
| <i>Figura 5.5. Dominio di calcolo del GV per la simulazione di riferimento.</i> | <i>71</i> |
| <i>Figura 5.6. Domini geometrici relativi alle diverse condizioni particolari prese in esame.....</i> | <i>72</i> |
| <i>Figura 5.7. Confronto tra gli andamenti della portata d'acqua delle serie A e B.</i> | <i>75</i> |
| <i>Figura 5.8. Andamento temporale della portata d'acqua delle simulazioni di tipo A.</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura 5.9. Flusso massico d'acqua lungo l'iniettore.....</i> | <i>76</i> |
| <i>Figura 5.10. Velocità nella gola del Venturi-boccaglio.</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura 5.11. Andamento temporale della frazione di liquido all'uscita dell'iniettore.....</i> | <i>77</i> |
| <i>Figura 5.12. Frazione di liquido lungo tutto l'iniettore.</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura 5.13. Frazione di liquido nel tratto dell'iniettore interno al GV.....</i> | <i>78</i> |
| <i>Figura 5.14. Andamento della pressione lungo il tubo di iniezione dell'acqua.</i> | <i>79</i> |
| <i>Figura 5.15. Andamento temporale della pressione all'uscita dell'iniettore per tutte le prove della serie A.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figura 5.16. Ingrandimento del picco di pressurizzazione.....</i> | <i>80</i> |
| <i>Figura 5.17. Confronto tra l'andamento della pressione del caso A1 e del caso B1 calcolata all'uscita dell'iniettore.....</i> | <i>81</i> |
| <i>Figura 5.18. Andamento della pressione lungo le celle coassiali all'iniettore (test A1).....</i> | <i>82</i> |
| <i>Figura 5.19. Ingrandimento del picco di perturbazione in due celle coassiali con l'iniettore (test A1).....</i> | <i>82</i> |


| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 11 | 93 |

| | |
|---|-----------|
| <i>Figura 5.20. Confronto tra gli andamenti di energia cinetica del piombo delle due serie A e B e tra le varie condizioni della serie A.....</i> | <i>83</i> |
| <i>Figura 5.21. Andamento dell'energia cinetica del piombo per le differenti simulazioni della A.</i> | <i>84</i> |
| <i>Figura 5.22. Confronto tra i picchi di pressione valutati nelle serie A e B.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura 5.23. Confronto tra gli andamenti di pressione relativi ai test della serie A.....</i> | <i>85</i> |
| <i>Figura 5.24. Confronto tra gli andamenti di pressione relativi ai test A1 e A3.</i> | <i>86</i> |
| <i>Figura 5.25. Lavoro di compressione calcolato per la serie A e B.</i> | <i>87</i> |
| <i>Figura 5.26. Lavoro di compressione stimato nelle varie simulazioni della serie A.....</i> | <i>87</i> |
| <i>Figura 5.27. Volume di argon valutato nelle varie simulazioni della serie A.</i> | <i>88</i> |

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 12 | 93 |

LISTA DELLE TABELLE

| | |
|--|-----------|
| <i>Tabella 3.1. Posizione delle celle di raccolta dati nei due casi in analisi.</i> | <i>25</i> |
| <i>Tabella 3.2. Matrice delle simulazioni per la prova ad alta pressione.</i> | <i>26</i> |
| <i>Tabella 3.3. Matrice delle simulazioni per la prova a bassa pressione.....</i> | <i>27</i> |
| <i>Tabella 3.4. Quantità di acqua iniettata nel caso bi-dimensionale</i> | <i>47</i> |
| <i>Tabella 5.1. Parametri principali che caratterizzano il reattore ELSY.....</i> | <i>65</i> |
| <i>Tabella 5.2. Caratteristiche del generatore di vapore.....</i> | <i>66</i> |
| <i>Tabella 5.3. Matrice delle simulazioni.....</i> | <i>70</i> |
| <i>Tabella 5.4. Regioni del dominio SIMMER.</i> | <i>72</i> |

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 13 | 93 |


1 DESCRIZIONE DELL'ATTIVITÀ

1.1 Ambito

Lo studio della sicurezza di un sistema nucleare ricopre un ruolo fondamentale nello sviluppo di un nuovo progetto, quale il reattore veloce refrigerato a piombo di quarta generazione (LFR). In questo ambito, attività di supporto analitiche, sperimentali e numeriche ricoprono un ruolo determinante per comprendere i fenomeni fisici, prevedere le possibili conseguenze sull'impianto e progettare eventuali sistemi e/o contromisure che possano mitigare l'impatto sui sistemi coinvolti ed escludere un rilascio significativo di radiazioni verso l'ambiente esterno.

L'interazione metallo liquido-acqua, che può avvenire in situazioni incidentali di moderata frequenza negli scambiatori di calore di un impianto LFR, è uno dei principali problemi di sicurezza da affrontare e risolvere. L'esecuzione di attività sperimentali consente lo studio dei fenomeni fisici coinvolti in queste sequenze incidentali e fornisce adeguato supporto allo sviluppo e alla valutazione degli strumenti numerici necessari per le analisi di sicurezza [1].

L'apparecchiatura sperimentale LIFUS-5, sita al centro ricerche ENEA del Brasimone e costruita per lo studio dell'interazione metallo liquido-acqua, è stata aggiornata per consentire di effettuare esperimenti affidabili e di elevata qualità ^{[2], [3]}. La nuova configurazione di impianto consente di semplificare la procedura di esecuzione degli esperimenti attraverso modifiche di componenti e una nuova elettronica di controllo, oltreché di ottenere dati idonei per lo sviluppo di modelli numerici e per la validazione dei codici di calcolo. La strumentazione è stata potenziata e accoppiata a un nuovo sistema di acquisizione. Due nuove sezioni di prova sono state progettate: la prima (progettata e realizzata e descritta nel presente report) capace di installare circa 70 termocoppie consentirà l'esecuzione di esperimenti rilevanti per lo sviluppo e la validazione di modelli numerici predittivi (codici di calcolo), e la seconda (in Ref. [4], e non discussa nel presente documento) consentirà di acquisire dati per estrapolare gli effetti che la rottura istantanea di un tubo del generatore di vapore ha sui tubi

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 14 | 93 |

circostanti e sulla struttura stessa dello scambiatore, oltreché per la qualifica dei codici di calcolo.

Il presente documento è il risultato della collaborazione tra l'Università di Pisa del consorzio CIRTEN ed ENEA, e è svolta in sinergia ai progetti EURATOM THINS (*Thermal-Hydraulics of Innovative Nuclear Systems*) e LEADER (*Lead-cooled European Advanced DEMonstration Reactor*) del VII Programma Quadro.

1.2 Obiettivo


L'attività, oggetto del presente report e prevista nell'ambito della Linea Progettuale 3 "Reattori di IV generazione"^[5], riguarda la progettazione di prove sperimentali di interazione tra leghe di piombo ed acqua in pressione, anche mediante modifiche ed aggiornamenti dell'impianto LIFUS 5 dell'ENEA Brasimone ed una definizione delle condizioni operative.

In particolare è prevista:


- la progettazione e realizzazione di una nuova linea d'iniezione acqua con valvola pirotecnica;
- la progettazione e realizzazione di una nuova sezione di prova per la qualifica di un generatore di vapore a tubi a spirale piana;
- la progettazione e realizzazione di un nuovo sistema di acquisizione dati veloce e del sistema di controllo dell'impianto;
- l'acquisizione di nuova strumentazione (misuratore di portata ad ultrasuoni, strain gauge e termocoppie) e la taratura dei trasduttori di pressione piezoelettrici già presenti sull'impianto.

1.3 Struttura del report

Gli obiettivi preposti sopra sono stati raggiunti come riportato nel presente report attraverso un approccio che integra, 1) una revisione critica dell'attuale configurazione di LIFUS5 basata sull'esperienza acquisita dalle precedenti campagne sperimentali, 2) l'utilizzazione di strumenti di calcolo a supporto della progettazione delle modifiche da apportare sull'apparecchiatura oltreché, 3) dell'identificazioni e comprensione dei fenomeni fisici da investigare, nei limiti concessi dal codice di calcolo, attraverso le future attività sperimentali programmate.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 15 | 93 |

Pertanto, oltre al presente capitolo, il Capitolo 2 riguarda le modifiche da apportare all'apparecchiatura LIFUS 5 (configurazione, strumentazione e sistema di controllo acquisizione) al fine di ottenere dati sperimentali significativi per lo sviluppo e validazione dei codici di calcolo e, quindi, per lo studio dei fenomeni afferenti all'interazione metallo liquido – acqua. Le attività di pre-test, descritte nel Capitolo 3, supportano le scelte da operare per l'aggiornamento dell'apparecchiatura (descritta nel Capitolo 4). Infine, nel Capitolo 5, sono riportati studi termoidraulici sulle possibili conseguenze derivanti da un incidente di Steam Generator Tube Rupture (SGTR), attraverso un'analisi dei principali fenomeni e processi che possono intaccare l'integrità strutturale del sistema nel suo complesso.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 16 | 93 |

2 APPARECCHIATURA SPERIMENTALE LIFUS 5

2.1 Descrizione di LIFUS 5

L'apparecchiatura sperimentale LIFUS 5 ^[3] è stata progettata al centro ricerche ENEA del Brasimone con lo scopo di investigare i fenomeni connessi con l'interazione tra leghe fuse di piombo e acqua a diverse condizioni operative significative per gli impianti a fissione di quarta generazione refrigerati a piombo (es. LFR), per gli impianti atti alla trasmutazione degli elementi transuranici (es. ADS), oltreché per sistemi previsti negli impianti a fusione. Le principali condizioni operative che caratterizzano il LIFUS 5 sono: pressione dell'acqua fino a 200MPa e temperatura della lega di piombo fino a 500°C. La prima applicazione dell'apparecchiatura fu effettuata nell'ambito del programma Europeo della Tecnologia della Fusione e riguardò lo studio dell'interazione tra acqua e una lega piombo litio (Pb-17Li) ^[2].


L'apparecchiatura (*Figura 2.1*) può essere suddivisa come segue:

- il vessel (S1), di circa 100 litri, dove avviene l'interazione metallo liquido – acqua,
- la tanca d'acqua (S2) pressurizzata con gas attraverso una linea connessa alla parte superiore,
- la linea di iniezione da ½ pollici connette la parte inferiore della tanca S2 con la parte inferiore del vessel S1,
- il contenitore di carico (S3) che, quando connesso, riceve acqua e metallo liquido trasportati a seguito dell'interazione tra i due fluidi,
- la tanca di stoccaggio del metallo liquido (S4).

2.2 Modifiche della configurazione di LIFUS 5

La configurazione attuale dell'impianto LIFUS 5, utilizzato fino ad ora per le prove sperimentali “ELSY” e “DEMETRA”^{[6] [7] [8]}, è caratterizzato da una configurazione geometrica fortemente asimmetrica.

Per migliorare il processo di qualifica del codice SIMMER III ^{[9] [10]}, devono essere rimosse tutte le cause di asimmetria e di incertezza presenti in LIFUS 5. In particolare, il fascio di tubi ad U deve essere rimosso e la linea di iniezione dell'acqua deve essere collocata al centro del

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 17 | 93 |

serbatoio S1, in linea con il suo asse di simmetria. Inoltre, il serbatoio S3 potrebbe essere rimosso in modo da evitare il passaggio dell’LBE fra il serbatoio di reazione e quello di sfogo e mantenerne, quindi, il volume costante.

Un’altra miglioria potrebbe essere la riduzione della lunghezza del tubo da 1/2” della linea di iniezione, che connette S2 con S1, in modo da ridurre le perdite di carico lungo questa tubazione. Da un punto di vista del miglioramento dell’analisi del fenomeno sperimentale, è auspicabile incrementare la qualità e la quantità della strumentazione della nuova apparecchiatura. In particolare, sarebbe opportuno misurare con precisione la portata di acqua che passa dal serbatoio S2 al vessel di reazione S1 in modo da avere sia un riscontro con i dati simulati sia un dato più preciso riguardo alla massa di acqua iniettata. Tale tipo di misura può essere fatta tramite metodi non invasivi, ad esempio con sensori ad ultrasuoni. Inoltre, un dato addizionale per quanto riguarda la portata di acqua iniettata potrebbe essere ottenuto da un misura del livello dell’acqua contenuta in S2 (ad esempio utilizzando un trasduttore di pressione differenziale).

Una disposizione di termocoppie più completa che copra tutto il volume del serbatoio S1 porterebbe una descrizione del fenomeno di interazione acqua-metallo liquido più esaustiva. Infatti, dalle esperienze precedenti è evidente una sensibile riduzione della temperatura dell’LBE nelle zone in cui c’è maggiore interazione fra acqua e metallo liquido. Per questo, potrebbe essere utile una griglia sottile di acciaio che sostiene una serie di termocoppie, che vada a coprire la maggior parte del volume del recipiente S1. Sono state ipotizzate due possibili distribuzioni (Figura 2.2). In Figura 2.2.a, le termocoppie sono state considerate disposte uniformemente lungo il raggio del serbatoio, mentre nel secondo caso (Figura 2.2.b) la disposizione è raffinata verso l’asse centrale del recipiente e quindi vicino all’asse dell’iniettore. Sono previsti quattro livelli assiali, ognuno con tredici termocoppie; il livello più vicino all’iniettore deve prevedere che l’iniettore di acqua nel metallo fuso possa traslare verso l’alto; quindi, al posto della termocoppia centrale dovrebbe essere presente un anello per permettere il passaggio dell’iniettore.

Un altro parametro fondamentale per l’analisi del fenomeno fisico è la pressione, che può aiutare a dedurre cosa accade quando l’LBE “caldo” e l’acqua “fredda” interagiscono tra loro. Dagli andamenti di pressione può essere ricostruito come le onde di pressione si propagano

all'interno della lega fusa nei primi istanti dell'interazione, e come il vapore d'acqua, l'LBE e il gas di copertura interagiscono l'uno con l'altro durante il transitorio. Per questo è importante un'accurata disposizione dei trasduttori di pressione sia nel serbatoio che nella linea di iniezione. Per quanto riguarda la linea di iniezione sarebbe opportuno un sensore di pressione che permetta di valutare il tempo e la pressione di rottura del tappo dell'ugello, in modo da avere una stima piuttosto precisa del momento in cui inizia l'interazione (questo se dovesse rimanere l'attuale sistema di apertura dell'ugello). La disposizione dei trasduttori di pressione, utilizzata nelle precedenti campagne sperimentali per il serbatoio S1 è accurata, ma si potrebbe ottenere un miglioramento nell'efficienza rendendola simmetrica ed aumentando il numero dei sensori presenti. Per quanto riguarda il serbatoio dell'acqua S2 risulterebbe utile porre un trasduttore di pressione nella parte superiore del recipiente per rilevare l'andamento della pressione nel gas.

Infine, attraverso una valutazione della deformazione delle strutture del vessel S1, sarebbe possibile estrapolare i carichi agenti per effetto della pressione generata 1) dall'onda di pressione che si origina all'atto della rottura e 2) dal moto del metallo liquido indotto dal cambiamento di fase del liquido iniettato. Tale misura richiede l'uso di sofisticati estensimetri per alta temperatura da installare a contatto con le pareti del vessel S1, e conseguentemente col piombo liquido. Un'analisi della posizione dove fissare tali estensimetri è stata effettuata attraverso un'analisi agli elementi finiti [11].

Il modello FEM sviluppato si compone di circa 2500 nodi e 2200 elementi di tipo assial-simmetrico (*Figura 2.3*). Il serbatoio è stato considerato libero di espandersi nella direzione radiale e il coperchio è stato considerato saldato al contenitore. È stato imposto ai nodi giacenti sull'asse di simmetria un vincolo di perfetta simmetria radiale (XSYMM); al nodo A è stato imposto uno spostamento nullo nella direzione verticale (*Figura 2.3*). Nelle simulazioni è stata considerata sia la forza peso del serbatoio e del coperchio sia la spinta idrostatica del metallo liquido (lega eutettica piombo bismuto) contenuto all'interno del serbatoio stesso. Nel calcolo della spinta idrostatica è stato considerato che il metallo liquido occupa il 70% del volume del serbatoio (la quota del pelo libero del liquido è a 567 mm dal fondo del recipiente). All'interno del serbatoio agisce una pressione addizionale Padd dovuta

all'interazione metallo liquido-acqua. Le proprietà termomeccaniche usate per le strutture sono quelle riportate nelle norme RCC-MR per l'AISI 316L.

La zona interna al serbatoio ad una distanza di 471 mm dal fondo (vedi *Figura 2.4* riferita al caso $P_{add}=18\text{MPa}$) è la posizione a massima deformazione, pertanto ideale per il posizionamento degli estensimetri. Analoga posizione si è trovata per la parte esterna del vessel S1 (468 mm dal fondo). La direzione della massima deformazione elastica principale coincide praticamente con la direzione circonferenziale e dipende quasi linearmente dal valore della pressione addizionale. Infine, nelle regioni individuate non si hanno gradienti elevati della deformazione elastica e si può ragionevolmente ritenere che la deformazione integrata nella griglia sensibile dell'estensimetro coincida col valore puntuale.

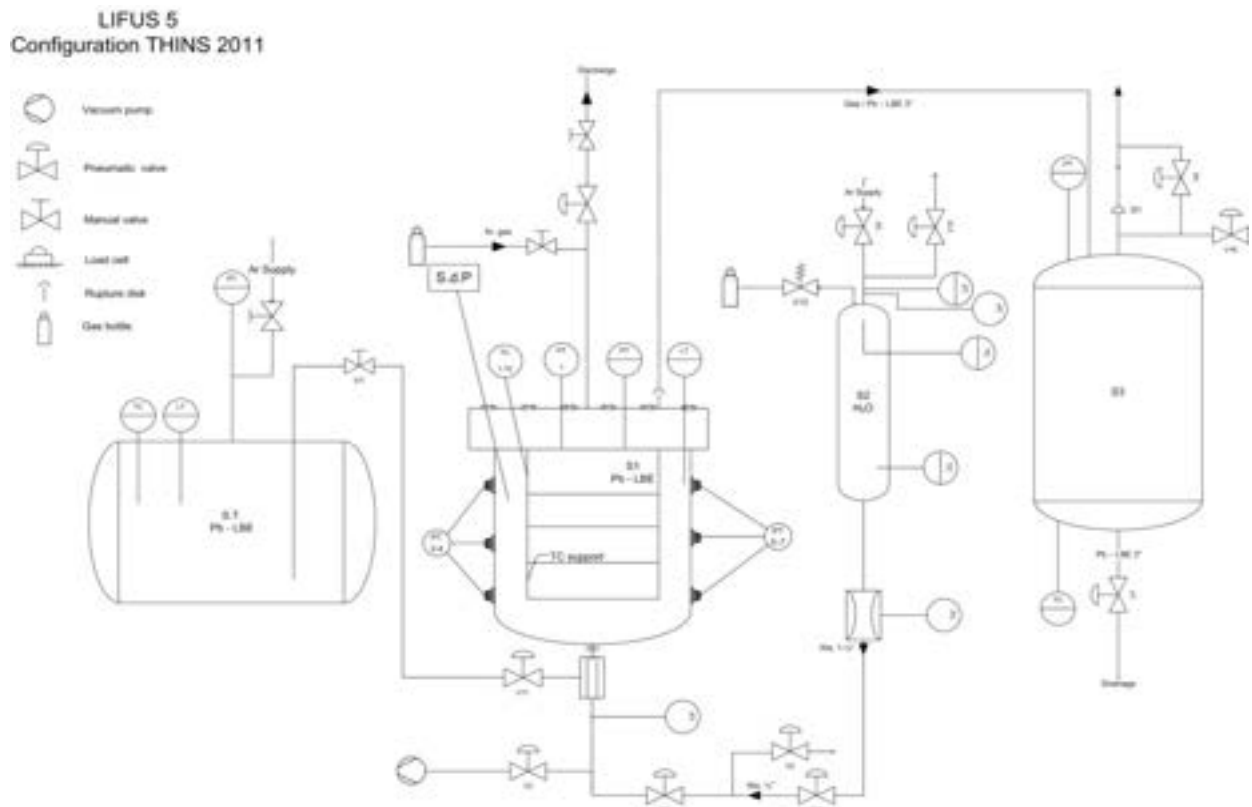
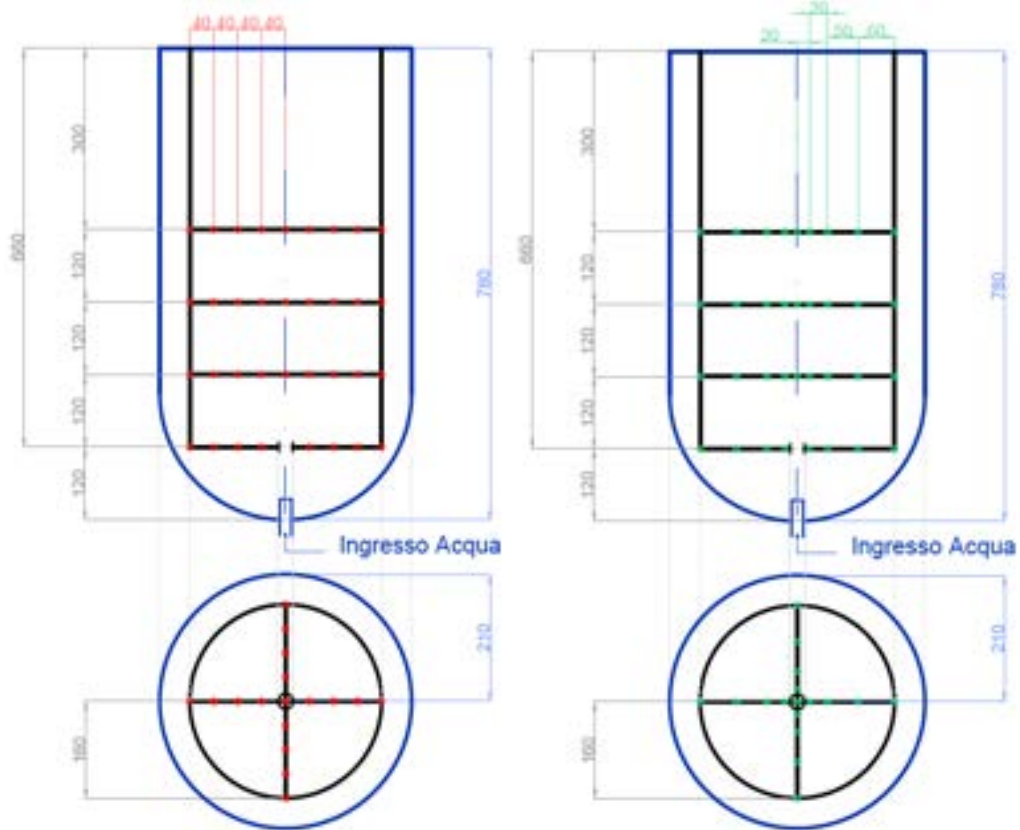


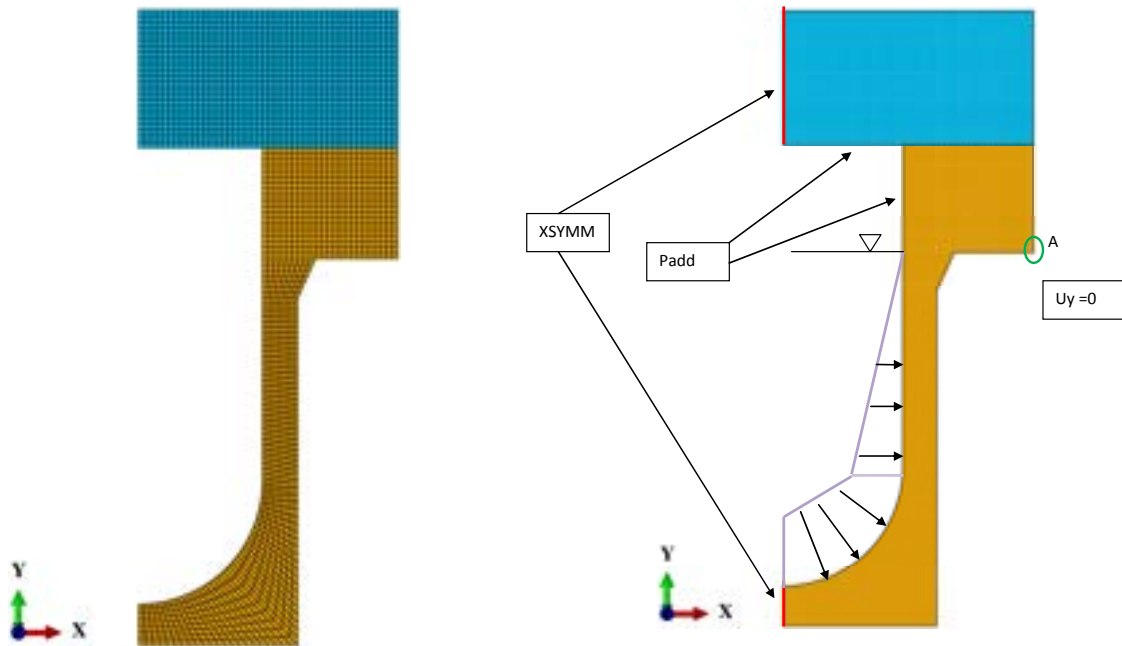
Figura 2.1. P&I dell'apparecchatura LIFUS 5.



a) Radialmente uniforme

b) Incrementi radiali

Figura 2.2. Possibili disposizioni delle termocoppie.



(a) Dettaglio della mesh

(b) Condizioni al contorno

Figura 2.3. Modello agli elementi finiti del serbatoio LIFUS-5.

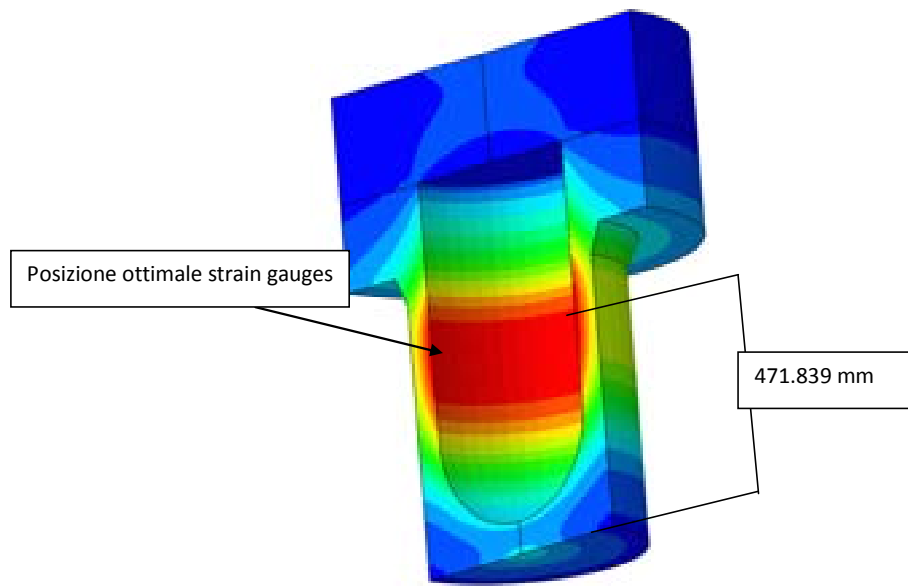


Figura 2.4. Posizione ottimale degli strain gauge.

3 CALCOLI DI PRE-TEST

3.1 Modelli 2D e 3D adottati per le simulazioni SIMMER

Per modellare tramite il codice SIMMER la nuova configurazione dell'apparecchiatura LIFUS 5, è stato sviluppato sia un modello 2D che un modello 3D.

Nel caso bidimensionale (Figura 3.1) il dominio è composto da due volumi principali: uno per il serbatoio S1 contenente l'LBE ed uno per il serbatoio di iniezione dell'acqua S2. I due volumi sono connessi dal canale di iniezione che termina con l'ugello dell'iniettore. A causa della simmetria cilindrica utilizzata dal codice SIMMER III, il serbatoio S2 è stato rappresentato da una regione anulare avente lo stesso volume ed altezza del serbatoio reale.

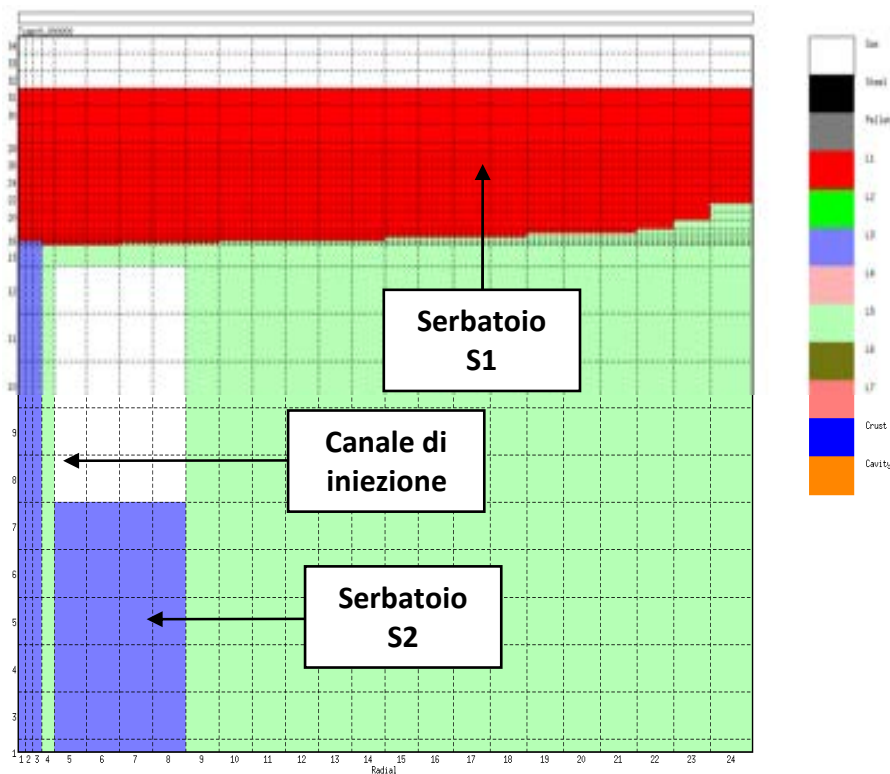



Figura 3.1. Modello utilizzato per la simulazione numerica tramite il codice bi-dimensionale SIMMER III.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 23 | 93 |

Dato che il modello utilizzato dal codice SIMMER non tiene conto in maniera diretta delle perdite di pressione nei tubi, è stato necessario introdurre dei coefficienti di orifizio adeguati per considerare in modo appropriato le cadute di pressione che si hanno fra S2 ed S1:

$$\Delta p = C_{orf} \rho w^2 \quad (2.1)$$

Nel modello utilizzato, i coefficienti di orifizio (C_{orf}) sono stati inseriti in due posizioni assiali: la prima direttamente sulla sezione dell'orifizio con un valore di 0.7, l'altra, con un valore di 1, in una sezione trasversale del tubo di iniezione a monte dell'orifizio. Tali valori sono determinati in modo da simulare, per il primo coefficiente, la brusca diminuzione e successivo brusco allargamento della sezione dovuto all'orifizio dell'iniettore [12], mentre, per il secondo coefficiente, le perdite di carico che si hanno lungo la linea di iniezione sia di tipo concentrato che distribuito [12].

Per effettuare le simulazioni in 3D mediante il codice SIMMER IV è stato elaborato il modello riportato in Figura 3.2 e in Figura 3.3. Per questa nuova configurazione è stata impiegata una geometria cartesiana. Il vessel è stato simulato andando a cercare di ricreare una geometria emisferica nella parte inferiore (v. Figura 3.2), mentre il serbatoio S2, contenente l'acqua da iniettare, è stato modellato con un parallelepipedo avente però le dimensioni simili a quelle del serbatoio cilindrico adottato nella prova sperimentale (v. Figura 3.3).

Anche nel caso del modello tri-dimensionale, come in quello bi-dimensionale, sono stati inseriti degli opportuni coefficienti di orifizio. Analogamente al caso precedente essi sono stati posti sia sulla sezione dell'orifizio (con il valore di 0.7) sia in una sezione a monte dell'iniettore (con il valore di 1).

Nella Tabella 3.1 sono indicate le posizioni dove sono stati campionati i dati di pressione, temperatura e portata di massa, sia nel caso bi-dimensionale che in quello tri-dimensionale. In Figura 3.4 sono indicate le celle del dominio corrispondenti alle coordinate indicate in Tabella 3.1.

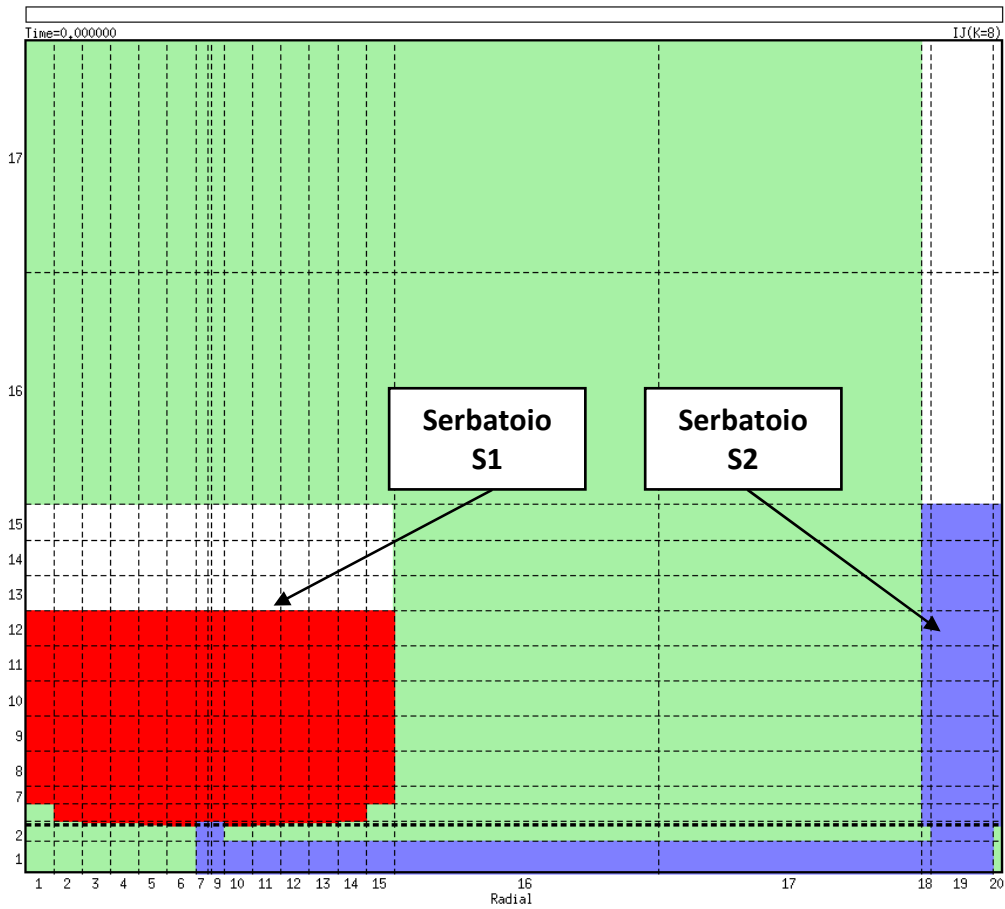


Figura 3.2. Sezione mediana del modello tri-dimensionale usato dal codice SIMMER IV.

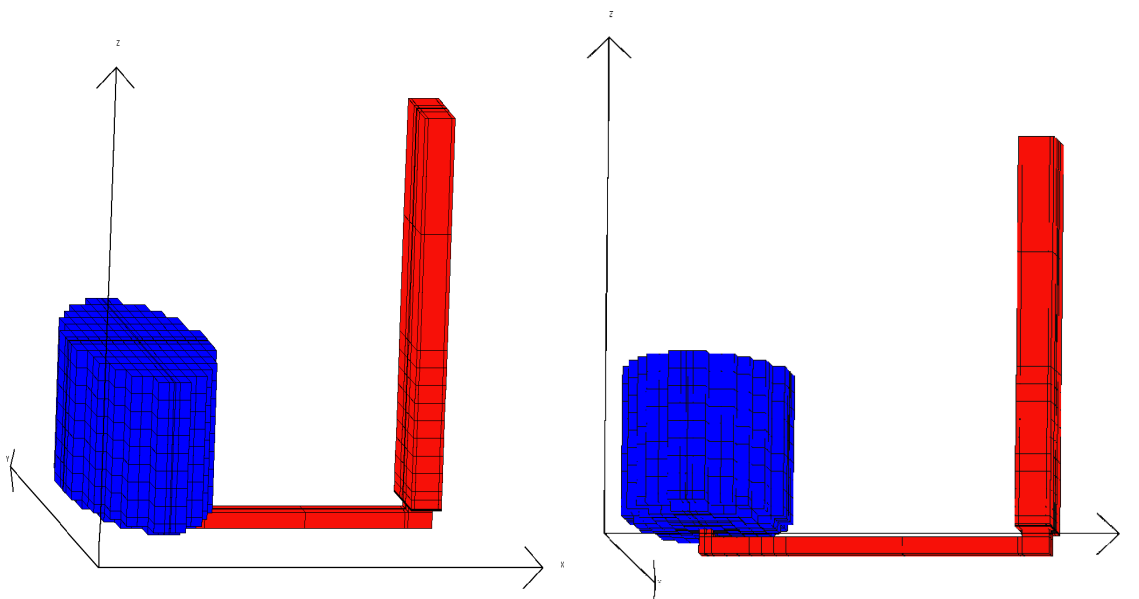


Figura 3.3. Viste del modello tri-dimensionale adottato per la simulazione.

| | 2 Dimensioni | | 3 Dimensioni | | |
|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | Celle lungo X | Celle lungo Y | Celle lungo X | Celle lungo Y | Celle lungo Z |
| PT1 e TC1 | 4 | 19 | 6 | 8 | 7 |
| PT2 e TC2 | 4 | 28 | 6 | 8 | 11 |
| PT3 e TC3 | 4 | 34 | 6 | 8 | 15 |
| PT4 e TC4 | 24 | 24 | 1 | 8 | 8 |
| PT5 e TC5 | 24 | 32 | 1 | 8 | 13 |
| PT6 e TC6 | 1 | 4 | 16 | 8 | 1 |
| Portata di acqua [kg/s] | 1 – 2 – 3 | 10 | 8 | 8 | 5 |

Tabella 3.1. Posizione delle celle di raccolta dati nei due casi in analisi.

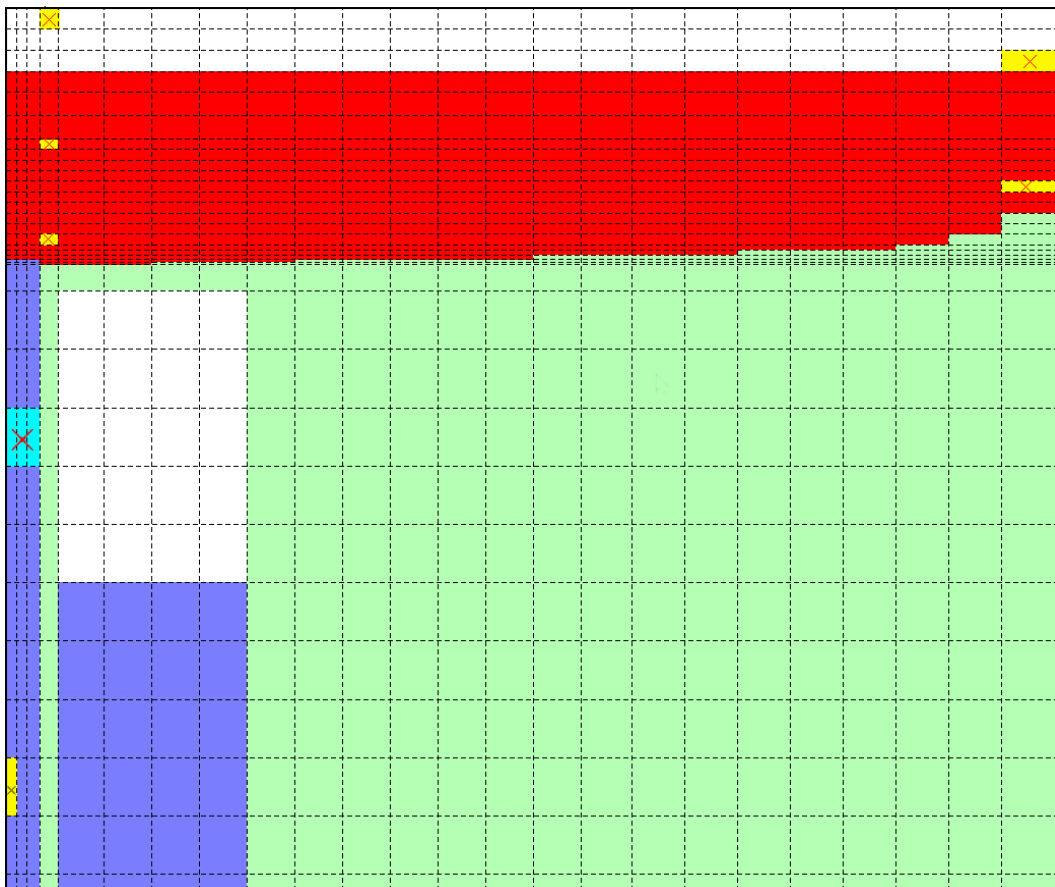


Figura 3.4. Dominio geometrico SIMMER con la posizione delle celle dove sono stati raccolti i dati di temperatura (giallo), di pressione (giallo) e di portata di acqua iniettata (blu ciano).

3.2 Matrici delle prove effettuate

L'obiettivo principale dell'analisi effettuata è supportare la scelta dei parametri delle prove sperimentali da realizzare in futuro sulla nuova sezione di prova, focalizzando l'attenzione sui problemi che si possono presentare, come, ad esempio, un valore eccessivo della pressione in

S1 o il riflusso dell’LBE nella linea di iniezione. Per ottenere questo risultato sono state previste due matrici di simulazioni, una per le prove ad alta pressione (v. Tabella 3.2) ed una per le prove a bassa pressione (v. Tabella 3.3), contenenti alcuni gruppi di simulazioni, ognuno dei quali è caratterizzato dalla variazione di un parametro caratteristico che può avere una qualche influenza sul fenomeno di interazione.

In ogni matrice di simulazioni, i parametri di cui si è valutato l’effetto sono:

1. frazione di gas di copertura: test A;
2. diametro dell’orifizio dell’iniettore: test B;
3. temperatura dell’acqua iniettata: test C;
4. pressione dell’acqua iniettata: test D;
5. temperatura della lega eutettica di piombo-bismuto: test E.

In ciascuna matrice è contenuto un caso di riferimento, preso in accordo con le prove sperimentali effettuate precedentemente sull’apparecchiatura LIFUS 5, e cinque serie di prove, dove sono stati fatti variare i parametri operativi come illustrato in precedenza. Per tutte le prove effettuate la durata del transitorio analizzato è di 3 s.

| Simulazioni | Pressione di iniezione dell’acqua [bar] | Temperatura dell’acqua iniettata [°C] | Frazione di volume di gas di copertura [%] | Diametro orifizio [mm] | Temperatura LBE [°C] |
|--------------------|--|--|---|-------------------------------|-----------------------------|
| Riferimento | 180 | 300 | 30 | 4 | 400 |
| A1 | 180 | 300 | 20 | 4 | 400 |
| A2 | 180 | 300 | 40 | 4 | 400 |
| B1 | 180 | 300 | 30 | 8 | 400 |
| B2 | 180 | 300 | 30 | 13 | 400 |
| C1 | 180 | 270 | 30 | 4 | 400 |
| C2 | 180 | 250 | 30 | 4 | 400 |
| D1 | 150 | 300 | 30 | 4 | 400 |
| D2 | 120 | 300 | 30 | 4 | 400 |
| E1 | 180 | 300 | 30 | 4 | 350 |
| E2 | 180 | 300 | 30 | 4 | 450 |

Tabella 3.2. Matrice delle simulazioni per la prova ad alta pressione.

| Simulazioni | Pressione di iniezione dell'acqua [bar] | Temperatura dell'acqua iniettata [°C] | Frazione di volume di gas di copertura [%] | Diametro orifizio [mm] | Temperatura LBE [°C] |
|--------------------|---|---------------------------------------|--|------------------------|----------------------|
| Riferimento | 40 | 240 | 30 | 4 | 350 |
| A1 | 40 | 240 | 20 | 4 | 350 |
| A2 | 40 | 240 | 40 | 4 | 350 |
| B1 | 40 | 240 | 30 | 8 | 350 |
| B2 | 40 | 240 | 30 | 13 | 350 |
| C1 | 40 | 220 | 30 | 4 | 350 |
| D1 | 50 | 240 | 30 | 4 | 350 |
| D2 | 30 | 240 | 30 | 4 | 350 |
| E1 | 40 | 240 | 30 | 4 | 300 |
| E2 | 40 | 240 | 30 | 4 | 400 |

Tabella 3.3. Matrice delle simulazioni per la prova a bassa pressione.

3.3 Risultati ottenuti per il modello bi-dimensionale

I risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il modello 2D sono riportati nel seguito e sono ordinati a seconda del parametro che di volta in volta si è fatto variare.

3.3.1 Frazione di gas di copertura

Nella prova di “riferimento” la frazione di gas di copertura è il 30% del volume totale del serbatoio S1, mentre nel caso A1 tale frazione è stata diminuita al 20% e nel caso A2 essa è stata aumentata al 40%.

In Figura 2.6 è riportato l'andamento di pressione rilevato all'interno della regione di LBE (nella cella (4,19)) nel serbatoio di reazione S1, sia nel caso di alta (v. Figura 3.5.a) che di bassa pressione (v. Figura 3.5.b). Come previsto, incrementando la frazione di gas di copertura la pressione di picco raggiunta all'interno del serbatoio tende a diminuire. Per il caso ad alta pressione gli andamenti rimangono sempre sotto il valore della pressione di iniezione; nel caso a bassa pressione, invece, per valori più bassi della frazione di volume di gas la pressione di S1 supera quella di S2, questo può provocare il fenomeno di riflusso della miscela LBE-vapore d'acqua all'interno del canale di iniezione.

Analizzando la prima parte del transitorio è possibile vedere che, sia nel caso di alta che di bassa pressione, la frazione di gas di copertura non ha influenza sul valore del picco iniziale di pressione (v. Figura 3.6). Infatti, in questa prima fase, il rapido incremento della pressione all'interno della regione di LBE è dovuto soprattutto all'impatto del getto di acqua sul metallo

liquido. Tutte e tre le simulazioni considerate per il caso ad alta pressione (180 bar) presentano un picco di circa 18 bar, mentre quelle del caso a bassa pressione (40 bar) mostrano un picco di 11 bar. Dopo questo picco, il vapor d'acqua prodotto durante l'interazione tende a muovere l'LBE verso l'alto nella regione del gas di copertura, facendo aumentare la pressione all'interno del serbatoio S1 e riducendo così la quantità di acqua iniettata.

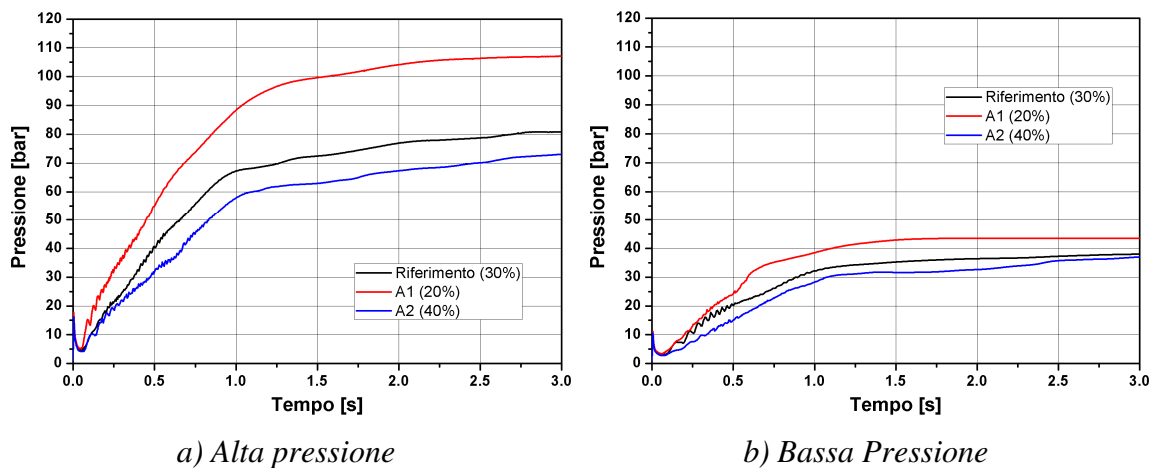


Figura 3.5. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti frazioni di gas di copertura.

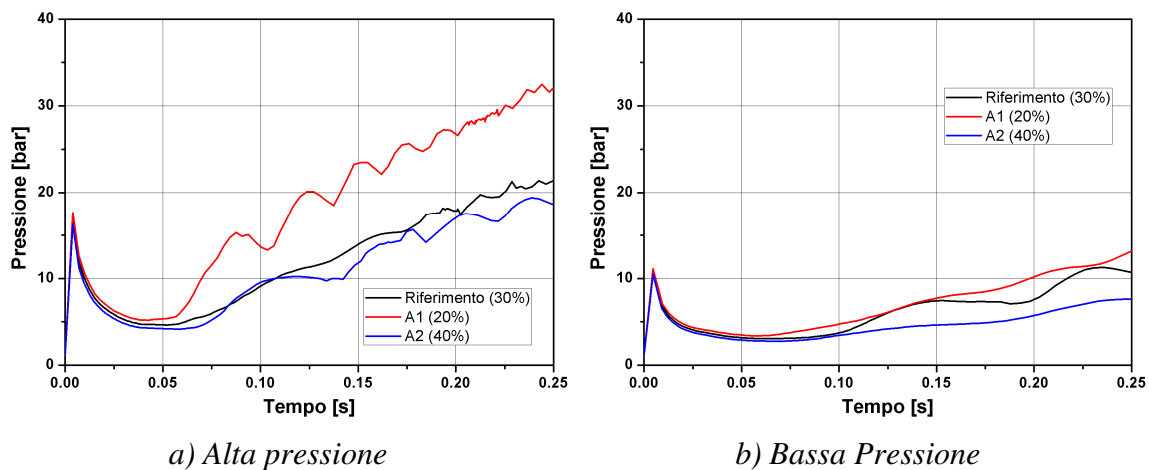


Figura 3.6. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti frazioni di gas di copertura nella fase iniziale del transitorio.

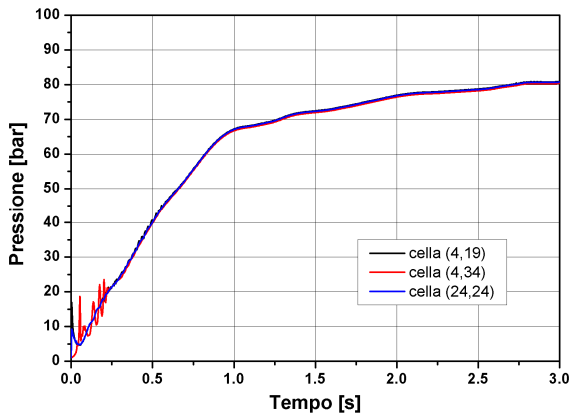
In Figura 2.8 sono messi a confronto gli andamenti di pressione in tre differenti posizioni all'interno del serbatoio di reazione per entrambi i casi di riferimento. In particolare, il primo punto è preso vicino all'iniettore (cella (4,19)), il secondo nel gas di copertura (cella (4,34))

ed il terzo vicino alla parete del serbatoio sotto il battente dell'LBE (cella (24,24)). Come è visibile dalle Figura 3.7 e Figura 3.8, le differenze fra i tre andamenti di pressione sono presenti soprattutto nella prima parte del transitorio e sono nette fra gli andamenti rilevati nella cella all'interno del gas di copertura rispetto a quelli presi nelle celle all'interno dell'LBE. Negli andamenti rilevati nel gas ci sono ampie oscillazioni di pressione in controfase rispetto a quelle che si hanno sugli andamenti rilevati all'interno del metallo fuso. Inoltre, gli andamenti di pressione nel metallo hanno un andamento attenuato rispetto a quelli nel gas. Questo comportamento può essere dovuto ad un doppio effetto: da una parte l'LBE è sottoposto all'azione del vapore, che vaporizza vicino alla zona di iniezione, e spinto verso l'alto, tale effetto è contrastato dalla reazione del gas di copertura che è compresso dal moto ascendente del metallo fuso. Dopo circa 0.5 s tali oscillazioni scompaiono dato che il vapore d'acqua raggiunge il gas di copertura e si mischia ad esso, riuscendo ad attraversare la zona del metallo.

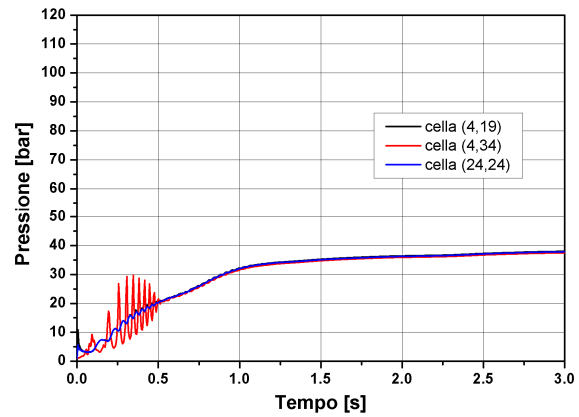
È interessante notare in Figura 3.8 come il primo picco presente sugli andamenti all'interno dell'LBE sia assente in quello nel gas. Questo è dovuto, come accennato in precedenza, al fatto che il picco iniziale crea una sorta di onda d'urto che si propaga all'interno del metallo liquido, ed è, quindi, percepita in modo attenuato nel gas.

Per quanto riguarda gli andamenti temporali di temperatura, è possibile vedere in Figura 2.10 che nella prima fase del transitorio il SIMMER prevede un'importante diminuzione della temperatura dell'LBE con la possibilità, per il metallo liquido, di raggiungere la temperatura di solidificazione (~ 124 °C), questo fenomeno è evidente specialmente per i casi ad alta pressione (si confronti la Figura 3.9.a con la Figura 3.9.b). L'acqua, che si trova nella fase liquida ad alta pressione, una volta iniettata nel serbatoio S1 evapora a contatto con l'LBE che si trova inizialmente a pressione ambiente. L'evaporazione sottrae calore alla lega eutettica di piombo-bismuto che viene raffreddato (v. Figura 3.10). Dopo questa fase la temperatura dell'LBE aumenta, con molte oscillazioni, fino a tornare ad un valore vicino a quello iniziale.

Ovviamente la cinetica di evaporazione dipende dallo scambio di calore che si ha sulla superficie delle bolle di vapore e dallo scambio di calore presenti fra le gocce e il metallo liquido.

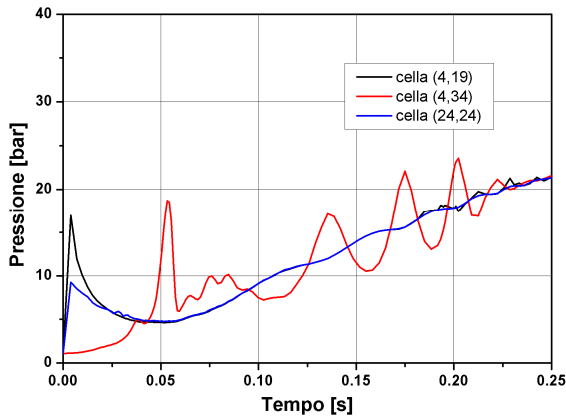


a) Alta pressione

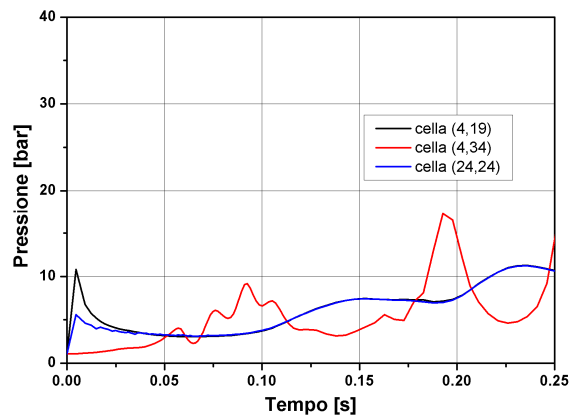


b) Bassa Pressione

Figura 3.7. Andamenti temporali della pressione in diverse zone del serbatoio S1 (caso di riferimento).

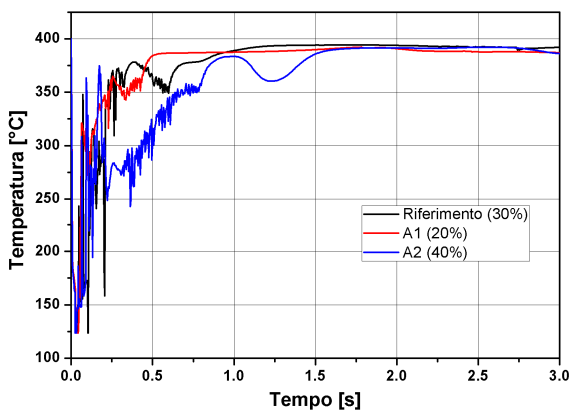


a) Alta pressione

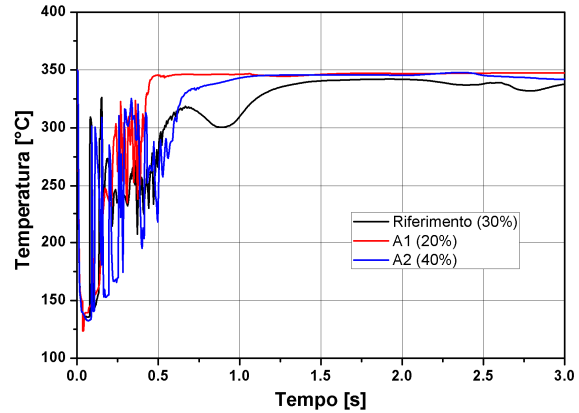


b) Bassa Pressione

Figura 3.8. Andamenti temporali della pressione in diverse zone del serbatoio S1 nella fase iniziale del transitorio (caso di riferimento).

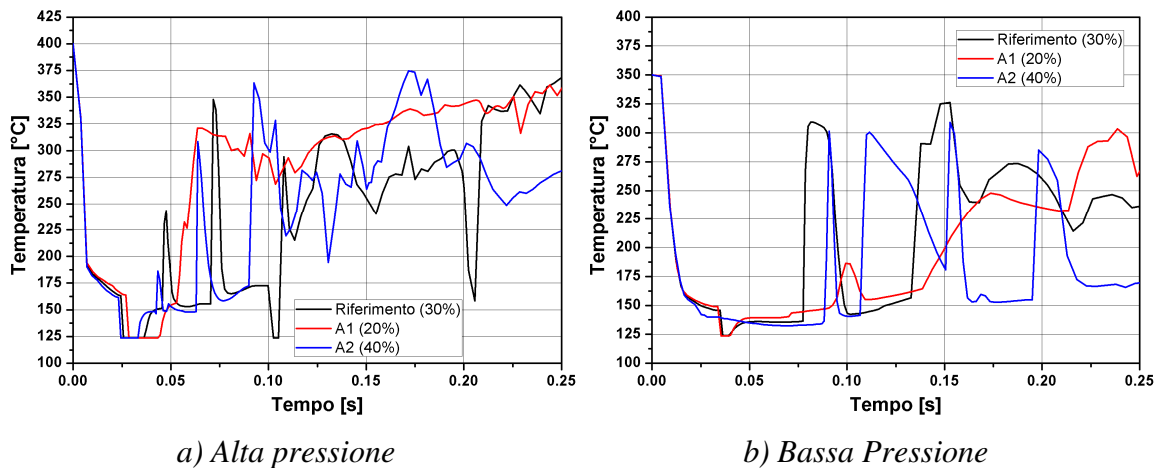


a) Alta pressione



b) Bassa Pressione

Figura 3.9. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti frazioni di gas di copertura.



a) Alta pressione *b) Bassa Pressione*

Figura 3.10. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti frazioni di gas di copertura nella fase iniziale del transitorio.

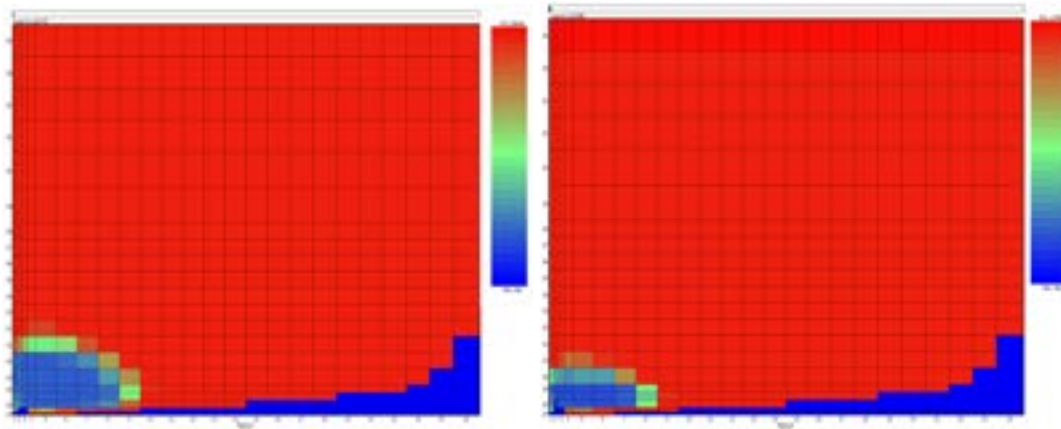
Andando ad analizzare la distribuzione spaziale della temperatura dell’LBE nella regione che si riferisce ad S1 nel dominio di calcolo, è possibile osservare l’evoluzione temporale della zona interessata all’interazione. Nella Figura 3.11 è rappresentata la distribuzione della temperatura a 0.01 s dall’inizio dell’iniezione dell’acqua nei casi di riferimento per le due pressioni di iniezione. Come può essere visto, in questa fase, non c’è una grande differenza tra i due casi, in quello ad alta pressione è presente una regione di interazione leggermente maggiore che in quello a bassa pressione. Dopo 0.05 s (v. Figura 3.12) le differenze sono molto più evidenti rispetto all’istante precedente. Nel caso ad alta pressione c’è una maggiore espansione dovuta alla maggiore quantità di acqua iniettata.

Dopo 0.1 s (v. Figura 3.13) è visibile per il caso ad alta pressione la separazione di una bolla di miscela vapore d’acqua-metallo liquido che si stacca dalla zona principale di interazione e si muove verso la parete del serbatoio. Un comportamento analogo si ha per il caso a bassa pressione ma in un momento successivo rispetto al caso ad alta pressione. A 0.5 s (v. Figura 3.14) la bolla di vapore che si è formata nel caso ad alta pressione ha già raggiunto la parte superiore del serbatoio, mentre nel caso ad alta pressione è ancora alla fase del distacco dalla zona principale di interazione

Queste considerazioni ci permettono di concludere che il fenomeno fisico per entrambi i casi è sostanzialmente lo stesso solo che si sviluppa con tempistiche diverse a causa delle diverse

pressioni di iniezione dell'acqua e, conseguentemente, a causa della diversa massa di acqua iniettata.

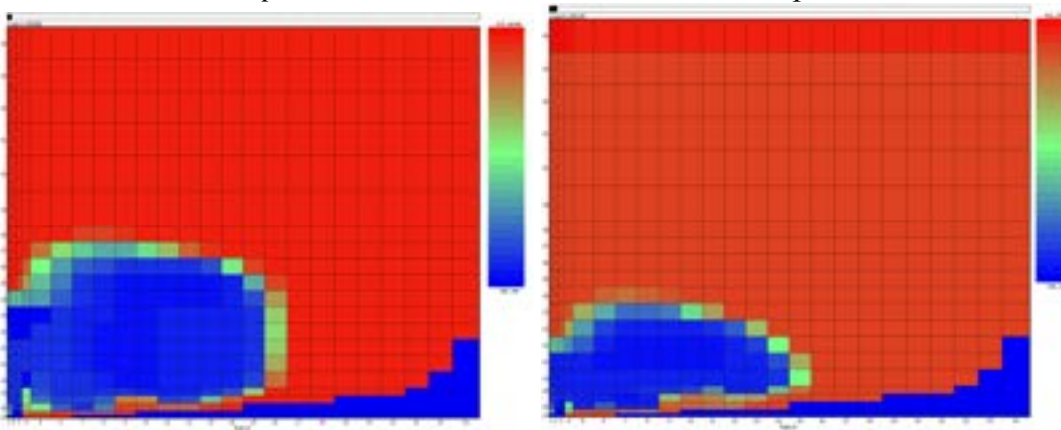
È possibile analizzare anche la portata in massa dall'acqua iniettata calcolata dal codice SIMMER III. Nella Figura 3.15 può essere notata una grande differenza nelle portate di acqua iniettata ottenute nelle simulazioni effettuate con alta pressione e in quelle effettuate a bassa pressione. Inoltre, nel caso relativo alla bassa pressione di iniezione con minore frazione di gas di copertura è presente, intorno a 1.5 s di transitorio, un fenomeno di riflusso del metallo liquido nella linea di iniezione dell'acqua che risulta altamente pericoloso per l'integrità di tale sistema.



a) Alta pressione

b) Bassa Pressione

Figura 3.11. Contour-plot della temperatura dell'LBE dopo 0.01 s dall'inizio dell'iniezione dell'acqua.



a) Alta pressione

b) Bassa Pressione

Figura 3.12. Contour-plot della temperatura dell'LBE dopo 0.05 s dall'inizio dell'iniezione dell'acqua.

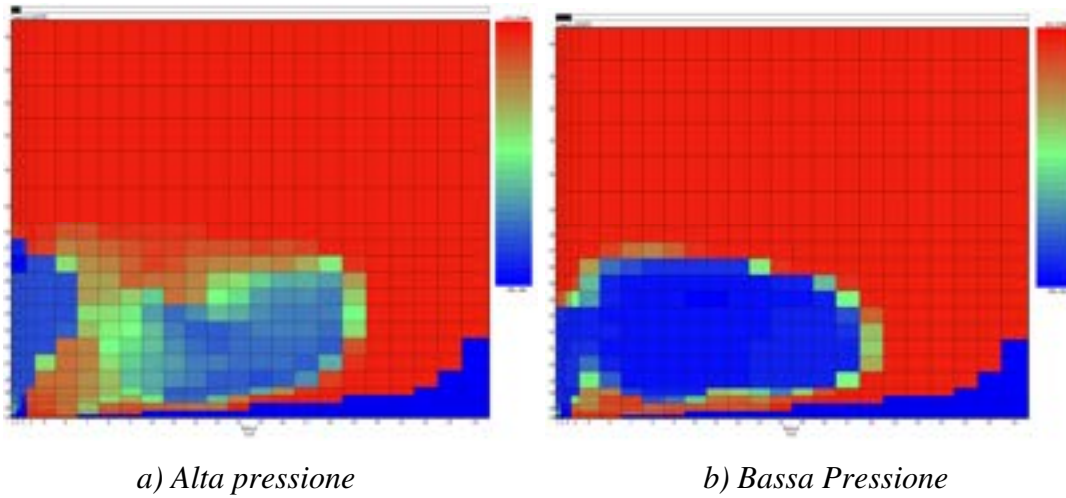


Figura 3.13. Contour-plot della temperatura dell'LBE dopo 0.1 s dall'inizio dell'iniezione dell'acqua.

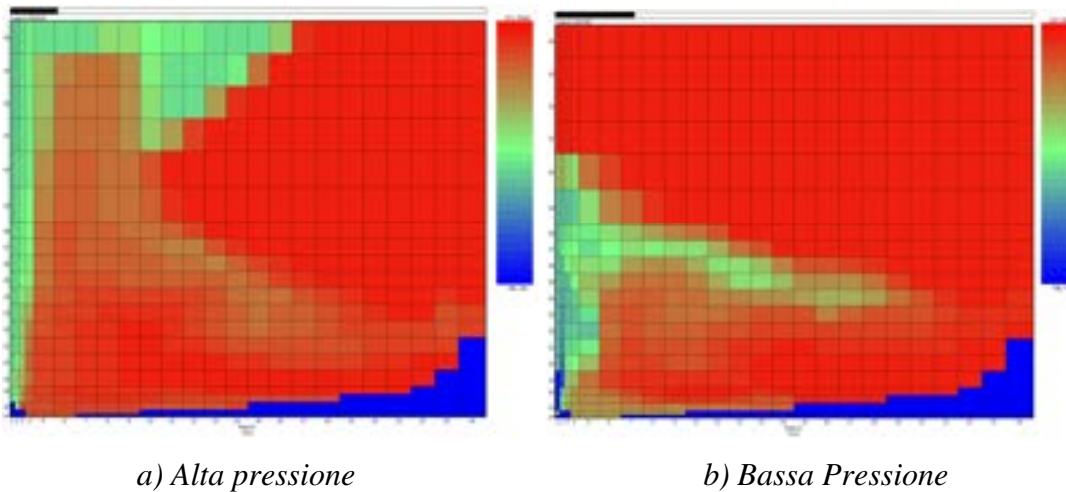


Figura 3.14. Contour-plot della temperatura dell'LBE dopo 0.5 s dall'inizio dell'iniezione dell'acqua.

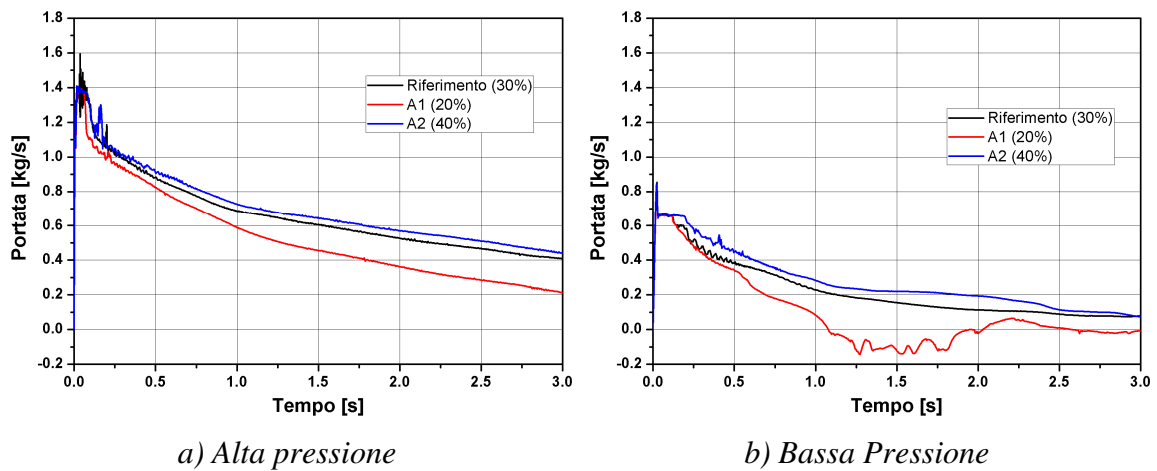



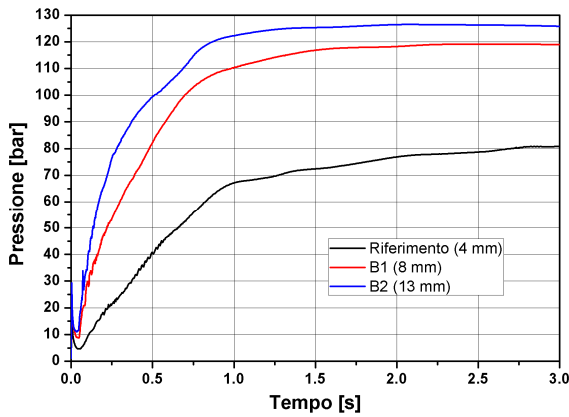
Figura 3.15. Andamenti temporali della portata dell'acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti frazioni di gas di copertura.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 34 | 93 |

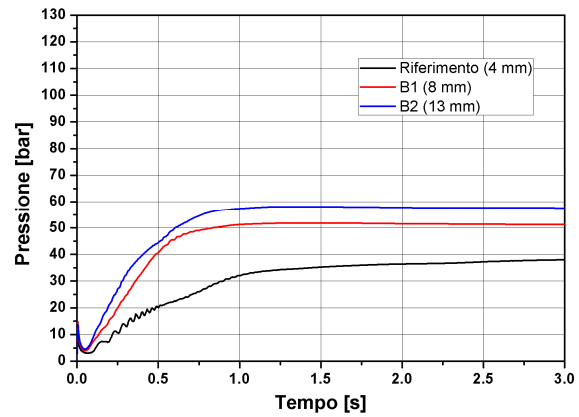
3.3.2 Diametro dell'orifizio dell'iniettore

Nel caso di riferimento il diametro dell'orifizio è stato considerato pari a 4 mm, dato che esso rappresenta il diametro impiegato per le prove sperimentali effettuate nell'ambito dei progetti EU DEMETRA ed ELSY ^{[6] [7]}. Per il caso B1 il diametro dell'orifizio è pari a 8 mm mentre per il caso B2 misura 13 mm. Ovviamente, un orifizio di sezione maggiore permette il passaggio di una maggiore quantità di acqua, rispetto ad uno con una sezione minore, causando una forte pressurizzazione del serbatoio di reazione S1 (v. Figura 3.16). Nel caso a bassa pressione (v. Figura 3.16.b) è visibile un fenomeno interessante, ovvero che gli andamenti di pressione dei casi B1 e B2 raggiungono uno stazionario al disopra del valore della pressione di iniezione dell'acqua. Questo può essere dovuto alla grande quantità di acqua iniettata nella prima fase del transitorio che, vaporizzando in contatto con l'LBE fuso e a causa del salto di pressione che si viene a creare, può provocare la solidificazione del metallo nella zona vicino all'orifizio dell'iniettore divenendo una possibile causa della sua otturazione.

Andando ad analizzare le prime fasi dell'iniezione dell'acqua (v. Figura 3.17) è possibile riscontrare che la dimensione dell'orifizio ha influenza anche sul picco iniziale di pressione: maggiore è il diametro dell'orifizio più grande risulta essere il valore raggiunto dal picco, ciò è dovuto al fatto che entra una massa maggiore di acqua nello stesso tempo. Gli andamenti temporali di temperatura, mostrati nella Figura 3.18 e nella Figura 3.19, sono maggiormente influenzati da questo parametro rispetto a quello del caso precedente a causa della grande quantità di acqua, a temperatura inferiore di quella del metallo fuso, iniettata per grandi valori del diametro dell'orifizio. La temperatura di solidificazione è raggiunta per un breve periodo nella fase iniziale dell'iniezione. Come previsto dai dati relativi agli andamenti temporali di pressione, la portata di acqua iniettata, mostrata in Figura 3.20, presenta un valore massimo di circa 8 kg/s per la simulazione B2 caratterizzata da un diametro di orifizio di 13 mm e da una pressione di iniezione dell'acqua pari a 180 bar. Per entrambi i casi B1 e B2 delle prove di questa serie la portata di acqua iniettata diventa negativa intorno a 0.5-1.0 s; questo indica un riflusso dell'LBE nel canale di iniezione con conseguente solidificazione. La suddetta spiegazione giustifica, inoltre l'assunzione fatta in precedenza in riferimento agli andamenti temporali di pressione (v. *Figura 3.16*).

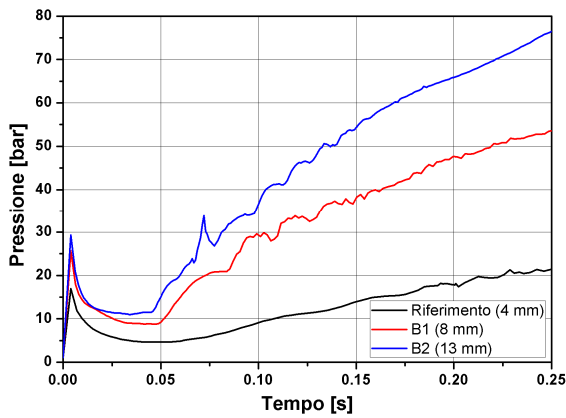


a) Alta pressione

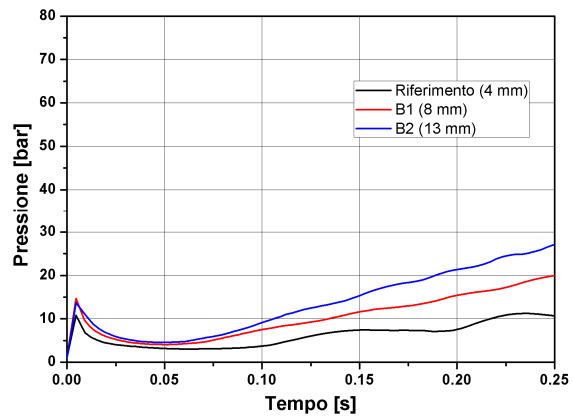


b) Bassa Pressione

Figura 3.16. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell'ugello di iniezione.

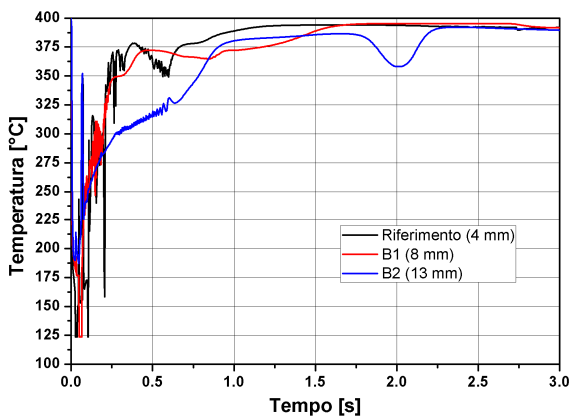


a) Alta pressione

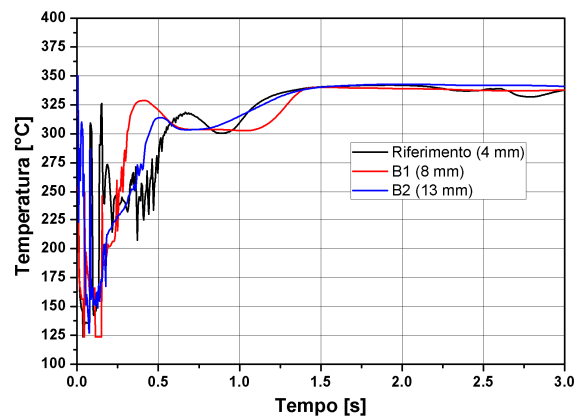


b) Bassa Pressione

Figura 3.17. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell'ugello di iniezione nella fase iniziale del transitorio.



a) Alta pressione



b) Bassa Pressione

Figura 3.18. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell'ugello di iniezione.

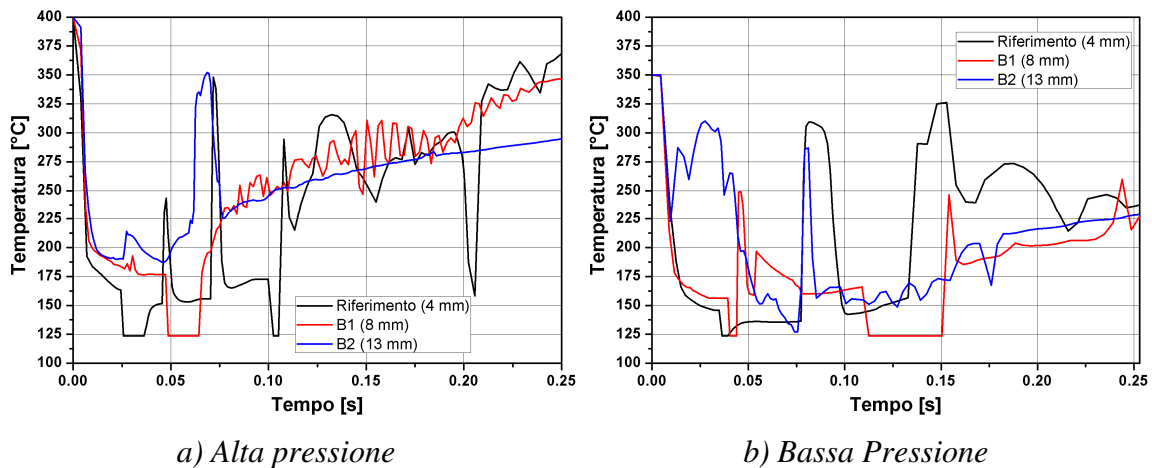


Figura 3.19. Andamenti temporali della temperatura nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell'ugello di iniezione nella fase iniziale del transitorio.

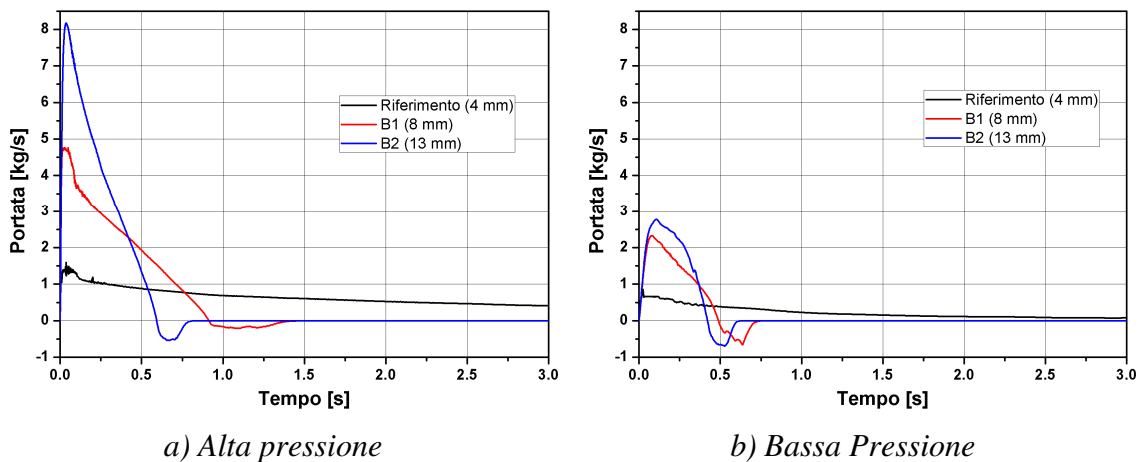



Figura 3.20. Andamenti temporali della portata di acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti diametri di orifizio dell'ugello di iniezione.

3.3.3 Temperatura dell'acqua iniettata

La temperatura dell'acqua iniettata è un altro parametro che può influenzare il processo di interazione metallo liquido-acqua. Innanzitutto, va evidenziato che il valore scelto per la temperatura di iniezione dell'acqua è differente nelle due matrici di simulazioni, dato che la temperatura di saturazione dell'acqua cambia con la pressione. In particolare, per il caso di riferimento è stata presa una temperatura di 300 °C per il caso ad alta pressione di iniezione ed una temperatura di 240 °C per il caso a bassa pressione, in accordo con le esperienze condotte in precedenza sull'apparecchiatura LIFUS 5.

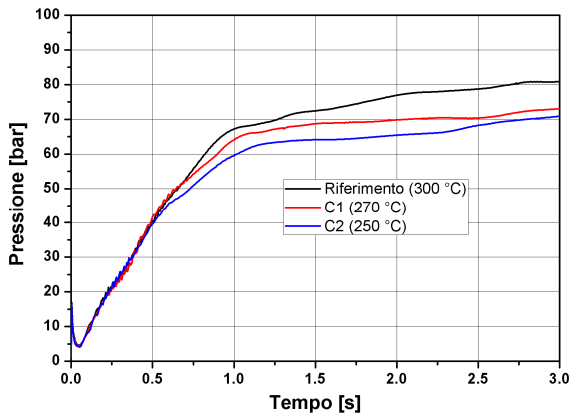
| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 37 | 93 |

Per la simulazione del caso ad alta pressione di iniezione sono stati considerati due differenti valori della temperatura dell'acqua: 270 °C per il caso C1 e 250 °C per il caso C2. Nella simulazione a bassa pressione, invece, è stata considerata soltanto un differente valore di temperatura rispetto al caso di riferimento: 220 °C per il caso C1. Tale scelta è stata dettata dal fatto che valori inferiori della temperatura risultano eccessivamente vicini al punto critico dell'acqua alla pressione della prova.

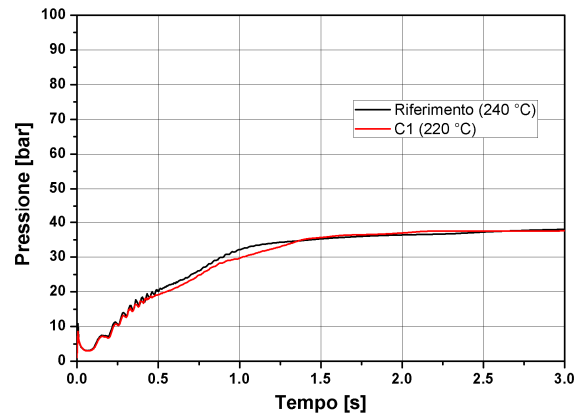
Come si vede nella Figura 3.21.a, la pressione presente in S1 tende ad aumentare all'aumentare della temperatura di iniezione dell'acqua in quanto a più alta temperatura l'acqua necessita di minore energia per subire il cambiamento di fase. Nel caso a bassa pressione, invece, la variazione della temperatura dell'acqua iniettata non sembra influenzare l'andamento di pressione all'interno del serbatoio di reazione, ciò è visibile in Figura 3.21.b.

Andando ad analizzare la prima fase del transitorio (v. Figura 3.22) può essere notato che il parametro variato in questa occasione ha un effetto trascurabile sul picco iniziale di pressione ed ha anche un effetto non molto marcato sugli andamenti temporali della temperatura dell'LBE, mostrati in Figura 3.23. Si nota un buon accordo nel caso di alta pressione tra l'andamento di riferimento di temperatura ed i due con differenti temperature dell'acqua iniettata, nel caso di bassa pressione di iniezione, riportato in Figura 3.23.b, si osserva una temperatura più alta di circa 5 °C nel periodo che va da circa 0.25 s e 1 s, per il caso con temperatura di iniezione dell'acqua minore. Tale comportamento può essere dovuto al fatto che la bolla di vapore creata dall'acqua iniettata ha dimensioni minori proprio a causa del fatto che l'acqua ha una temperatura inferiore, e quindi non riesce a raggiungere come nel caso di riferimento la zona di indagine della temperatura.

Dal grafico della portata di acqua iniettata, mostrato in Figura 3.24, è evidente che nella configurazione ad alta pressione, non ci sono sostanziali differenze fra il caso C1 ed il caso C2 in termini di portata massica di acqua iniettata.

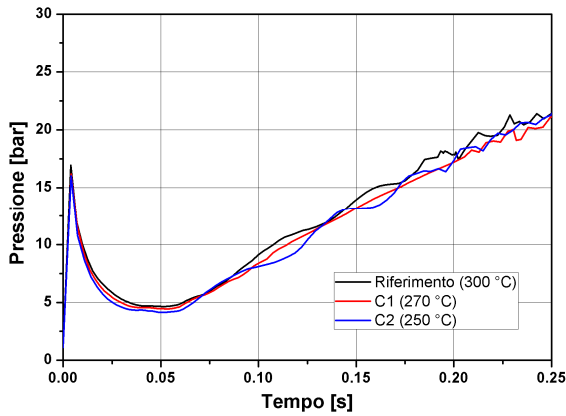


a) Alta pressione

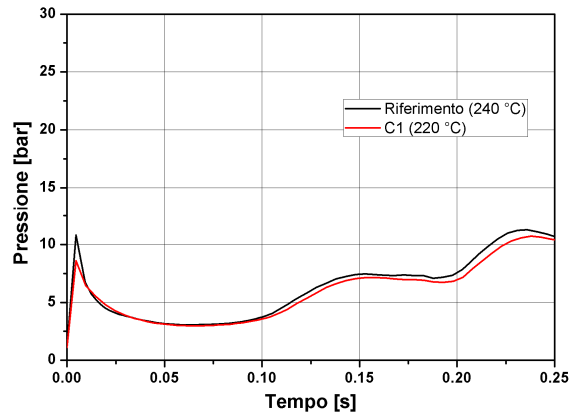


b) Bassa Pressione

Figura 3.21. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature di acqua iniettata.

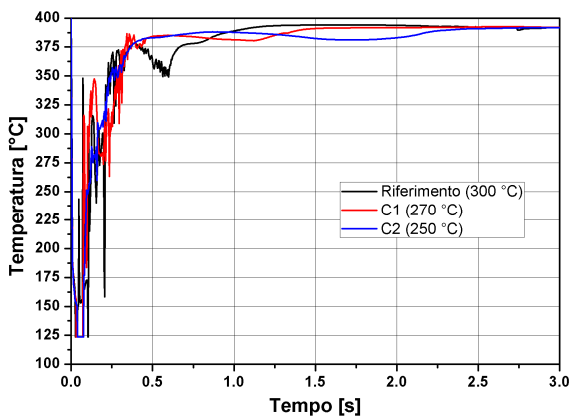


a) Alta pressione

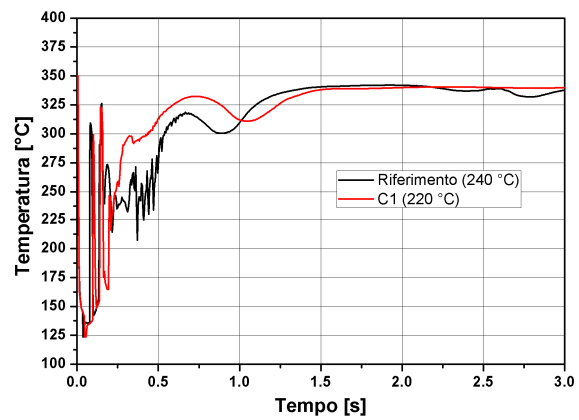


b) Bassa Pressione

Figura 3.22. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature di acqua iniettata nella fase iniziale del transitorio.



a) Alta pressione



b) Bassa Pressione

Figura 3.23. Andamenti temporali della temperatura dell'LBE nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature di acqua iniettata.

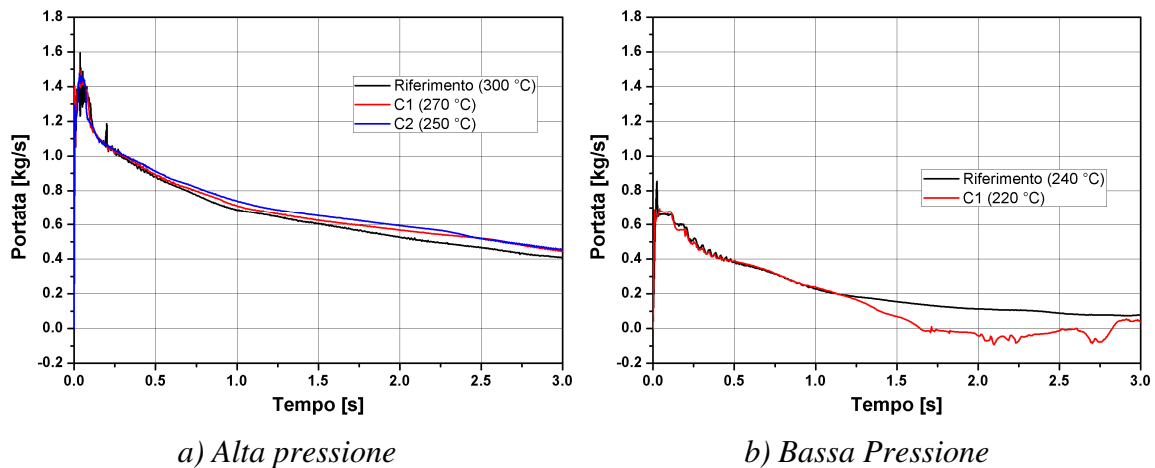


Figura 3.24. Andamenti temporali della portata di acqua iniettata al variare della temperatura dell'acqua di iniezione temperatura.

3.3.4 Pressione di iniezione

La pressione di iniezione dell'acqua è un parametro molto importante che domina il processo. Nella configurazione di alta pressione per il caso di riferimento è stata presa una pressione di 180 bar, mentre sono stati impostati 150 bar per il caso D1 e 120 bar per il caso D2. Nella serie a bassa pressione i valori sono: 40 bar per il caso di riferimento, 50 bar per il caso D1 e 30 bar per il caso D2. Dalla Figura 2.26 si nota che la pressione all'interno di S1 è ovviamente maggiore nel caso in cui è maggiore la pressione di iniezione e, di conseguenza, risulta più elevata anche la quantità di acqua iniettata (v. Figura 3.26), ciò è evidente in entrambe le serie di prove. Per le prove a bassa pressione c'è da sottolineare il fenomeno già discusso del riflusso che si presenta nel caso D2.

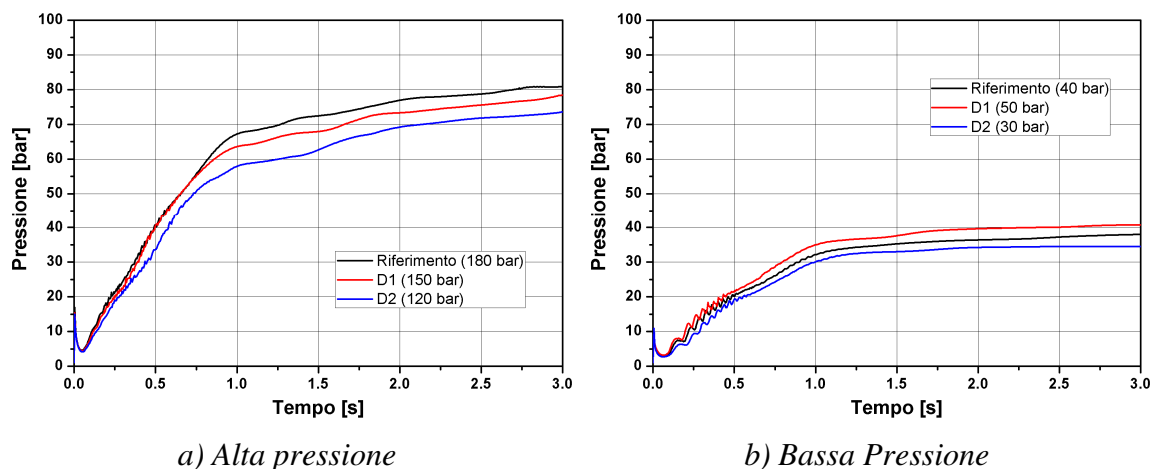


Figura 3.25. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti pressioni di iniezione.

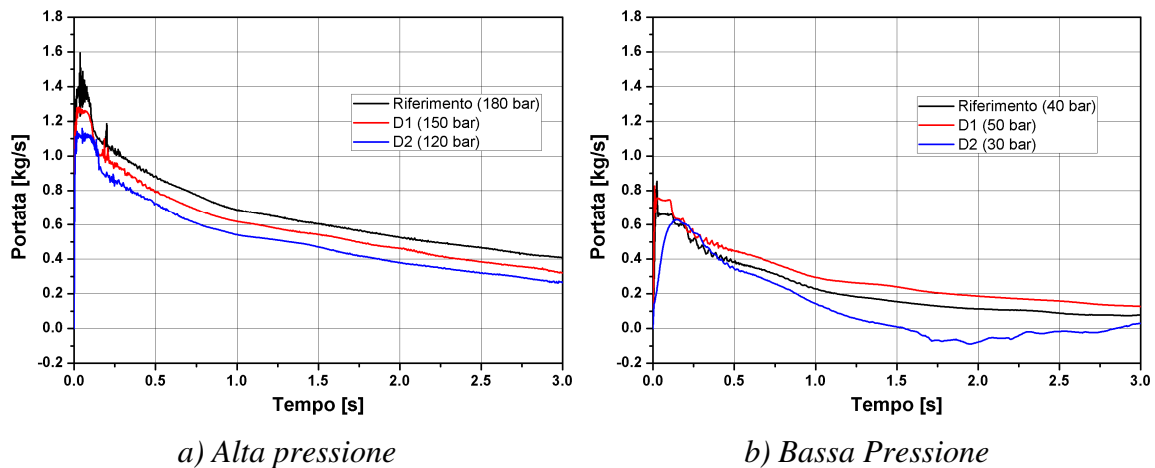


Figura 3.26. Andamenti temporali della portata dell'acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti pressioni di iniezione.

3.3.5 Temperatura dell'LBE

La temperatura della lega eutettica piombo-bismuto è l'ultimo parametro considerato in questa analisi. Nel caso di riferimento, per la configurazione ad alta pressione, l'LBE ha una temperatura di 400 °C, mentre nel caso E1 ha un valore di 350 °C e nel caso E2 vale 450 °C. Nella configurazione a bassa pressione si hanno i seguenti valori: 350 °C per il caso di riferimento, 300 °C per il caso E1 e 400 °C per il caso E2.

Gli andamenti di pressione riportati in *Figura 3.27* mettono in evidenza che si hanno maggiori pressurizzazioni nei casi in cui l'LBE ha una temperatura superiore, specialmente nella parte finale del transitorio considerato.

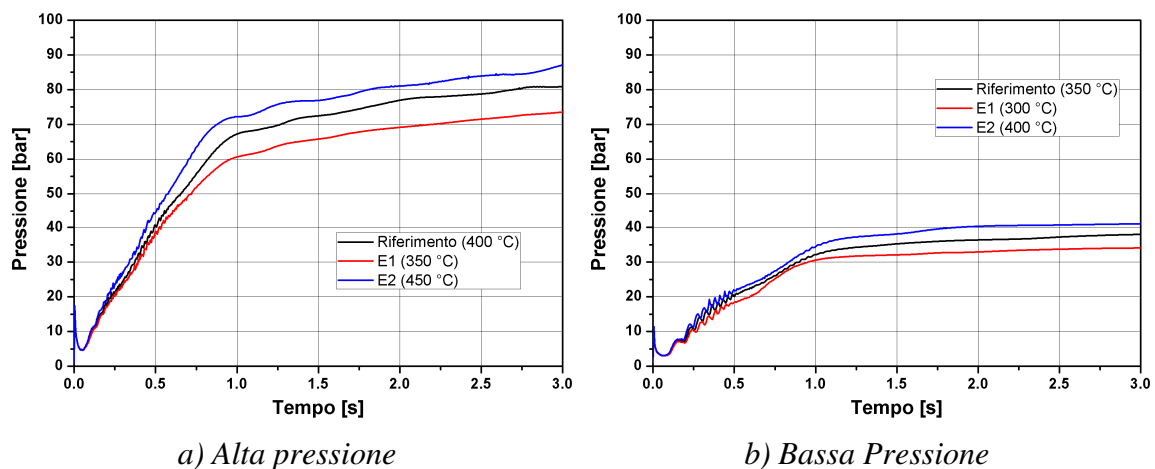
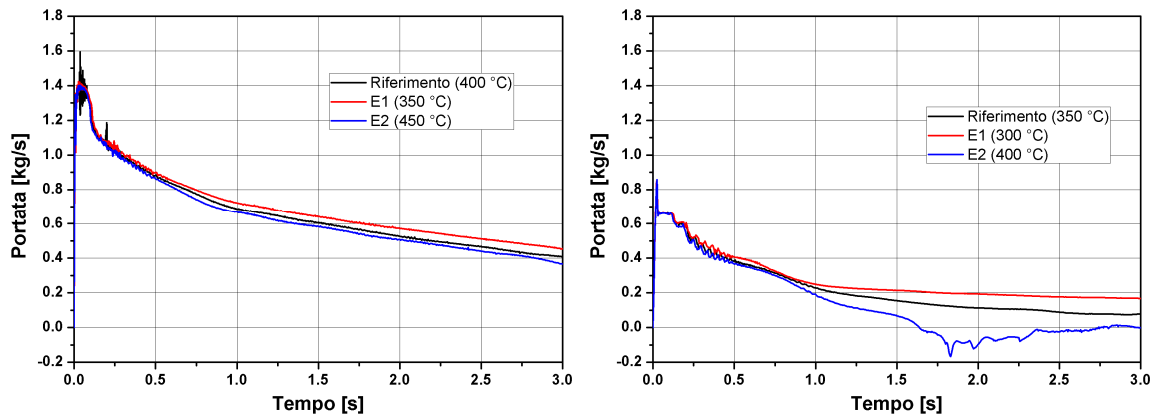


Figura 3.27. Andamenti temporali della pressione nella cella (4,19) per le simulazioni effettuate con differenti temperature dell'LBE.

Gli alti valori di pressione raggiunti, nei casi in cui la temperatura dell’LBE è maggiore, causano una riduzione della massa iniettata (v. Figura 3.28). In particolare, nel caso E2, nella serie di bassa pressione, c’è la presenza del fenomeno del riflusso. Ciò è in accordo con l’andamento di pressione all’interno del serbatoio S1 (v. Figura 3.27) che raggiunge il valore della pressione di iniezione quando compare tale fenomeno.



a) Alta pressione

b) Bassa Pressione

Figura 3.28. Andamenti temporali della portata dell’acqua iniettata per le simulazioni effettuate con differenti temperature dell’LBE.

3.4 Risultati ottenuti per il modello tri-dimensionale

La configurazione dell’apparecchiatura LIFUS 5 presa in esame in questa fase del lavoro è caratterizzata da un serbatoio di reazione in cui l’iniezione avviene in maniera assialsimmetrica; nonostante ciò, da un punto di vista dell’intero impianto permangono delle asimmetrie a causa della particolare disposizione del serbatoio di iniezione.

Il modello 3D del codice SIMMER IV è stato adottato unicamente per eseguire la simulazione del caso di riferimento ad alta pressione, al fine di verificare le possibili differenze dei risultati ottenuti con le due versioni del codice.

Andando a confrontare gli andamenti di pressione in prossimità dell’ugello, resi in Figura 3.29, si può notare che il codice tri-dimensionale fornisce un andamento con valori di pressione maggiori rispetto a quelli del caso bi-dimensionale. Si nota in Figura 3.30 che c’è una differenza nel picco di pressione iniziale, tale differenza può essere dovuta anche al fatto che la simulazione tri-dimensionale adotta, nei primi istanti, un passo temporale più piccolo.

Dopo questa prima fase si assiste ad un accordo nella fase discendente fino a 0.5 s per poi riscontrare un allontanamento fra i due trend.

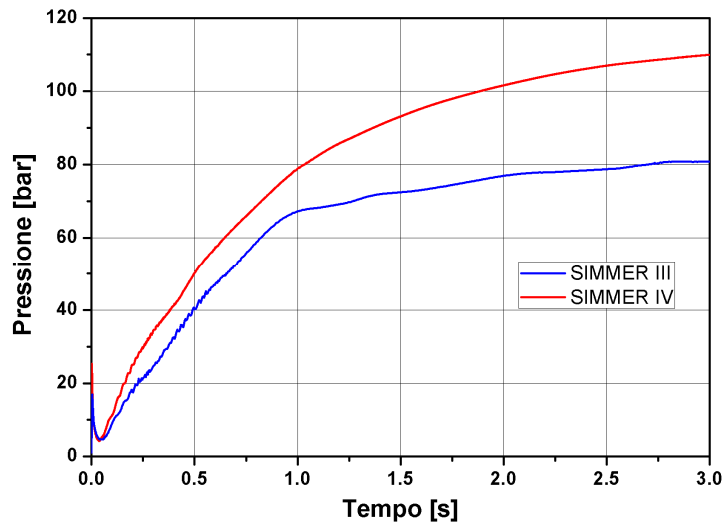


Figura 3.29. Confronto degli andamenti temporali della pressione nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale nella zona vicina al punto di iniezione.

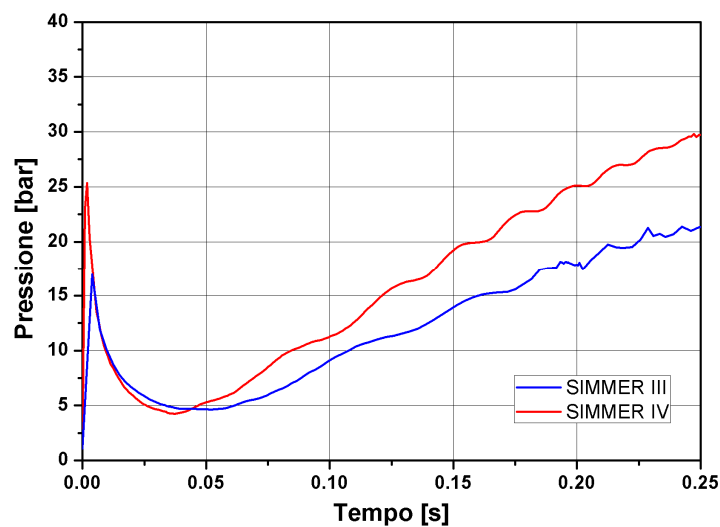


Figura 3.30. Confronto degli andamenti temporali della pressione nella prima parte del transitorio nella zona vicina al punto di iniezione.

Nella Figura 3.31 sono riportati gli andamenti temporali della pressione all'interno della zona del gas di copertura, essi sono simili a quelli presentati in precedenza eccetto il fatto che si possono notare delle oscillazioni nella fase iniziale del transitorio (v. Figura 3.32) dovute all'effetto inerziale del gas che si comporta come un elemento elastico. La presenza di un maggior numero di oscillazioni nel caso tri-dimensionale è facilmente spiegabile se si pensa

che in questo caso vengono raggiunte delle pressioni superiori che comportano una frequenza maggiore di oscillazione, dato che il gas raggiunge pressioni superiori e quindi si comporta come un elemento elastico più rigido. Le oscillazioni cessano quando la bolla di vapore dovuta all'iniezione entra in contatto con il gas di copertura.

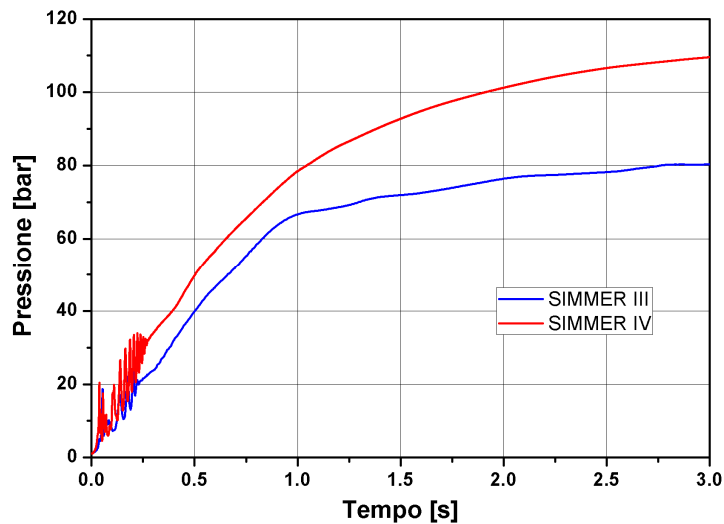


Figura 3.31. Confronto degli andamenti temporali della pressione nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale nella zona del gas di copertura.

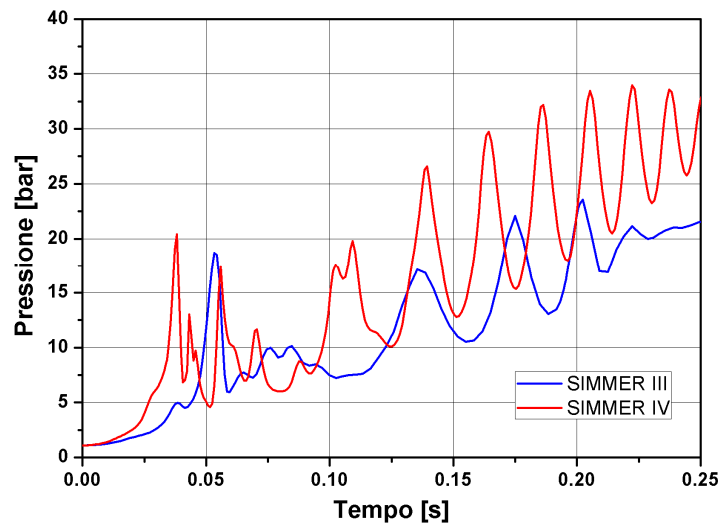


Figura 3.32. Confronto degli andamenti temporali della pressione nella prima parte del transitorio nella zona del gas di copertura.

Gli andamenti di pressione all'interno del canale di iniezione sono riportati in Figura 3.33. Da essa si nota che c'è un ottimo accordo fra i due andamenti calcolati, essi sono sovrapposti per gran parte del periodo del transitorio, per poi separarsi dopo circa 2.0 s dall'inizio

dell'iniezione, quando l'andamento estratto dalla versione bi-dimensionale continua nella fase di discesa, mentre l'andamento calcolato dalla versione tri-dimensionale tende a stabilizzarsi intorno al valore di circa 115 bar.

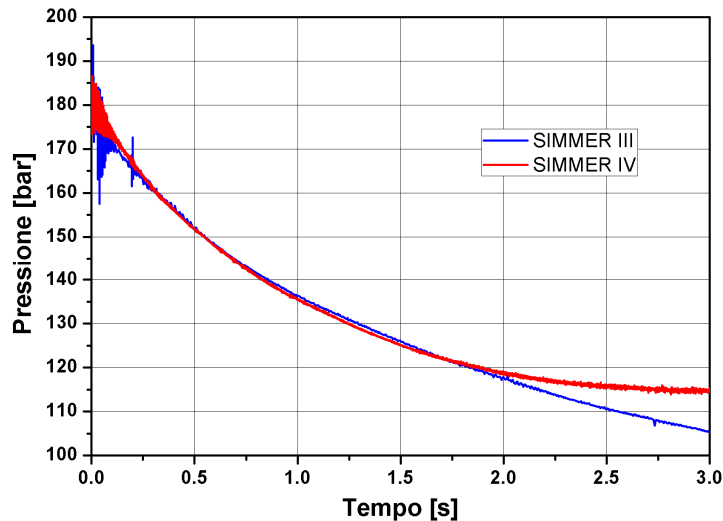


Figura 3.33. Confronto degli andamenti temporali della pressione nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale all'interno del canale di iniezione.

Dal punto di vista delle temperature del metallo fuso si hanno andamenti molto simili per le due versioni del codice; infatti, nella zona vicino al punto di iniezione (v. Figura 3.34), si ha una prima fase caratterizzata da ampie oscillazioni della temperatura dell'LBE che mediamente diminuisce a contatto con l'acqua che evapora, e quindi asporta calore, ed una seconda fase dove il metallo tende a tornare a valori di temperatura vicini a quelli iniziali.

C'è da notare che il codice SIMMER III è caratterizzato, nella prima fase del transitorio rappresentata in Figura 3.35, da maggiori oscillazioni di temperatura, mentre l'andamento calcolato dal SIMMER IV risulta più stabile e con valori medi simili a quelli relativi alla versione III. Va sottolineato che nel caso relativo alla simulazione effettuata con la versione bi-dimensionale del codice, nelle fasi iniziali dell'interazione, il metallo liquido raggiunge la temperatura di solidificazione, questo non accade nel caso della simulazione effettuata con la versione tri-dimensionale.

Spostando l'analisi sulla parete del vessel, sempre all'interno del metallo, si vede che le temperature sono poco perturbate dall'interazione, mostrando variazioni di pochi gradi, come evidenziato dagli andamenti rappresentati in Figura 3.36.

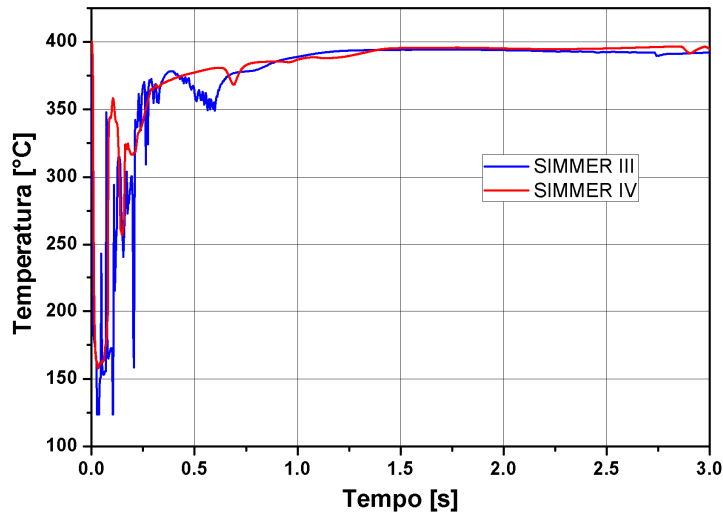


Figura 3.34. Confronto degli andamenti temporali della temperatura nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale nella zona vicina al punto di iniezione.

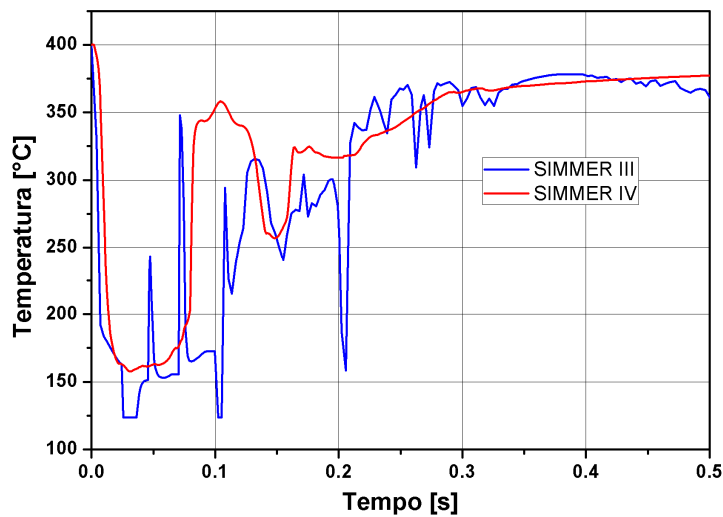


Figura 3.35. Confronto degli andamenti temporali della temperatura nella prima parte del transitorio nella zona vicina al punto di iniezione.

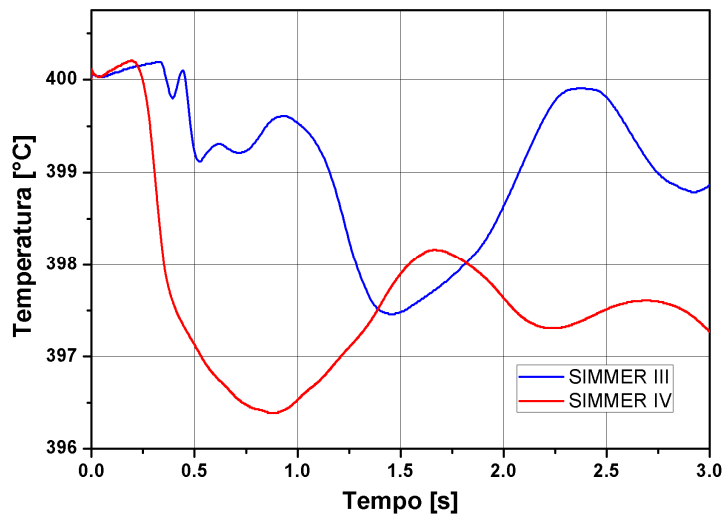


Figura 3.36. Confronto degli andamenti temporali della temperatura nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale nella zona vicina alla parete del serbatoio S1.

Gli andamenti temporali della portata di acqua iniettata calcolati con le due versioni del codice, riportati in Figura 3.37, presentano differenze soprattutto nella prima fase del transitorio e nella sua fase finale. Si nota infatti una inversione delle tendenze data dal fatto che l'andamento calcolato dal SIMMER III ha un a pendenza minore di quello calcolato con la versione tri-dimensionale del codice. Tali differenze nell'andamento non vanno però ad influire sulla quantità di acqua iniettata che risulta molto simile per le due configurazioni come visibile in Tabella 3.4.

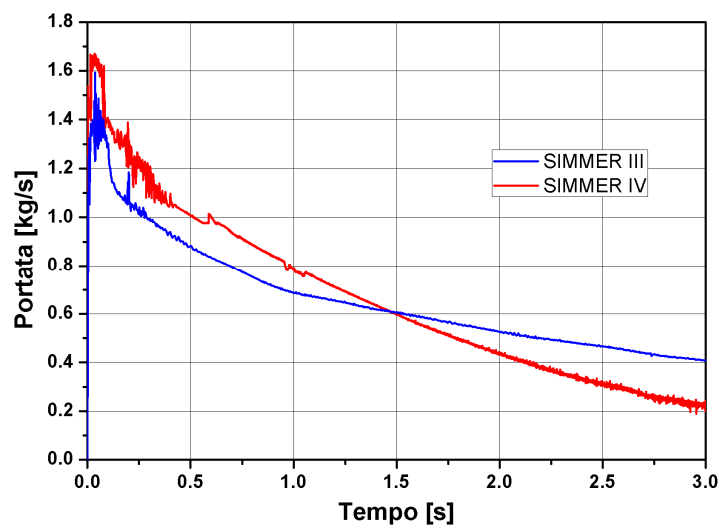


Figura 3.37. Confronto degli andamenti temporali della portata di acqua iniettata nel caso bi-dimensionale e tri-dimensionale.

| | Massa Iniettata [kg] |
|------------|-----------------------------|
| SIMMER III | 1.991 |
| SIMMER IV | 1.994 |

Tabella 3.4. Quantità di acqua iniettata nel caso bi-dimensionale ed in quello tri-dimensionale.

3.5 Applicazione del BFCAL

In questo lavoro si è deciso di completare l'analisi sfruttando le funzioni disponibili nel post-processore BFCAL del SIMMER al fine di ricavare informazioni sugli scambi energetici presenti durante l'interazione metallo liquido-acqua. L'analisi è stata condotta per i due casi di riferimento in geometria 2D, ad alta e a bassa pressione.

I risultati in uscita dal SIMMER sono riferiti ad ogni cella del dominio, il post-processore BFCAL provvede a mediare i valori delle variabili su specifiche regioni di controllo definite dall'utente. Nel caso in analisi sono stati definiti quattro volumi di controllo principali, ovvero: uno per la zona di argon in pressione in S2, uno per l'acqua di iniezione in S2 e nella tubazione di collegamento con S1, uno per il metallo fuso ed uno per il gas di copertura. L'analisi sarà focalizzata soprattutto sulla zona del gas di copertura e su quella del metallo liquido, che insieme vanno a coprire tutto il volume di S1. Tali volumi rimangono costanti per tutta la durata del transitorio.

Innanzitutto è stata effettuata un'analisi dei tempi di rottura della bolla creata dalla vaporizzazione dell'acqua iniettata, in quanto un'analisi energetica della zona relativa al gas di copertura perde parzialmente di significato una volta che il vapore creato dall'acqua iniettata si va a mischiare con il gas presente nella parte alta del serbatoio S1. Nella Figura 3.38 possiamo osservare l'evoluzione della bolla di vapore creata dall'iniezione dell'acqua per intervalli di 0.1 s, nel caso di iniezione ad alta pressione; mentre in Figura 3.39 è visibile il contour-plot della frazione di volume del metallo liquido nel caso di iniezione a bassa pressione. È evidente, come già detto in precedenza, che il fenomeno è simile in entrambi i casi, anche se si sviluppa in tempi sostanzialmente differenti, infatti, si nota chiaramente, che nel caso a bassa pressione, la bolla entra in contatto con il gas di copertura fra 0.4 e 0.5 s, mentre nel caso ad alta pressione ciò succede fra 0.2 s e 0.3 s.

Nella Figura 3.40 sono inoltre rappresentati i vettori di velocità relativi all’LBE, da essi si riesce ad avere un’idea sia del movimento del metallo liquido all’interno del serbatoio durante la fase di iniezione, sia del momento in cui si assiste alla rottura della bolla. Infatti, nel momento in cui la bolla dovuta all’iniezione entra in contatto con il gas di copertura, i vettori relativi alla velocità dell’LBE, nella zona superiore del vessel, acquisiscono una componente radiale assente in tutto il periodo in cui la bolla rimane integra nella parte centrale del vessel.

Un’indicazione più precisa riguardo alla rottura della bolla proviene dall’andamento dell’energia cinetica del refrigerante all’interno della zona del gas di copertura mostrato in Figura 3.41 per i due casi analizzati; infatti, focalizzando l’attenzione su tale zona, l’energia cinetica risulterà nulla fino a quando la bolla di refrigerante irrompe all’interno di tale regione. Si vede che l’ingresso del refrigerante all’interno della zona del gas avviene dopo 0.2 s nel caso di iniezione ad alta pressione, mentre dopo 0.48 nel caso di bassa pressione.

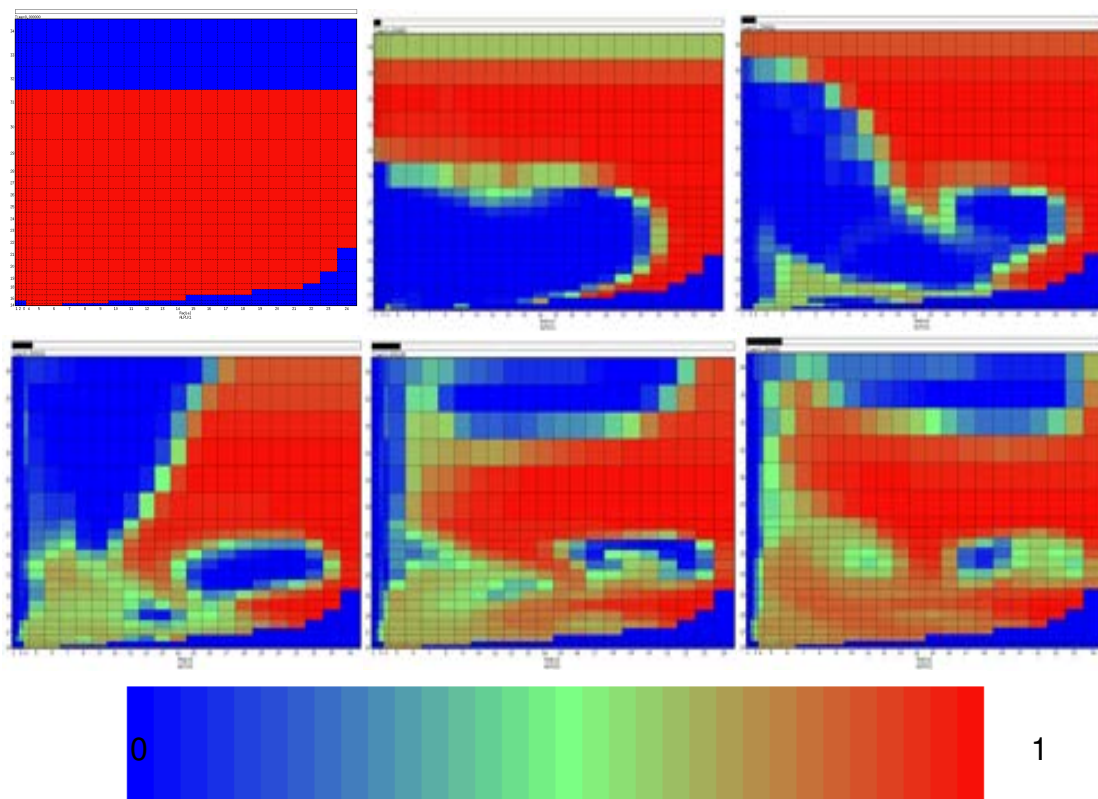


Figura 3.38. Contour-plot della frazione di volume di LBE per la valutazione dell'evoluzione della bolla nel caso di iniezione ad alta pressione.

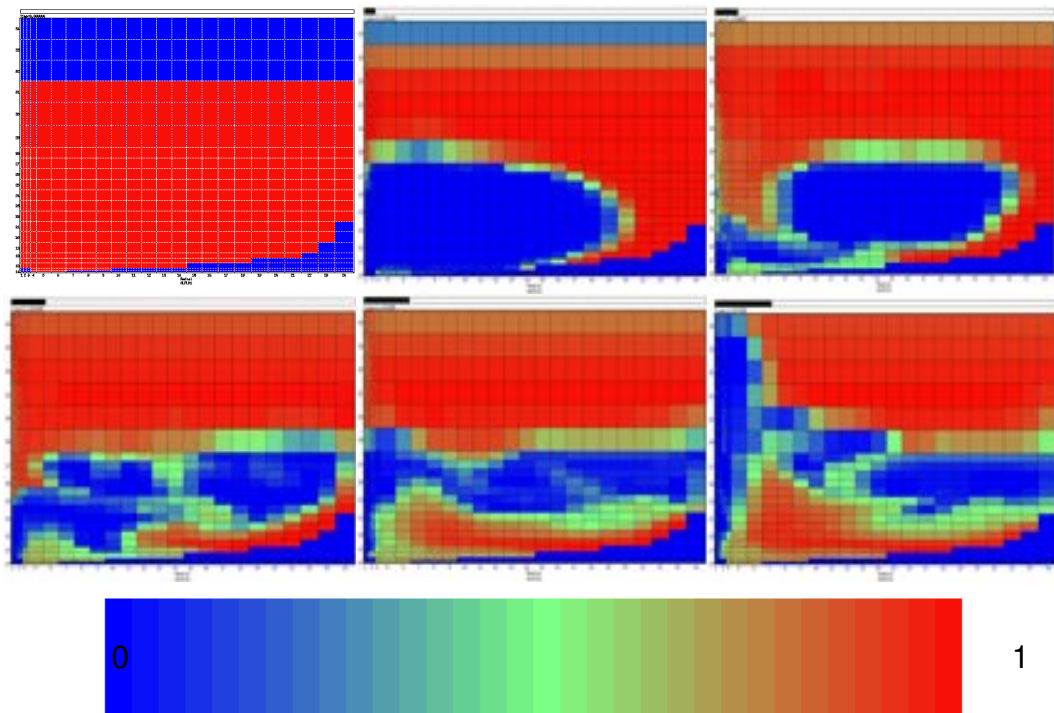
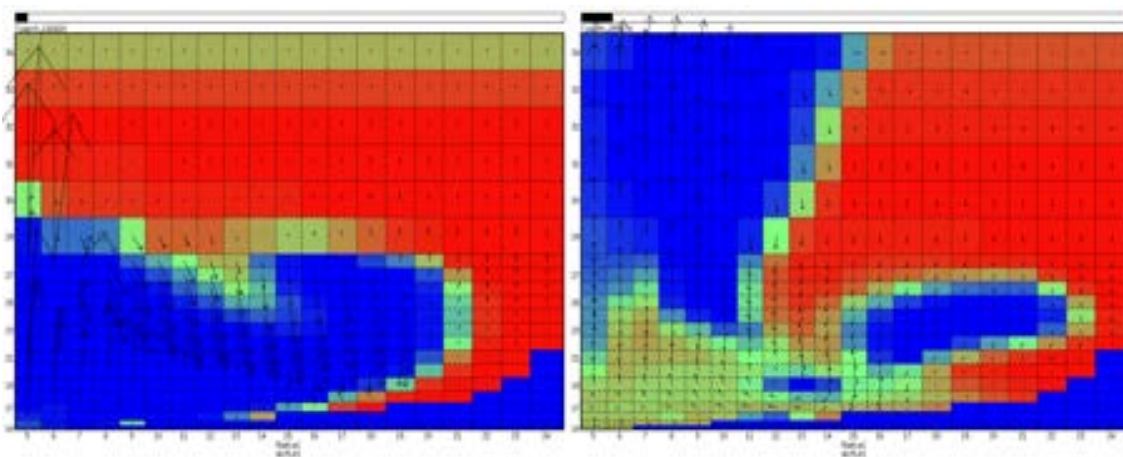


Figura 3.39. Contour-plot della frazione di volume di LBE per la valutazione dell'evoluzione della bolla nel caso di iniezione a bassa pressione.



a) prima della rottura

b) dopo la rottura

Figura 3.40. Andamento della velocità dell'LBE nel caso ad alta pressione.

Guardando le scale dei grafici si vede come nel caso ad alta pressione l'energia cinetica del refrigerante sia più del doppio rispetto al caso a bassa pressione; ciò è dovuto ovviamente al fatto che la pressione di iniezione è di gran lunga superiore nel primo caso rispetto al secondo.

In entrambi i casi, comunque, i valori di energia cinetica sono molto bassi (siamo nell'ordine di grandezza delle decine di Joule).

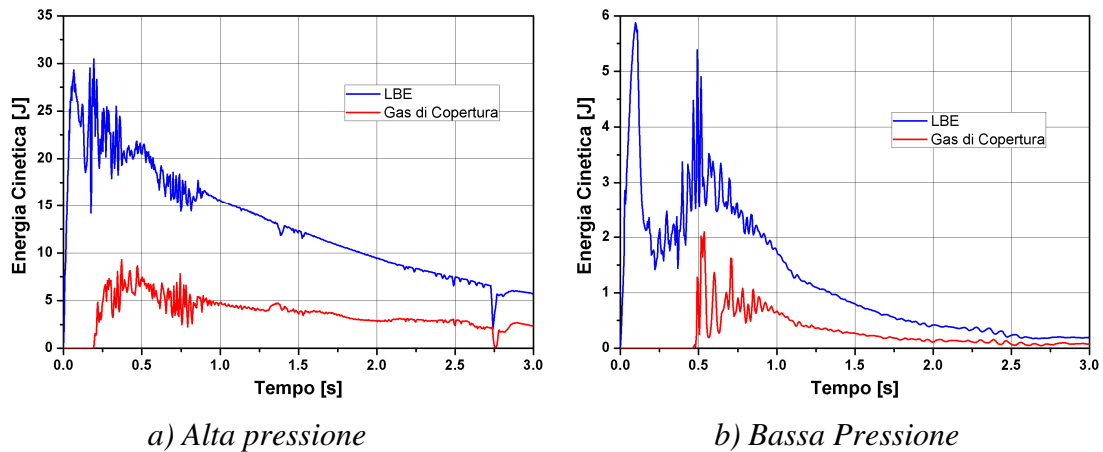


Figura 3.41. Andamento dell'energia cinetica all'interno della zona del gas di copertura e dell'LBE.

L'analisi del tempo di rottura della bolla assume un significato importante quando si va a valutare il lavoro di compressione compiuto sul gas di copertura, infatti, il modello utilizzato dal programma, per il calcolo di tale grandezza, perde di significato una volta che all'interno della zona analizzata entra un fluido gassoso diverso da quello iniziale. Il modello si basa sulle seguenti relazioni:

$$L_i = p_i \cdot (V_i - V_{i-1}) \quad (2.2)$$

$$L_{tot} = \sum_i L_i \quad (2.3)$$

Dove:

- L_i è il lavoro compiuto al passo temporale i-esimo;
- p_i è la pressione media all'interno della zona di gas al passo temporale i-esimo;
- V_i e V_{i-1} sono il volume della zona di gas al passo i-esimo ed a quello precedente.

È chiaro che se all'interno della zona di analisi entra del gas estraneo a quello presente all'inizio il calcolo può risultare falsato, in quanto anch'esso sarebbe preso in considerazione per il calcolo. Per questo motivo verrà preso in esame solo il periodo in cui nella zona in analisi non entrano altri fluidi gassosi diversi dal gas di copertura.

In Figura 3.42 è presente l'andamento del lavoro di compressione per i due casi analizzati, in entrambi esso è sempre positivo, inoltre è pulsante a causa del fatto che il gas tende a contrastare il movimento del metallo verso la parte alta del serbatoio comprimendosi. Ovviamente questo accade fintanto che la bolla di vapore di refrigerante non irrompe all'interno della zona di gas di copertura, da qui in poi si instaura una sorta di vortice all'interno del serbatoio (v. Figura 3.43) e ciò fa perdere senso a questo tipo di analisi.

Nel secondo asse del grafico è riportato il lavoro della pressione per unità di volume di gas, tale grandezza potrebbe risultare utile nel caso di applicazione di un'analisi di questo tipo ad apparecchiature di differenti dimensioni.

In Figura 3.42 è possibile inoltre vedere che le oscillazioni sono maggiori nel caso di iniezione a bassa pressione, questo perché l'ingresso del refrigerante avviene in maniera meno energica all'interno di S1 e ciò dà al gas una maggiore libertà di espandersi nel contrastare la salita del metallo fuso, e quindi gli effetti oscillatori sono visibili più chiaramente.

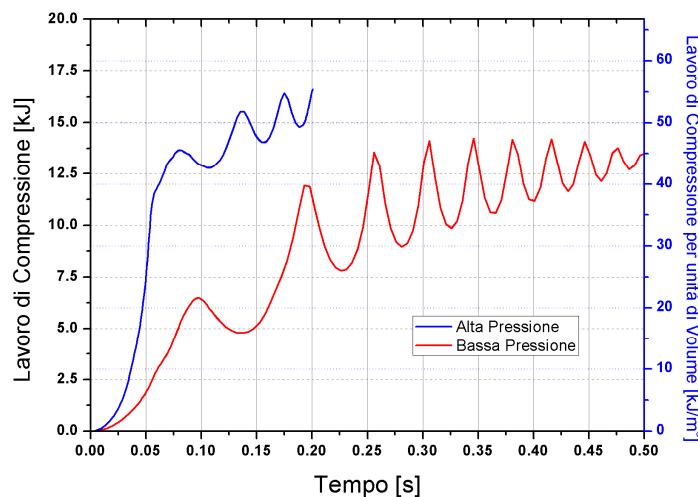


Figura 3.42. Andamento temporale del lavoro di compressione totale e per unità di volume di gas nel periodo precedente alla rottura della bolla di iniezione (nella regione del gas di copertura).

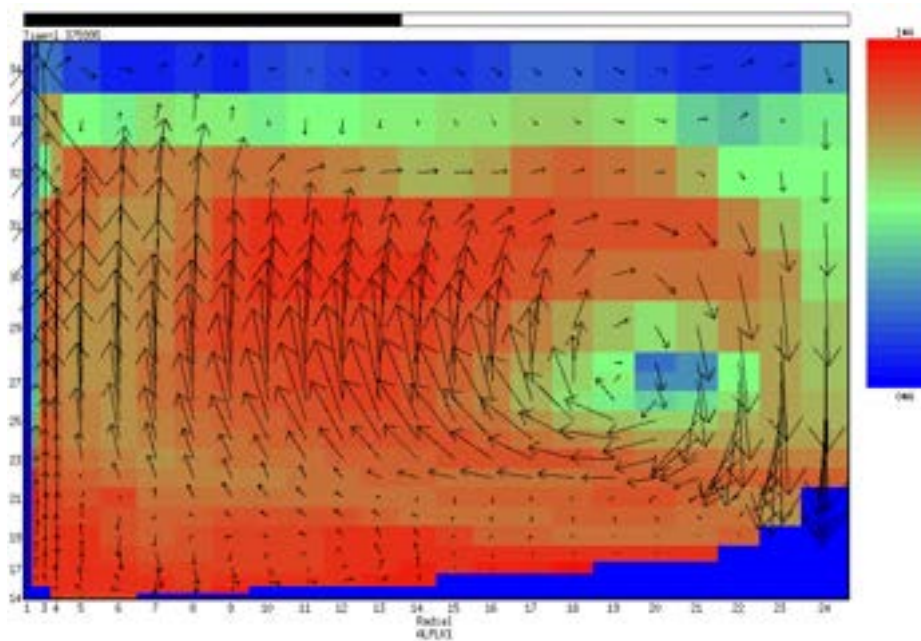


Figura 3.43. Andamento dei vettori di velocità dopo che la bolla di refrigerante ha raggiunto la parte superiore del vessel.

Derivando gli andamenti del lavoro di compressione nel tempo è possibile ricavare l'andamento della potenza di compressione che la massa di metallo liquido esercita sul gas, di copertura. Dato che l'LBE è allo stato liquido e quindi approssimativamente incompressibile si può dedurre che tale potenza è dovuta al fenomeno di interazione fra l'acqua iniettata ad alta pressione e il metallo ad alta temperatura.

In Figura 3.44 sono riportati gli andamenti della potenza di compressione della zona del gas di copertura sia totale che per unità di volume di cover gas. È interessante notare il fatto che nel caso ad alta pressione si ha un picco iniziale molto elevato mentre nel caso a bassa pressione esso è molto ridotto, inoltre nel caso a bassa pressione si raggiungono dei picchi maggiori nella seconda fase di espansione rispetto a quelli raggiunti nella prima fase.

Questo comportamento è dovuto agli effetti inerziali del metallo liquido; nel caso ad alta pressione il refrigerante entra nel serbatoio di iniezione in maniera molto energica, provocando lo spostamento in blocco di tutto il metallo che va a comprimere il gas nella parte superiore del serbatoio, nella fase immediatamente successiva a causa della forte spinta dell'acqua iniettata dal basso si crea un canale che unisce la zona di iniezione con la parte superiore di S1; ciò fa sì che non si abbiano molte oscillazioni in questa prova, è il tempo per

far risentire al gas degli effetti dovuti all'espansione dell'acqua che evapora a contatto con il metallo fuso sono molto ridotti. Nel caso a bassa pressione, invece, il fenomeno ha scale di tempo maggiori e si comporta in maniera lievemente differente. Nella fase immediatamente successiva all'iniezione il picco dovuto al colpo dell'acqua in pressione non è elevato come nel caso precedente dato che l'acqua è iniettata a pressione minore; per contro, il fatto che l'acqua è iniettata a pressione più bassa, permette la formazione di un accumulo di refrigerante nella zona di iniezione, il refrigerante inizia ad espandere questa espansione spinge il metallo fuso contro il gas di copertura che si comprime fino a quando esso riesce a creare una razione sull'LBE spingendolo nuovamente verso il basso. Questo innesca un fenomeno oscillatorio, il gas si comporta come un corpo elastico dando vita a picchi di potenza molto più elevati di quelli che si raggiungono nella fase iniziale dell'iniezione. In questo caso la bolla di vapore dovuta all'evaporazione del refrigerante iniettato raggiunge il gas di copertura, nella parte superiore di S1, in tempi più lunghi rispetto al caso precedente (circa 0.50 s).

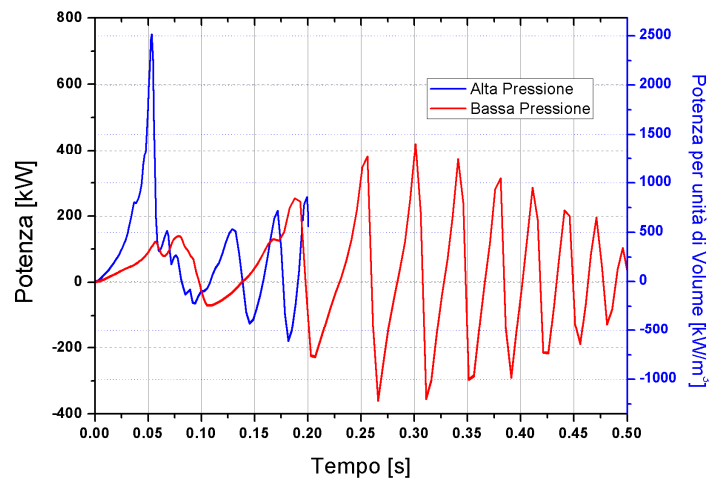


Figura 3.44. Andamenti temporali della potenza di compressione totale e per unità di volume.

Nella Figura 3.45 sono riportati gli andamenti dell'energia cinetica posseduta dal sistema costituito dal metallo liquido e dal vapore d'acqua che si forma in seguito all'evaporazione del refrigerante. Anche in questo caso è stata riportata sulla seconda scala del grafico l'energia cinetica per unità di volume, in questo caso per unità di volume di metallo liquido, dato che il contributo del metallo a questa grandezza è molto maggiore di quello dei fluidi gassosi presenti nel sistema (vapore d'acqua e gas di copertura).

La prima cosa da notare è il fatto che essa ha valori diversi da zero solo nella prima fase dell'iniezione, infatti in entrambi i casi dopo 1.5 s gli andamenti tendono ad annullarsi. Facendo un confronto con la Figura 3.41, relativa all'energia cinetica posseduta dal refrigerante, si vede che le grandezze sono molto inferiori, circa tre ordini di grandezza, rispetto a quelle relative all' energia cinetica totale, questo sta ad indicare che quasi la totalità dell'energia cinetica è dovuta al contributo del metallo liquido.

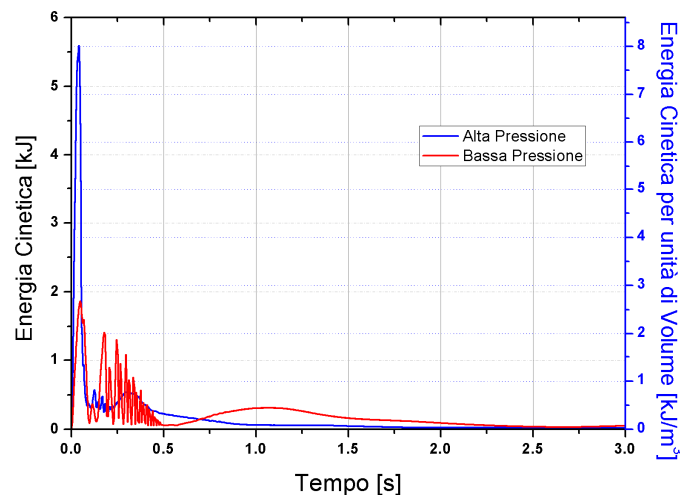


Figura 3.45. Andamento temporale dell'energia cinetica totale e per unità di volume di LBE del sistema metallo liquido-gas di copertura nei due casi analizzati.

Gli andamenti di energia meccanica all'interno della zona di gas di copertura (v. Figura 3.46) sono molto simili a quelli relativi al lavoro di compressione, poiché l'energia cinetica del gas è molto piccola ed è facile intuire che la maggior parte della quota di energia presente all'interno dell'energia meccanica sarà dovuta al lavoro di compressione effettuato sul gas.

Può risultare interessante andare a confrontare le due componenti dell'energia meccanica presenti all'interno del serbatoio S1, ovvero il lavoro di compressione e l'energia cinetica. Gli andamenti di tali grandezze sono riportati in Figura 3.47, da essa si vede chiaramente che essi sono correlati, infatti nelle zone in cui il lavoro di compressione presenta un massimo od un minimo relativo, l'energia cinetica si annulla, mentre è massima nelle zone in cui le velocità del sistema sono massime, ovvero a metà degli andamenti fra i massimi ed i minimi del lavoro di compressione.

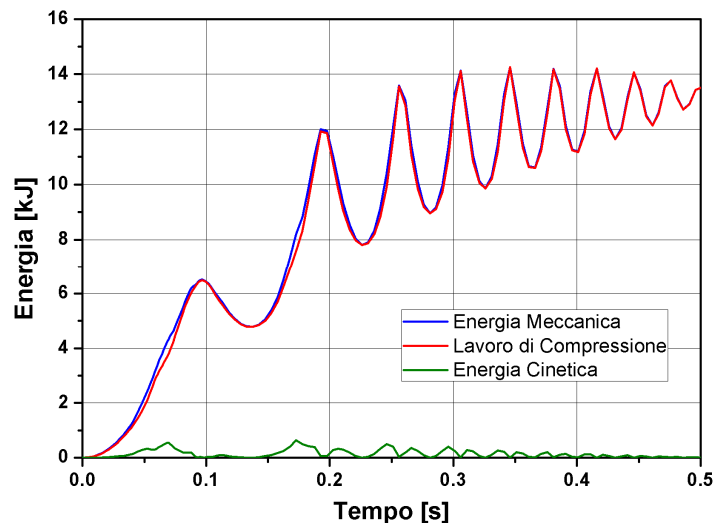


Figura 3.46. Confronto degli andamenti temporali dell'energia meccanica con quelli delle sue componenti all'interno della zona del gas di copertura (caso di bassa pressione).

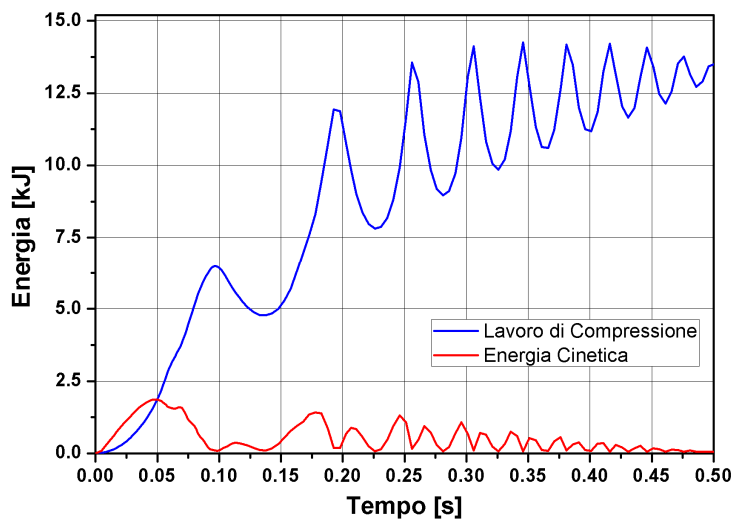
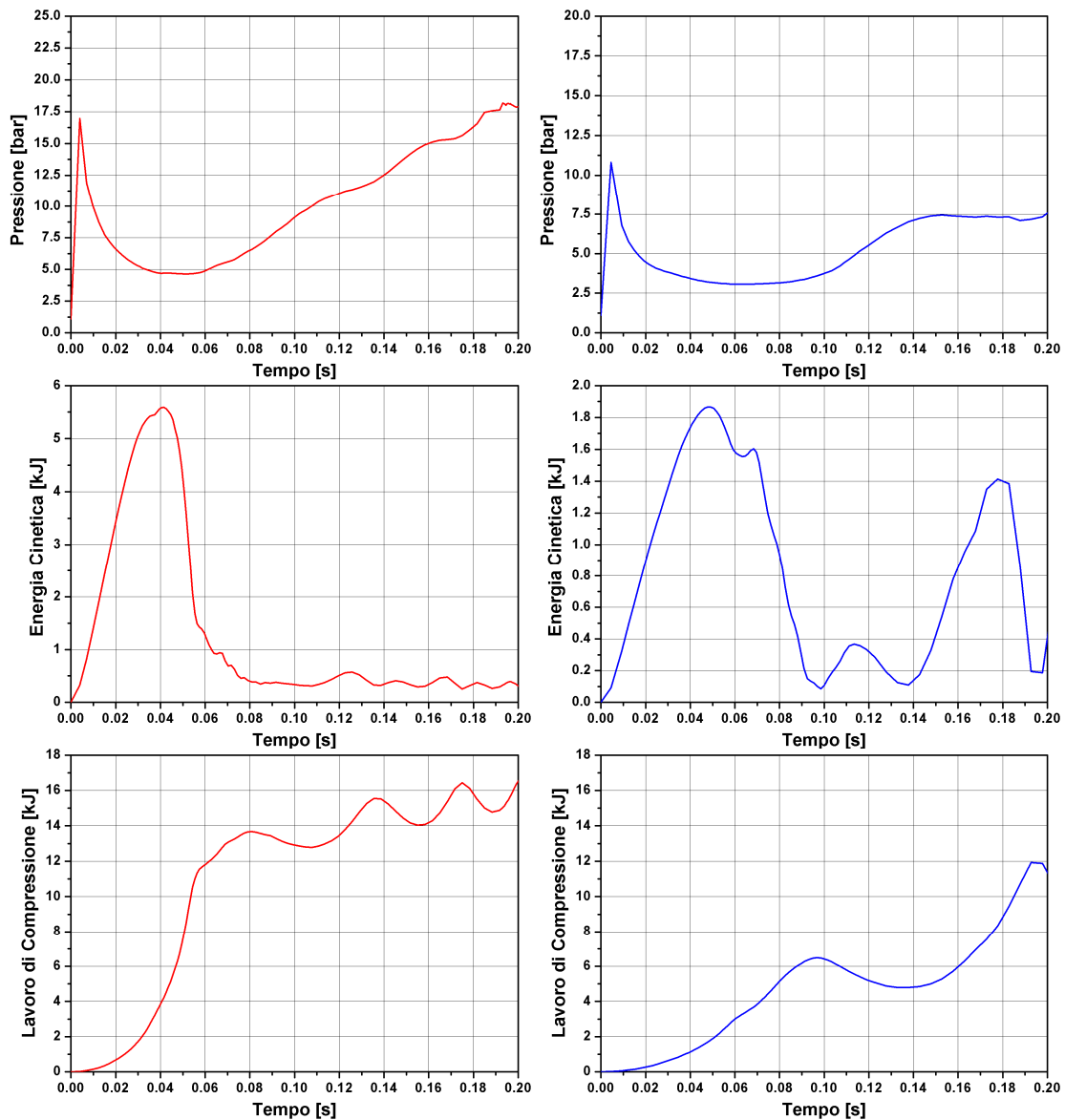


Figura 3.47. Confronto degli andamenti del lavoro di compressione e dell'energia cinetica nel caso a bassa pressione di iniezione.

Può risultare interessante andare a fare un confronto tra le scale temporali delle grandezze analizzate fino ad ora, per riuscire a comprendere in maniera migliore lo sviluppo del fenomeno. In Figura 3.48 sono riportati i grafici degli andamenti temporali della pressione, dell'energia cinetica e del lavoro di compressione.




a) Alta pressione

b) Bassa Pressione

Figura 3.48. Analisi delle scale temporali della pressione, dell'energia cinetica e del lavoro di compressione.


Da essi è possibile ricavare come si sviluppa il fenomeno dell'interazione nelle prime fasi. Si nota che la prima grandezza a raggiungere un massimo, intorno a 0.01 s, è la pressione all'interno dell'LBE nella zona vicina all'orifizio dell'ugello, ciò è dovuto al fatto che la massa del metallo liquido viene spostata a causa della forza dinamica esercitata dall'acqua che inizia ad entrare nel serbatoio di reazione S1. A causa di ciò si vede che si crea un picco di energia cinetica intorno a 0.04 s dovuto al fatto che il metallo comincia a muoversi in blocco verso l'alto, tale picco è maggiore nel caso ad alta pressione dato che l'acqua entra nel serbatoio con molta più energia. Nello stesso momento il lavoro di compressione inizia ad

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 57 | 93 |

aumentare, infatti la massa di metallo che si sposta verso l'alto preme contro il gas comprimendolo. Successivamente, soprattutto per il caso di alta pressione, si vede che l'energia cinetica tende ad annullarsi mentre continua ad aumentare sia la pressione che il lavoro di compressione. Tale fenomeno è dovuto al fatto che in questo momento inizia la pressurizzazione dovuta alla vaporizzazione dell'acqua iniettata. In questa fase il comportamento è diverso per il caso a bassa e ad alta pressione.

Nel caso di alta pressione data la forte spinta dovuta all'acqua pressurizzata a 180 bar, si vede che il metallo rimane compresso verso la parte alta del serbatoio, per questo l'energia cinetica diminuisce fino quasi ad annullarsi mentre la pressione ed il lavoro di compressione continuano ad aumentare presentando una serie di picchi dovuti agli effetti dinamici del gas descritti in precedenza. Nel caso di bassa pressione, invece, dopo il primo picco dovuto all'iniezione, si vede che gli effetti dinamici hanno un effetto maggiore. Infatti nell'andamento dell'energia cinetica si vede che si alternano picchi dovuti al fatto che il metallo ha un moto a pistone all'interno del serbatoio.

L'utility di post-processing sarebbe in grado di analizzare anche le variazioni di energia interna delle varie componenti del sistema, ma il programma non è in grado di conservare tale grandezza e quindi questo aspetto non è stato preso in considerazione.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 58 | 93 |

4 AGGIORNAMENTI TECNICI A LIFUS-5

Le attività di aggiornamento e messa a punto dell'apparecchiatura LIFUS 5 hanno lo scopo di:

- semplificare la procedura di preparazione ed esecuzione degli esperimenti, in modo da ridurre il tempo tra due esperimenti,
- avere una configurazione assial-simmetrica del vessel S1, dove avviene l'interazione, che sia più adatta allo sviluppo di modelli numerici per la simulazione di tali fenomeni,
- effettuare esperimenti in condizioni operative "più controllate", in modo da migliorare la conoscenza delle condizioni iniziali e al contorno, rilevanti per l'analisi dei dati sperimentali oltreché per le simulazioni numeriche,
- fornire dati affidabili altamente dettagliati.

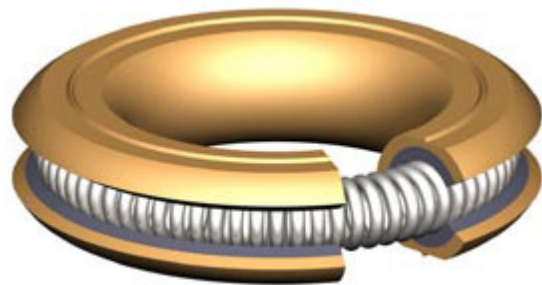
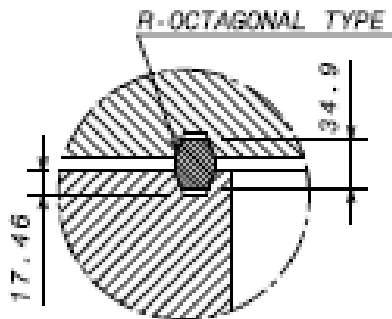
Le seguenti attività sono state progettate, programmate e completate:

- progettazioni e realizzazione di una nuova sezione di prova,
- la progettazione e realizzazione della nuova linea d'iniezione acqua,
- la progettazione e realizzazione di un nuovo sistema di acquisizione dati veloce e del sistema di controllo dell'impianto,
- l'acquisizione di nuova strumentazione (estensimetri e termocoppie) e la taratura dei trasduttori di pressione piezoelettrici già presenti sull'impianto, inclusa la analisi necessarie per il loro posizionamento ottimale,
- modifica della struttura di supporto dell'apparecchiatura sperimentale,
- progettazione e costruzione della nuova sala controllo.

4.1 Configurazione di LIFUS5

L'aggiornamento dell'apparecchiatura sperimentale LIFUS5 riguarda principalmente le modifiche al vessel S1 e alla linea di iniezione dell'acqua. Gli obiettivi di tali modifiche sono: la semplificazione della procedura di esecuzione degli esperimenti e il miglioramento della configurazione geometrica del sistema al fine di ottenere dati significativi per lo sviluppo di modelli numerici e per la qualificazione dei codici di calcolo.

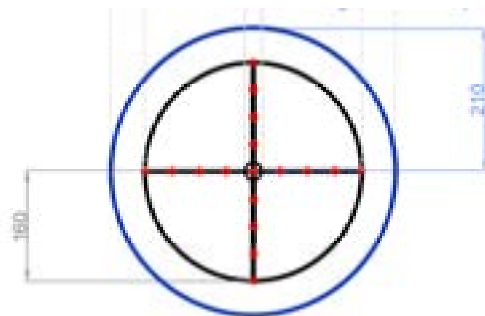
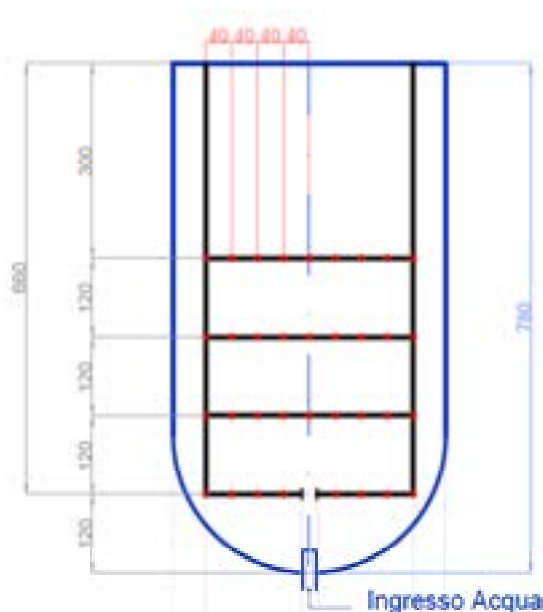
Il primo obiettivo è stato ottenuto attraverso la costruzione di una struttura di supporto dove è stata assemblata l'apparecchiatura sperimentale. E' stato inoltre costruita una sala controllo fissa, attraverso la quale l'apparecchiatura può essere operata in remoto. La flangia superiore e il vessel (S1) sono stati modificati in modo da poter essere accoppiati attraverso un nuovo sistema di serraggio. L'accoppiamento verrà infatti effettuato attraverso un nuovo anello metallico fornito da Garlock: HELICOFLEX gasket HN200 (vedi *Figura 4.1*). Questa modifica consentirà di velocizzare la procedura di preparazione dell'apparecchiatura, quindi si potranno ridurre i tempi tra un test e il successivo.



(a) Anello metallico di tenuta

(b) Garlock HELICOFLEX gasket HN200

Figura 4.1. Configurazione LIFUS 5, vecchio (a) e nuovo (b) sistema di serraggio della flangia superiore del vessel.

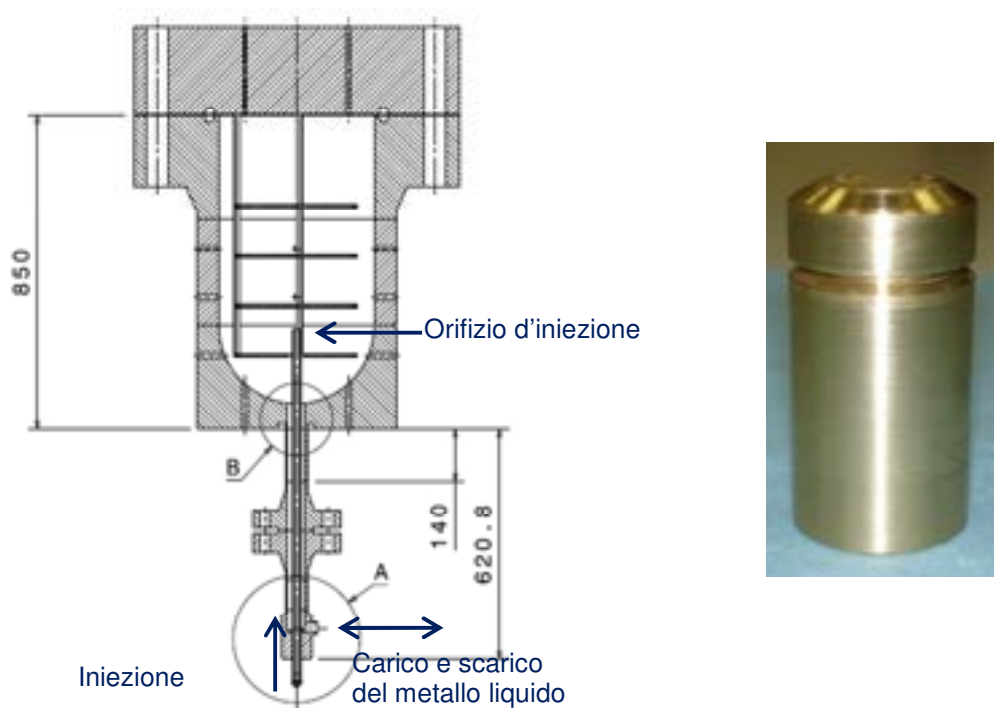


(a) Vista laterale

(b) Vista dall'alto

Figura 4.2. Sezione di prova predisposta per l'installazione di 70 termocoppie ad acquisizione veloce.

Diverse modifiche sono state implementate al fine di ottimizzare la geometria dove avviene la interazione metallo liquido acqua. La linea di connessione tra il vessel S1 e il contenitore di carico (S3) è stata intercettata in modo da confinare i fenomeni di interesse e limitare il dominio di calcolo. Una nuova sezione di prova è stata progettata e installata sulla base delle analisi effettuate da Università di Pisa (vedi sezione 3). Su tale struttura (in *Figura 4.2*) saranno installate 70 termocoppie ad acquisizione veloce che consentiranno una dettagliata mappatura della temperatura del sistema S1 e conseguentemente informazioni sul moto e sullo scambio di energia dei fluidi.



(a) Configurazione del nuovo sistema di iniezione dell'acqua

(b) Orifizio d'iniezione

Figura 4.3. Nuovo sistema di iniezione.

Anche il sistema di iniezione dell'acqua è stato completamente rinnovato. La nuova linea (*Figura 4.3*) di iniezione acqua è modificata. Una valvola ad apertura veloce è installata nella linea. Nella nuova configurazione, l'iniezione è collocata in posizione centrale, in linea con l'asse del vessel S1. La linea di iniezione acqua è, pertanto, coassiale con la linea che serve per effettuare il riempimento e lo svuotamento del metallo liquido dal vessel S1. Queste modifiche hanno richiesto modifiche al vessel S1: la penetrazione sul fondo è stata allargata per consentire l'accoppiamento con la tubazione coassiale (*Figura 4.4* e *Figura 4.5*). Un

nuovo orificio di iniezione di maggior diametro è stato progettato e installato (*Figura 4.3*) al fine di poter migliorare il controllo della pressione alla quale avviene la rottura del disco installato nell'ugello in prossimità del fondo del vessel S1.



Figura 4.4. Lavorazione del vessel S1 per montaggio bocchello e flangia inferiore della nuova linea di iniezione acqua.

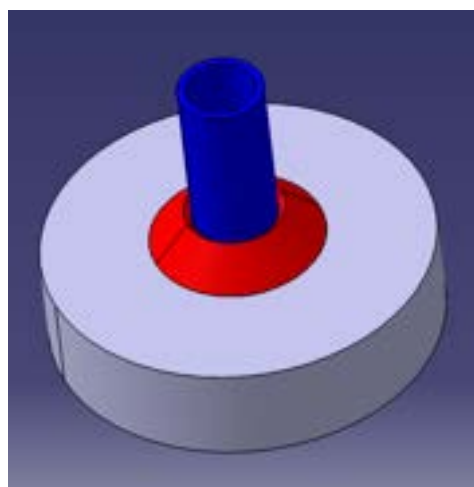



Figura 4.5. Particolare dell'accoppiamento tra la nuova linea coassiale di iniezione acqua e carico e scarico metallo liquido e il la parte inferiore del vessel S1.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 62 | 93 |


4.2 Strumentazione di LIFUS5

La strumentazione installata nell'apparecchiatura è stata rinnovata al fine di migliorare 1) la conoscenza dei parametri coinvolti nei fenomeni di interesse, attraverso misure affidabili ed accurate e, 2) il controllo dei parametri di interesse per la definizione delle condizioni iniziali e al contorno. L'investimento riguarda il vessel S1 e la tanca d'acqua S2 per i quali è stata acquisita la strumentazione di seguito riportata.

- 70 termocoppie a bassa costante di tempo per effettuare misure di temperatura ad acquisizione veloce. Queste saranno installate nel vessel S1 come riportato in *Figura 4.2* e forniranno misure a differenti posizioni radiali, azimutali e assiali;
- 7 trasduttori di pressione veloce che saranno installati
 - nel vessel S1 (uno nella parte alta in prossimità della flangia superiore e gli altri sulla parete a differenti altezze) oltreché,
 - nella parte alta della tanca S2, in modo da monitorare l'andamento della pressione di iniezione durante il transitorio.
- 15 estensimetri ad alta temperatura, che saranno installati nella parete interna del vessel S1 allo scopo di misurare la deformazione causata dal transitorio di pressione. Specifiche analisi preliminari [11] sono state effettuate per identificare il loro posizionamento (vedi sezione 2.2).
- un misuratore di portata (non ancora ordinato) con guide d'onda da inserire nella linea di iniezione. La scelta del misuratore di portata è vincolato alla posizione del punto di misura. Due sono le possibili alternative sulla base delle indagini effettuate: sulla parte orizzontale della linea di iniezione (attraverso una modifica del diametro della tubatura da ½" a 2"), sulla parte inferiore della tanca S2.

4.3 Controllo e acquisizione dati

Un nuovo sistema di controllo è stato progettato e acquisito. Il DACS (Data Acquisition and Control System) è realizzato con componentistica National Instruments (hardware and software) integrata con il sistema di acquisizione dedicato necessario per il corretto funzionamento degli estensimetri. Quest'ultimo è un sistema di misura compatto ad alta risoluzione equipaggiato di 16 canali analogici universali di ingresso. Ha specifiche caratteristiche che gli consentono la creazione di canali virtuali on-line e l'esecuzione in tempo reale di calcoli matematici in modo svincolato e indipendente dal PC a cui è connesso.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 63 | 93 |


L'architettura è divisa logicamente in due parti: 1) un sistema di controllo “real time” e il sistema di acquisizione (CTRL), e 2) un sistema di controllo e sicurezza (CISS). Quest'ultimo è un sotto-sistema separato atto alla protezione degli operatori e dell'impianto. Il CTRL è a sua volta composto da un sistema di interfaccia uomo macchina (HMI) e un sistema di acquisizione (SCADA) entrambi funzionati attraverso un sistema standard x86 PC/Workstation e sviluppati usando il software LabVIEW. Tutti i componenti comunicano attraverso la interfaccia standard Ethernet.

4.4 Sistema di riscaldamento con cavi scaldanti

L'attività [16] ha lo scopo di valutare la potenza dei cavi scaldanti da installare sull'apparecchiatura e ottimizzare lo spessore del materiale isolante di ricoprimento. Due sono i sistemi presi a riferimento e rilevanti per l'analisi: il vessel S1 e la tanca d'acqua S2.

Il modello del vessel S1 consta della struttura metallica in AISI 316 L, del metallo liquido (lega eutettica piombo bismuto) contenuto in esso e del materiale isolante. Il gas incondensabile occupa un volume delimitato dai dieci centimetri in direzione assiale sotto la flangia superiore. La potenza scaldante è uniformemente distribuita su uno spessore di 2 mm tra la superficie esterna della struttura metallica e la superficie interna del coibente. Analogamente, il modello della tanca d'acqua S2 include la struttura metallica in AISI 316 L, l'acqua e il gas incondensabile e il materiale isolante. La potenza scaldante è modellata come per il vessel S1.

Sulla base delle analisi effettuate (vedi Ref. [16]) si è trovato che una potenza installata di 10kW è sufficiente per i cavi scaldanti del vessel S1, e 3kW per la tanca d'acqua. Infine, lo spessore di isolante da installare è risultato essere di 150mm per il vessel S1 e 75mm per la tanca S2. Tali spessori consentono di mantenere la temperatura esterna del sistema sotto i 50°C ipotizzando che la salita di temperatura non sia regolata e che una potenza di 10 e 3 kW sono applicati in modo costante al vessel S1 e alla tanca S2, fino a che le temperature specificate di inizio test non sono raggiunte. I risultati sono ottenuti considerando come materiale isolante la lana di roccia 120kg/m³.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 64 | 93 |

5 ANALISI DELL'INCIDENTE SGTR NEL REATTORE ELSY

5.1 Il programma ELSY

Il progetto ELSY (*European Lead-cooled System*) è un programma di lavoro presentato ad Euratom da un consorzio europeo che si pone come obiettivo la progettazione di un sistema LFR (*Lead Fast Reactor*). Esso si inserisce all'interno della filiera dei reattori veloci refrigerati a metallo liquido pesante e in un quadro più ampio dello studio e della realizzazione dei reattori cosiddetti di quarta generazione (*GEN IV*)^[13].

L'obiettivo su citato potrà essere perseguito con specifiche soluzioni ingegneristiche che mostrino le caratteristiche favorevoli a SGTR all'utilizzo del piombo fuso. Quest'ultimo infatti, date le sue caratteristiche chimico-fisiche ed in particolar modo la sua capacità di non reagire chimicamente con l'acqua e l'aria, permette di semplificare notevolmente la configurazione del reattore, eliminando difatti quel circuito intermedio che caratterizza il layout della filiera dei reattori veloci refrigerati a sodio. I vantaggi di tale soluzione sono rappresentati da una parte dalla minimizzazione dei costi e dall'altra dalla riduzione dei rischi di incidente, aumentando l'affidabilità e la sicurezza dell'impianto.

D'altro canto, non poche problematiche sono emerse in questa fase di progettazione, richiedendo grande attenzione e analisi più accurate. Tra le varie, sicuramente di notevole importanza, è la questione legata alla mitigazione delle conseguenze che derivano da un ipotetico incidente di rottura di uno dei tubi di un generatore di vapore *Steam Generator Tube Rupture* (SGTR), preso in esame in questo lavoro di ricerca.

5.2 Caratteristiche del generatore di vapore del reattore ELSY

ELSY è un reattore veloce di "tipo a piscina", di circa 630 MWe, caratterizzato da un vessel con dimensioni relativamente contenute, ovvero un'altezza di circa 9 m e un diametro esterno di circa 13 m. In *Figura 5.1* è riportata la configurazione schematica del reattore in cui vengono illustrati i principali componenti, mentre in *Tabella 5.1* sono riportati i parametri di funzionamento. In particolare, all'interno del reattore sono previsti 8 generatori di vapore con tubi a spirale^[13].

| PARAMETRO | VALORE/TIPO |
|--|-------------------------------------|
| Potenza elettrica | 630 MWe |
| Efficienza termica | 42% |
| Refrigerante primario | Piombo puro |
| Sistema primario | Tipo a piscina, Compatto |
| Circolazione refrigerante primario | Forzata |
| Circ. refrig. prim. nel sistema DHR | Naturale+ Pony motors |
| Caduta di pressione nel sistema primario | ~ 1.5 bar |
| Temperatura di ingresso nel nocciolo | ~ 400 °C |
| Temperatura di uscita dal nocciolo | ~ 480 °C |
| Temperatura massima della camicia | ~ 550 °C |
| Combustibile | Mox e nitrati (con/senza MA) |
| Generatori di vapore | N. 8, dentro il vessel del reattore |
| Pompe primarie | N. 8, aspirano dal collettore caldo |
| Componenti del DHR | N. 4, dentro il collettore freddo |
| Componenti interni | Rimovibili |

Tabella 5.1. Parametri principali che caratterizzano il reattore ELSY.

Il generatore di vapore (GV) è il componente che richiede sicuramente una particolare attenzione poiché coinvolto nell'ipotetico incidente SGTR. Esso è immerso nel refrigerante primario, collegato alla piastra di copertura del vessel del reattore e disposto verticalmente in maniera equispaziata nella regione anulare tra il contenitore cilindrico in acciaio che racchiude il nocciolo e la superficie interna del vessel del reattore. Inoltre, il generatore di vapore funge da supporto per la pompa primaria (PP) che viene inserita assialmente dentro il mantello cilindrico interno del generatore stesso, posizionata quindi al centro dell'assemblaggio GV-PP (v. *Figura 5.1*).

Un fascio di tubi avvolti a spirale è disposto nella regione anulare delimitata dalla parete cilindrica del mantello interno e da quella del mantello esterno. La sezione di ingresso e quella di uscita di ogni tubo sono collegate, rispettivamente, al collettore di alimentazione dell'acqua e al collettore del vapore. I tubi sono disposti a due a due su piani perpendicolari all'asse del generatore di vapore, sfalsati tra piano e piano ed equispaziati tra loro.

La pompa primaria fornisce la prevalenza richiesta per spingere il refrigerante a fluire radialmente attraverso la parete porosa interna che la circonda, successivamente attraverso i tubi a spirale e, infine, attraverso la parete porosa esterna. In pratica, lo scambiatore è a flussi incrociati ed è quasi equivalente ad uno scambiatore di calore in contro-corrente, in quanto

l'acqua di alimentazione dentro uno dei diversi tubi circola dalla spirale esterna alla spirale interna, mentre il refrigerante primario fluisce nella direzione opposta dall'interno della regione anulare verso l'esterno.

Le principali caratteristiche geometriche ed i parametri operativi del GV sono riportati in *Tabella 5.2*; mentre da *Figura 5.3* a *Figura 5.4* sono riportati alcuni schemi che chiariscono anche la disposizione dei tubi.

| DATI GEOMETRICI | |
|--|---------|
| Diametro interno del guscio principale interno | 1120 mm |
| Diametro esterno del guscio principale interno | 1220 mm |
| Diametro interno del guscio guida interno | 1230 mm |
| Diametro esterno del guscio guida interno | 1240 mm |
| Diametro interno del guscio guida esterno | 2420 mm |
| Diametro esterno del guscio guida esterno | 2430 mm |
| Diametro interno del guscio principale esterno | 2440 mm |
| Diametro esterno del guscio principale esterno | 2540 mm |
| Porosità del mantello interno | 30% |
| Porosità del mantello esterno | 15% |
| Altezza del guscio principale interno | 3530 mm |
| Altezza del guscio guida interno | 2045 mm |
| Altezza del guscio principale esterno | 2745 mm |
| Altezza del guscio guida esterno | 3530 mm |
| Altezza totale del GV | 3730 mm |
| Altezza dell'avvolgimento | 2620 mm |
| Numero totale dei tubi | 218 |
| Lunghezza dei tubi | 55 |
| Diametro interno tubi | 17.2 mm |
| Diametro esterno tubi | 22.2 mm |
| Passo radiale | 24 mm |
| Passo assiale | 24 mm |
| PARAMETRI OPERATIVI | |
| Temperatura ingresso piombo | 480 °C |
| Temperatura uscita piombo | 400 °C |
| Pressione ingresso nel GV | 190 bar |
| Pressione uscita dal GV | 180 bar |
| Condizioni ingresso (acqua sottoraffreddata) | 335 °C |
| Condizioni di uscita (vapore surriscaldato) | 450 °C |

Tabella 5.2. Caratteristiche del generatore di vapore.

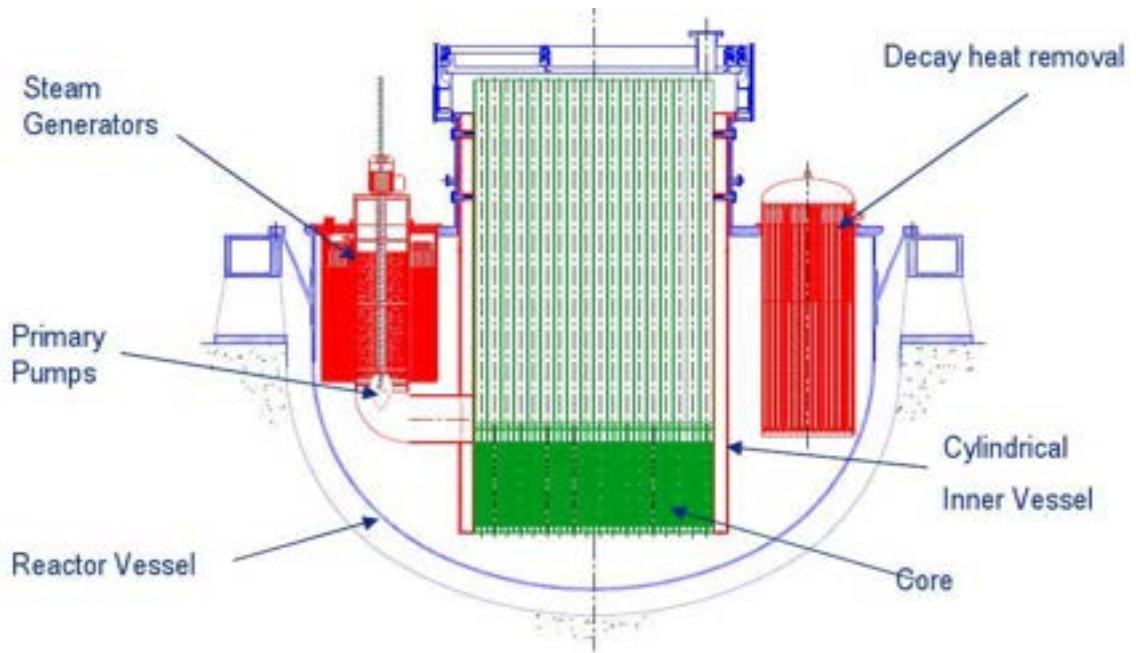


Figura 5.1. Schema del reattore ELSY.

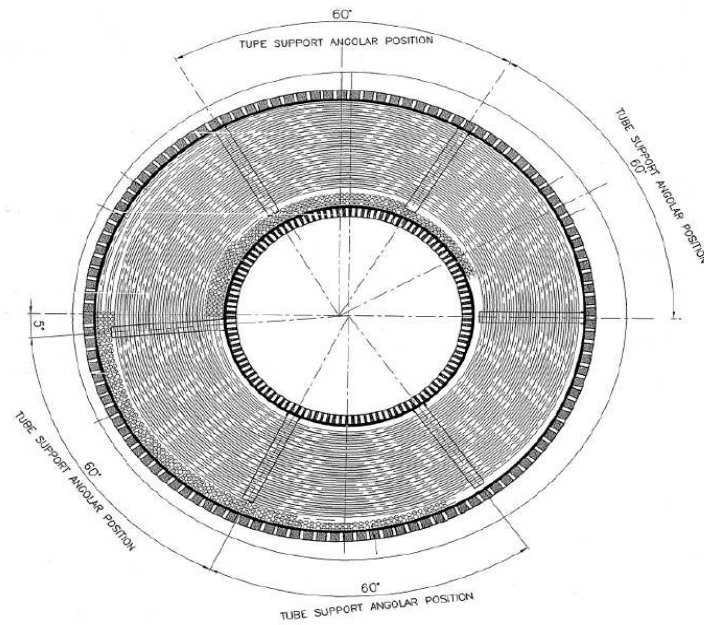


Figura 5.2. Sezione trasversale del generatore di vapore.

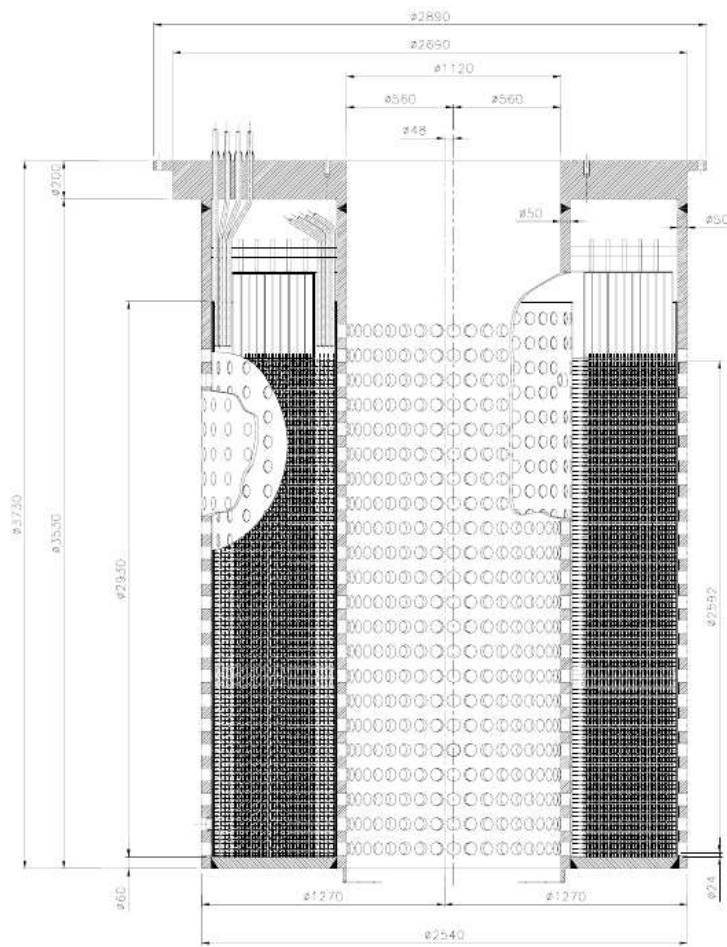


Figura 5.3. Sezione verticale del generatore di vapore.

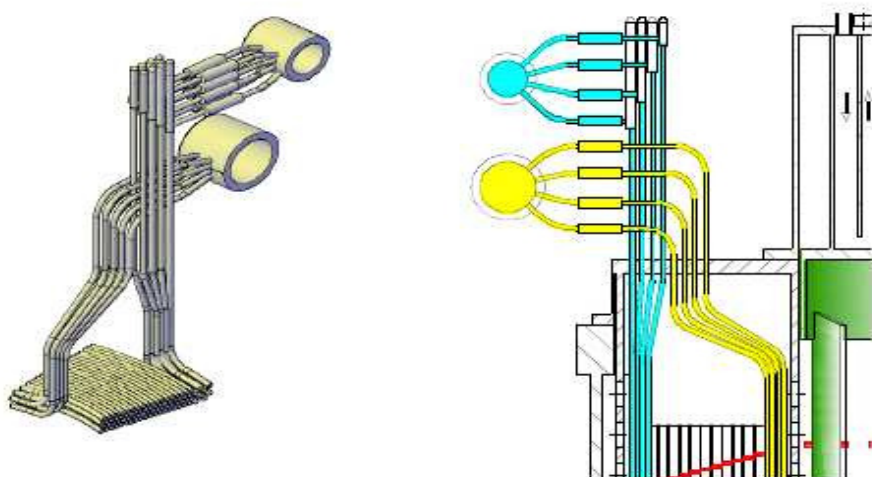



Figura 5.4. Collegamento del fascio tubiero con i collettori.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 69 | 93 |

5.3 Incidente di “Steam Generator Tube Rupture”

Nello studio delle possibili conseguenze derivanti da un incidente di tipo SGTR nel reattore ELSY è stata considerata, in particolare, la rottura a ghigliottina di una tubazione appartenente al fascio tubiero di un generatore di vapore. A seguito della rottura, una certa quantità di acqua viene rilasciata attraverso l’apertura del tubo, venendo conseguentemente a contatto con il metallo liquido. L’interazione fra acqua in fase liquida, fortemente pressurizzata e a bassa temperatura, e piombo fuso, ad alta temperatura e bassa pressione, genera una violenta vaporizzazione che potrebbe portare a possibili sovrappressioni e oscillazioni di pressione, potenzialmente pericolose per l’integrità del generatore di vapore stesso.

Per la mitigazione di queste eventuali conseguenze e la riduzione di tale pressurizzazione del circuito primario sono stati previsti alcuni accorgimenti, indicati di seguito, sia in fase di progetto che per la fase di esercizio.

In fase di progetto

- ◆ Eliminazione del rischio di rottura dei collettori dell’acqua e del vapore all’interno del circuito primario, a seguito della loro installazione all’esterno del vessel del reattore.
- ◆ Installazione su ogni tubo di una valvola di non ritorno vicino al collettore di vapore e di una valvola di isolamento, ad attivazione automatica in caso di elevata portata, vicino al collettore di mandata, questa successivamente sostituita da un Venturi-boccaglio per problemi di progettazione. Viene così impedito il flusso inverso nel lato vapore; mentre nel lato acqua o viene isolato il tubo rotto dall’entrata in funzione della valvola entro 3 s o viene limitata la portata d’acqua in uscita per mezzo del Venturi-boccaglio.
- ◆ Introduzione del sistema mantello forato a doppio guscio (principale e guida) con lo scopo di assicurare un flusso ascendente della miscela acqua-vapore- piombo creatasi durante lo SGTR, scongiurando il rischio di potenziali sovrappressioni distruttive all’interno del vessel del reattore. I fori dei due gusci guida sono disallineati rispetto a quelli dei gusci principali perciò, in caso di sovrappressione, nel volume anulare i due gusci guida dovrebbero collassare sui relativi gusci principali, bloccando il flusso in senso radiale e forzandolo verso l’alto nella regione del gas di copertura.

In fase di esercizio

- ◆ Un sistema di rivelazione delle perdite.
- ◆ Un sistema di depressurizzazione del GV.

5.4 Matrice delle simulazioni e dominio di calcolo

L'analisi del transitorio incidentale legato allo SGTR è stata effettuata utilizzando il codice di sistema SIMMER nella sua versione bidimensionale assialsimmetrica. La *Tabella 5.3* mostra le varie simulazioni eseguite con il suddetto codice di calcolo.

| Serie | Diametro dell'iniettore | Condizioni particolari | Simulazione |
|--------------|--------------------------------|---|--------------------|
| A | 18 mm | Referimento | A1 |
| | 18 mm | Porosità del mantello esterno | A2 |
| | 18 mm | Venturi-boccaglio nell'iniettore | A3 |
| | 18 mm | Tubo vicino all'apertura dell'iniettore | A4 |
| | 18 mm | Griglia nel plenum del GV | A5 |
| B | 24 mm | Referimento | B1 |
| | 24 mm | Porosità del mantello esterno | B2 |
| | 24 mm | Venturi-boccaglio nell'iniettore | B3 |
| | 24 mm | Tubo vicino all'apertura dell'iniettore | B4 |
| | 24 mm | Griglia nel plenum del GV | B5 |

Tabella 5.3. Matrice delle simulazioni.

Esse sono raggruppate principalmente in due serie secondo la grandezza del diametro della sezione del tubo di iniezione dell'acqua nella regione contenente piombo fuso.

Nelle simulazioni della serie di tipo A la fuoriuscita dell'acqua nel metallo liquido, a seguito della rottura a ghigliottina di un tubo a spirale, viene ipotizzata avvenire dalla sola bocca del tratto di tubo collegato con il collettore di mandata, in quanto viene trascurato il flusso uscente dalla linea vapore. Questo, difatti, viene bloccato dall'entrata in funzione della valvola di controllo (non ritorno).

Nella serie di simulazioni di tipo B, invece, nel dominio di calcolo è stata considerata una sezione di passaggio dell'iniettore pari a due volte l'area del tubo a spirale, equivalente alla somma delle aree delle due bocche derivanti dalla rottura a ghigliottina; tale situazione

potrebbe tener conto di un evento in cui non intervenga la valvola. Inoltre, in ciascuna serie di simulazioni, in aggiunta ad una configurazione di riferimento, sono stati considerati gli effetti di alcune parametri di interesse, quali:

- la presenza della porosità nel mantello esterno del GV che rappresenta la non perfetta aderenza dei due gusci, principale e guida;
- l'inserimento del Venturi-boccaglio nel tubo di iniezione dell'acqua;
- la presenza di un tubo in prossimità della sezione di uscita dell'acqua dall'iniettore;
- la presenza della griglia nella parte superiore del GV che simula le strutture interne nell'upper plenum dello stesso..

Ciascuna delle cinque simulazioni, condotte per ogni serie, adotta un proprio dominio di calcolo. Essi sono raffigurati nella *Figura 5.5* e *Figura 5.6*.

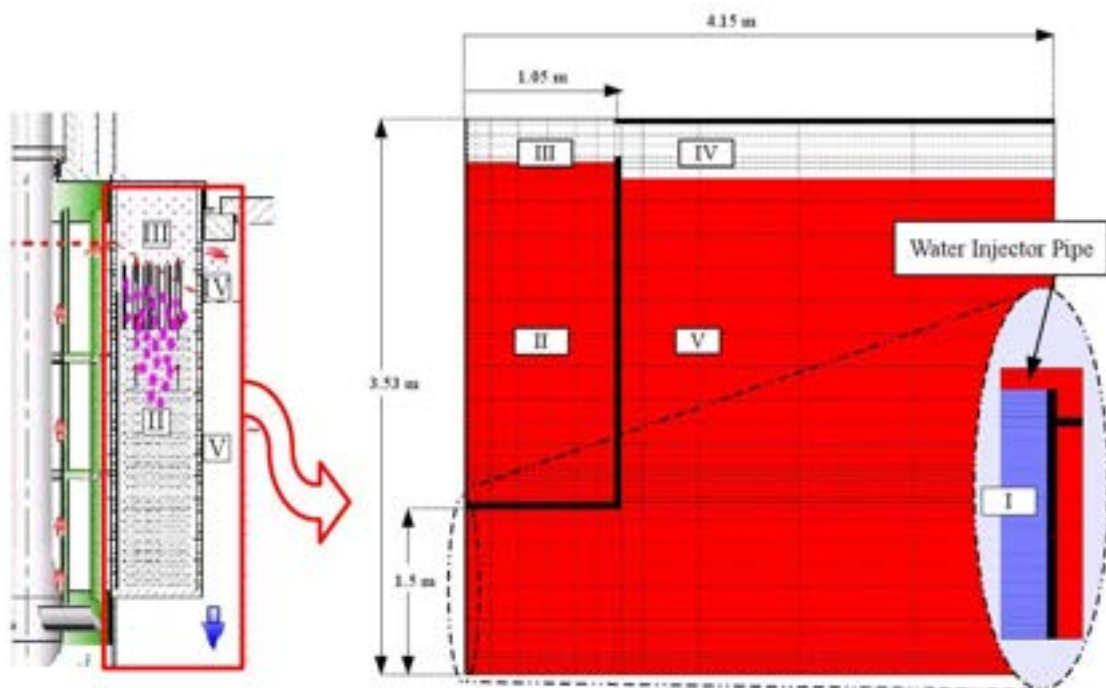


Figura 5.5. Dominio di calcolo del GV per la simulazione di riferimento.

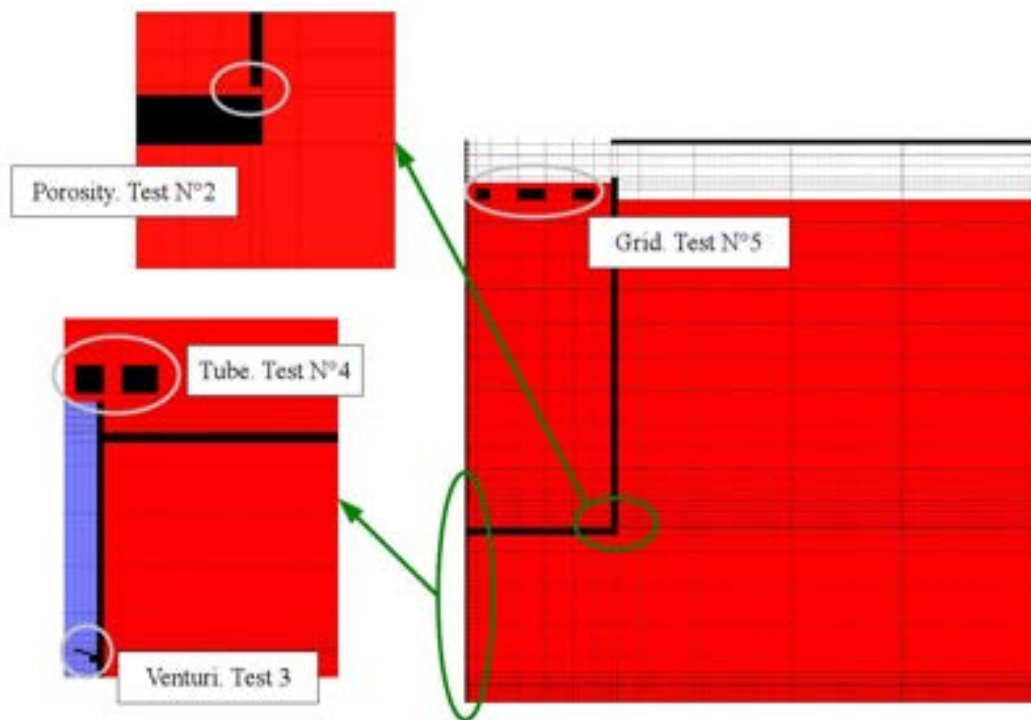



Figura 5.6. Domini geometrici relativi alle diverse condizioni particolari prese in esame.

Si tratta di domini bidimensionali ed assialsimmetrici, realizzati in coordinate cilindriche, in cui si possono distinguere cinque regioni per diverse combinazioni di componenti e condizioni iniziali di temperatura e pressione, indicate in *Tabella 5.4* e mostrate in *Figura 5.5*. La regione I rappresenta il tubo di iniezione posizionato lungo l'asse per questioni di simmetria, dal quale fuoriesce l'acqua del circuito secondario, le regioni II e III costituiscono la parte interna del generatore di vapore, mentre le regioni IV e V la parte esterna. Queste ultime svolgono la funzione di volume di espansione (VE). Come gas di copertura delle regioni III e IV è stato usato l'argon.

| Regione | Contenuto iniziale | Volume (lunghezza) | Temperatura [°C] | Pressione [bar] |
|---------|--------------------|---------------------|------------------|-----------------|
| I | Iniettore d'acqua | (1.76 m) | 335 | 190 |
| II | Piombo nel GV | 10.7 m ³ | 450 | 1-4 |
| III | Argon nel GV | 1.35 m ³ | 450 | 1 |
| IV | Argon nel VE | 25.2 m ³ | 450 | 1 |
| V | Piombo nel VE | 231 m ³ | 400 | 1-6 |

Tabella 5.4. Regioni del dominio SIMMER.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 73 | 93 |

La discretizzazione spaziale del dominio prevede 20 celle radiali e 40 celle assiali di ampiezza variabile. Le dimensioni delle regioni II e III, relative al generatore di vapore e indicate in *Figura 5.5*, corrispondono all'altezza e al raggio reali del componente, formato da un reticolo che conta globalmente 390 celle, prese da 1 a 15 in senso radiale e da 15 a 40 in senso assiale. Nella regione II, dato che lo spazio occupato dal fascio tubiero è stato riempito con il piombo, il volume del metallo liquido interno al GV risulta essere circa il doppio di quello reale. In tutte le simulazioni, la lunghezza del tubo di iniezione, che costituisce la regione I, è pari a 1.76 m e comprende le prime 19 celle assiali, mentre il raggio è costituito dalle prime 4 celle radiali.


L'apertura che mette in comunicazione la regione III con la IV, ovvero l'interno del GV con il volume di espansione, ha un'altezza pari a 300 mm, contando 3 celle assiali e un'area di passaggio complessiva pari a circa 2 m².

In tutte le simulazioni si è tenuto conto delle perdite di carico concentrate che si trovano lungo la tubazione d'acqua introducendo opportuni coefficienti di orifizio nel tubo di iniezione. Essi rappresentano sequenzialmente la perdita di carico in entrata dal collettore al fascio tubiero, le due curve presenti lungo il tubo che va dal collettore all'ingresso del GV, infine la perdita in uscita in prossimità della rottura della tubazione. Ulteriori perdite di carico concentrate sono state aggiunte in prossimità della gola del Venturi-boccaglio nella simulazione N. 3.

Tutte le simulazioni sono state eseguite per una durata del transitorio di 3 s poiché, trascorso questo intervallo di tempo, le valvole del lato acqua dovrebbero intervenire e isolare la tubazione rotta. Anche nel test 3, in cui la valvola di isolamento viene rimpiazzata dal Venturi-boccaglio, è stato considerato il medesimo intervallo di tempo di 3 s.

5.5 Analisi dei risultati

I risultati delle simulazioni verranno presentati in questa sezione analizzando inizialmente la portata d'acqua rilasciata dall'iniettore nel metallo liquido, importante per identificare il grado di pressurizzazione subito dal generatore di vapore. Questo, a sua volta, sarà responsabile dell'energia cinetica acquisita dal piombo che verrà spinto verso la parte superiore del GV. Raggiunta la regione del gas di copertura, l'energia cinetica del piombo determinerà la

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 74 | 93 |

pressurizzazione dell'argon, quindi un impulso di pressione sulla parete superiore del GV ed, infine, il lavoro di compressione subito dal gas.

5.5.1 Portata massica di acqua uscente dall'iniettore

La *Figura 5.7* e *Figura 5.8* riportano gli andamenti temporali della portata d'acqua di iniezione. Nel primo grafico vi è il confronto tra la portata che fuoriesce da un'area di passaggio singola e una doppia; mentre il secondo evidenzia l'importante effetto prodotto dall'inserimento del Venturi-boccaglio all'interno dell'iniettore. In quest'ultimo caso infatti la portata viene contenuta a valori che non superano i 3 kg/s contro i circa 20 kg/s delle altre simulazioni del gruppo A.

La limitazione della portata ad un dato valore è dovuta al fatto che il flusso d'acqua raggiunge le condizioni di flusso critico all'interno del tubo di iniezione. Nel caso A3, in cui è presente il Venturi-boccaglio, tale condizione viene raggiunta nella sezione ristretta che ha un'area relativamente minore di quella della sezione dell'iniettore stesso ed è rappresentata nel dominio di calcolo dalla cella (1,5). In questa regione, come emerge in *Figura 5.9*, il flusso d'acqua diventa massimo poiché viene raggiunta la velocità del suono.

L'andamento della velocità dell'acqua nella cella (1,5) è illustrato in *Figura 5.10*. Tale velocità è stata anche stimata analiticamente a circa 130 m/s secondo il modello di *Fauske* [8], dove si è tenuto conto delle perdite di carico concentrate (all'incirca di 14 bar) presenti tra le condizioni di stagnazione della parte iniziale dell'iniettore (190 bar e 335 °C) e quelle della gola del Venturi (pressione di 104 bar e temperatura del vapore e dell'acqua rispettivamente pari a 305 e 335 °C). Gli andamenti della portata illustrati nei grafici precedenti restano pressoché stabili per tutto il transitorio, in tutte le simulazioni, e raggiungono rapidamente i valori su citati in alcuni centesimi di secondo, a testimonianza della brusca vaporizzazione dell'acqua pressurizzata che viene in contatto con il metallo liquido ad alta temperatura e a bassa pressione.

In particolare, nella prova A3, il valore della portata segue il normale andamento solo nei primissimi istanti del transitorio, poiché, come in tutte le simulazioni, la vaporizzazione ha inizio in prossimità dell'apertura dell'iniettore. Successivamente, a mano a mano che la perturbazione si propaga all'interno dell'iniettore, giungendo ed includendo l'orifizio del

Venturi poco prima di 0.01 s, vengono raggiunte le condizioni di portata critica e il flusso d'acqua uscente dall'iniettore crolla rapidamente fino al valore di circa 2.3 kg/s e con una frazione di liquido abbondantemente più bassa, circa 100 volte, rispetto a quella delle altre simulazioni (*Figura 5.11*). È interessante constatare quanto appena detto confrontando le *Figura 5.8* e *Figura 5.11* ed analizzando le *Figura 5.12* e *Figura 5.13*. Difatti, la vaporizzazione raggiunge la gola e investe tutte le celle che vi si trovano nel mezzo, in senso assiale dalla 5 alla 19, mentre nelle altre simulazioni il fenomeno interessa principalmente la parte estrema dell'iniettore, ovvero il tratto che penetra nel generatore di vapore.

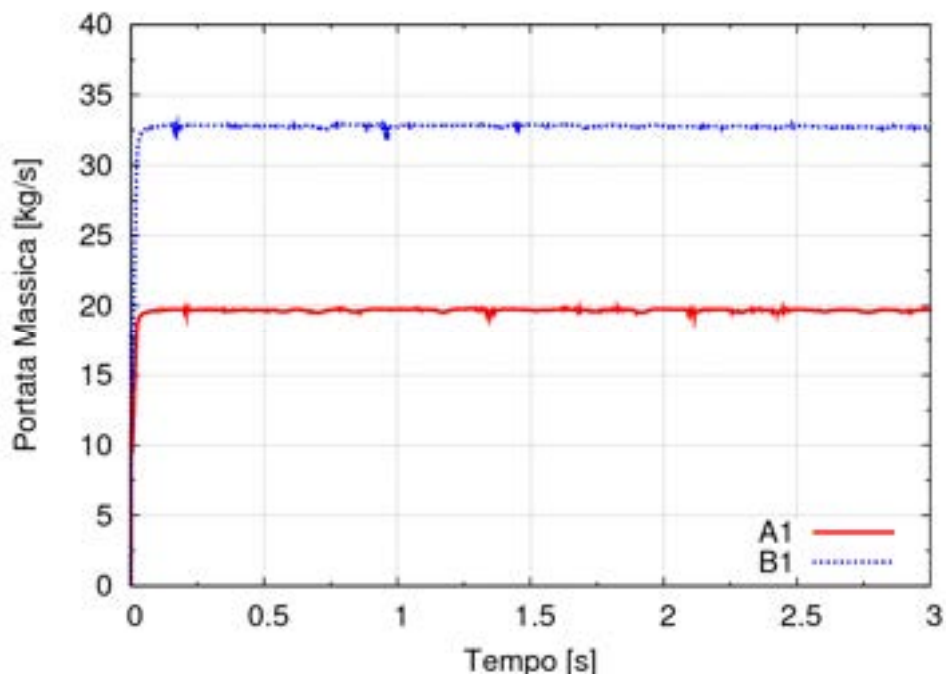


Figura 5.7. Confronto tra gli andamenti della portata d'acqua delle serie A e B.

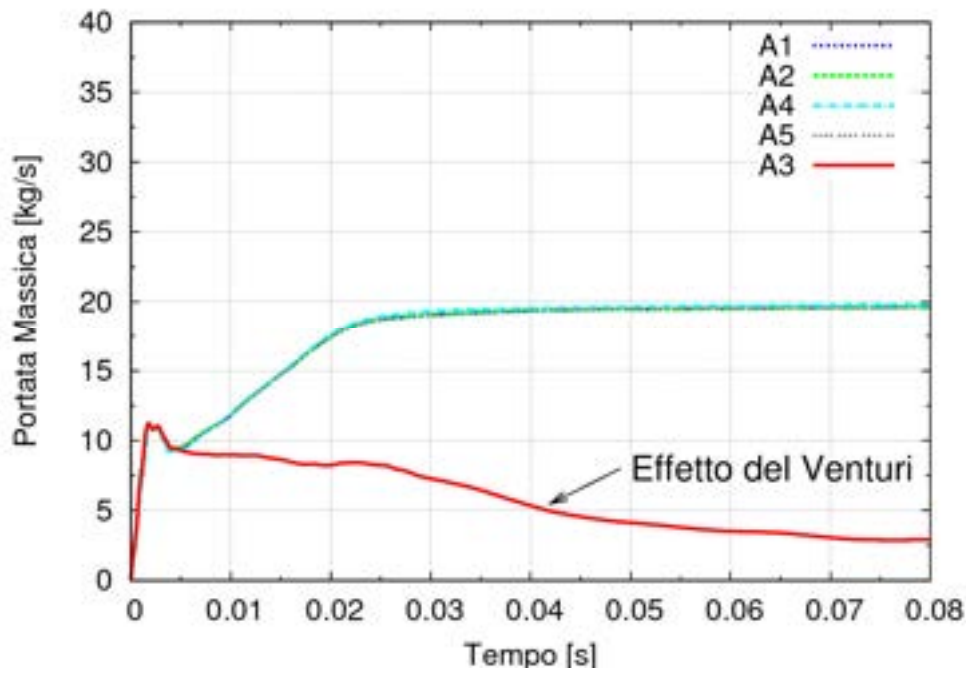


Figura 5.8. Andamento temporale della portata d'acqua delle simulazioni di tipo A.

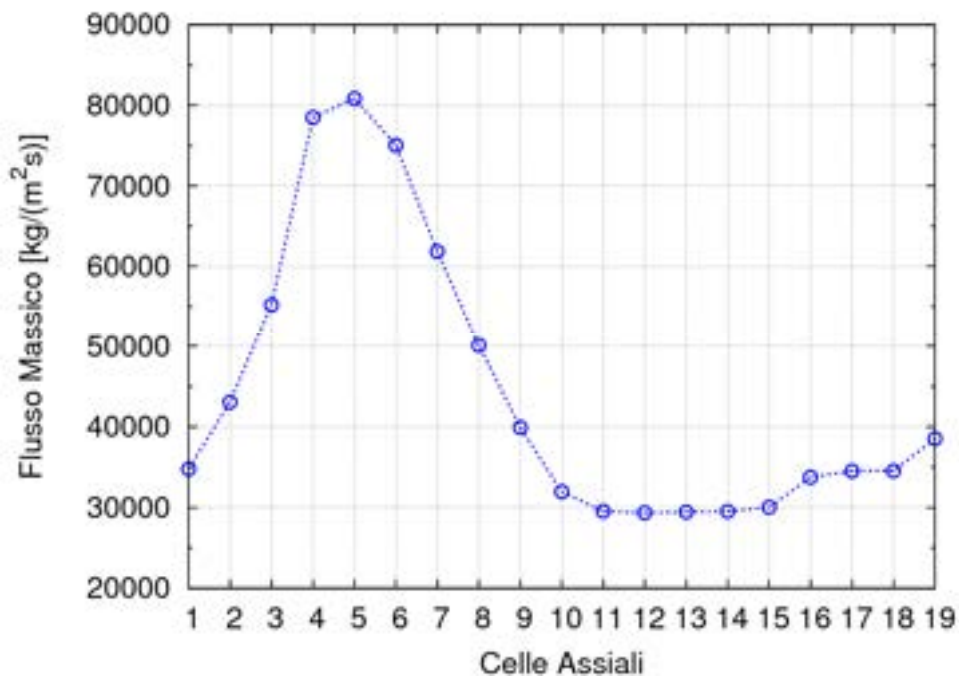


Figura 5.9. Flusso massico d'acqua lungo l'iniettore.

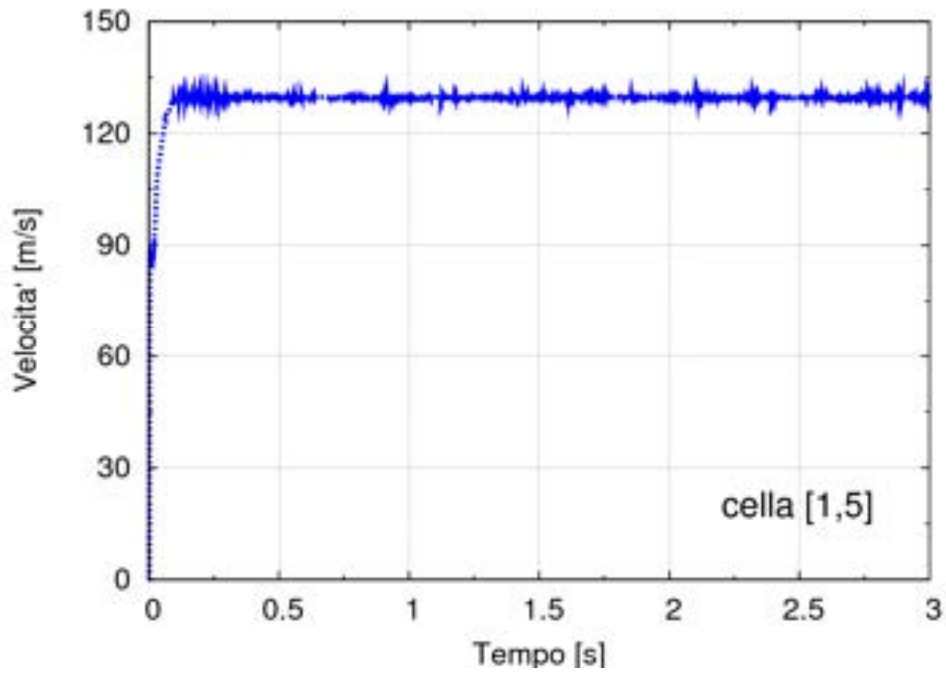


Figura 5.10. Velocità nella gola del Venturi-boccaglio.

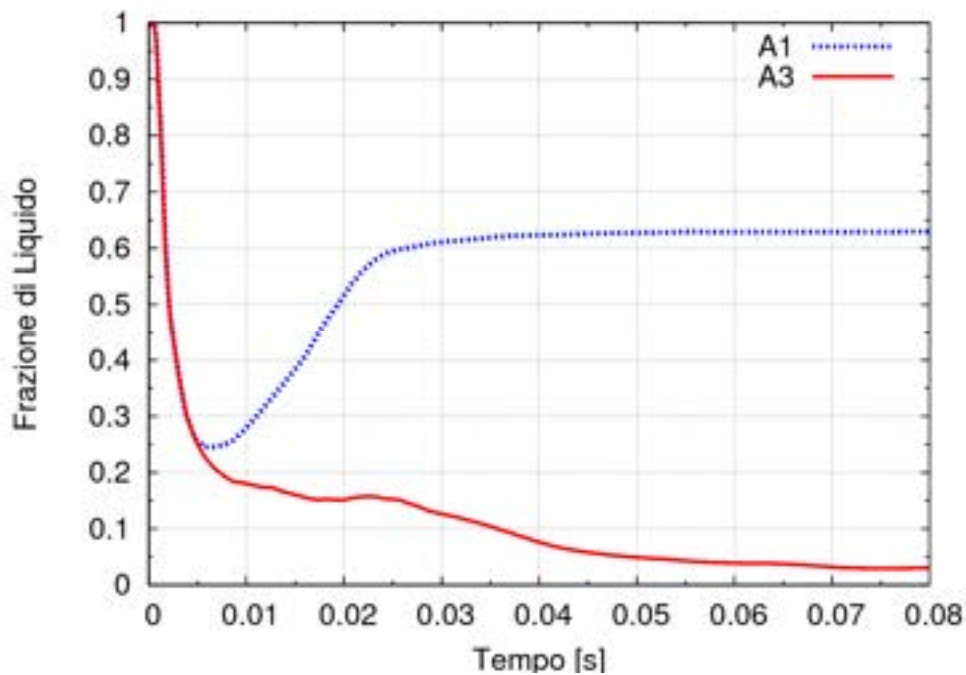


Figura 5.11. Andamento temporale della frazione di liquido all'uscita dell'iniettore.

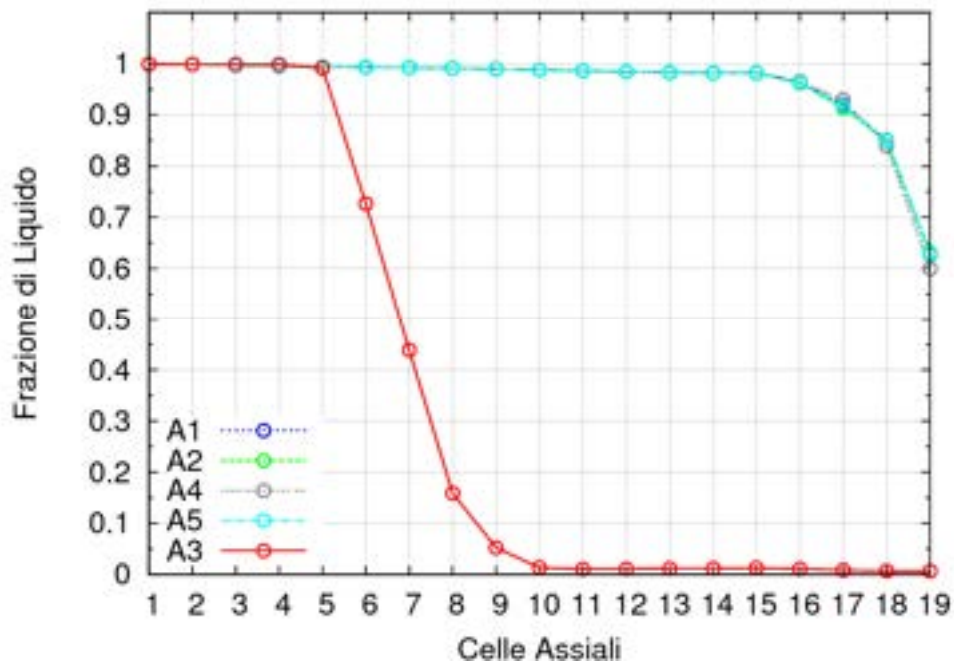


Figura 5.12. Frazione di liquido lungo tutto l'iniettore.

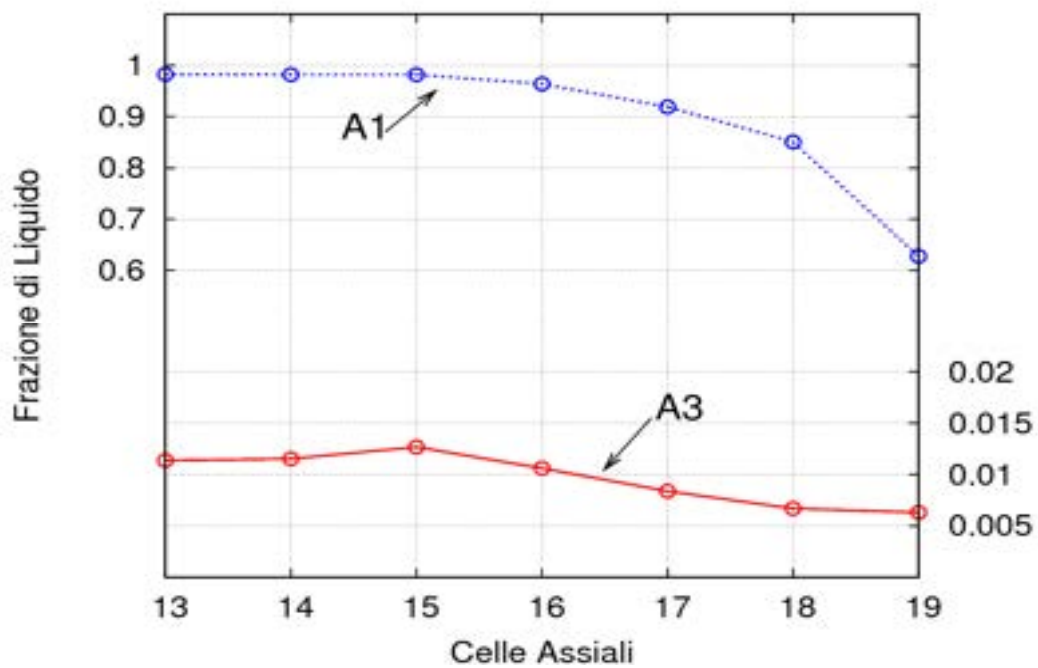


Figura 5.13. Frazione di liquido nel tratto dell'iniettore interno al GV.

5.5.2 Pressurizzazione del GV

Il discorso su articolato circa gli effetti del Venturi-boccaglio trova un'intuibile validità anche in *Figura 5.14*. È chiaramente evidente l'importante caduta di pressione esistente a cavallo della gola del Venturi, la quale consente il raggiungimento delle condizioni di flusso critico in questa regione. In tutte le altre prove invece sono evidenti le sole e comuni perdite di carico concentrate dovute ad un'iniziale perdita in ingresso e alle due curve a 90°.

In definitiva, il flusso d'acqua bifase si riversa nel metallo liquido con una pressione pari a circa 100 bar nella prova A1, contro i quasi 20 bar del test A3, provocando una rapida pressurizzazione nel generatore di vapore.

In ogni caso, secondo quanto emerge dai grafici di *Figura 5.15* e *Figura 5.16*, nella cella appena superiore all'apertura dell'iniettore, ovvero nella (1,20), l'andamento di pressione non supera il valore di 20 bar in tutte le simulazioni della serie A e per la maggior parte del transitorio. Solo nei primissimi istanti, l'evidente picco iniziale raggiunge circa 130 bar.

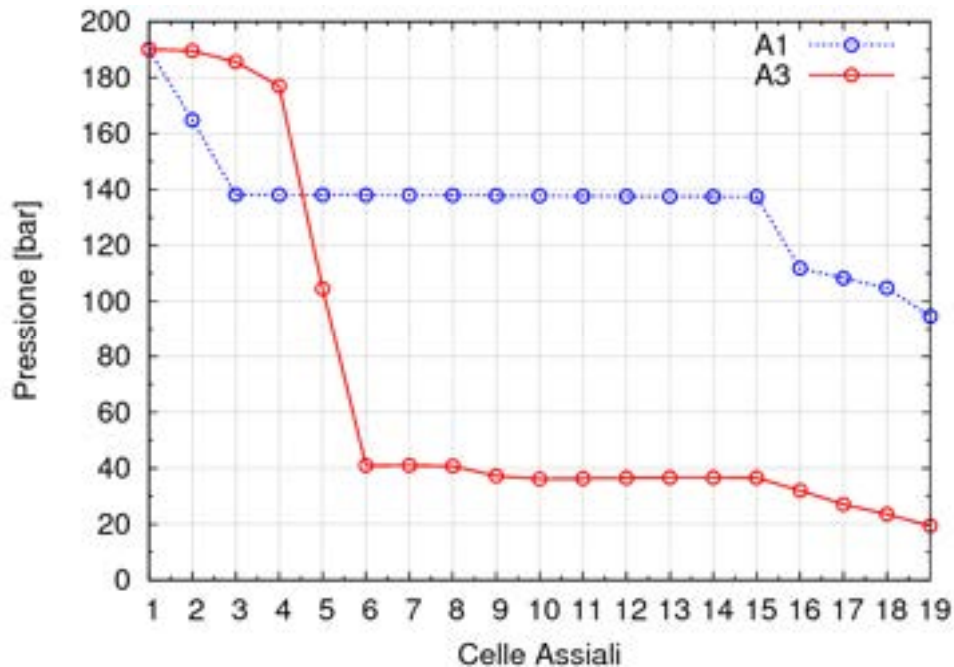


Figura 5.14. Andamento della pressione lungo il tubo di iniezione dell'acqua.

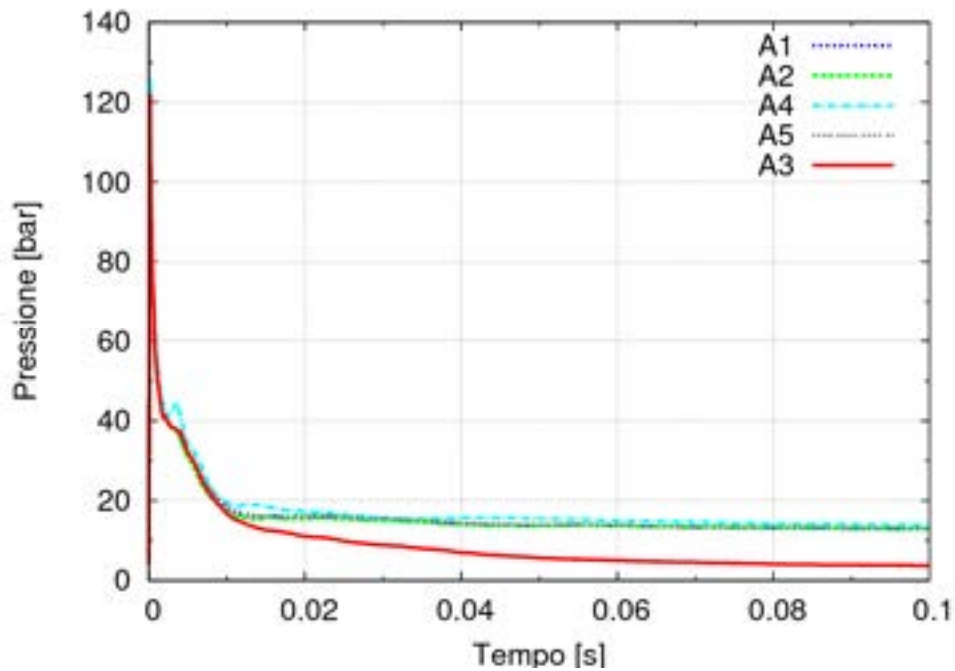


Figura 5.15. Andamento temporale della pressione all'uscita dell'iniettore per tutte le prove della serie A.

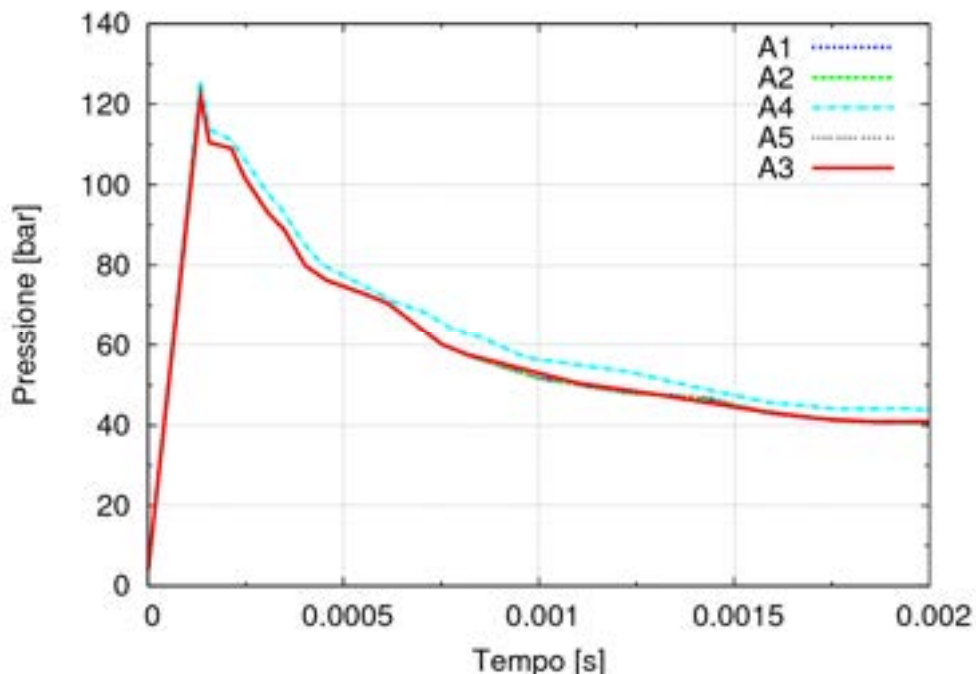


Figura 5.16. Ingrandimento del picco di pressurizzazione.

E' interessante notare dai medesimi grafici che la presenza del Venturi non ha praticamente effetto sul picco iniziale. Infatti, tra il test A3 e gli altri vi è uno scarto minimo che non supera

i 10 bar. La *Figura 5.17*, invece, rappresenta il confronto dell'andamento temporale della pressione tra le due serie. Essa è prevedibilmente più elevata nel caso B1 e denota nei primissimi istanti un picco iniziale che supera di 20 bar quello della simulazione A1.

In ogni modo, spostandosi nel dominio lungo la fila di celle coassiali con l'iniettore fino alla parete superiore del GV, si assiste ad un sostanziale crollo del picco iniziale di pressione, verificatosi in particolar modo nel minimo passaggio dalla cella (1,20) alla cella superiore (1,21), secondo i risultati illustrati nelle *Figura 5.18* e *Figura 5.19*.

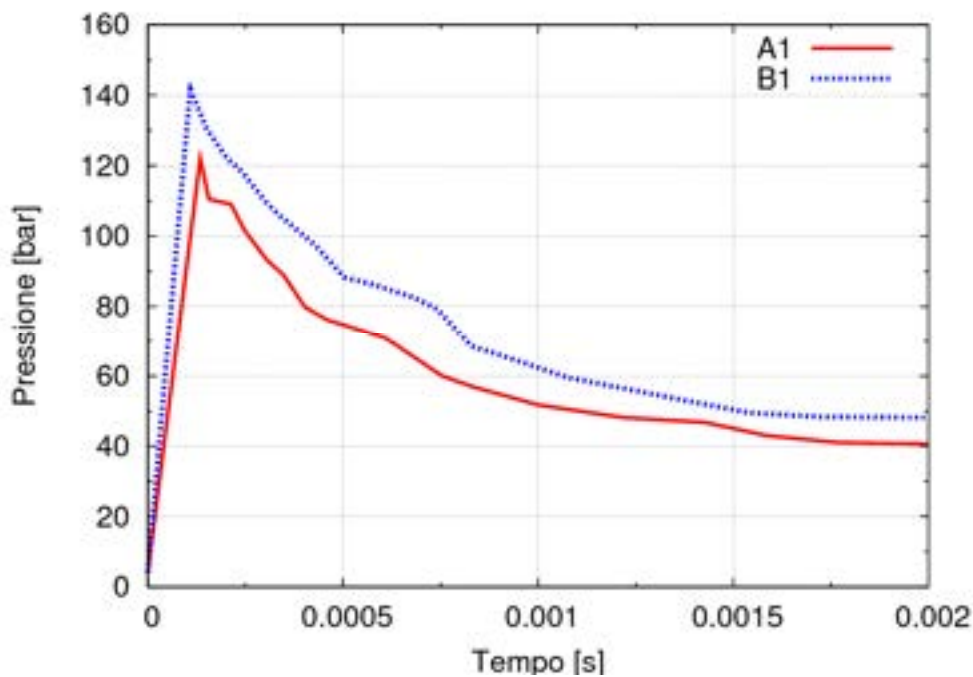


Figura 5.17. Confronto tra l'andamento della pressione del caso A1 e del caso B1 calcolata all'uscita dell'iniettore.

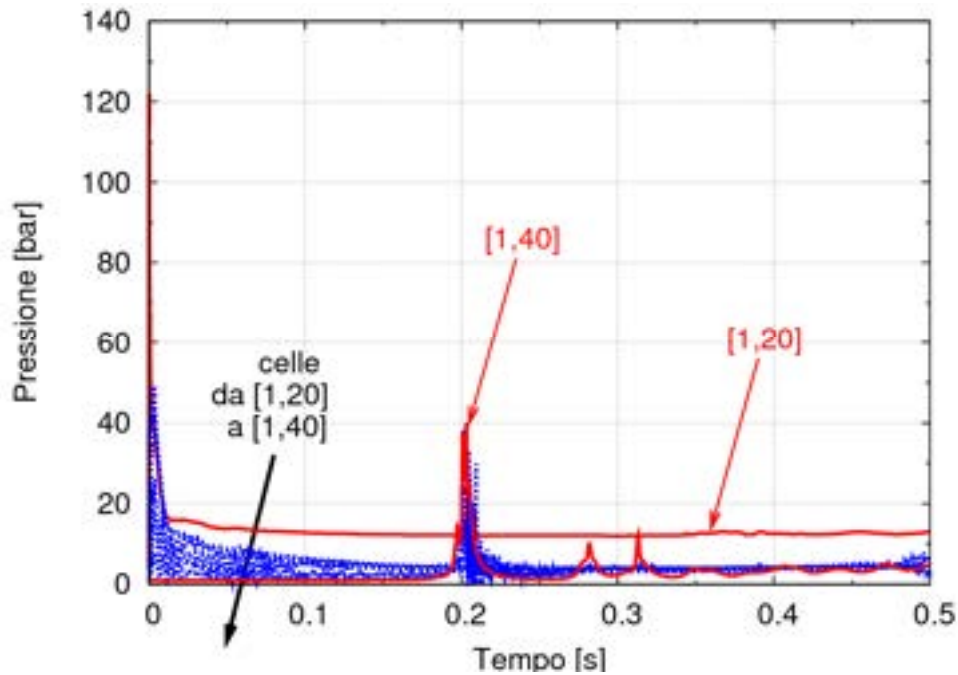


Figura 5.18. Andamento della pressione lungo le celle coassiali all'iniettore (test A1).

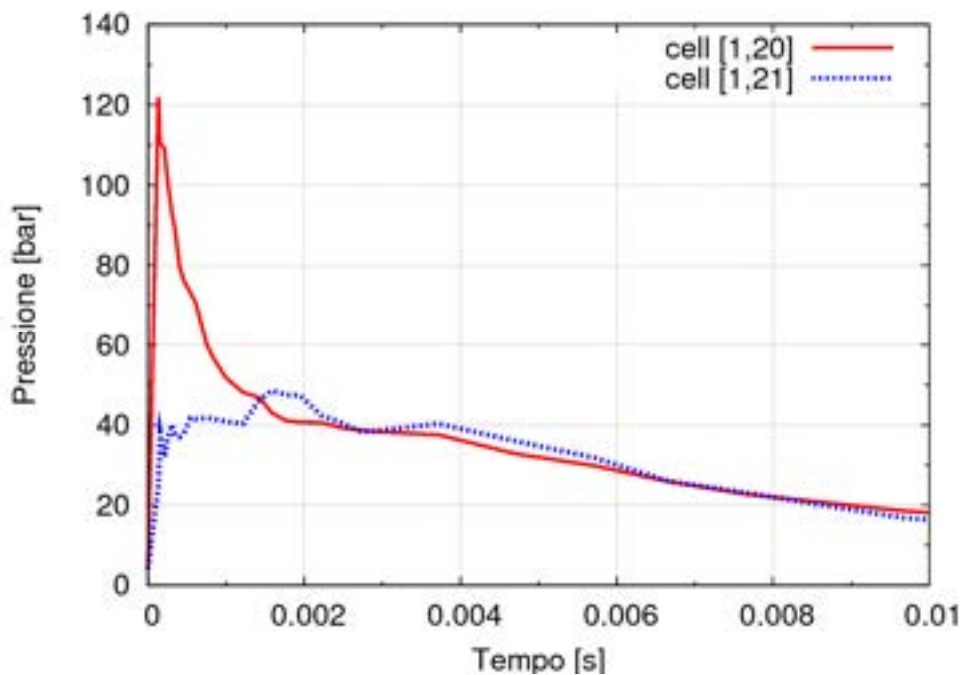


Figura 5.19. Ingrandimento del picco di perturbazione in due celle coassiali con l'iniettore (test A1).

5.5.3 Energia cinetica del piombo

Effetto immediato della pressurizzazione è l'isolamento del generatore di vapore creato dal sistema del mantello a doppio guscio, di cui lo stesso è fornito per ragioni di sicurezza. In questa situazione, per la pressione derivante dall'iniettore, la miscela piombo-acqua-vapore

viene sospinta verso l'alto nella regione del gas di copertura, dove l'apertura di 30 cm mette in comunicazione l'interno del GV con il volume di espansione esterno.

L'andamento temporale dell'energia cinetica acquistata dal piombo è mostrata nelle *Figura 5.20 e Figura 5.21*. Dal primo grafico emerge in sostanza una significativa differenza solo nel valore del primo picco che nel caso della serie B risulta essere quasi il doppio della serie A. Per il resto del transitorio i due andamenti seguono un'evoluzione temporale paragonabile. Nel secondo grafico, invece, è chiaramente visibile il notevole effetto di smorzamento del picco iniziale prodotto dall'inserimento del Venturi nell'iniettore. Per il resto del transitorio, come nel caso precedente, non vi sono differenze sostanziali.

Un ultimo dettaglio interessante deriva dal confronto degli andamenti temporali della pressione del GV e dell'energia cinetica, conseguentemente acquisita dal piombo, mostrati rispettivamente nelle *Figura 5.15 e Figura 5.21*. Esiste in pratica un ritardo di circa 0.2 s nella propagazione della perturbazione del picco di pressione, dall'acqua uscente dall'iniettore al piombo interno al GV.

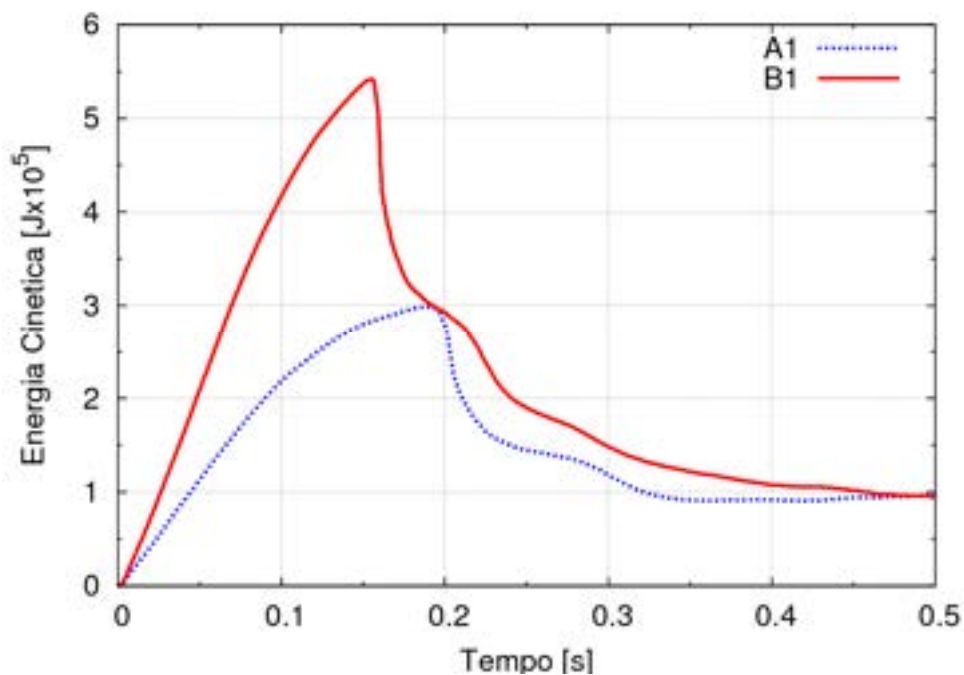


Figura 5.20. Confronto tra gli andamenti di energia cinetica del piombo delle due serie A e B e tra le varie condizioni della serie A.

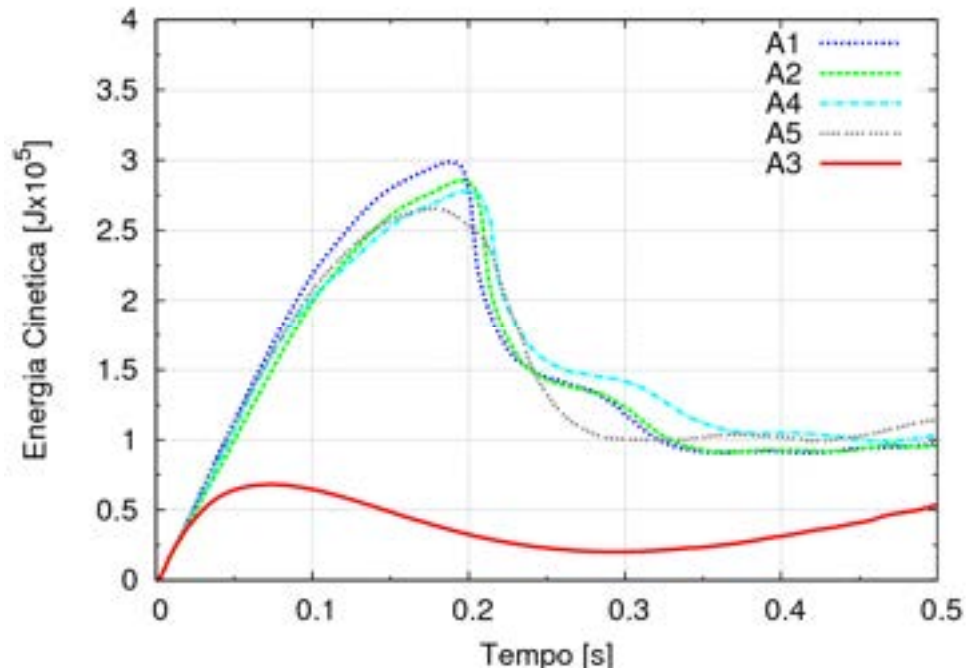


Figura 5.21. Andamento dell'energia cinetica del piombo per le differenti simulazioni della A.

5.5.4 Impulso di pressione sulla parete superiore del GV

Nella fase in cui il piombo viene accelerato e spinto verso l'argon di copertura fino a toccare la parete superiore del generatore di vapore (celle (1-14,40)), il metallo liquido acquista una tale inerzia da originare un secondo picco di pressione visibile nella *Figura 5.18* e stimato precisamente nella cella (1,40) intorno ai soliti 0.2 s, anche se in misura molto modesta, è stato osservato già a partire della cella (1,30).

La *Figura 5.22*, *Figura 5.23* e *Figura 5.24* ritraggono le prime frazioni di secondo degli andamenti temporali di pressione, per meglio evidenziare il confronto esistente tra i picchi delle varie simulazioni. In *Figura 5.22* si evidenzia il picco precedentemente menzionato di quasi 40 bar appartenente alla serie A, quasi tre volte più piccolo e con un marginale ritardo di circa 0.05 s rispetto a quello della serie B. In *Figura 5.23*, invece, si riporta il confronto tra tutte le simulazioni del gruppo A. Nel primo grafico, il picco ottenuto nel test di riferimento A1 risulta essere conservativamente e comunque modestamente il più alto ed in anticipo rispetto a tutti gli altri per l'assenza di condizioni particolari che eventualmente ostacolano la propagazione dell'onda di pressione. E' importante specificare a questo punto che i suddetti

valori di pressione sono compresi in un intorno approssimativamente di 10 bar e raggiungono mediamente i 35 bar.

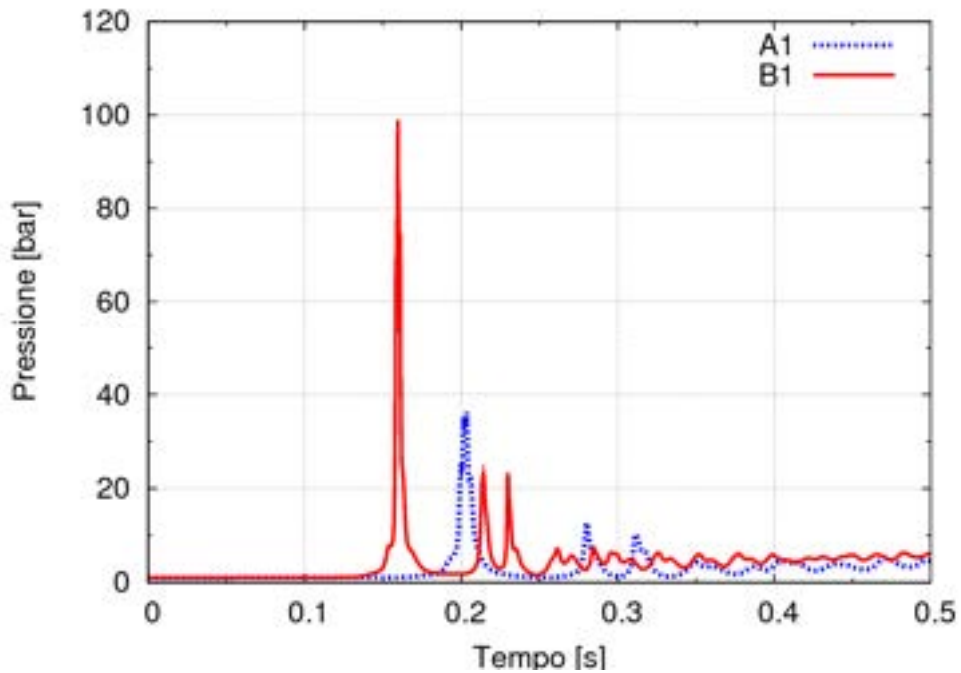


Figura 5.22. Confronto tra i picchi di pressione valutati nelle serie A e B.

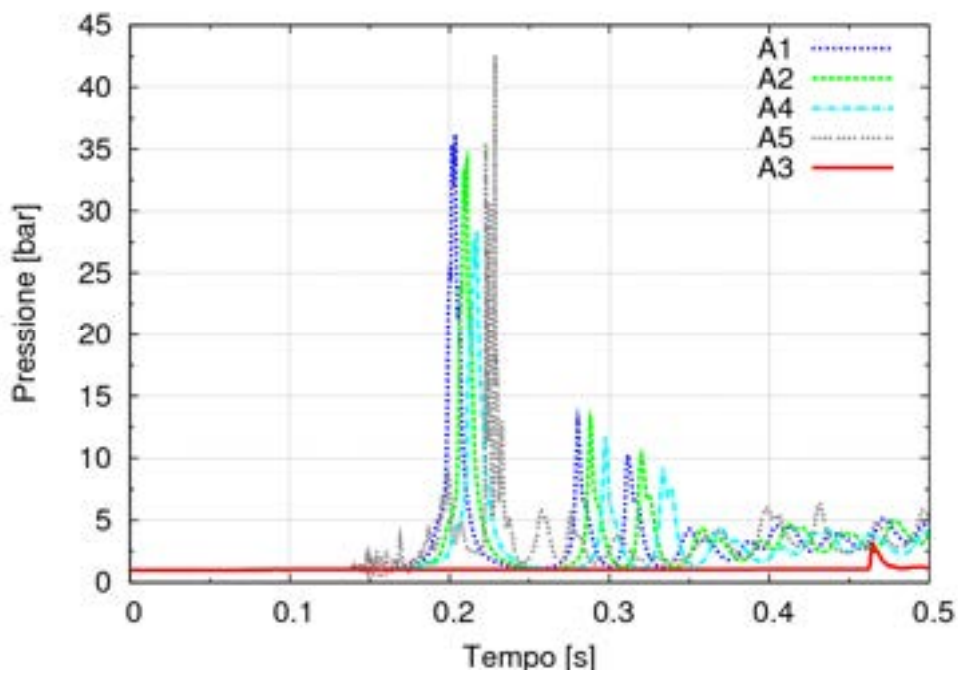


Figura 5.23. Confronto tra gli andamenti di pressione relativi ai test della serie A.

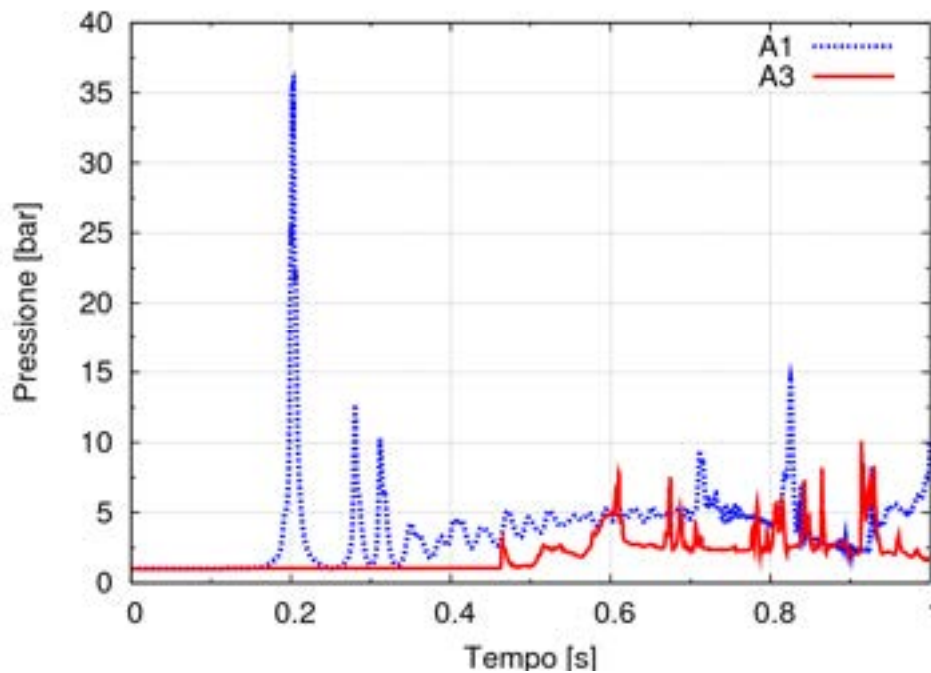


Figura 5.24. Confronto tra gli andamenti di pressione relativi ai test A1 e A3.

5.5.5 Lavoro di compressione subito dal gas di copertura

Oltre al secondo picco di pressione, una conseguenza del moto ascendente del piombo è rappresentata dal lavoro di compressione subito dall'argon di copertura, di cui la *Figura 5.25* e *Figura 5.26* ne illustrano gli andamenti, indicando un confronto rispettivamente tra le due serie e tra le diverse condizioni delle prove della serie A. Come osservato nelle analisi precedenti, il lavoro di compressione stimato nelle prove B risulta essere sempre maggiore di quello della serie A, così come nel test A3 appare più debole rispetto agli altri. In questo caso però le differenze tra gli andamenti sono meno marcati e i picchi della perturbazione si delineano mediamente intorno agli 0.8 s, abbondantemente in ritardo rispetto ai precedenti 0.2 s, sintomo eventualmente del fatto che l'azione smorzante del gas di copertura e dell'intero volume di espansione è stata ormai avviata.

E' importante notare che l'intervallo di tempo scelto nella rappresentazione delle curve è stato appositamente limitato a 1 s perché, dopo questo punto, il gas di copertura non è più argon, ma diventa una miscela di vapore e argon. Così il volume di argon diminuisce in maniera vertiginosa intorno agli 0.8 s, fino grossomodo ad annullarsi in quasi tutte le simulazioni. E'

facilmente comprensibile come in tali condizioni il lavoro di compressione subito dal gas perfetto perda di significato. *Figura 5.27* mostra l'andamento del volume di argon delle simulazioni della serie A.

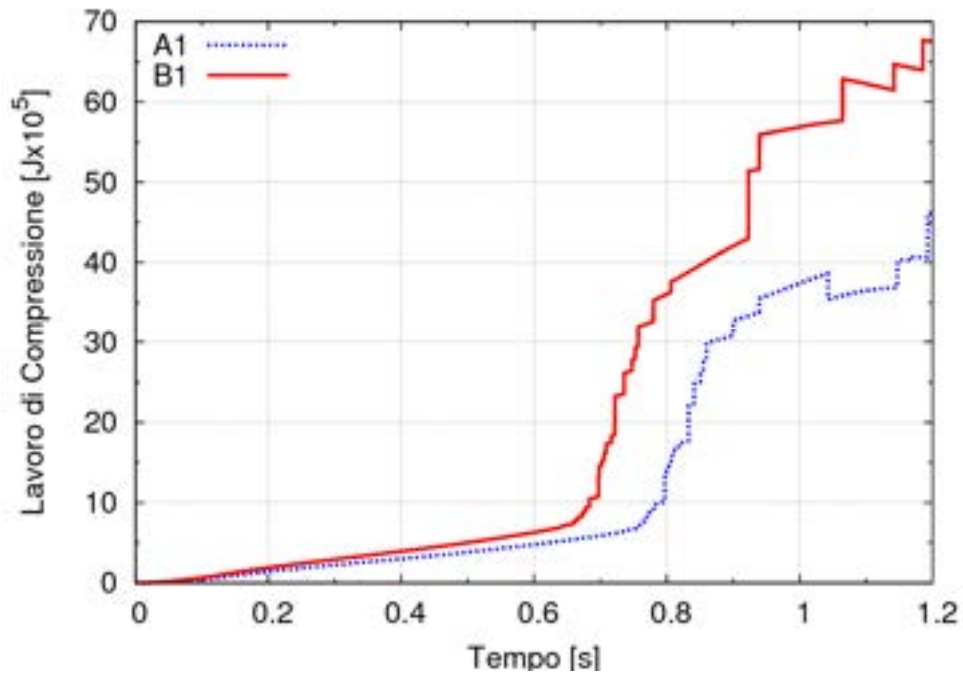


Figura 5.25. Lavoro di compressione calcolato per la serie A e B.

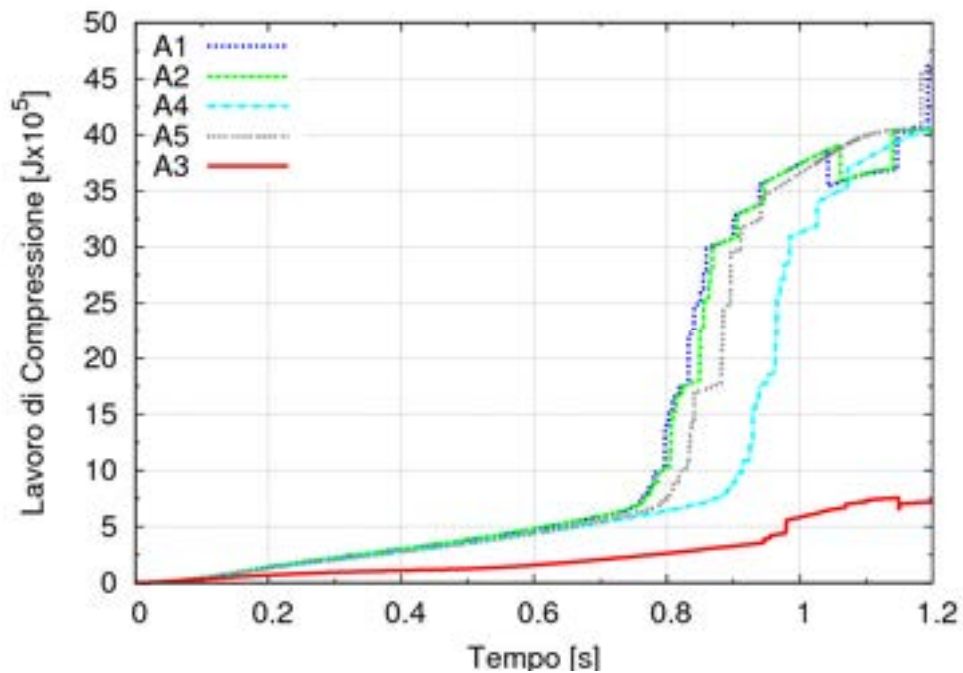


Figura 5.26. Lavoro di compressione stimato nelle varie simulazioni della serie A.

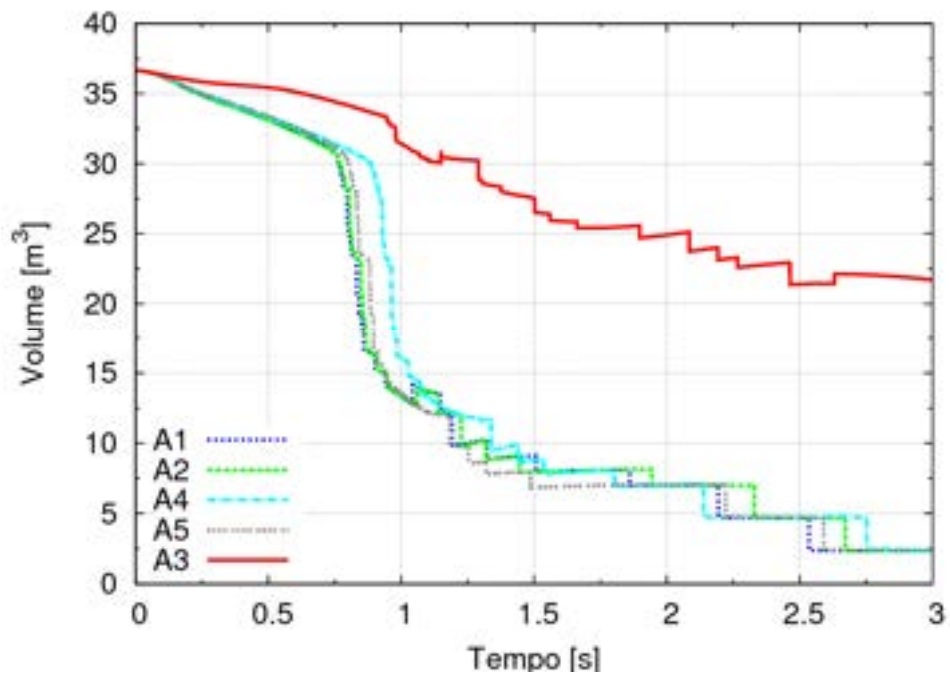


Figura 5.27. Volume di argon valutato nelle varie simulazioni della serie A.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 89 | 93 |


6 CONCLUSIONI

L'attività, oggetto del presente report e prevista nell'ambito della Linea Progettuale 3 "Reattori di IV generazione" riguarda la progettazione di prove sperimentali di interazione tra leghe di piombo ed acqua in pressione, anche mediante modifiche ed aggiornamenti dell'impianto LIFUS 5 dell'ENEA Brasimone ed una definizione delle condizioni operative. L'attività ha riguardato una scelta delle modifiche da apportare all'apparecchiatura LIFUS 5 (configurazione, strumentazione e sistema di controllo acquisizione) al fine di ottenere dati sperimentali significativi per lo sviluppo e validazione dei codici di calcolo e, quindi, per lo studio dei fenomeni afferenti all'interazione metallo liquido – acqua. Tali modifiche sono state basate su una revisione critica dell'attuale configurazione di LIFUS-5 basata sull'esperienza acquisita dalle precedenti campagne sperimentali oltreché, su un' estensiva attività numerica a supporto della progettazione.

Le analisi numeriche con il codice SIMMER hanno inoltre consentito di individuare i parametri che maggiormente influenzano il fenomeno dell'interazione fra metallo liquido ed acqua.

Le osservazioni più significative fornite dall'analisi sono riassunte nel seguito.

- L'andamento temporale della pressione nel vessel di reazione è maggiormente influenzata, oltre che dalla pressione di iniezione dell'acqua, dalla frazione di gas di copertura e, soprattutto, dalla dimensione dell'orifizio; quest'ultima influenza anche il primo picco di pressione dovuto all'impatto dell'acqua pressurizzata sull'LBE.
- Le temperature hanno andamenti che non presentano differenze significative fra i vari casi simulati; ovviamente, si hanno maggiori differenze nei casi in cui vengono modificati i valori di temperatura delle condizioni al contorno della prova, ovvero la temperatura del metallo liquido o quella dell'acqua iniettata.
- I valori di portata di acqua iniettata hanno uno stretto legame con quelli della pressione; infatti si nota che gli elevati valori della pressione sono provocati da elevate quantità di acqua iniettata nell'unità di tempo; una pressione elevata all'interno del serbatoio di

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 90 | 93 |


reazione significa una rapida riduzione della portata di acqua, dato che si va a creare un equilibrio fra la pressione nella linea di iniezione e quella all'interno del serbatoio.

In alcuni dei casi analizzati si presenta il fenomeno del riflusso del metallo fuso all'interno del condotto di iniezione. Le condizioni che in misura maggiore favoriscono l'insorgere di questo fenomeno sono un'ampia sezione dell'orifizio dell'ugello ed il rapido raggiungimento dell'equilibrio fra la pressione all'interno del serbatoio e la condotta di iniezione. Tale fenomeno è da considerarsi indesiderabile per la corretta esecuzione delle prove e per la sicurezza dell'apparecchiatura, per cui le condizioni in cui esso è presente sono assolutamente da evitare durante le prove sperimentali. È stata effettuata anche un'analisi di questa tipologia di prova, nel caso di riferimento ad alta pressione, mediante la versione tridimensionale del codice SIMMER; essa ha dimostrato di essere in buon accordo con SIMMER III nel caso del calcolo degli andamenti temporali di temperatura e di portata, mentre per le pressioni essa tende a sovrastimare l'andamento calcolato dalla versione bidimensionale.

Nel caso del reattore ELSY, i risultati ottenuti tramite il codice SIMMER III hanno evidenziato una netta differenza tra le due serie di simulazioni A e B, mentre, all'interno della serie A, si distingue il test A3 per gli effetti prodotti dall'inserimento del Venturi-boccaglio nel tubo iniettore.

Nell'insieme delle prove della serie B la portata di iniezione dell'acqua attraverso la rottura a ghigliottina raggiunge il valore di circa 33 kg/s, mentre nell'insieme dei test della serie A, in cui viene trascurato il rilascio dalla linea vapore, la portata massima risulta essere non maggiore di 20 kg/s. Nel confronto tra le varie simulazioni del gruppo A, sottoposte a diverse condizioni particolari, la minore portata valutata in A3 è dovuta all'inserimento del Venturi-boccaglio all'interno dell'iniettore, la cui geometria permette difatti il raggiungimento delle condizioni di portata critica nella sezione ristretta, ovvero nella cella (1,5). L'efflusso di fluido viene perciò limitato e fuoriesce dall'iniettore con una frazione di liquido pari a quasi un decimo di quella degli altri casi.

L'acqua che si riversa nel piombo genera un'istantanea e violenta vaporizzazione e provoca una rapida pressurizzazione della regione interna del GV. Gli andamenti di pressione calcolati

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 91 | 93 |


nella cella (1,20), appena all'uscita dell'iniettore, mostrano difatti un picco iniziale che raggiunge i 120 bar in tutte le simulazioni della serie A e 140 bar nella serie B. Questo picco crolla significativamente già nella cella superiore, ovvero nella (1,21), e viene ulteriormente smorzato lungo le altre celle coassiali all'iniettore fino alla (1,40).

Il picco della perturbazione dovuto alla vaporizzazione si propaga nel piombo fuso con un ritardo di 0.2 s. In quest'istante si verifica difatti un picco nell'andamento dell'energia cinetica del metallo liquido.

Lo spostamento della massa di piombo determina così la compressione del gas di copertura e un impulso importante sulla parete superiore del GV quando questa viene raggiunta dal metallo. In questo stesso istante, ovvero intorno ai 0.2 s, si genera un secondo picco di pressione nell'ultima cella (1,40), dove la pressione raggiunge valori pari a più o meno 35 bar per le simulazioni della serie A ed a quasi 100 bar nelle simulazioni B. E' notevole, invece, l'effetto del Venturi, in quanto annulla completamente questo secondo picco di pressione.


Per quanto riguarda gli andamenti del lavoro di compressione subito dall'argon, essi mostrano modestissime differenze ed un ritardo abbondante del picco di perturbazione, che in questo caso appare mediamente intorno agli 0.8 s. E' chiaramente evidente l'azione smorzante del gas di copertura e dell'intero volume di espansione.

In conclusione, facendo fluire un maggior quantitativo di acqua dalla tubazione sin dall'istante iniziale, la rottura con area doppia dell'iniettore (simulazioni B) produrrà effetti sempre più marcati ed in anticipo rispetto a tutte le simulazioni del gruppo A. Allo stesso modo all'interno delle simulazioni della serie A, i test N° 1, 2, 4 e 5 creeranno conseguenze puntualmente più rapide e di maggior entità rispetto a quelle provocate dalla simulazione A3. In questo caso, difatti, fluirà una portata d'acqua ancora più piccola, circa sette volte, poiché limitata dalle condizioni critiche raggiunte nella gola del Venturi-boccaglio.

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 92 | 93 |

BIBLIOGRAFIA

- [1] **A. Del Nevo, P. Agostini, et al.**, *Final WP3 report on future needs and for clear infrastructure road map supporting LFR system development*, FP7 ADRIANA Project Deliverable D3.2, 22 April 2011.
- [2] **Ciampichetti et al.**, *Water large leaks into liquid Pb-17Li: first experimental results on LIFUS 5 facility*, Fus. Eng. Des., 69 (2003) 563-567.
- [3] **A. Ciampichetti, L. Mansani**, *Experimental test program and test set-up on the basis of the design needs of the LBE/water interaction*, ENEA Report ET-S-R-001, 12 May 2006.
- [4] *LEADER Project: Assessment of damping pressure wave inside SG*, Presentazione Task 6.4 al Working meeting del Progetto FP7 LEADER, ANSALDO NUCLEARE, Villa Cattaneo, Genova, Italia 12 May 2011.
- [5] *ACCORDO DI PROGRAMMA: Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2008-09*, Luglio 2010.
- [6] **A. Ciampichetti, P. Agostini, G. Benamati, G. Bandini, D. Pellini, N. Forgiione, F. Oriolo**, *LBE-water interaction in sub-critical reactors: first experimental and modelling results*, Journal of Nuclear Materials, Vol. 376, pp. 418-423, 2008.
- [7] **A. Ciampichetti, D. Pellini, P. Agostini, G. Benamati, N. Forgiione, F. Oriolo**, *Experimental and computational investigation of LBE–water interaction in LIFUS 5 facility*, Nuclear Engineering and Design, Vol. 239, pp. 2468-2478, 2009.
- [8] **D. Bernardi, A. Ciampichetti, N. Forgiione**, *Test parameters definition for SGTR experiments*, Technical Report – Doc 57, Task 6.3 of ELSY Project, 2010.
- [9] **K. Morita, A. Rineiski, E. Rineiski, E. Kiefhaber, W. Maschek, M. Flad, G. Rimpault, P. Coste, S. Pigny, S. Kondo, Y. Tobita, S. Fujita**, *Mechanistic SIMMER III analyses of severe transient in Accelerator Driver Systems (ADS)*, Proc. 9th Int. Conf. on Nuc. Eng. (ICONE 9), Nice Acropolis (France), April 8-12, 2001.
- [10] **Y. Tobita, Sa. Kondo, K. Morita, W. Maschek, et al.**, *The Development of SIMMER-III, An Advanced Computer Program for LMFR Safety Analysis*, Proc. IAEA/NEA Technical Meeting on Use of Computational Fluid Dynamics (CFD)

| | | | | | |
|--|---------------------------------|-------------|-----------------|-------------|-----------|
|  Ricerca Sistema Elettrico | Sigla di identificazione | Rev. | Distrib. | Pag. | di |
| | NNFISS – LP3 - 031 | 0 | R | 93 | 93 |

Codes for Safety Analysis Reactors Systems Including Containment, Pisa, Italy, November 11-14, 2002.

- [11] **R. Giammusso, et al.**, *Studio preliminare per il posizionamento degli strain gauge in LIFUS-5*, ENEA-UTIS, L5-WD-02(11)Rev. 0, 30 Agosto 2011.
- [12] **I. E. Idelchik**, *Handbook of Hydraulic Resistance*, 3rd Edition, Begell House, 1996.
- [13] **L. Cinotti**, *Reactor assembly preliminary configuration*. Technical report, Del Fungo Giera Energia, April 2008.
- [14] **N. E. Todreas, M. S. Kazimi**, *NUCLEAR SYSTEMS I-Thermal Hydraulic Fundamentals*. Book, 1990.
- [15] **A. Del Nevo, A. Ciampichetti, et al.**, *Intermediate report on the water injection system, test matrix and test section design for HLM/water interaction experimental investigation in the LIFUS 5 facility*, EC FP7 THINS Project, Task 4.1.2, ET-S-R-007 Rev. 0, 31 March 2011.
- [16] **A. Del Nevo, , et al.**, *Design of LIFUS 5 warm-up system and procedure*, ENEA-UTIS, L5-WD-01(11)Rev. 0, 31 Luglio 2011.