



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



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Verifica sperimentale di prototipi di barre scaldanti per l'impianto SPES-3

*G. Tortora, S. Gandolfi*



## VERIFICA SPERIMENTALE DI PROTOTIPI DI BARRE SCALDANTI PER L'IMPIANTO SPES-3

G. Tortora, S. Gandolfi (SIET)

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**

## Verifica sperimentale di prototipi di barre scaldanti per l'impianto SPES-3

**Ente emittente** SIET

# PAGINA DI GUARDIA

**Descrittori**

**Tipologia del documento:** Rapporto Tecnico  
**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"  
**Argomenti trattati:** Reattori nucleari ad acqua  
 Reattori nucleari evolutivi

**Sommario**

Questo rapporto è stato emesso nell'ambito del PAR2008-09 dell'accordo di programma ENEA-MSE e costituisce uno dei deliverable dell'obiettivo A " Prova integrale SPES-3 per reattori modulari di piccola-media taglia " della linea progettuale LP2 "Reattori evolutivi".

Lo scopo principale della campagna sperimentale condotta sull'impianto Circuito Prova Barre era quello di verificare le caratteristiche tecniche, fisiche ed elettriche di alcuni prototipi di barra scaldante per individuare la soluzione tecnica più adatta per l'impianto SPES3. SIET aveva commissionato a due aziende leader internazionali, Rotfil (Italia) e Thermocoax (Francia) la fornitura di quattro prototipi, ma solo l'azienda Rotfil è stata in grado di consegnare le barre entro i tempi previsti. SIET ha completato i test di collaudo delle sole barre Rotfil, mentre le prove da condurre sulle barre Thermocoax potranno essere oggetto di una successiva campagna sperimentale. Il budget, resosi disponibile per il mancato collaudo del secondo fascio di barre, è stato utilizzato nell'effettuazione di una campagna sperimentale aggiuntiva sul primo fascio. Tale campagna, costituita da test di crisi termica e di fatica, ha reso ancora più significativo il collaudo positivamente eseguito sulle barre Rotfil. La ditta Rotfil ha fornito anche il prototipo di candela del pressurizzatore, altro componente, che è stato sottoposto a test di qualifica durante le fasi preliminari della campagna sperimentale.

**Note**
**Copia n.**
**In carico a:**

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	12/09/2011	NOME	P. Meloni		P. Meloni
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	CONVALIDA	VISTO	APPROVAZIONE	

**EMITTENTE**

issued by  
**Unità di Produzione**  
Production Unit

**CLIENTE: ENEA**  
*client*

**COMMESSA: 1PN000PBS00577**  
*Job*

**DISCO:**  
*disk*

**PAGINA: 1 DI: 218**  
*page of*

**IDENTIFICATIVO: 01 725 RP 11**  
*document*

**Classe Ris.:**  
*confidentiality*

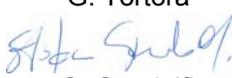
**Allegati: 1**  
*enclosures*

**TITOLO: VERIFICA SPERIMENTALE DI PROTOTIPI DI BARRE SCALDANTI PER L'IMPIANTO SPES-3**  
*title*

**REDATTORI: G.Tortora, S.Gandolfi**  
*prepared by*

**LISTA DI DISTRIBUZIONE**  
*distribution list*

P. Meloni	ENEA
C. Congiu	S.I.E.T.
A. Achilli	S.I.E.T.
G. Cattadori	S.I.E.T.
A. Luce	S.I.E.T.
R. Ferri	S.I.E.T.
S. Botti	S.I.E.T.
G. Tortora	S.I.E.T.
G. Filella	S.I.E.T.

0	06/09/2010	EMISSIONE <i>Issue</i>	 G. Tortora  S. Gandolfi	 A. Achilli
REV <i>rev</i>	DATA <i>date</i>	DESCRIZIONE <i>description</i>	REDAZIONE <i>prepared by</i>	APPROVAZIONE <i>approved by</i>

Informazioni strettamente riservate di proprietà SIET SpA - Da non utilizzare per scopi diversi da quelli per cui sono state fornite.  
*Confidential information property of SIET SpA - Not to be used for any purpose other than those for which it is supplied.*

## INDICE

<b>LISTA DELLE TABELLE .....</b>	<b>3</b>
<b>LISTA DELLE FIGURE .....</b>	<b>4</b>
<b>ALLEGATI.....</b>	<b>12</b>
<b>NOMENCLATURA .....</b>	<b>13</b>
<b>1 INTRODUZIONE .....</b>	<b>14</b>
<b>2 CONTENUTI DEL DOCUMENTO .....</b>	<b>15</b>
<b>3 CIRCUITO PROVA BARRE .....</b>	<b>16</b>
3.1 Scopo dell'impianto .....	16
3.2 Caratteristiche dell'impianto.....	16
3.3 Connessione ai sistemi ausiliari.....	19
3.4 Loop di regolazione .....	19
3.4.1 PIC-030 Pressione del circuito.....	20
3.4.2 LIC-030 Livello liquido nel pressurizzatore.....	20
3.4.3 JIC-050 Potenza termica allo scambiatore.....	20
3.4.4 FIC-040 Isolamento sistema iniezione di emergenza .....	21
3.4.5 WIC-100 Potenza elettrica al canale .....	21
3.5 Parametri di controllo.....	21
3.5.1 Massima pressione di impianto.....	22
3.5.2 Massima pressione nel pressurizzatore .....	22
3.5.3 Minimo livello di liquido nel pressurizzatore .....	22
3.5.4 Massima temperatura delle barre scaldanti.....	22
3.5.5 Massima temperatura di uscita canale.....	22
3.5.6 Massima temperatura nel pressurizzatore .....	22
3.5.7 Massima corrente elettrica al canale di potenza.....	23
3.5.8 Massima corrente elettrica alla singola barra .....	23
3.5.9 Massimo potenziale elettrico al canale di potenza .....	23
3.5.10 Minimo potenziale elettrico tra canale di potenza e struttura impianto.....	23
<b>4 PROVE DI VERIFICA DEL SISTEMA DI TENUTA IDRAULICA DEL FONDO VESSEL ...</b>	<b>24</b>
<b>5 VERIFICA DELLE CARATTERISTICHE DELLE BARRE SCALDANTI .....</b>	<b>34</b>
5.1 Candela del pressurizzatore .....	34
5.2 Barre scaldanti simulatori delle barrette del core .....	36
<b>6 MONTAGGIO DELLE BARRE SCALDANTI .....</b>	<b>40</b>
<b>7 ESECUZIONE DEI TEST .....</b>	<b>43</b>
7.1 Avviamento.....	43
7.2 Shakedown Test.....	44
7.2.1 Verifica a caldo della candela del pressurizzatore.....	44
7.2.2 Verifica delle connessioni elettriche terminali delle barre scaldanti .....	45
7.3 Nominal Test .....	49
7.4 Stress Test .....	50
7.5 Endurance Test.....	50
<b>8 DATI SPERIMENTALI.....</b>	<b>51</b>
8.1 Shakedown test.....	55
8.2 Nominal test .....	73
8.3 Stress Test.....	186
<b>9 CALCOLO DEL <math>\Delta T</math> DI BARRETTA.....</b>	<b>207</b>
<b>10 CONCLUSIONI .....</b>	<b>211</b>
10.1 Barre scaldanti .....	211
10.2 Candela del pressurizzatore .....	212
10.3 Tenuta idraulica inferiore .....	213
10.4 Strumentazione e dispositivi di regolazione e controllo .....	213
<b>11 RIFERIMENTI .....</b>	<b>215</b>

## LISTA DELLE TABELLE

Tab.7.1 - Caratteristiche principali dell'allestimento per le prove sulle guaine.....	46
Tab.7.2 - Prove di verifica dell'integrità della guaina di rivestimento dei cavi .....	46
Tab.7.3 - Didascalie delle grandezze di Tab. 7.2 .....	47
Tab.8. 1 - Elenco misure dirette e strumenti per prove Rotfil.....	52
Tab.8. 2 - Elenco misure derivate.....	54
Tab.8. 3 - Elenco degli Shakedown Test effettuati .....	55
Tab.8. 4 – Dettagli sugli Shakedown Test elencati in Tab.8. 3 .....	57
Tab.8. 5 – Elenco dei Nominal Test effettuati .....	73
Tab.8. 6 – Dettagli sui Nominal Test elencati in Tab.8. 5 .....	74
Tab.8. 7 - Elenco dei Test di Crisi Termica effettuati.....	186
Tab.8. 8 - Dettaglio sui Test di Crisi Termica elencati in Tab.8. 7.....	187
Tab.8. 9 - Elenco degli Endurance Test effettuati .....	194
Tab.8. 10 – Dettaglio sugli Endurance Test elencati in Tab.8. 9.....	195
Tab.9. 1 - Condizioni operative per SPES-3 e Circuito Prova Barre .....	208
Tab.9. 2 – Proprietà termofisiche dell'acqua alle condizioni operative indicate in Tab. 9.1.....	208
Tab.9. 3 – Riepilogo delle grandezze calcolate tramite le formule da (7.3) a (7.7).....	209
Tab.10. 1 – Variazione della resistenza elettrica delle barre scaldanti in funzione della temperatura .....	212
Tab.10. 2 Elenco della strumentazione utilizzata per la campagna sperimentale .....	214

## LISTA DELLE FIGURE

Fig. 3. 1 - Circuito prova barre: vista ramo superiore .....	17
Fig. 3. 2 - Circuito prova barre: vista frontale scambiatore principale, secondario e circuito EBT .....	17
Fig. 3. 3 - Circuito prova barre – vista scambiatore principale .....	18
Fig. 4.1 - Foto tenuta a banco e schema dei suoi principali componenti .....	24
Fig. 4.2 - Sistema di ancoraggio durante le prove, dettaglio tenuta: flangia di chiusura superiore e tubo per pressurizzazione .....	26
Fig. 4.3 - Riscaldamento elettrico esterno della tenuta .....	27
Fig. 4.4 - Coibentazione della tenuta .....	28
Fig. 4.5 - Goccia d'acqua indicante la non perfetta tenuta durante il secondo giorno di prove .....	30
Fig. 4.6 - Dischi di Kalrez® dopo le prove sulla tenuta .....	31
Fig. 4.7 - Dischi di Kalrez® tra dischi di acciaio dopo le prove sulla tenuta .....	31
Fig. 4.8 - Estrusione del Kalrez negli spazi lasciati liberi dalle parti metalliche .....	33
Fig. 4.9 - Effetti dell'inserzione ed estrazione del Kalrez dal sistema di tenuta .....	33
Fig. 5. 1 - Candela scaldante del pressurizzatore .....	35
Fig. 5. 2 - Barre Rotfil .....	39
Fig. 6. 1 - Fascio di barre assemblato .....	40
Fig. 6. 2 - Fasi di montaggio: inserimento barre dal piano 4° della Centrale Emilia .....	41
Fig. 6. 3 - Fasi di montaggio: inserimento barre dal piano 3° della Centrale Emilia .....	41
Fig. 6. 4 - Fasi di montaggio: lavori al piano 5° della Centrale Emilia per agevolare l'inserimento delle barre scaldanti .....	42
Fig. 6. 5 - Fasi di montaggio: inserimento delle barre scaldanti nella zona tenuta .....	42
Fig.7. 1 – Dettaglio schiacciamento locale dell'elemento scaldante del pressurizzatore .....	45
Fig.7. 2 – Terminazioni elettriche delle barre con guaine danneggiate .....	47
Fig.7. 3 – Dettaglio terminazioni elettriche delle barre con guaine danneggiate .....	48
Fig.7. 4 –Allestimento per prove sulle guaine: collegamento morsetti .....	48
Fig.7. 5 – Esecuzione prova sulle guaine .....	48
Fig. 8. 1 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°1 .....	58
Fig. 8. 2 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°1 .....	58
Fig. 8. 3 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°2 .....	59
Fig. 8. 4 - Andamento della pressione circuito prova barre per il Test n°2 .....	59
Fig. 8. 5 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°2 .....	60
Fig. 8. 6 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°3 .....	60
Fig. 8. 7 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°3 .....	61
Fig. 8. 8 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°3 .....	61
Fig. 8. 9 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°3 .....	62
Fig. 8. 10 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°3 .....	62
Fig. 8. 11 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°4 .....	63
Fig. 8. 12 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°4 .....	63
Fig. 8. 13 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°4 .....	64
Fig. 8. 14 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°4 .....	64
Fig. 8. 15 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia " terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°4 .....	65
Fig. 8. 16 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°5 .....	65
Fig. 8. 17 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°5 .....	66
Fig. 8. 18 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°5 .....	66
Fig. 8. 19 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°5 .....	67

Fig. 8. 20 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°5 .....	67
Fig. 8. 21 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°6.....	68
Fig. 8. 22 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°6.....	68
Fig. 8. 23 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°6.....	69
Fig. 8. 24 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°6 .....	69
Fig. 8. 25 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°6.....	70
Fig. 8. 26 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°6.....	70
Fig. 8. 27 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°6 .....	71
Fig. 8. 28 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°7.....	71
Fig. 8. 29 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°7.....	72
Fig. 8. 30 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°7.....	72
Fig. 8. 31 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°8.....	79
Fig. 8. 32 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°8.....	79
Fig. 8. 33 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°8.....	80
Fig. 8. 34 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°8 .....	80
Fig. 8. 35 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°8.....	81
Fig. 8. 36 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°8.....	81
Fig. 8. 37 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°8 .....	82
Fig. 8. 38 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°9.....	82
Fig. 8. 39 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°9.....	83
Fig. 8. 40 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°9.....	83
Fig. 8. 41 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°9 .....	84
Fig. 8. 42 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°9.....	84
Fig. 8. 43 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°9.....	85
Fig. 8. 44 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°8 .....	85
Fig. 8. 45 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°10.....	86
Fig. 8. 46 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°10.....	86
Fig. 8. 47 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°10.....	87
Fig. 8. 48 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°10.....	87
Fig. 8. 49 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°10.....	88
Fig. 8. 50 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°10.....	88
Fig. 8. 51 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°10 .....	89
Fig. 8. 52 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°10.....	89
Fig. 8. 53 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°11.....	90
Fig. 8. 54 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°11.....	90
Fig. 8. 55 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°11.....	91
Fig. 8. 56 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°11.....	91
Fig. 8. 57 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°11 .....	92
Fig. 8. 58 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°8.....	92
Fig. 8. 59 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°10 .....	93
Fig. 8. 60 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°12.....	93
Fig. 8. 61 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°12.....	94
Fig. 8. 62 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°12.....	94

Fig. 8. 63 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°12.....	95
Fig. 8. 64 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°12.....	95
Fig. 8. 65 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°12.....	96
Fig. 8. 66 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°12.....	96
Fig. 8. 67 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°13.....	97
Fig. 8. 68 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°13.....	97
Fig. 8. 69 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°13.....	98
Fig. 8. 70 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°13.....	98
Fig. 8. 71 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°13.....	99
Fig. 8. 72 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°13.....	99
Fig. 8. 73 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°13.....	100
Fig. 8. 74 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°14.....	100
Fig. 8. 75 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°14.....	101
Fig. 8. 76 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°14.....	101
Fig. 8. 77 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°14.....	102
Fig. 8. 78 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°14.....	102
Fig. 8. 79 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°14.....	103
Fig. 8. 80 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°14.....	103
Fig. 8. 81 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°15.....	104
Fig. 8. 82 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°15.....	104
Fig. 8. 83 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°15.....	105
Fig. 8. 84 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°15.....	105
Fig. 8. 85 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°15.....	106
Fig. 8. 86 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°15.....	106
Fig. 8. 87 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°8.....	107
Fig. 8. 88 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°16.....	107
Fig. 8. 89 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°16.....	108
Fig. 8. 90 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°16.....	108
Fig. 8. 91 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°16.....	109
Fig. 8. 92 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°16.....	109
Fig. 8. 93 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°16.....	110
Fig. 8. 94 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°16.....	110
Fig. 8. 95 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°17.....	111
Fig. 8. 96 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°17.....	111
Fig. 8. 97 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°17.....	112
Fig. 8. 98 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°17.....	112
Fig. 8. 99 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°17.....	113
Fig. 8. 100 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°17.....	113
Fig. 8. 101 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°17.....	114
Fig. 8. 102 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°18.....	114
Fig. 8. 103 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°18.....	115
Fig. 8. 104 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°18.....	115

Fig. 8. 105 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°18.....	116
Fig. 8. 106 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°18.....	116
Fig. 8. 107 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°18.....	117
Fig. 8. 108 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°18.....	117
Fig. 8. 109 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°19.....	118
Fig. 8. 110 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°19.....	118
Fig. 8. 111 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°19.....	119
Fig. 8. 112 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°19.....	119
Fig. 8. 113 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°19.....	120
Fig. 8. 114 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°19.....	120
Fig. 8. 115 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°19.....	121
Fig. 8. 116 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°20.....	121
Fig. 8. 117 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°20.....	122
Fig. 8. 118 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°20.....	122
Fig. 8. 119 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°20.....	123
Fig. 8. 120 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°20.....	123
Fig. 8. 121 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°20.....	124
Fig. 8. 122 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°20.....	124
Fig. 8. 123 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°21.....	125
Fig. 8. 124 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°21.....	125
Fig. 8. 125 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°21.....	126
Fig. 8. 126 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°21.....	126
Fig. 8. 127 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°21.....	127
Fig. 8. 128 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°21.....	127
Fig. 8. 129 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°21.....	128
Fig. 8. 130 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°22.....	128
Fig. 8. 131 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°22.....	129
Fig. 8. 132 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°22.....	129
Fig. 8. 133 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°22.....	130
Fig. 8. 134 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°22.....	130
Fig. 8. 135 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°22.....	131
Fig. 8. 136 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°22.....	131
Fig. 8. 137 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°23.....	132
Fig. 8. 138 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°23.....	132
Fig. 8. 139 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°23.....	133
Fig. 8. 140 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°23.....	133
Fig. 8. 141 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°23.....	134
Fig. 8. 142 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°23.....	134
Fig. 8. 143 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°23.....	135
Fig. 8. 144 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°24.....	135
Fig. 8. 145 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°24.....	136
Fig. 8. 146 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°24.....	136

Fig. 8. 147 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°24.....	137
Fig. 8. 148 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°24.....	137
Fig. 8. 149 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°24.....	138
Fig. 8. 150 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°24.....	138
Fig. 8. 151 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°24.....	139
Fig. 8. 152 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°25.....	139
Fig. 8. 153 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°25.....	140
Fig. 8. 154 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°25.....	140
Fig. 8. 155 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°25.....	141
Fig. 8. 156 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°25.....	141
Fig. 8. 157 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°25.....	142
Fig. 8. 158 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°25.....	142
Fig. 8. 159 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°26.....	143
Fig. 8. 160 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°26.....	143
Fig. 8. 161 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°26.....	144
Fig. 8. 162 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°26.....	144
Fig. 8. 163 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°26.....	145
Fig. 8. 164 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°26.....	145
Fig. 8. 165 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°26.....	146
Fig. 8. 166 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°27.....	146
Fig. 8. 167 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°27.....	147
Fig. 8. 168 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°27.....	147
Fig. 8. 169 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°27.....	148
Fig. 8. 170 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°27.....	148
Fig. 8. 171 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°27.....	149
Fig. 8. 172 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°27.....	149
Fig. 8. 173 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°28.....	150
Fig. 8. 174 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°28.....	150
Fig. 8. 175 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°28.....	151
Fig. 8. 176 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°28.....	151
Fig. 8. 177 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°28.....	152
Fig. 8. 178 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°28.....	152
Fig. 8. 179 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°28.....	153
Fig. 8. 180 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°29.....	153
Fig. 8. 181 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°29.....	154
Fig. 8. 182 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°29.....	154
Fig. 8. 183 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°29.....	155
Fig. 8. 184 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°29.....	155
Fig. 8. 185 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°29.....	156
Fig. 8. 186 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°29.....	156
Fig. 8. 187 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°30.....	157
Fig. 8. 188 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°30.....	157

Fig. 8. 189 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°30.....	158
Fig. 8. 190 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°30.....	158
Fig. 8. 191 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°30.....	159
Fig. 8. 192 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°30.....	159
Fig. 8. 193 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°30.....	160
Fig. 8. 194 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°31.....	160
Fig. 8. 195 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°31.....	161
Fig. 8. 196 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°31.....	161
Fig. 8. 197 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°31.....	162
Fig. 8. 198 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°31.....	162
Fig. 8. 199 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°31.....	163
Fig. 8. 200 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°31.....	163
Fig. 8. 201 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°32.....	164
Fig. 8. 202 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°32.....	164
Fig. 8. 203 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°32.....	165
Fig. 8. 204 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°32.....	165
Fig. 8. 205 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°32.....	166
Fig. 8. 206 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°32.....	166
Fig. 8. 207 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°32.....	167
Fig. 8. 208 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°33.....	167
Fig. 8. 209 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°33.....	168
Fig. 8. 210 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°33.....	168
Fig. 8. 211 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°33.....	169
Fig. 8. 212 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°33.....	169
Fig. 8. 213 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°33.....	170
Fig. 8. 214 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°33.....	170
Fig. 8. 215 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°34.....	171
Fig. 8. 216 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°34.....	171
Fig. 8. 217 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°34.....	172
Fig. 8. 218 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°34.....	172
Fig. 8. 219 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°34.....	173
Fig. 8. 220 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°34.....	173
Fig. 8. 221 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°34.....	174
Fig. 8. 222 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°35.....	174
Fig. 8. 223 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°35.....	175
Fig. 8. 224 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°35.....	175
Fig. 8. 225 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°35.....	176
Fig. 8. 226 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°35.....	176
Fig. 8. 227 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°35.....	177
Fig. 8. 228 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°35.....	177
Fig. 8. 229 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°35.....	178
Fig. 8. 230 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°36.....	178

Fig. 8. 231 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°36.....	179
Fig. 8. 232 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°36.....	179
Fig. 8. 233 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°36.....	180
Fig. 8. 234 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°36.....	180
Fig. 8. 235 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°36.....	181
Fig. 8. 236 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°36.....	181
Fig. 8. 237 - Andamento della temperatura "circuito primario quota superiore barre" (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°37.....	182
Fig. 8. 238 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°37.....	182
Fig. 8. 239 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°37.....	183
Fig. 8. 240 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°37.....	183
Fig. 8. 241 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°37.....	184
Fig. 8. 242 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°37.....	184
Fig. 8. 243 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°37.....	185
Fig. 8. 244 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°38.....	188
Fig. 8. 245 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°38.....	188
Fig. 8. 246 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°38.....	189
Fig. 8. 247 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°39.....	189
Fig. 8. 248 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°39.....	190
Fig. 8. 249 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°39.....	190
Fig. 8. 250 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°40.....	191
Fig. 8. 251 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°40.....	191
Fig. 8. 252 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°40.....	192
Fig. 8. 253 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°41.....	192
Fig. 8. 254 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°41.....	193
Fig. 8. 255 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°41.....	193
Fig. 8. 256 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°42.....	196
Fig. 8. 257 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°42.....	196
Fig. 8. 258 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°42.....	197
Fig. 8. 259 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°42.....	197
Fig. 8. 260 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°42.....	198
Fig. 8. 261 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°42.....	198
Fig. 8. 262 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°42.....	199
Fig. 8. 263 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°43.....	199
Fig. 8. 264 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°43.....	200
Fig. 8. 265 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°43.....	200
Fig. 8. 266 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°43.....	201
Fig. 8. 267 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°43.....	201
Fig. 8. 268 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°43.....	202
Fig. 8. 269 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°43.....	202
Fig. 8. 270 - Andamento della temperatura "circuito primario quota mediana barre" (turchese) e della portata del circuito (marrone) per il Test n°44.....	203
Fig. 8. 271 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°44.....	203
Fig. 8. 272 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°44.....	204
Fig. 8. 273 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°44.....	204
Fig. 8. 274 - Andamento della temperatura "circuito primario iniezione linea di ritorno" per il Test n°44.....	205
Fig. 8. 275 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°44.....	205
Fig. 8. 276 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°44.....	206

Fig.9. 1 – Configurazione del fascio di barre scaldanti: (a) nel core di SPES-3, (b) nel Circuito Prova Barre .....	207
Fig.9. 2 – Configurazione interna dei conduttori nella barra scaldante fornita da Rotfil .....	210

## **ALLEGATI**

**Allegato 1: Relazione tecnica di Start Power S.r.l. sull'incidente avvenuto il 12 Aprile 2011.....216**

## NOMENCLATURA

EBT	Emergency Boration Tank
ENEA	Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile
Hot Rod	barra scaldante di potenza maggiorata
IRIS	International Reactor Innovative and Secure
MSE	Ministero dello Sviluppo Economico
Normal rod	barra scaldante di potenza standard
PAR	Piano Annuale di Realizzazione
PID	Proportional Integrative, Derivative (regolatore di processo ad azione proporzionale, integrativa e derivativa);
PLC	Programmable Logical Controller (controllore logico programmabile);
PWM	Pulse Width Modulation (modulazione ad ampiezza di impulso);
PWR	Pressurized Water Reactor
RPV	Reactor Pressure Vessel
SAD	Sistema di Acquisizione Dati;
SCR	Silicon Controlled Rectifier (raddrizzatore controllato al silicio);
SIET	Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche
SPES	Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza
SSR	Solid State Relè (relè allo stato solido);
CPB	Circuito Prova Barre

## 1 INTRODUZIONE

Il progetto SPES3 prevede la realizzazione di un simulatore sperimentale di un reattore SMR di tipo integrale, in cui tutti i componenti del circuito primario (pressurizzatore, generatori di vapore, ecc.) sono contenuti all'interno del vessel primario (RPV).

L'impianto nucleare preso a riferimento per la progettazione di SPES3 è il reattore ad acqua in pressione IRIS, in cui primario e contenimento si accoppiano dinamicamente per mitigare le conseguenze di eventi incidentali tipo LOCA.

L'impianto sperimentale SPES3 è riscaldato elettricamente da un fascio di 235 barrette prototipiche, che simula il core del reattore.

Le barrette trasmettono potenza al fluido per riscaldamento indiretto, ossia per il riscaldamento di una resistenza interna, isolata dalla guaina esterna per mezzo di un materiale ad alto isolamento.

Prima di procedere all'approvvigionamento del fascio di barre per SPES3, è necessario eseguire una serie di prove su dei prototipi, al fine di verificarne la funzionalità sia dal punto di vista elettrico che meccanico.

Presso i laboratori SIET è stato progettato e costruito un apposito impianto, denominato "Circuito Prova Barre" (CPB), in cui è possibile installare fino a quattro prototipi di barra scaldante ed eseguire test in condizioni stazionarie e transitorie. Questo impianto permette anche la valutazione sperimentale delle prestazioni funzionali di riscaldatori elettrici da utilizzarsi nel pressurizzatore.

Il presente documento descrive la campagna sperimentale effettuata sull'impianto CPB per valutare il set di barre scaldanti della ditta Rotfil, realizzate secondo la specifica [1], e un prototipo di resistenza elettrica del sistema di pressurizzazione, realizzato sempre da Rotfil secondo la specifica [2].

I documenti [3] e [4] riportano rispettivamente il progetto del circuito e la descrizione dettagliata dell'impianto "as built".

Questo documento, in aggiunta alla descrizione e all'analisi accurata delle prove sperimentali sulle barre scaldanti, riporta le modifiche apportate ad alcuni componenti del circuito prova barre che si sono rese necessarie per l'esecuzione delle prove.

## 2 CONTENUTI DEL DOCUMENTO

La descrizione dettagliata del circuito prova barre è riportata in [4].

Il presente documento rimanda a [3] e [4] per i dettagli costruttivi, mentre riporta tutte le informazioni necessarie a comprendere i risultati della campagna di prove.

Gli argomenti trattati sono i seguenti:

- Verifica preliminare delle caratteristiche elettriche e meccaniche delle barre scaldati e della candela del pressurizzatore; successivo montaggio delle stesse nel CPB.
- Collaudo a caldo dell'impianto CPB con descrizione dei problemi incontrati in fase di start-up e delle soluzioni adottate per risolverli.
- Descrizione delle prove effettuate (prove di ciclaggio e di stress) ed analisi dei principali parametri di funzionamento.
- Analisi visiva successiva allo smontaggio delle barre scaldanti.
- Conclusioni riguardanti il funzionamento delle barre scaldanti.

Costituiscono parte integrante del documento tutti gli allegati e i disegni, revisioni aggiornate di quanto riportato nel documento di realizzazione "as built" [4].

### 3 CIRCUITO PROVA BARRE

#### 3.1 Scopo dell'impianto

L'impianto CPB è stato progettato e realizzato con l'obiettivo primario di verificare il funzionamento delle barre di potenza che saranno impiegate in SPES-3. L'impianto può essere utilizzato anche per la valutazione sperimentale del flusso termico critico.

L'impianto ed i suoi circuiti ausiliari sono dimensionati per eseguire test a piena potenza di quattro barre scaldanti con modalità e numero di ripetizioni tale da coprire le possibili condizioni di esercizio in condizioni nominali e di incidente, come previsto dalla simulazione RELAP5 dell'incidente di rottura a ghigliottina della linea del DVI dell'impianto SPES3.

#### 3.2 Caratteristiche dell'impianto

Il circuito prova barre è costituito da:

- un circuito principale che ospita le barre scaldanti;
- uno scambiatore;
- un circuito di simulazione dell'EBT;
- un pressurizzatore cilindrico collegato all'impianto mediante una linea di disaccoppiamento idraulico e contenente una candela scaldante.

Le principali caratteristiche del circuito sono riassunte di seguito:

○ volume di acqua nel circuito principale	0.0325 m <sup>3</sup> ; di cui 0.0035 m <sup>3</sup> nel pressurizzatore
○ volume di acqua nel circuito EBT	0.005 m <sup>3</sup> ;
○ Pressione di progetto	17.25 MPa
○ Temperatura di progetto	353.5 °C (T saturazione)
○ Pressione di esercizio	15.5 MPa
○ Temperatura di ingresso acqua in esercizio	278 °C
○ Temperatura di uscita acqua in esercizio	316 °C
○ Salto termico ingresso-uscita $\Delta T$	38 °C
○ massima potenza elettrica alle barre (33135 W)	121 kW (2 "normal" da 27612 W, 2 "hot" da 33135 W)
○ potenza candela del Pressurizzatore	25 kW
○ massima portata massica nel primario	0.54 kg/s
○ fluido di processo:	acqua demineralizzata
○ tipo circolazione:	naturale.

Per le condizioni di progetto del circuito principale si rimanda a [3] e [4].

Le Fig. 3. 1, Fig. 3. 2, Fig. 3. 3 mostrano alcune viste del circuito prova barre.



**Fig. 3. 1 - Circuito prova barre: vista ramo superiore**



**Fig. 3. 2 - Circuito prova barre: vista frontale scambiatore principale, secondario e circuito EBT**



**Fig. 3. 3 - Circuito prova barre – vista scambiatore principale**

### 3.3 Connessione ai sistemi ausiliari

Nello schema di flusso del CPB, [4], sono rappresentate le connessioni della sezione di prova con i circuiti ausiliari che ne consentono il funzionamento.

In particolare sono visibili:

- il collegamento con il sistema di riempimento;
- il collegamento con la linea di scarico per lo svuotamento;
- l'alimentazione con l'acqua di raffreddamento dello scambiatore principale;
- l'alimentazione con l'acqua di raffreddamento dello scambiatore EBT;
- l'alimentazione elettrica alle barre in prova;
- l'alimentazione elettrica alla candela del pressurizzatore.

Il riempimento del circuito con acqua è eseguito mediante la pompa a pistoni ad alta pressione "IMAMI". In questo caso, agendo sul bypass della pompa stessa, è possibile immettere nel circuito acqua a pressione crescente fino al valore di progetto di 172.5 bar. Il superamento della pressione di 172.5 bar determina l'apertura della valvola di sicurezza posta sul pressurizzatore.

Lo scarico può avvenire sia a caldo sia a freddo, aprendo le linee di drenaggio.

Il raffreddamento dello scambiatore inserito nel ramo discendente del circuito principale è controllato variando il livello di acqua iniettata tramite la pompa Booster3 nel tubo esterno dello scambiatore coassiale.

L'alimentazione elettrica alle barre del canale è realizzata mediante un generatore in corrente continua TAMINI. Questo generatore è costituito da due trasformatori elettrici 3kV/160V con i secondari esafase collegati in parallelo e da tre 3 convertitori AC/DC indipendenti è in grado di erogare 8000 A ognuno alla tensione di 167V, per una potenza disponibile totale di circa di 4000kW.

L'alimentazione ai quattro elementi scaldanti rappresentanti le barre del canale di potenza è fornita da un solo convertitore collegato mediante una linea elettrica dedicata e dimensionata per supportare la corrente di circa un migliaio di Ampère per fornire una potenza di circa 120kW.

La candela scaldante del pressurizzatore è costituita da un tripolo resistivo e viene alimentata tramite una linea 400Vac dedicata dotata di regolatore a controllo di fase gestito da un loop di controllo.

### 3.4 Loop di regolazione

L'impianto CPB è dotato dei seguenti loop di regolazione:

- 1 PIC-030 pressione del circuito;
- 2 LIC-030 livello liquido nel pressurizzatore;
- 3 JIC-050 potenza termica allo scambiatore.
- 4 FIC-040 isolamento sistema iniezione di emergenza (valvola ON/OFF);
- 5 WIC-100 potenza elettrica al canale.

Ogni loop è dotato di un regolatore elettronico di processo.

I regolatori di processo utilizzati sono di tipo programmabile, dotati di interfaccia di comunicazione e sono cablati su un bus standard attraverso il quale comunicano con il software di controllo in esecuzione su un personal computer. Il loro utilizzo permette di eseguire azioni sia in modalità manuale che automatica.

#### **3.4.1 PIC-030 Pressione del circuito**

La pressione è regolata attraverso la candela del pressurizzatore. La variabile di processo di questo loop di regolazione è costituita dal segnale dello strumento P30.

#### **3.4.2 LIC-030 Livello liquido nel pressurizzatore**

Per mantenere le condizioni di pressione e temperatura di esercizio deve essere soddisfatto l'equilibrio tra le fasi liquido e vapore dell'acqua contenuta nel pressurizzatore e compensata la variazione di volume del fluido nel circuito principale. Il livello di acqua nel pressurizzatore si stabilizza a due differenti condizioni:

- monofase liquida sottoraffreddata, durante il riempimento e la prima fase di riscaldamento;
- liquido saturo con formazione di vapore, che viene parzialmente spurgato durante l'andata a regime.

La misura di livello, variabile controllata dal sistema, è calcolata in entrambe le condizioni per permettere il corretto raggiungimento della condizione operativa. Il sistema di regolazione, costituito da un regolatore PID a doppia azione, agisce sulla valvola di by-pass della pompa di alimento primaria ad alta pressione.

La variabile di processo di questo loop di regolazione è costituita dal segnale dello strumento DP30. Durante l'esercizio questo loop può essere mantenuto disattivato, previo isolamento del circuito principale dalla mandata della pompa.

#### **3.4.3 JIC-050 Potenza termica allo scambiatore**

Il mantenimento delle condizioni nominali di temperatura all'ingresso del canale è realizzato mediante uno scambiatore di calore acqua/acqua, il cui primario è rappresentato da una sezione del tratto verticale discendente del circuito principale, mentre il secondario è costituito da una vasca, concentrica al tubo primario, contenente acqua satura a pressione ambiente.

Il volume di scambio viene regolato mediante l'iniezione di acqua fredda dalla linea di riempimento a bassa pressione, tramite un regolatore PID, a singola azione con uscita proporzionale, che agisce sulla valvola di mandata della pompa al fine di mantenere il livello al valore necessario al corretto scambio termico. La variabile di processo del loop JIC-050 è il valore fornito dallo strumento T5.

### **3.4.4 FIC-040 Isolamento sistema iniezione di emergenza**

La simulazione del funzionamento dell'impianto SPES-3 prevede l'iniezione di un volume noto di acqua fredda. L'iniezione viene realizzata aprendo, in base ad un comando esterno (azione manuale o programmata) una valvola ON/OFF che viene chiusa una volta fluita la massa di liquido prestabilita o trascorso un periodo di tempo determinato manualmente dall'operatore.

### **3.4.5 WIC-100 Potenza elettrica al canale**

L'erogazione di potenza elettrica alle barre del canale è realizzata sia in modalità manuale, sia in modalità automatica con "generazione automatica di transistori di potenza", mediante un convertitore AC/DC del gruppo di potenza TAMINI. La modulazione di potenza è realizzata mediante la regolazione dello sfasamento degli impulsi di eccitazione ai diodi controllati (SCR) del convertitore.

## **3.5 Parametri di controllo**

Per garantire il corretto funzionamento delle macchine e dell'impianto sono previste azioni di intervento automatico al manifestarsi di una condizione anomala o di un allarme. Di seguito vengono elencati i parametri di controllo principali utilizzati durante l'esercizio dell'impianto:

1. massima pressione di impianto;
2. massima pressione nel pressurizzatore;
3. minimo livello di liquido nel pressurizzatore;
4. massima temperatura delle barre scaldanti;
5. massima temperatura di uscita canale;
6. massima temperatura nel pressurizzatore;
7. massima corrente elettrica al canale di potenza;
8. massimo potenziale elettrico al canale di potenza;
9. minimo potenziale elettrico tra canale di potenza e struttura dell'impianto;

Il sistema di controllo dell'impianto è realizzato utilizzando un PLC dotato di interfaccia di comunicazione e collegato in rete Profibus attraverso la quale comunica con il software di controllo in esecuzione su un personal computer.

I cavi provenienti dalla strumentazione di controllo sono cablati agli ingressi del PLC. Gli attuatori discreti (ON/OFF) sono pilotati dai segnali di uscita del PLC.

### **3.5.1 Massima pressione di impianto**

La massima pressione di impianto viene rilevata mediante un pressostato con contatto normalmente chiuso. Al raggiungere della pressione di soglia pari a 17 MPa i contatti si aprono. Il pressostato è idraulicamente collegato alla presa manometrica M3 (vedi disegno) posizionata in prossimità dell'uscita del canale di potenza.

### **3.5.2 Massima pressione nel pressurizzatore**

La massima pressione all'interno del pressurizzatore viene rilevata mediante un pressostato, tarato per intervenire a 17MPa, collegato alla presa manometrica M32.

### **3.5.3 Minimo livello di liquido nel pressurizzatore**

Alla misura del livello di liquido nel pressurizzatore è associato un valore minimo di soglia al di sotto del quale la candela del pressurizzatore non deve essere alimentata. Il programma di gestione impianto elabora la misura di livello di liquido nel pressurizzatore L-30, la confronta con il valore di soglia e, in funzione delle condizioni operative, genera un segnale di inibizione che viene inviato al PLC. Alla ricezione di questo segnale, il PLC interrompe la potenza elettrica alla candela del pressurizzatore.

### **3.5.4 Massima temperatura delle barre scaldanti**

Ognuna delle quattro barre scaldanti fornite da Rotfil è dotata di una termocoppia inserita nel materiale isolante. Queste termocoppie sono collegate al sistema di controllo della massima temperatura delle barre del canale di potenza, costituito da sedici convertitori di segnale TC/Volt ognuno dotato di doppio loop di allarme collegato al PLC. Al raggiungimento del valore di soglia prefissato avviene l'interruzione della potenza elettrica alle barre. Il valore di soglia di massima temperatura è modificabile dall'operatore, ma è stato preliminarmente impostato a 750°C.

### **3.5.5 Massima temperatura di uscita canale**

Alla temperatura T3, di uscita dal canale di potenza, è associato il valore di soglia di 350 °C oltre il quale il PLC genera la azione di interruzione della potenza elettrica al canale.

### **3.5.6 Massima temperatura nel pressurizzatore**

Alla temperatura T30 del fluido nel pressurizzatore è associato il valore di soglia di 350 °C oltre il quale il PLC genera la azione di interruzione della potenza elettrica alla candela del pressurizzatore e al canale.

Il riscaldatore elettrico inserito all'interno del pressurizzatore è dotato di una termocoppia. Il segnale di questa termocoppia è collegato ad un dispositivo di condizionamento del segnale che, al raggiungimento del valore di soglia, sgancia la potenza elettrica alla candela del pressurizzatore.

### **3.5.7 Massima corrente elettrica al canale di potenza**

Alla misura di corrente elettrica totale è associato il valore di soglia di 1000 A. Al raggiungimento di tale soglia, il PLC genera le azioni di interruzione della potenza elettrica alla candela del pressurizzatore e al canale.

### **3.5.8 Massima corrente elettrica alla singola barra**

Alla misura di corrente elettrica di una singola barra è associato il valore di soglia di 350 A. Al raggiungimento di tale soglia, il PLC genera le azioni di interruzione della potenza elettrica alla candela del pressurizzatore e al canale.

### **3.5.9 Massimo potenziale elettrico al canale di potenza**

Alla misura di potenziale elettrico è associato il valore di soglia di 150 V. Al raggiungimento di tale soglia, il PLC genera le azioni di interruzione della potenza elettrica alla candela del pressurizzatore e al canale.

### **3.5.10 Minimo potenziale elettrico tra canale di potenza e struttura impianto**

Alla misura di potenziale elettrico tra la linea di alimentazione alle barre del canale e la struttura dell'impianto è associato il valore di minima tensione, al di sotto del quale è possibile la presenza di scarso isolamento elettrico. Al raggiungimento di tale valore di soglia, il PLC genera le azioni di interruzione della potenza elettrica alla candela del pressurizzatore e al canale.

## 4 PROVE DI VERIFICA DEL SISTEMA DI TENUTA IDRAULICA DEL FONDO VESSEL

Questo capitolo descrive la caratteristica del sistema di tenuta idraulica del fondo vessel, la modalità di installazione, le prove effettuate per verificare l'integrità del sistema di tenuta tra le barre scaldanti e il recipiente in pressione. Il sistema di tenuta replica, opportunamente scalato per quattro barre, il sistema di tenuta sul fondo vessel come previsto per l'impianto SPES3.

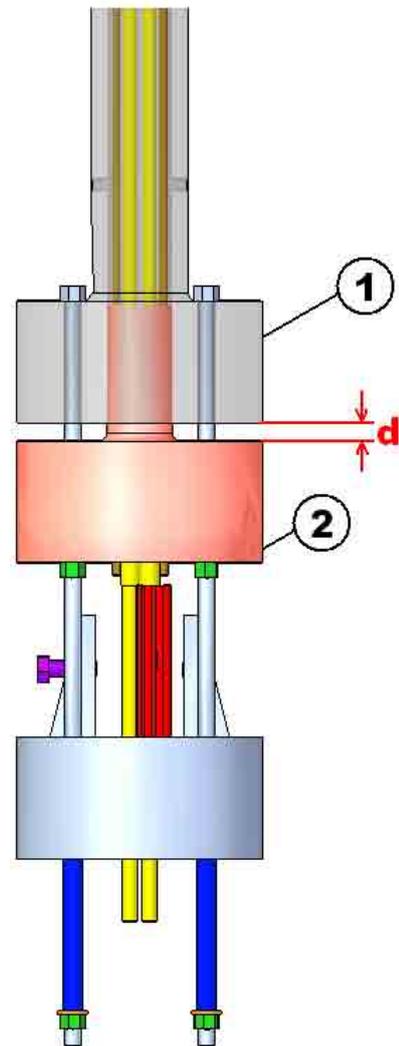


Fig. 4.1 - Foto tenuta a banco e schema dei suoi principali componenti

### 4.1 Caratteristiche della tenuta idraulica

La tenuta dell'impianto è descritta in [3] e le modifiche ad essa apportate in fase di realizzazione sono documentate in [4].

Nel punto di inserimento degli elementi scaldanti nel circuito è presente un sistema di tenuta basato su un complesso premitreccia, in cui elementi metallici in AISI 304 comprimono dei dischetti di Kalrez®, che schiacciandosi realizzano la tenuta.

Lo schiacciamento è determinato dalla coppia di serraggio data dai 4 bulloni presenti sulla faccia inferiore della tenuta.

Il progetto preliminare prevedeva una prima tenuta realizzata con un disco di 24 mm di Kalrez® e una seconda tenuta, detta di guardia, realizzata con un disco di 12 mm di Kalrez®. La configurazione finale consiste in un singolo stadio di tenuta con un disco di Kalrez®, spesso 2,03 mm, mentre dischi di acciaio, spessi 2 mm, sono sovrapposti fino al raggiungimento degli spessori previsti di 24 mm e di 12 mm.

Il Kalrez® 7090 è un perfluoroelastomero adatto per l'utilizzo in applicazioni che richiedono elevata durezza e alti moduli di resistenza. Esso ha la capacità di non variare le sue proprietà fisiche ad elevate temperature, ossia non perde le sue proprietà di elasticità e durezza, necessarie ad evitare trafileamenti.

## 4.2 Assemblaggio della tenuta idraulica

La tenuta è stata assemblata come mostrato in Fig. 4.1, ma a causa di interferenze geometriche tra le parti, dovute ad un eccessivo riscaldamento del pezzo per l'esecuzione di una saldatura, i dischi di grafite sono stati compressi troppo e lo schiacciamento ha portato ad un leggero danneggiamento degli stessi, che hanno perso l'integrità nella parte esterna. Tuttavia si è ritenuto che questo danneggiamento non pregiudicasse la prova in quanto l'estrusione dei dischi avviene normalmente in fase di serraggio.

Dopo essere stata assemblata, la parte superiore della tenuta è stata chiusa in modo ermetico. Un'apertura permette l'ingresso dell'acqua, portata in pressione attraverso una pompa che raggiunge i 1000 bar, Fig. 4.2.

Si è scelto di scaldare tutto il sistema con cavi attraversati da corrente elettrica ricoperti di materiale ceramico. I cavi sono avvolti lungo la tenuta, come mostrato in Fig. 4.3.

Tutto il sistema è stato coibentato con lana di roccia per limitare le dispersioni termiche, come evidenziato in Fig. 4.4.



**Fig. 4.2 - Sistema di ancoraggio durante le prove, dettaglio tenuta: flangia di chiusura superiore e tubo per pressurizzazione**



**Fig. 4.3 - Riscaldamento elettrico esterno della tenuta**



**Fig. 4.4 - Coibentazione della tenuta**

### 4.3 Prove

Le prove effettuate sul sistema di tenuta si riassumono in:

- **Prove di tenuta a freddo:** consistono nel serrare la tenuta con una coppia nota, riempire la camera con acqua e pressurizzare fino ad avere trafileamenti. L'obiettivo è determinare la pressione di serraggio minima per cui non si hanno perdite alle pressioni tipiche dell'impianto. Si vuole quindi valutare la pressione a cui non si hanno trafileamenti in funzione della pressione di serraggio, l'integrità meccanica e dimensionale del Kalrez® in pressione.
- **Prove di tenuta a caldo:** eseguite come quelle a freddo, pressurizzando l'acqua fino ad avere trafileamenti. Servono a trovare il valore di pressione a caldo per cui si manifestano trafileamenti. Se tale valore è inferiore alla pressione di progetto, è necessario ripetere la prova a caldo con coppie di serraggio maggiori.
- **Prova di stress del Kalrez®:** consistono nel sottoporre il materiale ad alte temperature per un tempo prefissato.

Per le prime prove sulla "tenuta", erano disponibili 4 dischetti di Kalrez®, di cui due presentavano imperfezioni. I due dischi rispondenti alle caratteristiche sono denominati A e B e i due con delle imperfezioni, C e D.

Per valutare il serraggio e caratterizzare contemporaneamente il comportamento del Kalrez®, è stato scelto come parametro di riferimento la distanza " $d$ " tra le flange 1 e 2 indicate in Fig. 4.1. Le prove si sono svolte in due giornate descritte di seguito.

#### 4.3.1 Primo giorno di prova

Nella prima giornata di prova, prima di riempire il sistema con acqua e di pressurizzarlo, si è proceduto al serraggio dei 4 bulloni che devono garantire la tenuta.

Prima di procedere al serraggio, si è misurata la distanza  $d$  tra le due flange: essa risultava 13.0 mm, misurata in 4 punti diversi tra le flange.

La tenuta è stata serrata fino ad arrivare ad una distanza  $d$  di 12.1 mm. La diminuzione della distanza è da imputare principalmente allo schiacciamento e riduzione dello spessore dei 4 dischi di Kalrez®.

Il sistema è stato portato a freddo ad una pressione di 250 bar e non si sono riscontrate perdite. Il sistema è stato lasciato in queste condizione per 15 minuti e non si sono riscontrate perdite.

Si è proceduto al riscaldamento del sistema. A causa della dilatazione dell'acqua in un volume costante, la pressione è salita durante il riscaldamento; per questo motivo è stato necessario scaricare acqua continuamente per limitare la pressione.

Questo scarico continuo di acqua ha portato ad un ciclaggio di pressione che è salita, durante il riscaldamento da temperatura ambiente alla temperatura di progetto (350 °C) da 150 a 300 bar.

Durante tutta l'esecuzione della prova, nonostante le pressioni siano salite oltre il limite richiesto e nonostante l'iniziale imperfezione di due dischi di Kalrez®, non si sono riscontrate perdite. Alla fine della prova, la distanza  $d$  è stata misurata in 12 mm, dovuta allo schiacciamento, al riscaldamento, alla pressurizzazione e all'estrusione del Kalrez® nello spazio libero. Si è quindi lasciato raffreddare il sistema per 20 ore.

### 4.3.2 Secondo giorno di prova

Durante il secondo giorno di prova, si è proceduto dapprima alla misurazione della distanza “ $d$ ” tra le due flange. Dopo la verifica che la misura non fosse variata rispetto a quella del giorno precedente, si è proceduto a un’ulteriore serraggio fino ad arrivare ad una distanza “ $d$ ” di 11.5 mm. Il sistema è stato portato a freddo ad una pressione di 100 bar e si sono riscontrate perdite, come mostrato in Fig. 4.5. Si sono dunque dovuti serrare maggiormente i bulloni, fino ad una distanza “ $d$ ” pari a 11.0 mm. Il sistema portato a 120 bar a freddo ha evidenziato ancora perdite. Si è ulteriormente serrato il pacco tenuta, fino ad una distanza “ $d$ ” pari a 10.6 mm.



**Fig. 4.5 - Goccia d’acqua indicante la non perfetta tenuta durante il secondo giorno di prove**

Il sistema è stato portato a 300 bar a freddo, senza riscontrare perdite e la pressione è stata mantenuta per circa 1.5 ore. Si è proceduto al riscaldamento del sistema, con le medesime modalità del giorno precedente. Il sistema ha presentato perdite solo per temperature superiori a 350 °C e pressioni superiori a 250 bar.

Alla fine della prova la distanza “ $d$ ” è stata misurata in 10.6 mm. Il sistema è stato lasciato raffreddare. I dischi di Kalrez® sono stati scaricati e sono visibili in Fig. 4.6 e Fig. 4.7. Si può osservare che i dischi interni A e B non presentano particolari alterazioni, mentre i dischi C e D, a contatto con le lamelle di acciaio e maggiormente sollecitati nelle fasi di montaggio e smontaggio appaiono rovinati.

In particolare, in tutti i dischi si può osservare un danneggiamento della parte centrale dovuto soprattutto allo sfregamento con le barre durante le fasi di montaggio e smontaggio.



**Fig. 4.6 - Dischi di Kalrez® dopo le prove sulla tenuta**



**Fig. 4.7 - Dischi di Kalrez® tra dischi di acciaio dopo le prove sulla tenuta**

#### 4.4 Prova di durata del Kalrez® ad alta temperatura

È stata eseguita una prova, per verificare le eventuali variazioni delle proprietà meccaniche del Kalrez®, tenuto ad una temperatura di 300°C per circa 30 ore in un apposito forno.

Si è potuto concludere alla fine della prova, che la proprietà di elasticità non è stata compromessa dalla sollecitazione termica prolungata e non si sono evidenziate apprezzabili modifiche alla geometria del pezzo.

#### 4.5 Conclusioni sulle prove di tenuta

Le prove hanno dimostrato la validità del Kalrez® come materiale da usare nel sistema di tenuta, in particolare:

- Il materiale, nonostante sia stato portato al di sopra della temperatura massima di esercizio, 325°C, non ha mostrato segni di fusione, né la sua consistenza ed elasticità sono cambiate.
- Il materiale, sottoposto ad alta temperatura (circa 300° C) per un periodo di 30 ore, non ha evidenziato cambiamenti nelle proprietà meccaniche, come elasticità, granulometria e flessibilità.
- Nonostante che due dei dischi fossero inizialmente danneggiati alle estremità, il materiale ha dimostrato di potersi estrudere nello spazio libero e andare a chiudere ogni eventuale passaggio all'acqua, come mostrato in Fig. 4.8. Questo comporta però la possibilità di danneggiamento in seguito all'inserimento ed estrazione dello stesso durante le prove.
- Il materiale ha assicurato la tenuta fino a pressioni superiori ai 155 bar (pressione di esercizio).

I punti critici nell'utilizzo del Kalrez® potrebbero essere i seguenti:

- la facilità di estrusione del materiale negli spazi vuoti: si potrebbero verificare danneggiamenti nel caso di smontaggio e rimontaggio di alcune barre durante le prove.
- Va limitato il più possibile il numero di inserimenti ed estrazioni della tenuta, poiché può provocare danneggiamento della stessa con asportazione di materiale estruso durante le prove precedenti, Fig. 4.9.



**Fig. 4.8 - Estrusione del Kalrez negli spazi lasciati liberi dalle parti metalliche**



**Fig. 4.9 - Effetti dell'inserzione ed estrazione del Kalrez dal sistema di tenuta**

## 5 VERIFICA DELLE CARATTERISTICHE DELLE BARRE SCALDANTI

Il circuito prova barre raggiunge le condizioni nominali di temperatura e pressione tramite le quattro barre scaldanti, che simulano le barrette di combustibile, collocate nel ramo ascendente del circuito, e la candela del pressurizzatore che consente il mantenimento della pressione dell'impianto.

Questo capitolo descrive i due tipi di barre di potenza e le verifiche effettuate prima del montaggio delle barre e della candela del pressurizzatore sull'impianto CPB.

### 5.1 Candela del pressurizzatore

La candela del pressurizzatore è stata realizzata dalla ditta Rotfil, secondo la specifica tecnica [4].

All'arrivo della candela del pressurizzatore, sono stati effettuati i seguenti test:

- **Resistenza elettrica:** verifica della resistenza teorica della candela di 17.33  $\Omega$ . Il test ha dato esito positivo dato che la resistenza misurata è pari a 17.1  $\Omega$ .
- **Isolamento a freddo e a caldo:** ciascuna delle tre fasi presenti e i due cavi della termocoppia hanno mostrato perfetto isolamento a freddo rispetto alla guaina metallica esterna.
- **Analisi dimensionale:** Le dimensioni della candela, in particolare il diametro, la lunghezza e la posizione della flangia di attacco al bocchello del pressurizzatore, rispettano le specifiche.
- **Posizione termocoppia:** questa grandezza è stata verificata ricercandone la posizione spostando una sorgente di calore lungo l'asse della candela fino ad individuare il punto geometrico in cui il segnale fornito dalla termocoppia ha mostrato il valore più elevato. La posizione rilevata è risultata coerente con la specifica.
- **Posizione parte attiva:** la parte attiva della candela è nella parte inferiore del componente. Le parti superiore e inferiore devono rimanere a bassa temperatura durante il funzionamento a piena potenza della candela. La verifica della posizione e la sua lunghezza hanno dato esito positivo. Le parti elettricamente non attive hanno mostrato un gradiente negativo di temperatura proporzionale alla distanza dalla sezione attiva.

La candela del pressurizzatore è mostrata in Fig. 5. 1.



**Fig. 5. 1 - Candela scaldante del pressurizzatore**

## 5.2 Barre scaldanti simulatori delle barrette del core

Le barre scaldanti da provare nell'impianto sono state realizzate secondo la specifica tecnica [3].

Le barre scaldanti sono state acquistate da due diversi fornitori: Rotfil (Italia) e Thermocoax (Francia), ognuno dei quali fornisce un set di quattro barre.

Le barre sono a riscaldamento indiretto. Sono realizzate con tecnologie differenti, ma esternamente presentano le stesse caratteristiche geometriche, ad eccezione della parte terminale di collegamento all'alimentazione elettrica.

Lo scopo della campagna di prove è quello di sottoporre i due set di barre alle stesse condizioni al fine di verificare quale dei prodotti è più adeguato alla simulazione delle barrette di combustibile del nocciolo (core) del reattore SMR di riferimento. Un'ulteriore verifica riguarda la strumentazione installata sui due prototipi: una termocoppia su ognuna delle barre Rotfil e quattro termocoppie su ognuna delle barre Thermocoax.

Valutazioni preliminari sul riscaldamento delle parti terminali delle barre, per dissipazione di potenza nelle parti "non attive" delle barre, in particolare nei cavi elettrici di connessione, hanno portato ad una interazione tra SIET ed i fornitori per la risoluzione del problema.

Rotfil ha fornito le barre senza alcuna modifica al progetto iniziale.

Thermocoax ha deciso di utilizzare i coltelli di supporto assiale delle barre (particolare numero 15 nel disegno 074-00-00rev3 allegato al documento [4]) come polo elettrico, pertanto ha cambiato il materiale terminale della barra da acciaio a rame.

Il presente documento riporta i risultati della campagna sperimentale effettuata sulle barre scaldanti della ditta Rotfil.

Le prove sui componenti di fornitura Thermocoax saranno oggetto di una campagna sperimentale da eseguirsi in un PAR successivo del programma di ricerca MSE-ENEA.

Le barre Rotfil sono mostrate in Fig. 5. 2.

### 5.2.1 Verifica delle caratteristiche elettriche e meccaniche delle barre Rotfil

Alla ricezione delle barre scaldanti di produzione Rotfil si è proceduto all'effettuazione dei seguenti test:

- Resistenza elettrica;
- Isolamento a freddo e a caldo;
- Analisi dimensionale;
- Posizione termocoppie;
- Posizione parte attiva.

Le 4 barre fornite da Rotfil sono state denominate *ROD A*, *ROD B*, *ROD C*, *ROD D*. Di queste, la *ROD A* e la *ROD D* sono le **HOT ROD** (potenza massima 33135 W), mentre la *ROD B* e la *ROD C* sono le **NORMAL ROD** (potenza massima 27612.5 W).

Di seguito sono riassunti i risultati ottenuti dei test suddetti.

### Resistenza elettrica:

La resistenza elettrica è stata misurata con un multimetro, la differenza tra valore teorico e misurato è accettabile.

	<b>Resistenza indicata dal costruttore <math>\Omega</math></b>	<b>Resistenza misurata <math>\Omega</math></b>	<b>Differenza %</b>
<b>ROD A</b>	0.353	0.35	0.85
<b>ROD B</b>	0.390	0.38	2.56
<b>ROD C</b>	0.400	0.39	2.50
<b>ROD D</b>	0.358	0.34	5.03

### Isolamento a freddo e a caldo:

Il riscaldamento delle barre avviene attraverso due resistenze che rappresentano il polo positivo (chiamati CAVO BLU 1 e CAVO BLU 2) e un cavo che rappresenta il polo negativo (chiamato CAVO NERO). Si è verificato l'isolamento a freddo e a caldo di questi fili rispetto alla guaina metallica esterna.

All'interno della guaina sono presenti due ulteriori fili (CAVO ROSSO TC e CAVO VERDE TC) della termocoppia installata. Si è verificato l'isolamento di questi due cavi rispetto alla guaina metallica a freddo e a caldo.

La condizione a caldo è caratterizzata da una temperatura media di 180°C, mentre la condizione a freddo è caratterizzata da una temperatura di circa 15°C.

Nella successiva tabella sono riportati, per ogni barra, i valori di resistenza misurati da uno strumento (Meger) per le misure di resistenza ad alto isolamento, con potenziale di ispezione di 1000 V.

L'isolamento a freddo è pressoché perfetto sia per i cavi di riscaldamento che per i cavi delle termocoppie. I valori di resistenza scendono tuttavia notevolmente a caldo per i cavi responsabili di riscaldamento, ma vengono comunque considerati accettabili. Non si apprezzano invece differenze per i cavi delle termocoppie tra le condizioni a caldo e a freddo.

<b>Barra</b>	<b>Cavo</b>	<b>Prova a freddo</b>	<b>Prova a caldo</b>
<b>ROD A</b>	Filo Blu 1	20 M $\Omega$	3 M $\Omega$
	Filo Blu 2	20 M $\Omega$	3 M $\Omega$
	Filo Nero	20 M $\Omega$	3 M $\Omega$
	Filo Rosso TC	100 M $\Omega$	100 M $\Omega$
	Filo Verde TC	100 M $\Omega$	100 M $\Omega$
<b>ROD B</b>	Filo Blu 1	10 M $\Omega$	5 M $\Omega$
	Filo Blu 2	10 M $\Omega$	5 M $\Omega$
	Filo Nero	10 M $\Omega$	5 M $\Omega$
	Filo Rosso TC	10 M $\Omega$	10 M $\Omega$
	Filo Verde TC	10 M $\Omega$	10 M $\Omega$
<b>ROD C</b>	Filo Blu 1	10 M $\Omega$	1 M $\Omega$
	Filo Blu 2	10 M $\Omega$	1 M $\Omega$
	Filo Nero	10 M $\Omega$	1 M $\Omega$
	Filo Rosso TC	30 M $\Omega$	30 M $\Omega$
	Filo Verde TC	30 M $\Omega$	30 M $\Omega$
<b>ROD D</b>	Filo Blu 1	20 M $\Omega$	5 M $\Omega$
	Filo Blu 2	20 M $\Omega$	5 M $\Omega$
	Filo Nero	20 M $\Omega$	5 M $\Omega$
	Filo Rosso TC	20 M $\Omega$	20 M $\Omega$
	Filo Verde TC	20 M $\Omega$	20 M $\Omega$

Dimensioni:

La principale dimensione che doveva essere verificata era il diametro di 9.5 mm con tolleranza (+0,-0.1) mm lungo ciascuna barra.

Il controllo è avvenuto con l'ausilio di un calibro ventesimale. Le misure effettuate hanno riportato valori tutti entro le tolleranze indicate.

Posizione delle termocoppie:

La posizione della termocoppia è stata verificata riscaldando con una sorgente di calore i punti prossimi alla posizione teorica e leggendo il segnale di temperatura tramite un multimetro. Le posizioni delle termocoppie hanno sufficientemente rispettato le richieste della specifica.

La differenza tra la posizione teorica di specifica e quella misurata è riportata nella seguente tabella. I valori riportati sono riferiti all' RPV bottom, come previsto in specifica. La differenza tra le due posizioni non inficia gli obiettivi della misura:

	Misurato [mm]	Teorico [mm]	Nome TC	Nome Prolunga
<b>ROD A</b>	-280	-67	TW_1AHA	CPB1
<b>ROD B</b>	3080	3404	TW_1BCB	CPB2
<b>ROD C</b>	6304	6290	TW_1CCC	CPB3
<b>ROD D</b>	6490	6375	TW_1DHD	CPB4

Posizione parte attiva:

Ogni barra presenta una parte attiva compresa tra due parti, che devono restare fredde, quando la barra è alimentata. È stata verificata la posizione della parte attiva di ogni barra, l'effettivo suo riscaldamento e il mantenimento della temperatura ambiente nelle parti terminali. Rispetto al punto di ancoraggio di ogni barra, costituito da un ingrossamento ottenuto con tondino saldato, dalla parte delle terminazioni elettriche, la posizione delle parti attive rispetta le condizioni indicate nella specifica da SIET [1].

Secondo la specifica, le parti attive devono essere tutte della stessa lunghezza e devono cominciare e finire nello stesso punto rispetto al tondino saldato. Per motivi di difficoltà costruttive, il fornitore ha richiesto che le parti attive possano essere di lunghezze poco diverse. SIET ha accettato questa richiesta, con la condizione che la parte attiva di ciascuna barra finisca alla stessa distanza rispetto al tondino saldato, in modo che, una volta montate nell'impianto, le parti attive terminino tutte alla stessa altezza.

È stato verificato con successo che tutte le parti attive terminano alla stessa distanza dal tondino saldato, con un errore inferiore a 10 millimetri rispetto al valore teorico di 6594 millimetri.

La lunghezza della parte attiva misurata rispetto a quella teorica indicata dal costruttore per ciascuna barra viene riportata nella seguente tabella:

	Teorico [mm]	Misurato [mm]
<b>ROD A</b>	3700	3690
<b>ROD B</b>	4090	4100
<b>ROD C</b>	4050	4055
<b>ROD D</b>	3720	3730



**Fig. 5. 2 - Barre Rotfil**

## 6 MONTAGGIO DELLE BARRE SCALDANTI

Successivamente alla verifica delle caratteristiche elettriche e meccaniche delle barre scaldanti si è proceduto al loro montaggio.

Questa operazione è risultata alquanto complessa ed ha impegnato parecchio personale per i seguenti motivi:

- la movimentazione delle barre scaldanti è risultata difficoltosa per:
  - a) la lunghezza delle barre superiore a otto metri, che ha costretto sia a manovre delicate per evitare l'oscillazioni dei componenti sia a trovare punti intermedi di appoggio e di vincolo per irrigidire il fascio durante lo spostamento;
  - b) il limitato spazio a disposizione, dovuto alla posizione dell'impianto CPB rispetto ad altri componenti e macchine preesistenti;
  - c) la presenza di componenti di impianti preesistenti ai piani 4° e 5° della Centrale Emilia in prossimità dell'impianto SPES2
- la presenza dei componenti stessi dell'impianto circuito prova barre, ed in particolare della tenuta inferiore del canale di potenza, precedentemente assemblato per eseguire le prove di collaudo a freddo.

L'operazione di montaggio è consistita nelle seguenti fasi:

1. smontaggio dei pavimenti e dei grigliati di protezione ai piani 3°, 4° e 5° della struttura SPES per agevolare la movimentazione delle barre scaldanti;
2. sollevamento del fascio di barre tramite un sistema a carrucole dal 2° al 5° piano della struttura SPES per tenere il bundle in posizione verticale ed evitare deformazioni delle barre stesse, Fig. 6. 1, Fig. 6. 2, Fig. 6. 3, Fig. 6. 4, Fig. 6. 5;
3. smontaggio del gruppo tenuta inferiore;
4. inserimento del fascio di barre completo delle griglie distanziatrici già posizionate;
5. montaggio del gruppo tenuta inferiore;
6. montaggio dei pavimenti e dei grigliati di protezione.



**Fig. 6. 1 - Fascio di barre assemblato**



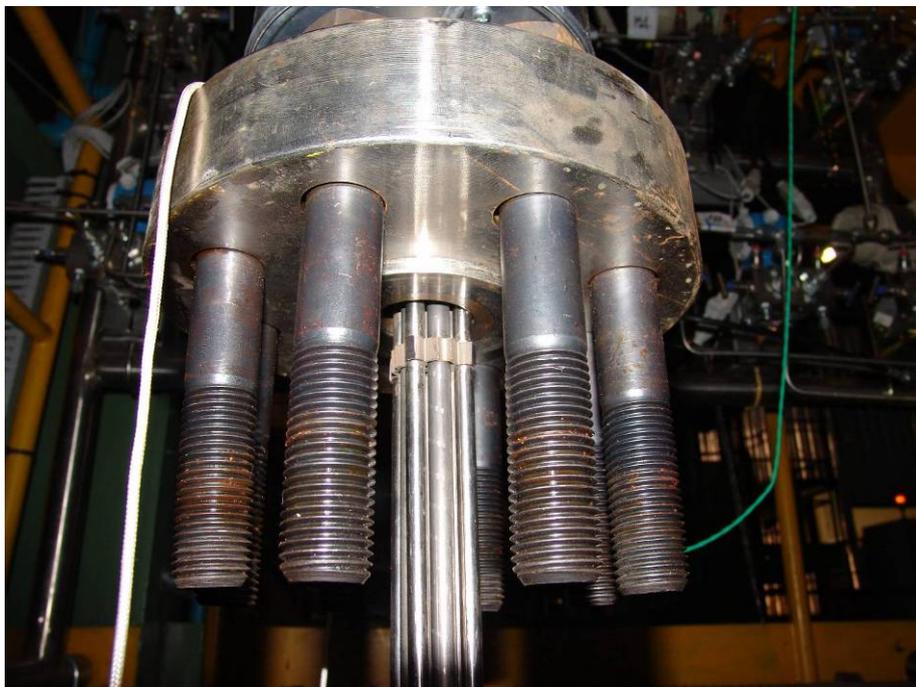
**Fig. 6. 2 - Fasi di montaggio: inserimento barre dal piano 4° della Centrale Emilia**



**Fig. 6. 3 - Fasi di montaggio: inserimento barre dal piano 3° della Centrale Emilia**



**Fig. 6. 4 - Fasi di montaggio: lavori al piano 5° della Centrale Emilia per agevolare l'inserimento delle barre scaldanti**



**Fig. 6. 5 - Fasi di montaggio: inserimento delle barre scaldanti nella zona tenuta**

## 7 ESECUZIONE DEI TEST

I test eseguiti presso l'impianto CPB sono stati prevalentemente rivolti a valutare le seguenti caratteristiche termo-meccaniche delle barre di potenza:

- la performance dell'isolamento elettrico per verificare che la camicia delle barre non vada in tensione;
- il valore della resistenza interna alle barre;
- le caratteristiche meccaniche (deformazione, ovalizzazione, integrità strutturale, fessurazione della camicia esterna);
- l'affidabilità delle termocoppie, presenti in diverse posizioni delle barre di potenza, e il loro isolamento elettrico.
- la potenza generata e l'uniformità assiale del flusso nella parte attiva.

Il numero totale di ciclaggi previsti per ciascun set di barre è 30.

I test eseguiti sulle barre scaldanti si distinguono in:

- Shakedown Test: Test preliminari eseguiti per verificare il funzionamento dell'impianto e dei sistemi di controllo e per apportare le opportune azioni correttive;
- Nominal Test: Test di riscaldamento, pressurizzazione e raffreddamento con trip di potenza;
- Stress Test: Test di crisi termica a bassa pressione;
- Endurance Test: Test di mantenimento delle condizioni operative dell'impianto per tempi prolungati in modo da verificare il corretto funzionamento delle barre scaldanti a seguito di prove di sollecitazione.

Oltre alle prestazioni termo-meccaniche delle barre, sono state eseguite le verifiche delle soluzioni legate alle connessioni elettriche con il circuito di alimentazione ed in particolare:

- l'adeguatezza del collegamento elettrico delle barre;
- il tipo di connessione fisica tra le barre scaldanti e la linea elettrica di potenza.

La esecuzione dei test, descritti nei paragrafi 7.3, 7.4 e 7.5, prevede la realizzazione di almeno una delle seguenti fasi:

- avviamento;
- ciclaggio.

L'avviamento è comune a tutti i test eseguiti, mentre il ciclaggio è presente solo negli Shakedown test e nei Nominal test. La fase di ciclaggio sarà pertanto descritta nel paragrafo riguardante i Nominal test, dettagliando le varie sottofasi che lo compongono.

### 7.1 Avviamento

Nelle condizioni di start-up si parte con l'impianto completo degli internals, riempito di acqua (fino al livello previsto nel pressurizzatore), a pressione atmosferica  $P=1$  bar e  $T_{\text{acqua}} = T_{\text{amb}} = 10-20$  °C, a seconda delle condizioni atmosferiche esterne. L'assenza di contropendenze favorisce l'eliminazione dell'aria contenuta nelle tubazioni. Anche gli scambiatori vengono riempiti con acqua a temperatura ambiente, fino al livello nominale.

Una volta riempito, il circuito viene pressurizzato creando un cuscino di vapore saturo in equilibrio con il liquido sottostante nel pressurizzatore, mediante la candela scaldante da 25 kW inserita nel pressurizzatore stesso. In alternativa è possibile pressurizzare con azoto, tramite la linea di iniezione presente sulla sommità del pressurizzatore.

Il riscaldamento dell'acqua nel circuito principale è avviato contemporaneamente alla pressurizzazione, dando potenza alle barre scaldanti principali (le barre sottoposte a collaudo). La potenza fornita alle barre viene aumentata gradualmente, di modo che la temperatura dell'acqua in uscita (sommità delle barre) sia minore di quella all'interno del pressurizzatore per evitare la formazione di sacche di vapore.

La differenza di densità che si crea tra l'acqua presente nel ramo caldo e quella nel ramo freddo favorisce l'instaurarsi di una portata di circolazione naturale nel circuito.

## 7.2 Shakedown Test

Gli shakedown test comprendono le verifiche del sistema di controllo delle macchine ausiliarie, dei regolatori di processo e degli attuatori di sicurezza.

Rivestono particolare importanza il test realizzato per valutare l'affidabilità della candela del pressurizzatore ed il test di verifica delle connessioni elettriche terminali delle barre scaldanti.

### 7.2.1 Verifica a caldo della candela del pressurizzatore

Dopo alcuni test di pressurizzazione e di riscaldamento del circuito a bassa potenza conclusi con esito positivo, la candela del pressurizzatore è stata sottoposta ad un ciclo di variazione di pressione e di energizzazione in condizioni termoidrauliche simili a quelle previste per il funzionamento con l'impianto SPES3. Durante questa verifica si è verificato un malfunzionamento della candela che ha precluso la possibilità di pressurizzare il circuito prova barre.

È stato necessario estrarre la candela dal pressurizzatore per eseguire la valutazione delle sue caratteristiche elettriche e fisiche al fine di identificare la causa del guasto.

Il malfunzionamento è stato causato probabilmente da una iniziale disomogeneità locale del materiale isolante presente tra la sezione elettricamente attiva e la guaina esterna. Ciò ha causato un rapido innalzamento della temperatura locale dovuto al passaggio di corrente tra parte attiva e guaina esterna fino a provocare un corto circuito elettrico. L'alta pressione nel circuito ha causato lo schiacciamento localizzato della guaina surriscaldata sull'ossido interno, Fig.7. 1.

A causa della indisponibilità della candela è stata aggiunta una linea per la pressurizzazione dell'impianto mediante aria compressa.



**Fig.7. 1 – Dettaglio schiacciamento locale dell'elemento scaldante del pressurizzatore**

## **7.2.2 Verifica delle connessioni elettriche terminali delle barre scaldanti**

Una delle criticità rilevate nel progetto e nella realizzazione delle barre Rotfil è la dimensione del diametro e della lunghezza dei terminali elettrici in rame. Questi terminali sono dimensionati per dissipare, in condizioni di esercizio nominali, una potenza di circa 200W per convezione naturale in aria mantenendo la loro temperatura ad un valore inferiore rispetto a quello di fusione del rame ( $880^{\circ}\text{C} \div 1020^{\circ}\text{C}$ ). Questa valutazione preliminare non ha tenuto conto dell'effetto di coibentazione derivato dalla presenza di una guaina elettricamente isolante, realizzata in materiale vetro-siliconico, infilata su ogni terminale. Durante la prima energizzazione, a causa di un difetto della catena di retroazione del generatore di tensione, le barre sono state alimentate con un impulso della durata di circa 5 secondi alla massima potenza. Le guaine hanno impedito l'asportazione del calore con un rapido incremento della temperatura che ha causato la fusione parziale dei terminali di rame e la carbonizzazione di parte delle guaine.

A seguito di questo incidente state eseguite le seguenti azioni:

- 1) controllo della integrità elettrica di ogni barra: gli elementi resistivi di ogni barra sono risultati integri ed isolati rispetto alla guaina metallica esterna;
- 2) controllo e riparazione del sistema di retroazione del generatore di potenza da personale specializzato. La relazione tecnica dell'intervento è riportata nell'Allegato 1;
- 3) esecuzione di una prova in laboratorio per verificare il comportamento elettrico e fisico dei terminali sottoposti a passaggio di corrente elettrica;
- 4) modifica del sistema di raffreddamento dei terminali elettrici delle barre;
- 5) riduzione della lunghezza dei terminali elettrici delle barre;
- 6) esclusione elettrica di una barra scaldante per preservare un elemento da possibili ulteriori guasti.

La prova in laboratorio è stata condotta su uno spezzone di terminale completo di guaina prelevato dalle barre, collegato ad una saldatrice elettrica a corrente continua. Le caratteristiche dell'allestimento sono riportate in Tab.7.1. Le guaine danneggiate ed l'allestimento per la prova a banco sono mostrate in Fig.7. 2, Fig.7. 3, Fig.7. 4, Fig.7. 5.

<b>sezione di prova</b>	barra di rame: diametro 3mm, lunghezza 520mm	
<b>distanza ventola di raffreddamento-sezione di prova</b>	190mm	
<b>shunt utilizzato</b>	S10380	300A / 60mV
<b>Voltmetro</b>	Multimetro fluke F.S. 300mV	
<b>sonda termometrica</b>	termocoppia K + calibratore Microcal	

**Tab.7.1 - Caratteristiche principali dell'allestimento per le prove sulle guaine**

La corrente circolante nello spezzone di terminale è stata misurata con uno shunt mentre la temperatura della parete del terminale è stata misurata con una termocoppia K. Per valutare il comportamento del terminale in diverse condizioni di convezione forzata è stato posto frontalmente ad esso un ventilatore. La velocità dell'aria è stata misurata tramite un anemometro.

La Tab.7.2 riporta le grandezze principali nelle condizioni di test le cui didascalie sono esplicitate in Tab.7.3.

#	T <sub>i</sub> (°C)	S <sub>H</sub> (mV)	I <sub>sald</sub> (A)	I (A)	V <sub>aria</sub> (m/s)	Δt (s)	T <sub>f</sub> (°C)	NOTE
0	17.2	0	0	0	0	0	17.2	condizioni iniziali
1	17.2	1.45	0	7.5	0	60	17.3	
2	17.3	1.9	10	9.5	0	60		
3	17.4	4.2	20	21	0	60		
4	18	6.1	30	30.5	0	60		
5	20	8.4	40	42	0	60		
6	23	10.3	50	51.5	0	60		
7	27	12.5	60	62.5	0	60		
8	31.5	14.7	70	73.5	0	60		
9	41	21.2	100	106	0	60		
10	57	25.7	120	128.5	0	60		
11	81	32	150	160	0	60		
12	118	36.1	170	180.5	0	60		fumo dalla guaina
13	134	36	170	180	4.8	60		
14	121	42.3	200	211	4.8	60	147	
14b	156	42.1	200	210.5	4.8	180	156	
15	158	44.2	210	221	4.8	60	170	
16	170	46.1	220	230.5	4.8	60	187	
17	191	47.7	230	230.5	4.8	45	202	fault saldatrice
18	27	47.7	230	238.5	4.8	280	212	salita rapida da 0 a 230 A; fault saldatrice dopo 280s
19	22.5				4.8	10	76	salita rapida da 0 a 250 A
20	76	48.8	250	249	4.8	280	225	
21	18				4.2	10	53	salita rapida da 0 a 250 A
22	53	49.6	250	248	4.2	330	237	
23	25				3.3	10	87	Salita rapida da 0 a 250 A
24	88	49.1	250	245.5	3.3	180	245	al tempo 150s fumo dalla guaina a 240°C
25	32				0	10	64	Salita rapida da 0 a 250 A
26	64	49.8		249	0	600	307	Tmax 315°C; fumo dalla guaina; filmato con tempi

**Tab.7.2 - Prove di verifica dell'integrità della guaina di rivestimento dei cavi**

#		numero test
$T_i$	(°C)	temperatura iniziale
$S_H$	(mV)	misura dallo shunt 300A/60mV
$I_{sald}$	(A)	indicazione di corrente della saldatrice
$I$ (A)	(A)	misura di corrente effettiva
$V_{aria}$	(m/s)	velocità aria misurata con anemometro
$\Delta t$	(s)	durata del test
$T_f$	(°C)	temperatura finale

Tab.7.3 - Didascalie delle grandezze di Tab. 7.2



Fig.7. 2 – Terminazioni elettriche delle barre con guaine danneggiate



**Fig.7. 3 – Dettaglio terminazioni elettriche delle barre con guaine danneggiate**



**Fig.7. 4 –Allestimento per prove sulle guaine: collegamento morsetti**



**Fig.7. 5 – Esecuzione prova sulle guaine**

Questa prova ha evidenziato la necessità di raffreddare i terminali delle barre scaldanti.

Il sistema di collegamento elettrico dei terminali alla linea di alimentazione è stato modificato riducendo a circa 500mm la lunghezza dei terminali. I terminali sono stati rivestiti con guaina per ripristinare le condizioni di isolamento elettrico.

E' stato applicato un ventilatore in grado di forzare la circolazione di aria in prossimità delle connessioni elettriche

Sono state applicate tre termocoppie in prossimità della giunzione terminale-barra e tra le guaine dei terminali elettrici. Alle misure di queste temperature è stato associato un intervento di apertura dell'interruttore del generatore di potenza al superamento della temperatura di 195°C.

In serie alla linea di alimentazione elettrica sono stati inseriti dei fusibili rapidi dimensionati per intervenire nel più breve tempo possibile ad un valore di corrente di poche decine di ampere superiore a quella nominale di ogni barra.

### 7.3 Nominal Test

Questo test rappresenta il transitorio di potenza, pressione e temperatura che si manifesta durante l'incidente preso come riferimento. Questa prova è suddivisa in tre distinte fasi:

- 1) **transitorio di salita lenta in pressione**  
l'impianto pieno di acqua a temperatura ambiente e a pressione atmosferica viene portato alle condizioni di funzionamento nominale. Le barre sono elettricamente alimentate fino a raggiungere gradualmente la massima potenza (93.8kW).
- 2) **stazionario di pressione e temperatura**  
l'impianto viene mantenuto alle condizioni nominali di 155 bar e 318 °C all'uscita del canale di potenza per un tempo variabile da 300s a 900s.
- 3) **transitorio di depressurizzazione e raffreddamento**  
L'impianto viene depressurizzato, tramite l'apertura della valvola di vent del pressurizzatore, mantenendo le barre scaldanti alimentate alla massima potenza. Alla pressione di 147 bar la potenza viene ridotta al 7% del valore nominale e alla pressione di 117 bar viene aperta la valvola di intercetto della linea EBT per iniettare acqua fredda.

Il test viene completato quando la pressione scende a circa 6 bar.

Queste fasi costituiscono ciò che in precedenza è stato denominato come "ciclaggio".

Più in dettaglio le fasi suddette si compongono delle seguenti sotto-fasi:

- 1) riscaldamento da temperatura ambiente a condizioni operative;
- 2) raggiungimento delle condizioni di regime (pressione, temperatura, potenza);
- 3) spegnimento della candela di riscaldamento del pressurizzatore;
- 4) apertura della valvola di sfiato per simulare la depressurizzazione;
- 5) raggiungimento del primo set-point di pressione a 147 bar, istantanea riduzione della potenza al 7% della potenza nominale;
- 6) raggiungimento del secondo set-point di pressione a 117 bar con conseguente apertura della valvola di iniezione dell'EBT. Il circuito che simula l'EBT è un circuito secondario di bypass al ramo discendente del circuito principale, ed in condizioni operative di impianto in esso è contenuta acqua ferma a temperatura ambiente ed alla pressione di impianto di 155 bar. Questa riserva di acqua fredda può essere iniettata per gravità nel flusso principale, aprendo la valvola a sfera posta nella parte inferiore. L'iniezione può essere completa, ed in questo caso la valvola a sfera viene mantenuta aperta per un tempo prolungato, oppure può essere parziale. In questo secondo caso la valvola a sfera viene mantenuta aperta per un intervallo temporale più limitato, in modo di consentire il trasferimento solo parziale della massa di acqua fredda contenuta nell'EBT. L'acqua calda proveniente dal circuito principale, che sostituisce quella fredda all'interno dell'EBT, viene raffreddata, successivamente alla richiusura della valvola, dallo scambiatore coassiale che circonda l'EBT stesso. Nel secondario di tale scambiatore viene immessa una portata costante di acqua fredda. L'acqua eccedente il livello previsto viene scaricata attraverso il troppo pieno ed allontanata. Il secondario dello scambiatore, successivamente all'iniezione dell'EBT nel

circuito principale, è sottoposto ad flussaggio continuo di acqua a temperatura ambiente, allo scopo di riportare, entro breve tempo, l'acqua all'interno del circuito EBT ad una temperatura  $T < 40$  °C.

- 7) mantenimento della potenza al 7% e della pressione a 5-6 bar
- 8) spegnimento delle barre ed attesa che la temperatura del circuito diminuisca sotto i 40-50 °C.

#### 7.4 Stress Test

Questo test rappresenta la possibile condizione di crisi termica a bassa pressione caratteristica della fase conclusiva di alcuni transitori incidentali previsti per le prove dell'impianto SPES3. Questo test si esegue con l'impianto pieno di acqua in condizioni sotto raffreddate e alimentando le barre al 7 % del valore nominale di potenza. La prova consiste nel provocare il surriscaldamento locale nel canale di potenza evidenziato dalle misure di temperatura di parete delle barre. Il test si conclude al raggiungimento del valore massimo di temperatura regolato tra 600°C e 700°C.

#### 7.5 Endurance Test

Questo test rappresenta la condizione di esercizio prolungato in condizioni nominali. Questa prova è suddivisa in tre distinte fasi:

- 1) transitorio di salita lenta in pressione  
l'impianto pieno di acqua a temperatura ambiente e a pressione atmosferica viene portato alle condizioni di funzionamento nominale. Le barre sono elettricamente alimentate fino a raggiungere gradualmente la massima potenza (93.8kW).
- 2) Stazionario di pressione e temperatura  
l'impianto viene mantenuto alle condizioni nominali di 155 bar e 318 °C all'uscita del canale di potenza per un tempo variabile da 3600s a 7200s.

Tutti i test sono rintracciabili tramite il nome del file di acquisizione.

A seguito della mancata fornitura del set di barre scaldanti provenienti dalla ditta Thermocoax sono stati eseguiti da SIET dei test di stress aggiuntivi, cogliendo l'occasione di approfondire l'indagine sul set di barre proveniente dalla ditta Rotfil.

## 8 DATI SPERIMENTALI

Per ogni test sono riportati i grafici delle grandezze ritenute più significative.

Prima di passare alla descrizione dei test si elencano le grandezze riportate nei grafici, facendo opportune precisazioni in modo da rendere i grafici stessi facilmente leggibili.

Le grandezze rappresentate nei grafici sono le seguenti:

- **Temperatura “circuito primario quota superiore barre”, T-3.**
- **Resistenza elettrica barre scaldanti, R-100;** questa grandezza è relazionata alla T-3 per mostrare il suo andamento crescente con la temperatura, eventuali picchi sono da ritenersi valori spuri dovuti a errori di manovra in fase di acquisizione (per esempio, allo sgancio di potenza, che risulta nulla, la resistenza risulta infinita o di valore molto elevato rispetto ai valori di esercizio).
- **Potenza totale delle barre scaldanti, W-100;** questa grandezza mostra un andamento crescente a gradini dovuto al tipo di regolazione effettuata dall'operatore. Si è proceduto, infatti, alla salita in potenza a gradini così da evitare rapide escursioni di temperatura e pressione del sistema.
- **Pressione del circuito prova barre, P-30;** questa grandezza mostra un andamento a gradini netti, tipici della regolazione automatica, durante i test di shake down. Per i test di ciclaggio e quelli di stress mostra un andamento a gradini irregolari dovuto alla regolazione manuale con valvola di immissione azoto nel circuito del pressurizzatore, metodo alternativo di pressurizzazione adottato dopo il guasto della candela.
- **Temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore”, T-4.**
- **Temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno”, T-8.**
- **Temperature delle termocoppie di barra, TW-1AHA, TW-1BCB, TW-1CCC, TW-1DHD;** le termocoppie di barra fornite dalla ditta Rotfil sono 4, una per ogni barra. La grandezza TW-1BCB è da considerarsi non significativa, in quanto installata sulla ROD B, non alimentata per la perdita di isolamento. La grandezza TW-1AHA è significativa e fornisce la temperatura nel gruppo tenuta, opportunamente raffreddato ad aria. Le grandezze TW-1CCC e TW-1DHD sono significative della temperatura delle HOT ROD ma, vista la configurazione interna dell'elemento scaldante Rotfil, **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** risultano poco idonee per la stima del valore della temperatura superficiale di parete.
- **Temperatura “terminazioni elettriche barre scaldanti”, T-wire1;** la termocoppia relativa a questa grandezza è situata tra le guaine delle terminazioni elettriche delle barre scaldanti. La misurazione di questo valore è necessaria onde evitare l'instaurarsi di sovratensioni o sovracorrenti all'interno degli elementi scaldanti.

Altre grandezze non riportate in questo elenco sono state rappresentate nei grafici per un'analisi più dettagliata dei test, nel caso di verificarsi di condizioni anomale.

In Tab.8. 1 è riportato l'indice di tutte le grandezze, dirette e derivate, registrate dal Sistema di Acquisizione Dati (SAD). Per le grandezze derivate è indicato il metodo utilizzato per calcolarle dalle grandezze dirette di partenza elencate in Tab.8. 2.

**Tab.8. 1 - Elenco misure dirette e strumenti per prove Rotfil**

#	descrizione	Codice	Tipo di	Segnale dello	U. M.	costruttore	modello	tipo di	costruttore	modello
		misura	Strumento	strumento						
1	circuito primario quota inferiore barre	T-1 OP	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
2	circuito primario quota mediana barre	T-2	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
3	circuito primario quota superiore barre	T-3	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
4	Circuito primario discendente quota superiore	T-4	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
5	uscita scambiatore lato primario	T-5	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
6	circuito primario lato discendente zona bassa	T-6	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
7	circuito primario discendente quota inferiore	T-7 OP	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
8	circuito primario iniezione linea di ritorno	T-8	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
9	quota inferiore pressurizzatore	T-30	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
10	quota mediana pressurizzatore	T-31 OP	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
11	quota superiore pressurizzatore	T-32	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
13	uscita linea iniezione scambiatore EBT	T-41 OP	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
14	linea iniezione EBT quota inferiore	T-42 OP	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
15	scambiatore circuito primario lato second.. quota sup.	T-50	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
16	scambiatore EBT lato secondario quota mediana	T-60 OP	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
17	temperatura di parete barra 4 inferiore	TW-1AHA	Termocoppia tipo K inglobata	mvTC non compensata	mV	n.d.	(***)	TC/Volt	PRELECTRONICS	4116
18	temperatura di parete barra 4 inferiore intermedia	TW-1BCB	Termocoppia tipo K inglobata	mvTC non compensata	mV	n.d.	(***)	TC/Volt	PRELECTRONICS	4116
19	temperatura di parete barra 4 superiore intermedia	TW-1CCC	Termocoppia tipo K inglobata	mvTC non compensata	mV	n.d.	(***)	TC/Volt	PRELECTRONICS	4116
20	temperatura di parete barra 4 superiore	TW-1DHD	Termocoppia tipo K inglobata	mvTC non compensata	mV	n.d.	(***)	TC/Volt	PRELECTRONICS	4116
21	temperatura di parete flangia tenuta posizione A	TW200A	Termocoppia tipo K di parete	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(**)			
22	temperatura di parete flangia tenuta posizione B	TW200B	Termocoppia tipo K di parete	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(**)			
23	temperatura di parete flangia tenuta posizione C	TW200C	Termocoppia tipo K di parete	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(**)			
24	temperatura di parete flangia tenuta posizione D	TW200D	Termocoppia tipo K di parete	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(**)			
25	Temperature ambiente	TROOM	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
26	Temperatura riscaldatore elettrico pressurizzatore	T-HEAT	Termocoppia tipo K inglobata							
27	pressione ingresso canale	P1	Trasmettitore pressione relativa	analogo	mA	HONEYWELL	STD-170			
28	pressione pressurizzatore	P30	Trasmettitore pressione relativa	analogo	mA	E + H	Cerabar S			
29	temperatura di parete flangia tenuta posizione D	TW200D	Termocoppia tipo K di parete	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(**)			
30	Temperature ambiente	TROOM	Termocoppia tipo K	mvTC non compensata	mV	TERMOTECH	(*)			
31	Temperatura riscaldatore elettrico pressurizzatore	T-HEAT	Termocoppia tipo K inglobata							
32	pressione ingresso canale	P1	Trasmettitore pressione relativa	analogo	mA	HONEYWELL	STD-170			
33	pressione pressurizzatore	P30	Trasmettitore pressione relativa	analogo	mA	E + H	Cerabar S			

n	descrizione	Codice	Tipo di	Segnale dello	U. M.	costruttore	modello	tipo di	costruttore	modello
		misura	Strumento	strumento				condizionatore		
34	pressione differenziale barre	DP-1	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	E + H	Deltabar S			
35	pressione differenziale canale di potenza & ramo caldo	DP-3	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	E + H	Deltabar S			
36	pressione differenziale ramo caldo orizzontale	DP-4	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	HONEYWELL	STD-120			
37	pressione differenziale scambiatore principale lato prim.	DP-5	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	E + H	Deltabar S			
38	pressione differenziale ramo freddo verticale	DP-6	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	E + H	Deltabar S			
39	pressione differenziale ramo freddo orizzontale + valvola	DP-7	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	HONEYWELL	STD-120			
40	pressione differenziale pressurizz. stretto range lato inf.	DP-30	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	HONEYWELL	STD-120			
41	pressione differenziale pressurizzatore largo range	DP-31	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	E + H	Deltabar S			
42	pressione differenziale ramo caldo orizzontale - altezza intermedia pr	DP-32	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	HONEYWELL	STD-120			
43	pressione differenziale venturimetro	DP-20	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	HONEYWELL	STD-120			
44	pressione differenziale linea iniezione verticale	DP-40	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	E + H	Deltabar S			
45	pressione differenziale linea iniezione orizzontale & valvola	DP-41	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	HONEYWELL	STD-120			
46	pressione differenziale scambiatore princip. lato second.	DP-50	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	E + H	Deltabar S			
47	pressione differenziale vaschetta di raccolta	DP-51	Trasmittitore pressione diff.	analogico	mA	HONEYWELL	STD-120			
48	corrente elettrica canale potenza	I100	Shunt	analogico	V	IME	1000A	mV/Volt	WEIDMUELLER	WAS PRO DC/DC
48	corrente elettrica su singola barra (barra x - da definire)	I10n	Shunt	analogico	V	IME	300A	mV/Volt	WEIDMUELLER	WAS PRO DC/DC
50	tensione elettrica canale potenza	V100	Diretto	analogico	V	n.a.	n.a.	mV/Volt	WEIDMUELLER	WAS PRO DC/DC
51	tensione elettrica canale potenza su struttura metallica	V101	Diretto	analogico	V	n.a.	n.a.	mV/Volt	WEIDMUELLER	WAS PRO DC/DC
52	potenza elettrica candela pressurizzatore	W30	Input tipo SSR	analogico	Contatto	SIEMENS	n.a.			
53	fine corsa valvola ON/OFF posizione aperta	Z400	Fine corsa	analogico	Contatto	TELEMECANIQUE	n.a.			
54	fine corsa valvola ON/OFF posizione chiusa	Z40C	Fine corsa	analogico	Contatto	TELEMECANIQUE	n.a.			

- (\*) termocoppia K, ANSI SPECIAL, lunghezza 150mm, diametro 1.5 mm, cavo 1 m, connettore mignon maschio  
 (\*\*) termocoppia K, ANSI SPECIAL, piastrina saldata, lunghezza 150mm, diametro 1.0 mm, cavo 1m, connettore mignon maschio  
 (\*\*\*) termocoppia inserita nella barra di potenza  
 OP Strumento opzionale: da installare in base a successive valutazioni sperimentali

**Tab.8. 2 - Elenco misure derivate**

n	descrizione	codice misura	Misura Primaria
1	livello pressurizzatore	L_30	DP-30, T-32, P-30
2	caduta di pressione barre circuito primario	DP_100	DP-1, DP-3
3	livello scambiatore	L_50	DP-51, T-50
4	potenza barra (totale)	W_100	I-100, V-100
5	livello linea EBT	L_40	DP-40, DP-41, T-40
6	portata di ricircolo	F_20	DP-20, P1, T5
7	resistenza elettrica barre	R_100	I-100, V-100

Le misure L\_30, L\_50 e L\_40, ovvero le misure di livello rispettivamente del pressurizzatore, dello scambiatore principale e dell'EBT, sono calcolate a partire dalle misure di pressione facendo uso della legge di Stevino:

$$DP = \rho \cdot g \cdot L$$

dove la misura di pressione  $DP$  proviene da un trasduttore di pressione differenziale, la densità  $\rho$  è calcolata a partire da pressione e temperatura misurate e l'accelerazione di gravità  $g$  è una costante.

Le misure elettriche W\_100 e R\_100, rispettivamente potenza e resistenza delle barre scaldanti, sono calcolate nel seguente modo:

$$W = V \cdot I$$

$$V = R \cdot I$$

dove  $V$  e  $I$  sono rispettivamente la tensione di alimentazione e la corrente erogata alle barre scaldanti. Entrambi i valori sono registrati direttamente dal SAD.

La misura di portata F\_20 avviene tramite un venturimetro, secondo quanto indicato nella normativa [5].

## 8.1 Shakedown test

I test di shakedown sono prove preliminari eseguite sul circuito prova barre con lo scopo principale di verificare il corretto funzionamento delle 3 barre scaldanti (2 HOT e una STANDARD) dopo l'incidente avvenuto in fase di commissioning e di mettere a punto i principali parametri dell'impianto.

In Tab.8. 3 sono riportati i vari test eseguiti in fase preliminare.

**Tab.8. 3 - Elenco degli Shakedown Test effettuati**

#	nome_file_acquisizione	descrizione prova
1	2011-04-21_10:51.xls	SHAKEDOWN TEST
2	2011-04-21_14:08.xls	SHAKEDOWN TEST
3	2011-04-22_10:42.xls	SHAKEDOWN TEST
4	2011-04-27_9:23.xls	SHAKEDOWN TEST
5	2011-04-27_13:42.xls	SHAKEDOWN TEST
6	2011-04-28_9:57.xls	SHAKEDOWN TEST
7	2011-05-31_13:01.xls	SHAKEDOWN TEST – CRISI

I problemi riscontrati durante la fase di start-up dell'impianto sono risultati i seguenti:

- Il settaggio del livello iniziale di liquido nel pressurizzatore;
- Il settaggio del valore di temperatura della guaina delle terminazioni elettriche delle barre scaldanti;
- Il settaggio del livello dello scambiatore principale del circuito secondario.
- Il settaggio del valore di potenza tale per cui avveniva il primo trip di depressurizzazione, ovvero l'impostazione del valore della potenza ridotta al 7%.

Il livello di liquido nel pressurizzatore è un parametro fondamentale per pressurizzare correttamente il sistema; in fase preliminare si è dovuto agire sulla valvola di sfiato, posta sulla sommità del pressurizzatore, o sulla linea di drenaggio, posta nella parte inferiore dell'impianto, per limitare gli sbalzi di pressione.

Il valore di temperatura della guaina delle terminazioni elettriche delle barre è un parametro da tenere sotto controllo, soprattutto a seguito dell'incidente avvenuto in fase di commissioning delle barre scaldanti. In fase preliminare si è settato un valore di temperatura della guaina delle terminazioni elettriche basso, intorno ai 120 °C, e si è assistito a sporadici sganci di potenza con conseguenti oscillazioni sulle grandezze principali dell'impianto.

Il valore del livello dello scambiatore principale del circuito secondario è di fondamentale importanza per la corretta asportazione della potenza generata e il conseguente mantenimento della temperatura di ingresso nel circuito primario, in linea con i valori di esercizio dichiarati nei paragrafi 3.2 e 3.5. L'impostazione di questo parametro influenza la corretta instaurazione di una portata in circolazione naturale.

Durante la depressurizzazione del sistema, al raggiungimento della pressione di 147 bar, si simula lo SCRAM del reattore. Ciò consiste semplicemente nella riduzione della potenza dal valore massimo al 7% dello stesso.

Tramite il regolatore di potenza, in condizioni a freddo, si è impostato un valore percentuale tale per cui si legga a video la potenza ridotta di 6.56 kW (il 7% di quella massima pari a 93.8 kW, data l'esclusione di una delle due NORMAL ROD).

Il valore percentuale impostato col regolatore è però risultato corrispondere a valori di potenza inferiori a 6.56 kW dato che la resistenza delle barre scaldanti mostra un andamento crescente in funzione della temperatura, Figure 6.5, 6.11, 6.16 e 6.21. Infatti, l'aumento di resistenza delle barre scaldanti, a pari tensione di alimentazione, comporta l'erogazione di una corrente minore alle barre stesse con una potenza generata, di conseguenza, minore.

A seguito degli shakedown test, in condizioni di esercizio:

- Il valore settato per il livello di liquido del pressurizzatore si aggira intorno a un terzo del livello massimo, circa 1.5 m;
- Il valore settato per la temperatura della guaina delle terminazioni elettriche delle barre scaldanti varia dai 180 ai 195 °C;
- Il valore percentuale settato sul regolatore di potenza, in modo da ottenere la potenza ridotta di 6.56 kW, durante la depressurizzazione del sistema, si aggira intorno al 25.8 %;
- Il valore settato per il livello dello scambiatore principale si aggira intorno a 1.20 m rispetto a un livello massimo di circa 4.5 m.

Dai grafici che seguono, elencati test per test in Tab.8. 4, si nota che dopo un primo set di prove, durante il quale si è verificato il funzionamento dell'impianto a bassa potenza e media pressione (Figure 6.1, 6.2, 6.3 e 6.4) ci si è lentamente diretti verso le condizioni di esercizio dell'impianto.

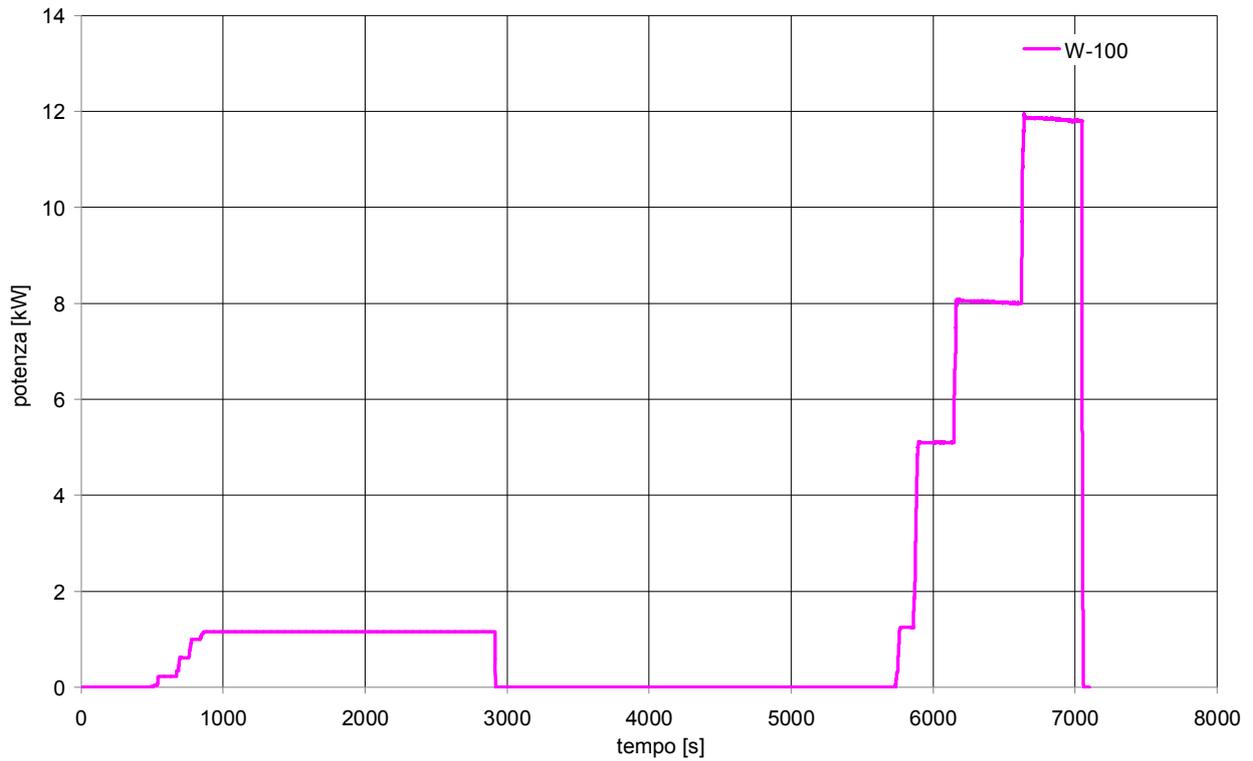
È da considerarsi a tutti gli effetti un test di shakedown anche quello di crisi termica condotto successivamente all'ultima prova di ciclaggio termico. Infatti tramite questo test si sono scelti i valori di potenza e pressione più idonei, in termini di sicurezza dell'impianto e delle barre scaldanti, per procedere alla instaurazione di una miscela bifase nella zona adiacente la superficie delle barre scaldanti.

A basse pressioni un'eventuale asciugamento della superficie delle barre scaldanti è facilmente estinguibile tramite piccoli aumenti di pressione che comportano una condensazione della miscela bifase e un successivo ribagnamento della superficie stessa.

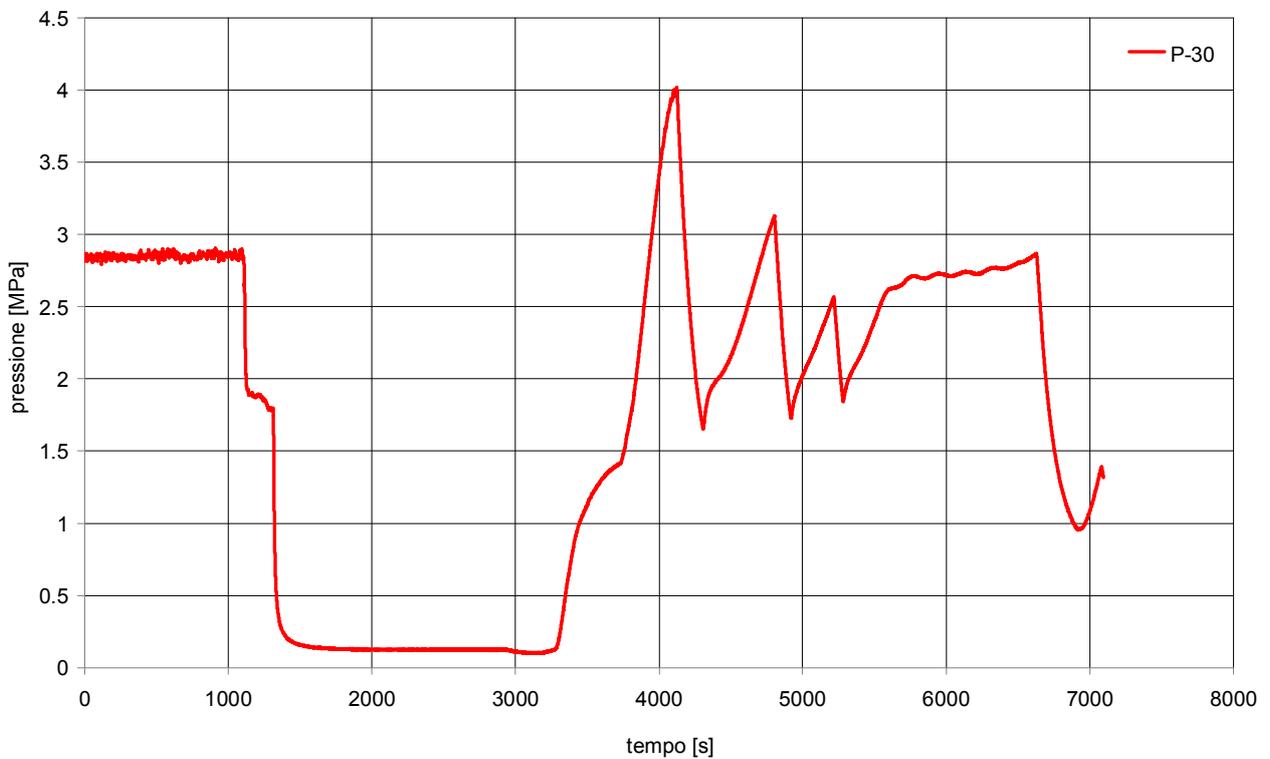
È inoltre opportuno eseguire queste prove a livelli di pressione bassi in modo da evitare che il fenomeno di crisi diverga con conseguenti danni strutturali agli elementi scaldanti (bruciamento della camicia e perdita di isolamento elettrico).

**Tab.8. 4 – Dettagli sugli Shakedown Test elencati in Tab.8. 3**

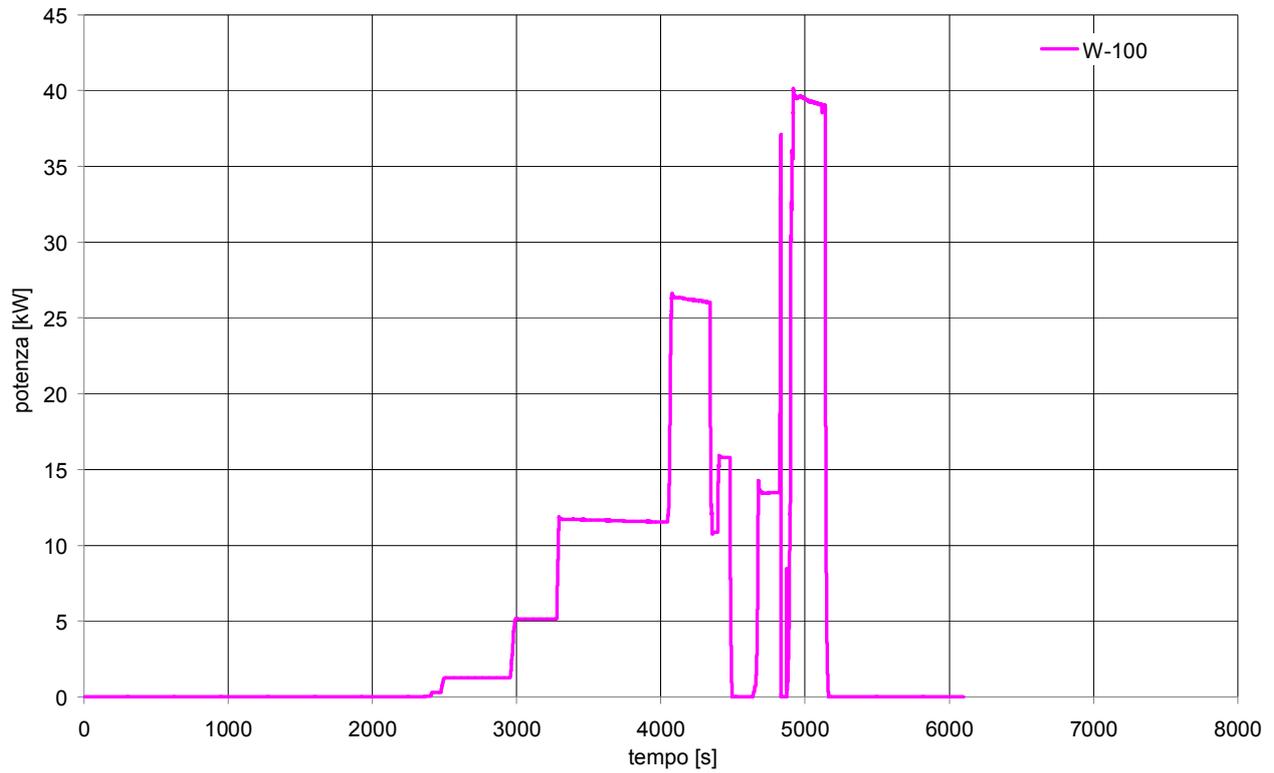
#	Figure di riferimento	Commenti sul test
1	Fig. 8.1 Fig. 8.2	Test eseguito a bassa potenza e media pressione, in modo da verificare: <ul style="list-style-type: none"> <li>○ la risposta delle barre scaldanti in fase di generazione di potenza (fino a circa 12 kW, vedi Fig. 8.1) e la loro stabilità nel tempo;</li> <li>○ la pressurizzazione del sistema tramite la candela scaldante.</li> </ul>
2	Fig. 8.3 Fig. 8.4 Fig. 8.5	Test eseguito a media potenza e media pressione, in modo da validare il test precedentemente effettuato.
3	Fig. 8.6 Fig. 8.7 Fig. 8.8 Fig. 8.9 Fig. 8.10	Test eseguito ad alta potenza ed alta pressione in modo da settare i principali parametri dell'impianto. Si è proceduto alla depressurizzazione del sistema verificando la corretta attivazione dei set-point di pressione.
4	Fig. 8.11 Fig. 8.12 Fig. 8.13 Fig. 8.14 Fig. 8.15	Test eseguito con salita graduale in pressione e potenza, entrambe le grandezze sono sotto i valori di esercizio. Depressurizzazione del sistema eseguita in modo corretto.
5	Fig. 8.16 Fig. 8.17 Fig. 8.18 Fig. 8.19 Fig. 8.20	Test eseguito con salita graduale in pressione e potenza, entrambe le grandezze sono sotto i valori di esercizio. Depressurizzazione del sistema eseguita in modo corretto. Sganci di potenza dovuti al settaggio delle soglie di allarme d'impianto a un valore inferiore a quello di esercizio.
6	Fig. 8.21 Fig. 8.22 Fig. 8.23 Fig. 8.24 Fig. 8.25 Fig. 8.26 Fig. 8.27	Test eseguito con salita graduale in pressione e potenza, entrambe le grandezze sono sotto i valori di esercizio. Depressurizzazioni intermedie del sistema tramite drenaggio di liquido per limitare la salita rapida in pressione. Depressurizzazione del sistema eseguita in modo corretto. Diminuzione di potenza antecedente alla depressurizzazione per limitare la salita rapida in pressione del sistema.
7	Fig. 8.28 Fig. 8.29 Fig. 8.30	Test di crisi termica eseguito a bassa pressione e potenza. Raggiungimento di temperature di barra elevate ma ben al di sotto del limite dichiarato nella specifica del costruttore.



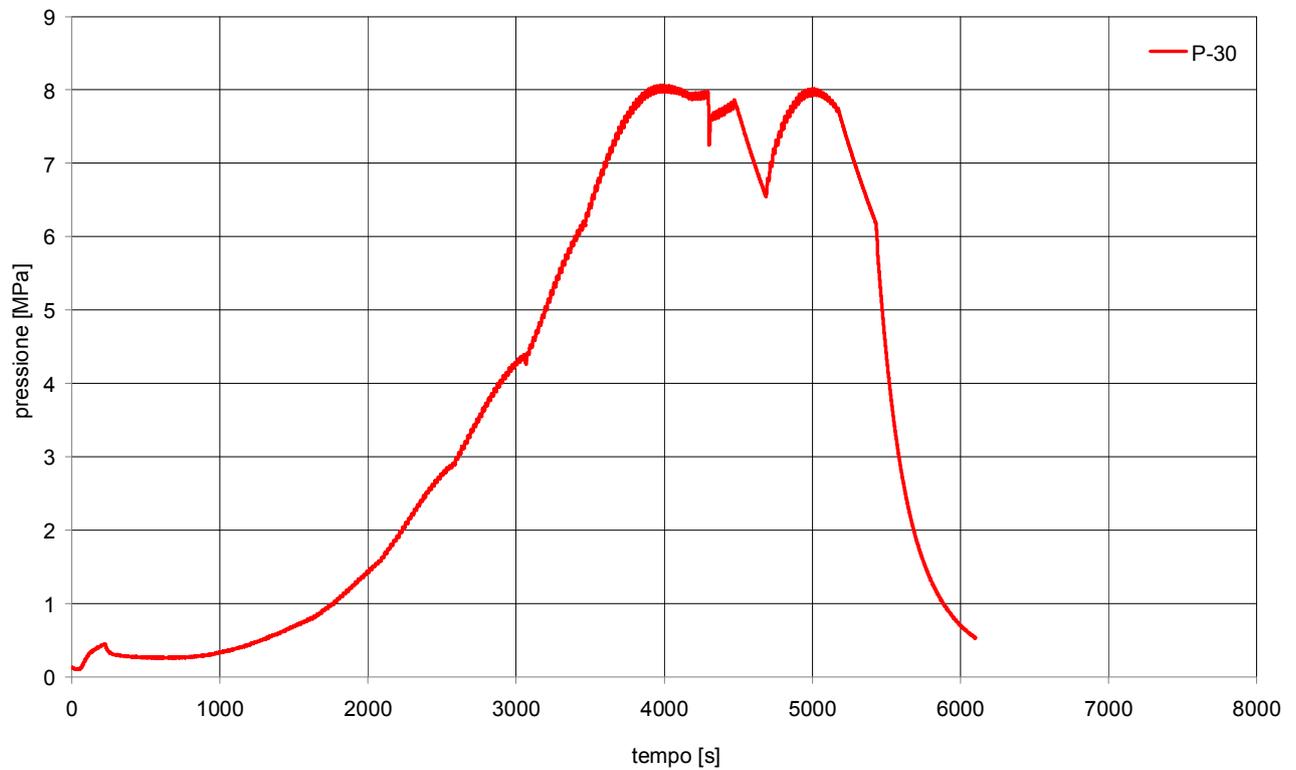
**Fig. 8. 1 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°1**



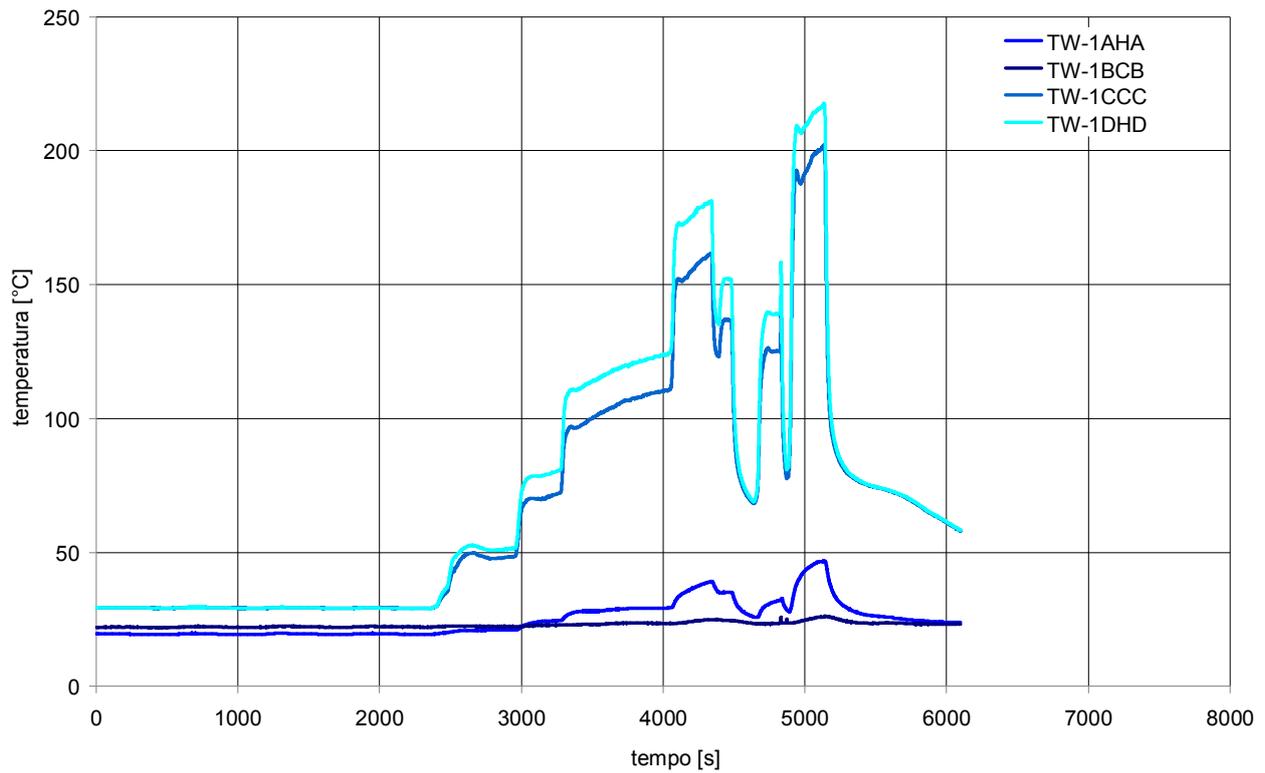
**Fig. 8. 2 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°1**



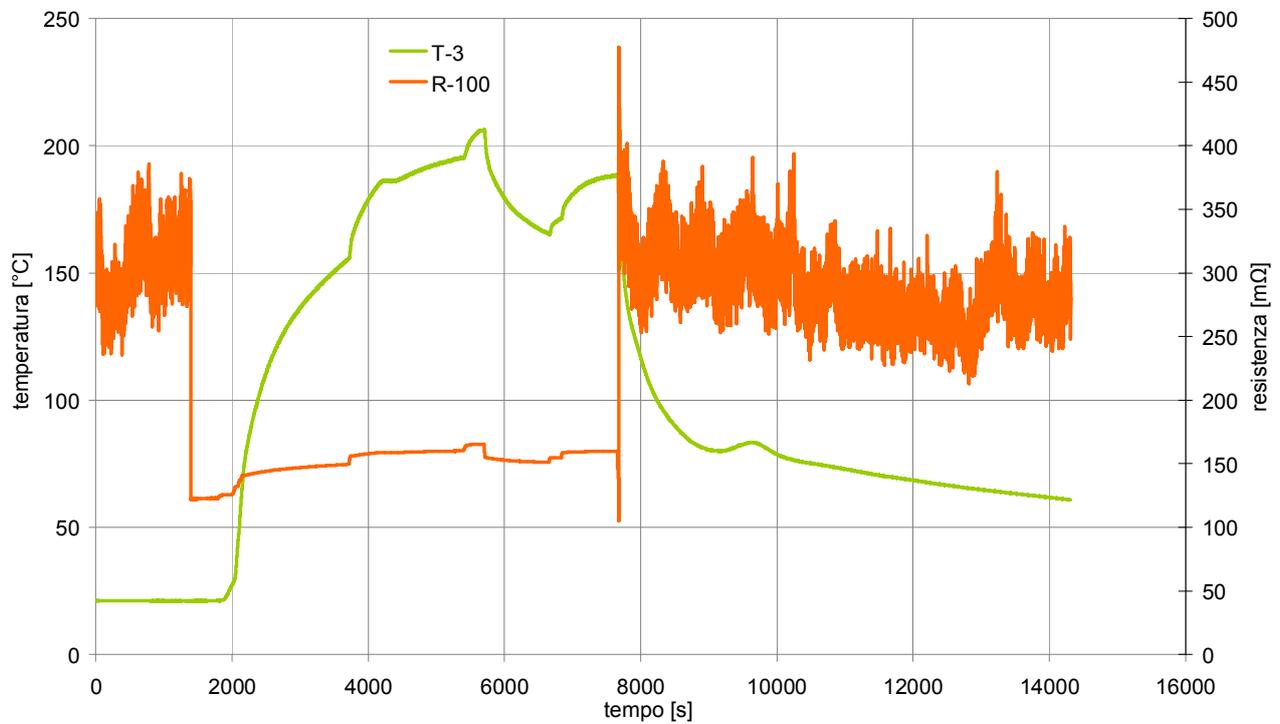
**Fig. 8.3 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°2**



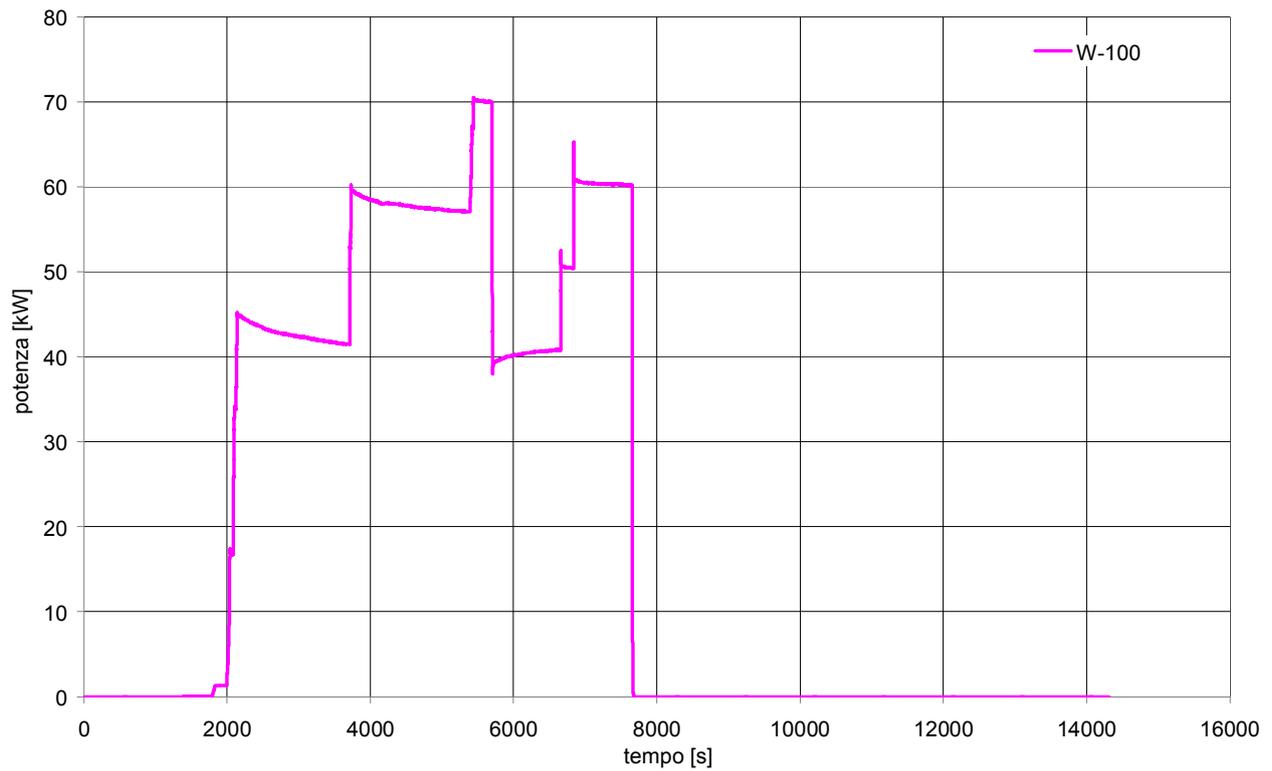
**Fig. 8.4 - Andamento della pressione circuito prova barre per il Test n°2**



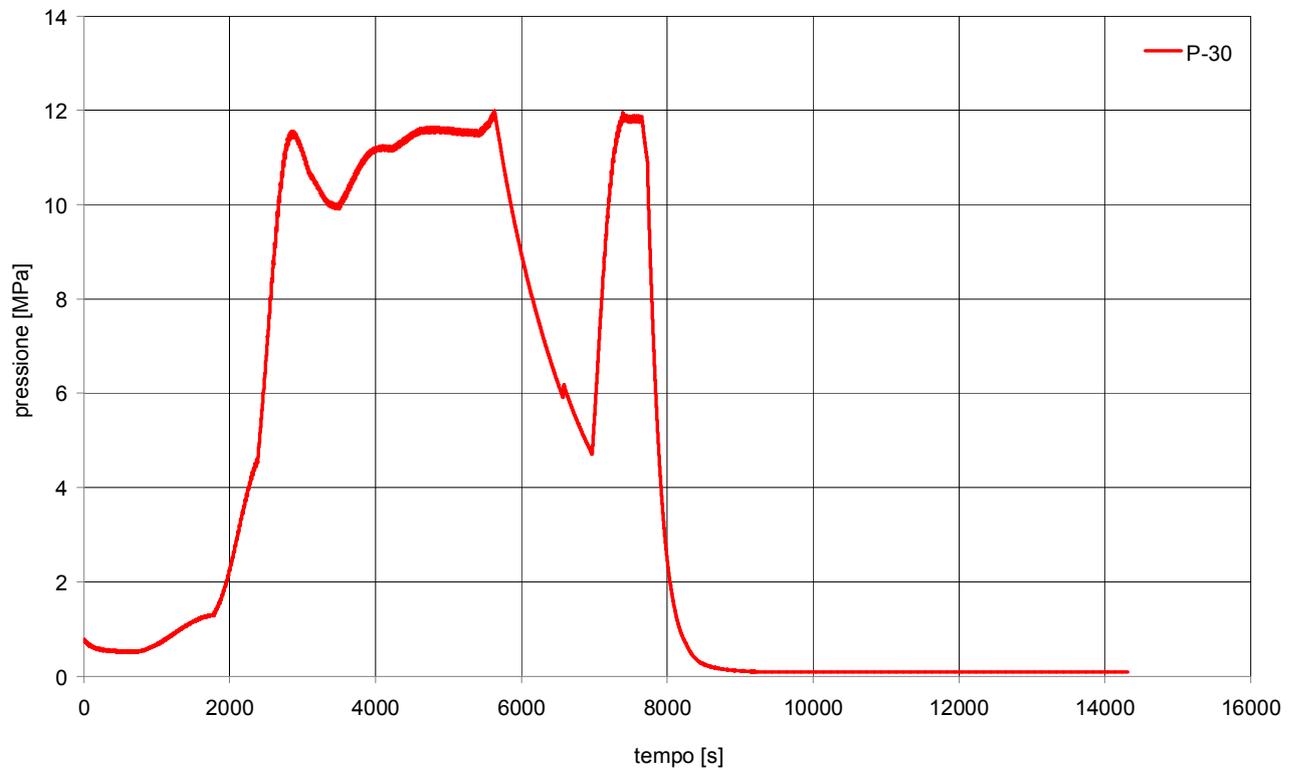
**Fig. 8. 5 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°2**



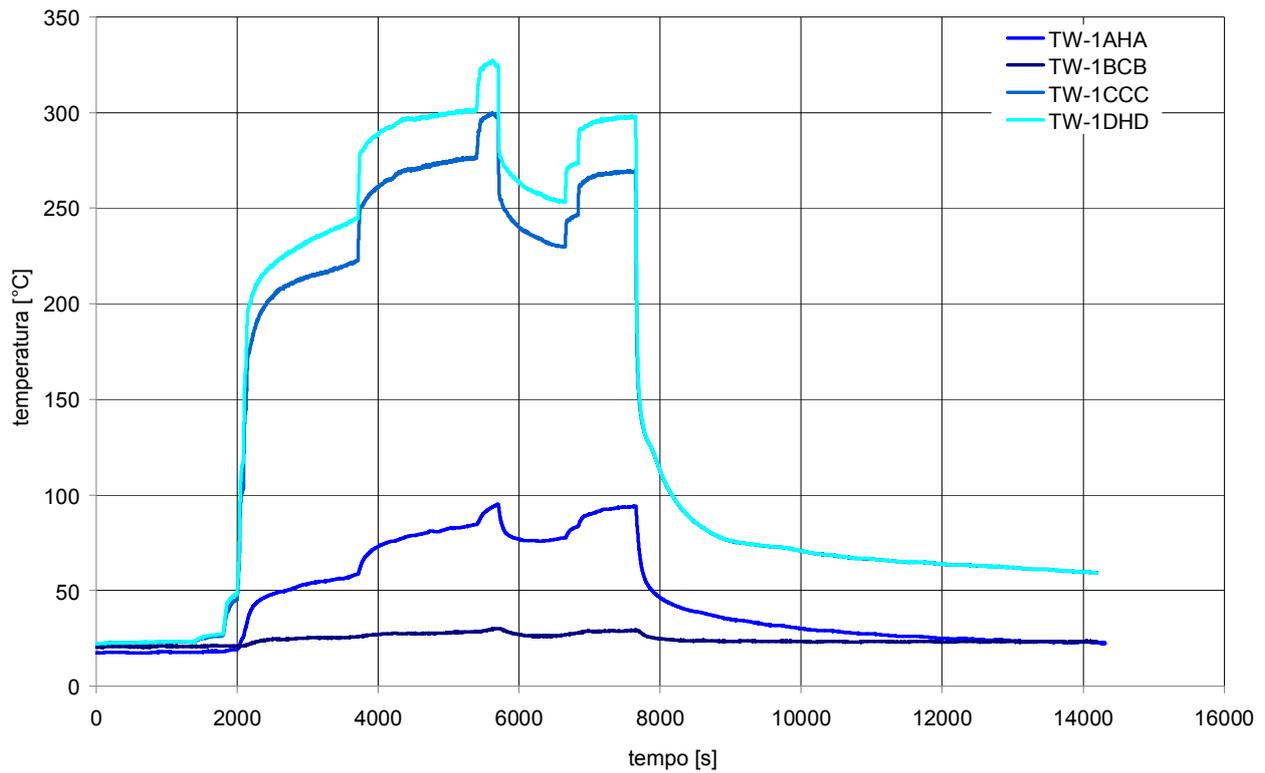
**Fig. 8. 6 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°3**



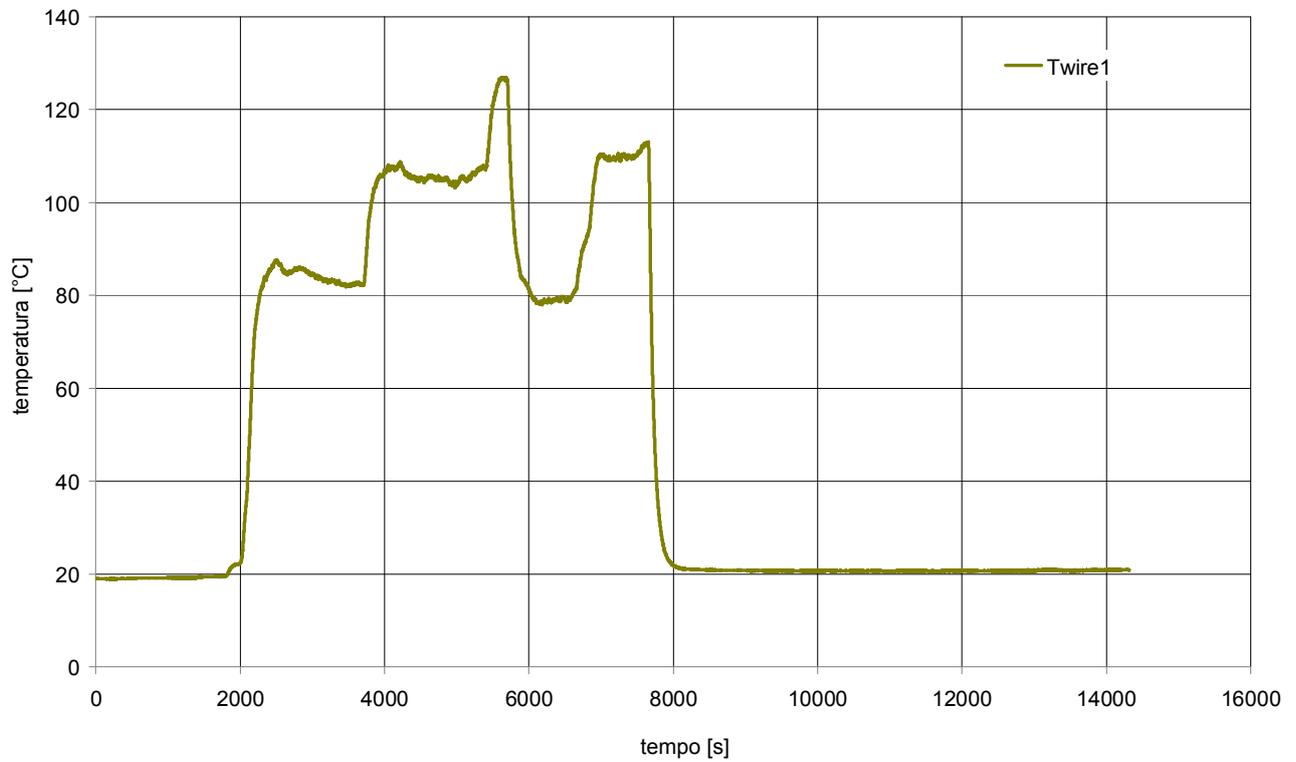
**Fig. 8. 7 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°3**



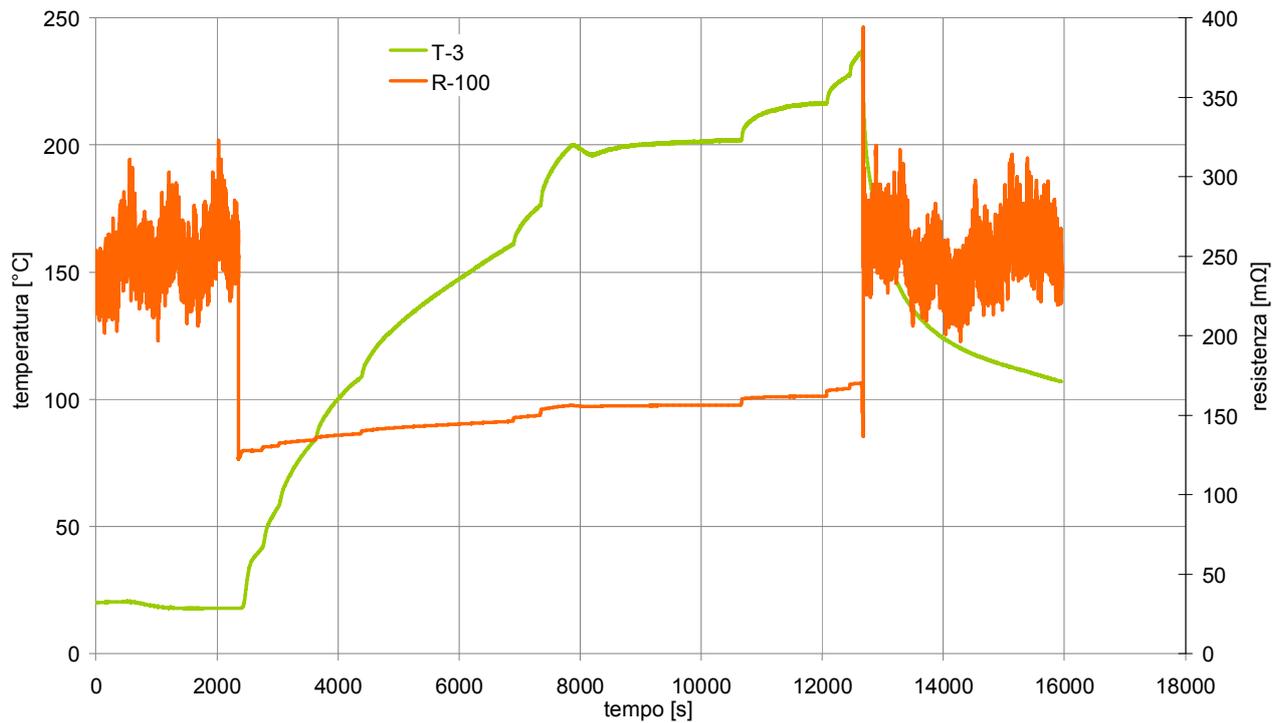
**Fig. 8. 8 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°3**



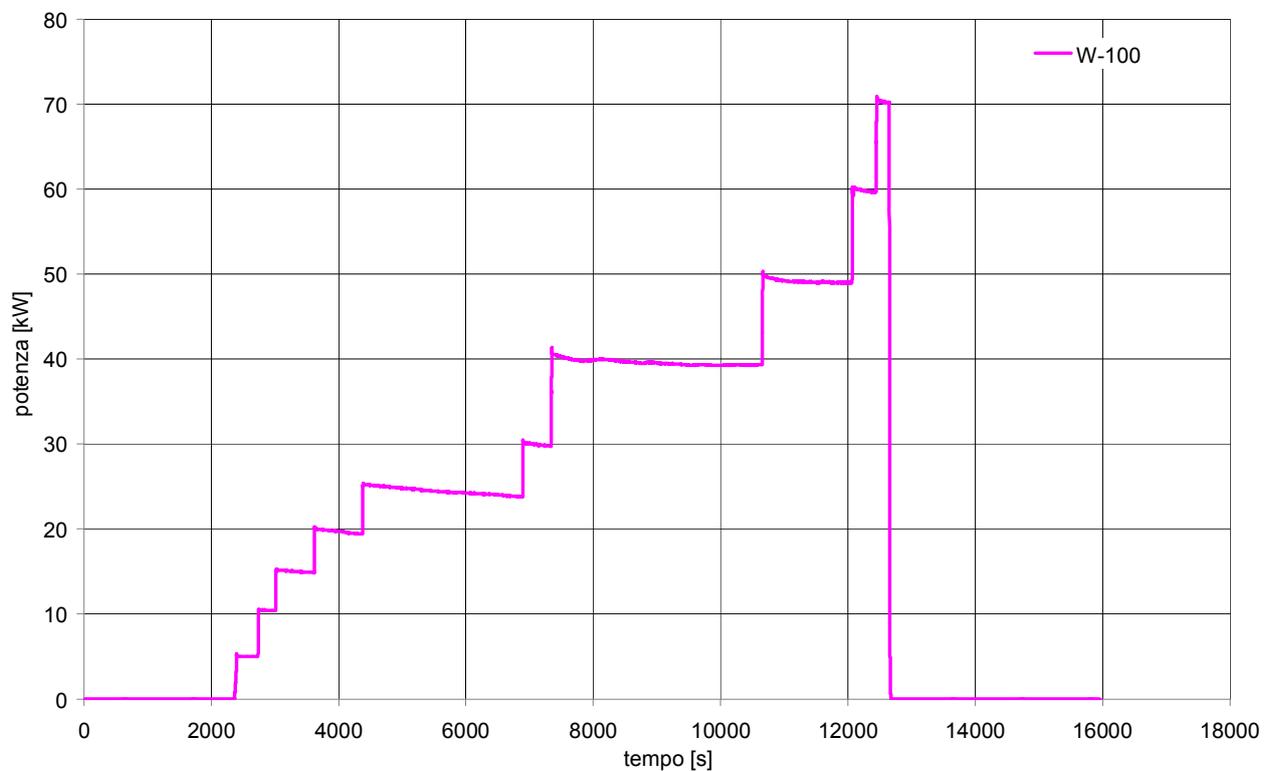
**Fig. 8. 9 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°3**



**Fig. 8. 10 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°3**



**Fig. 8. 11 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°4**



**Fig. 8. 12 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°4**

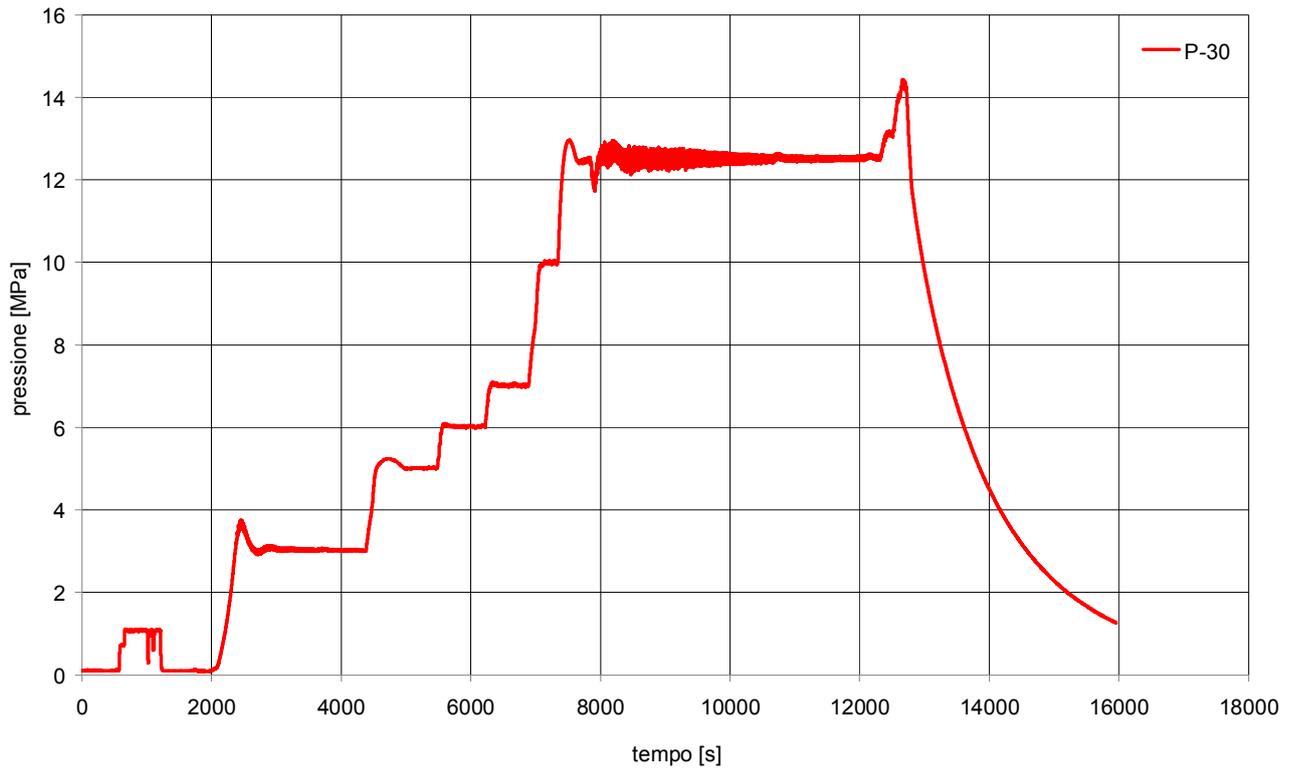


Fig. 8. 13 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°4

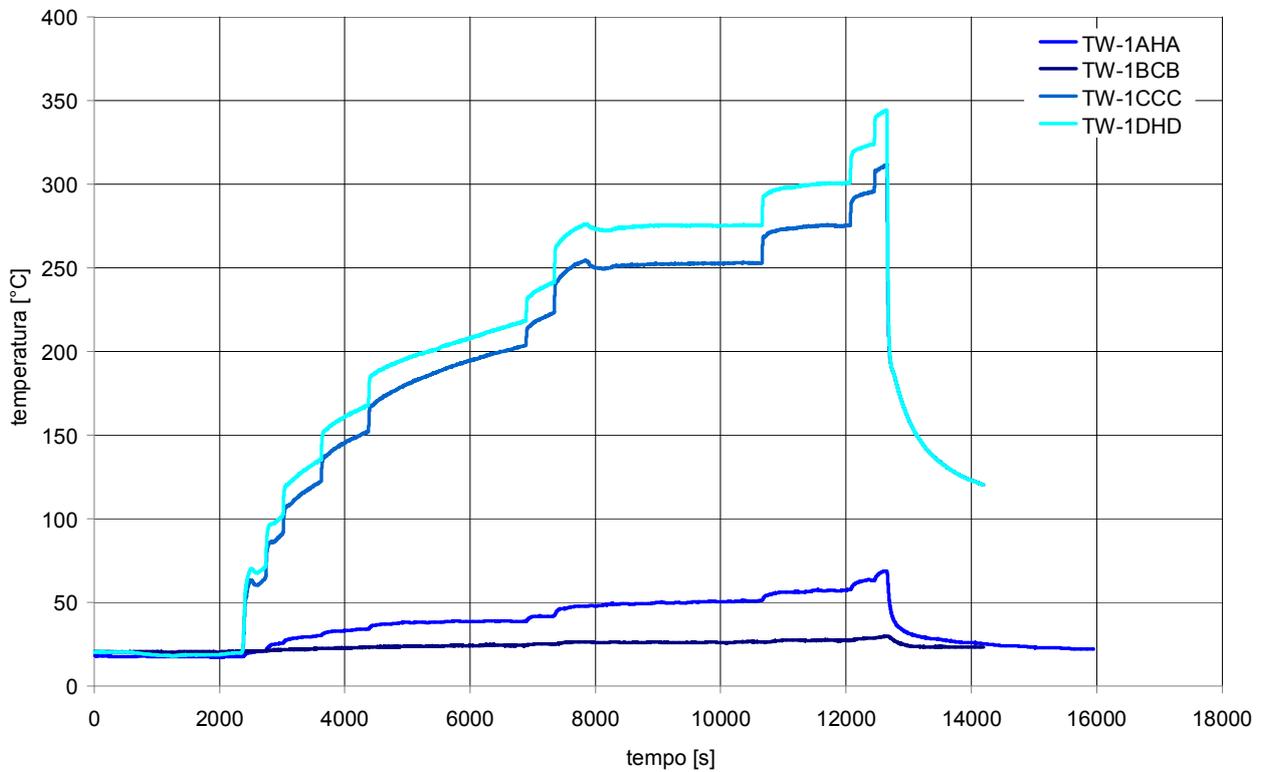
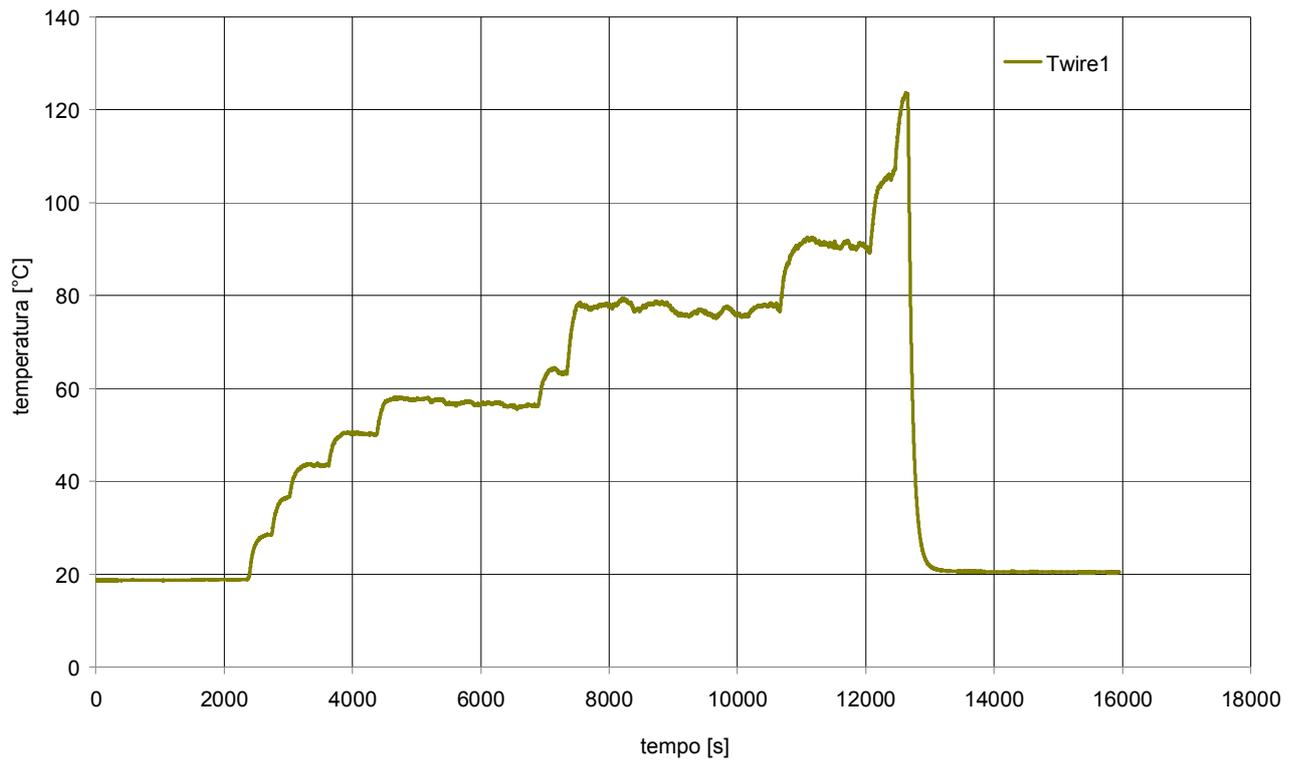
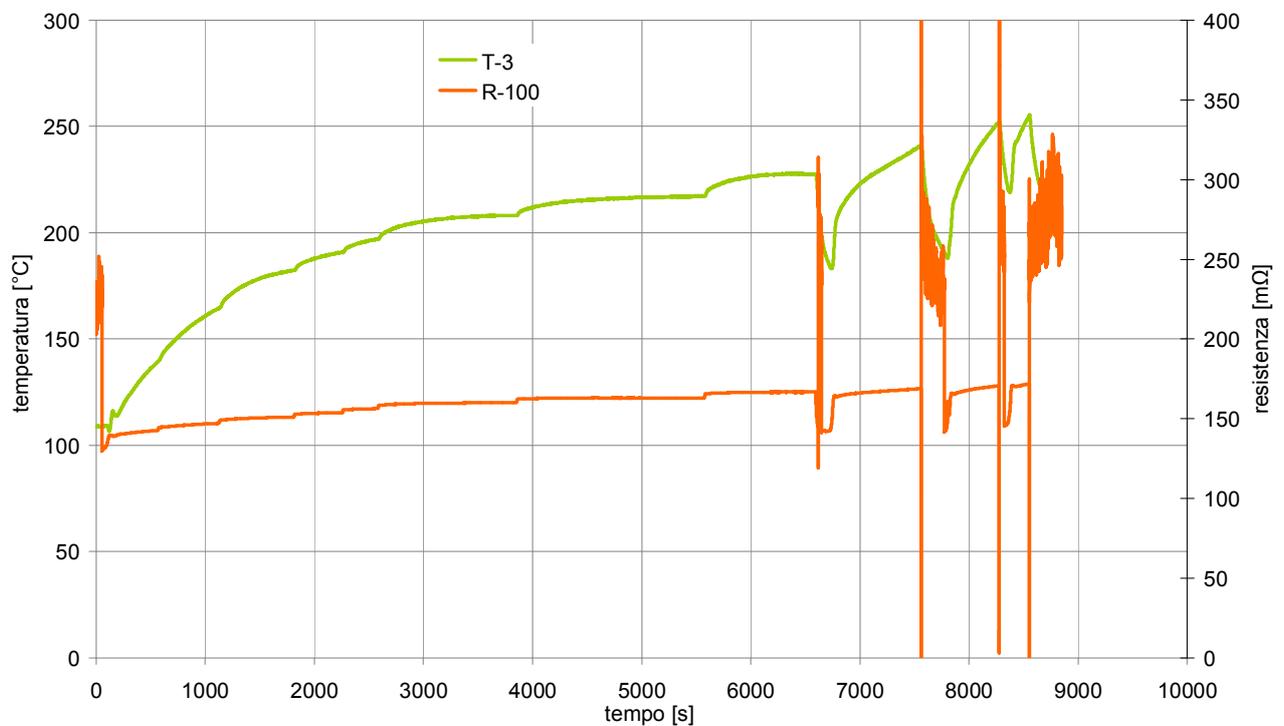


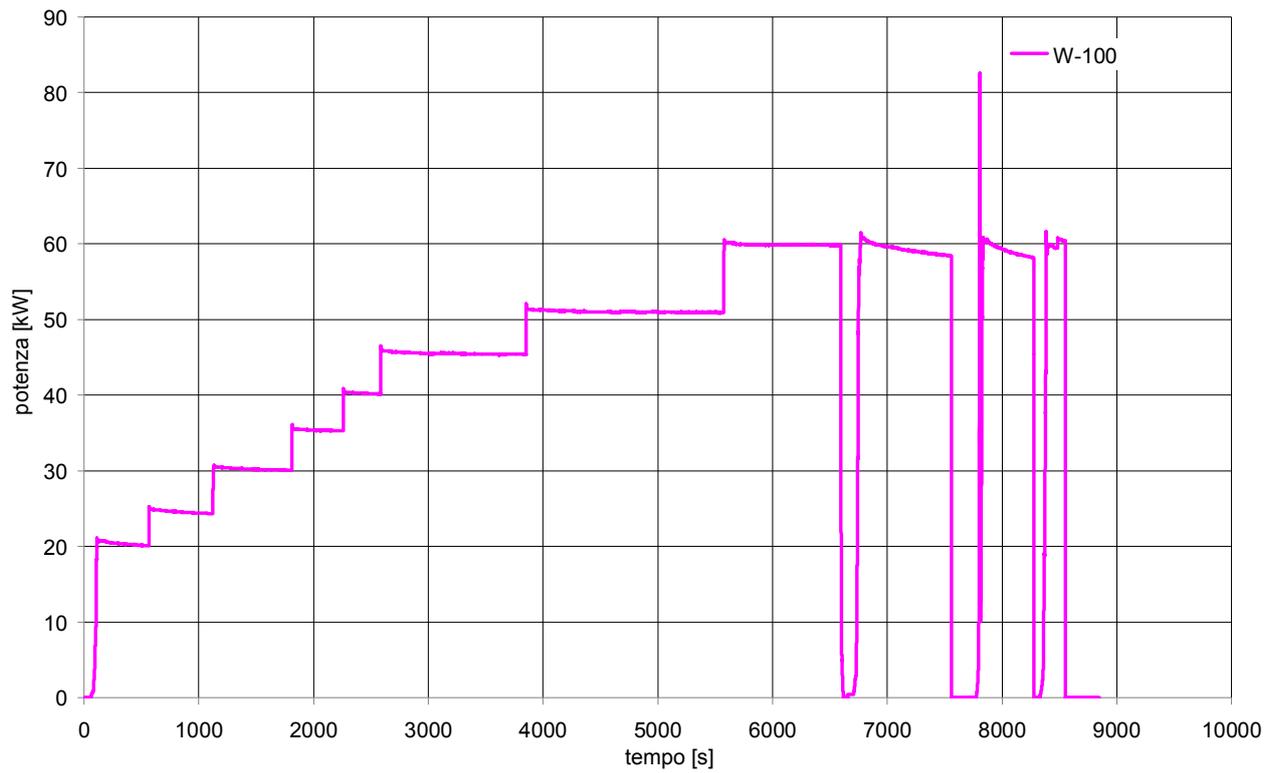
Fig. 8. 14 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°4



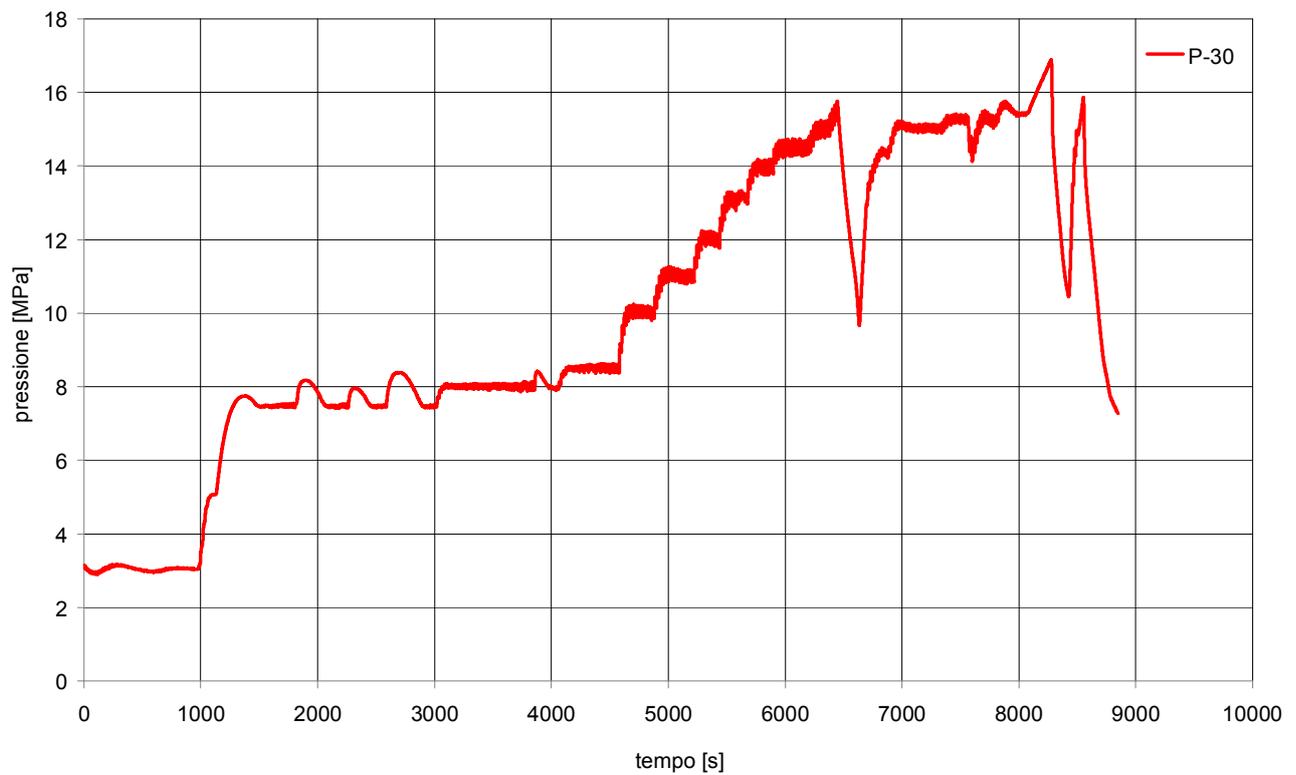
**Fig. 8. 15 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “ terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°4**



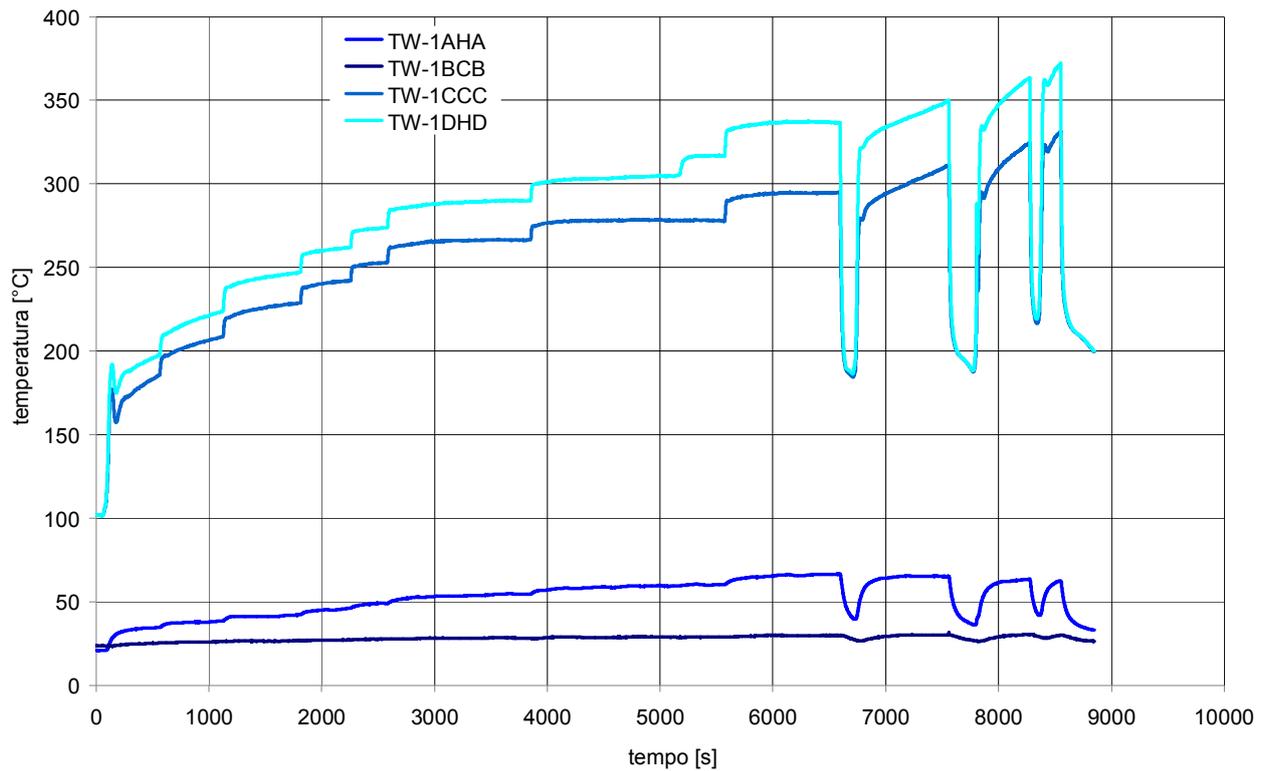
**Fig. 8. 16 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°5**



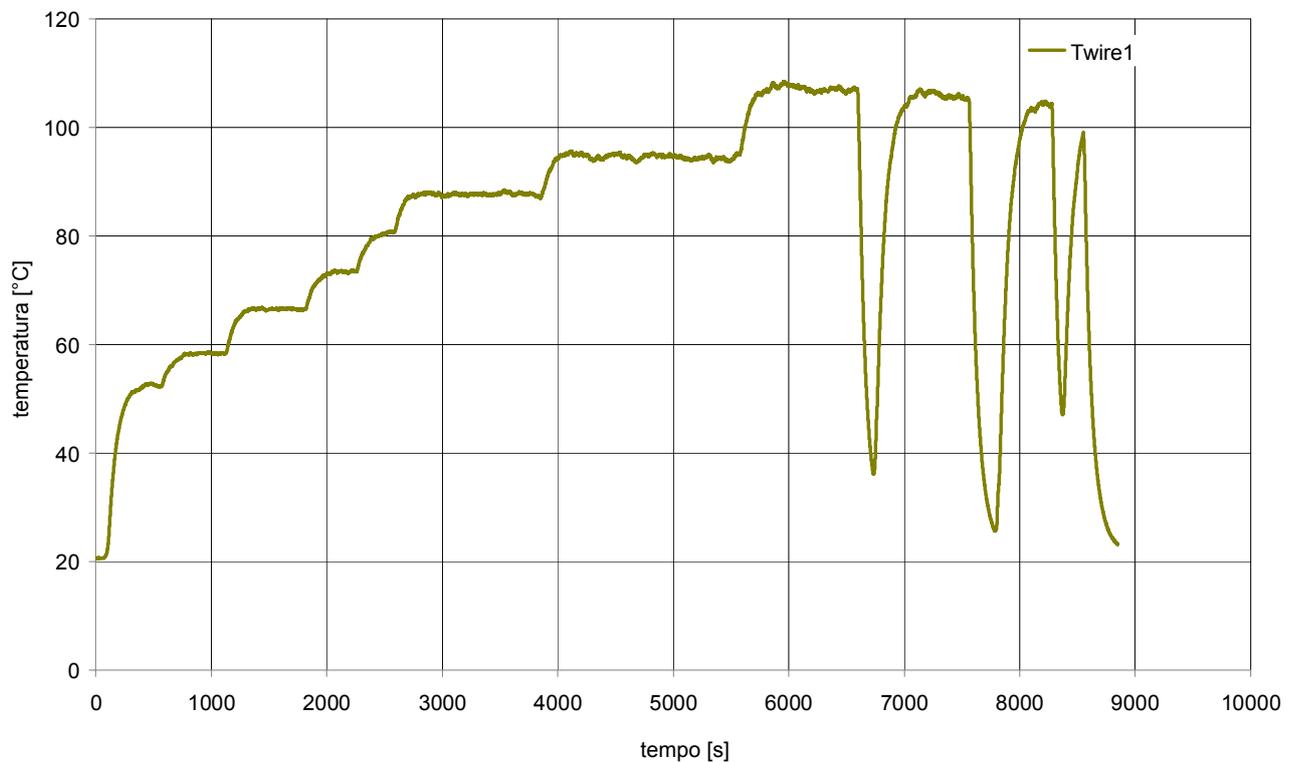
**Fig. 8. 17 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°5**



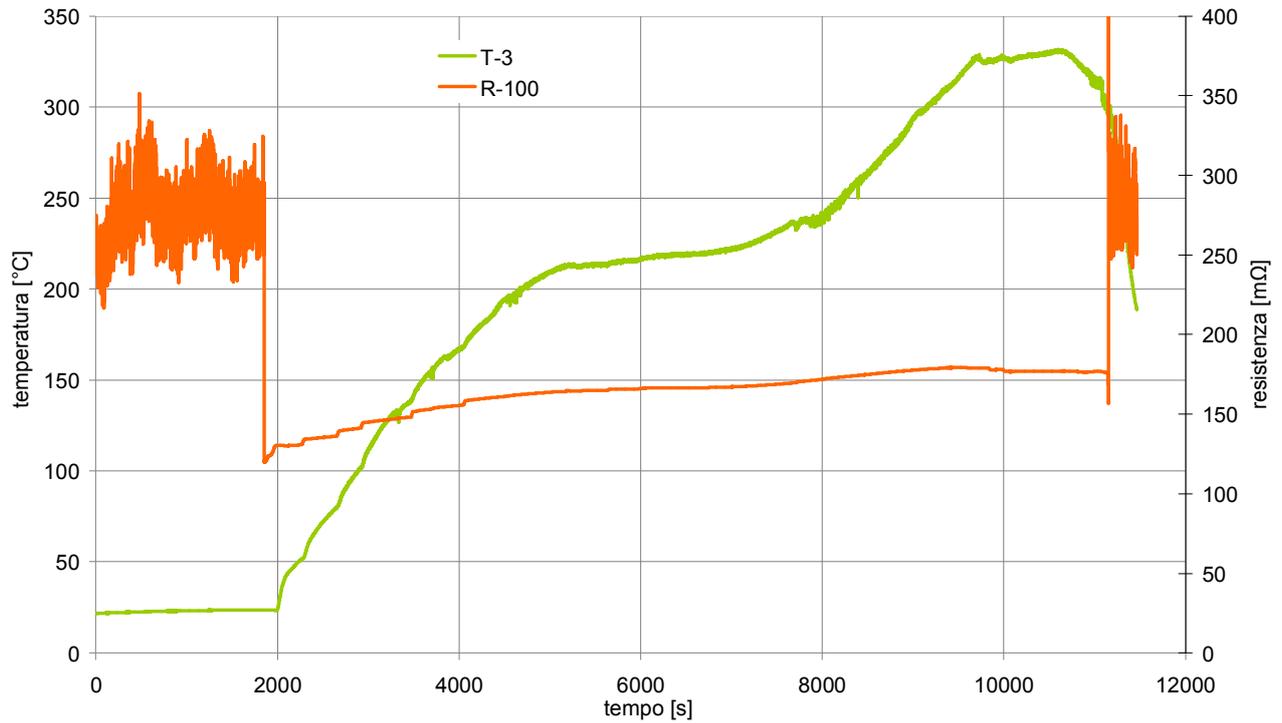
**Fig. 8. 18 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°5**



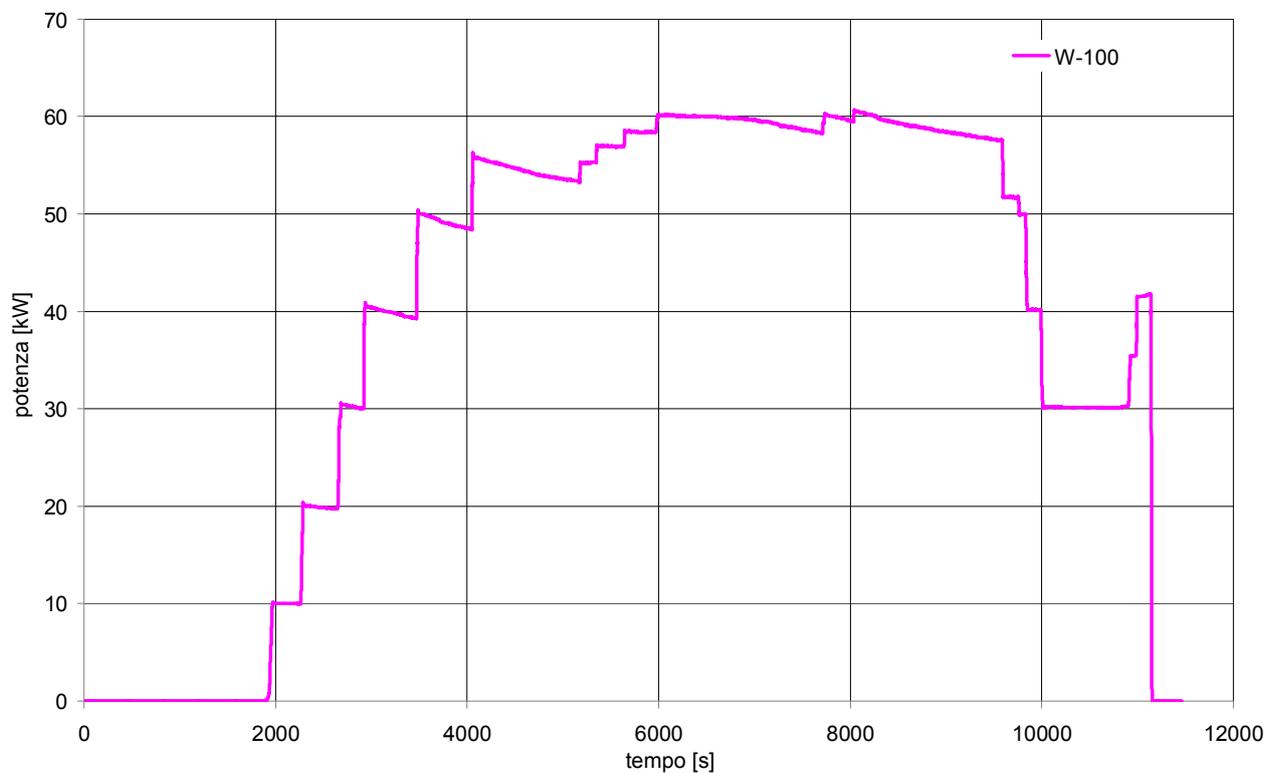
**Fig. 8. 19 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°5**



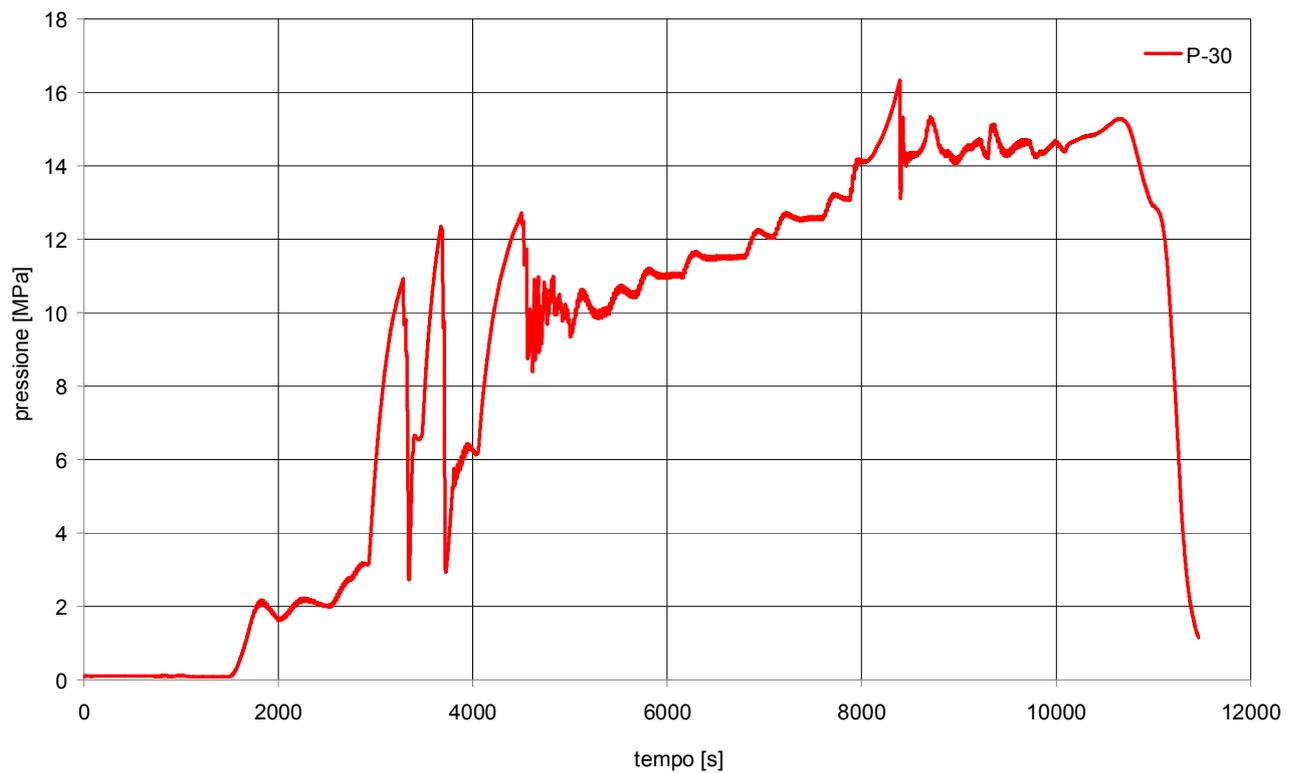
**Fig. 8. 20 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°5**



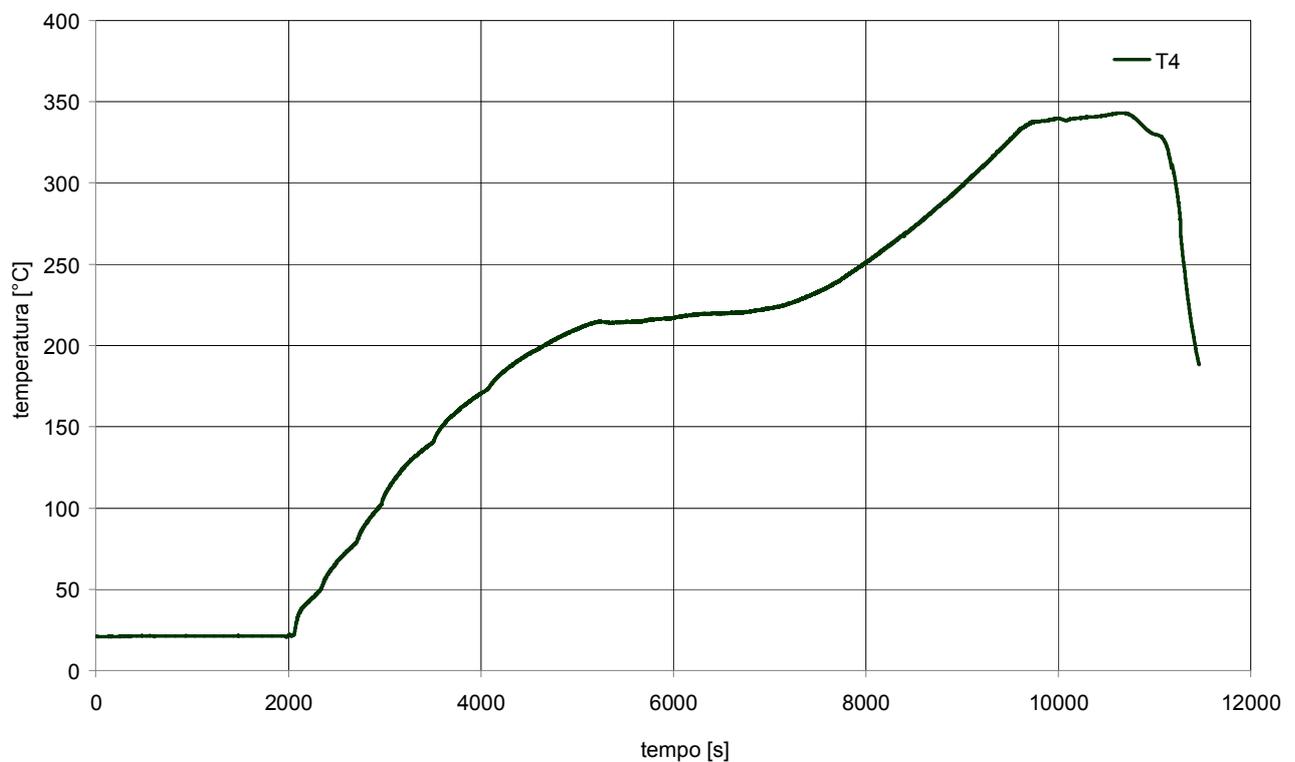
**Fig. 8. 21 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°6**



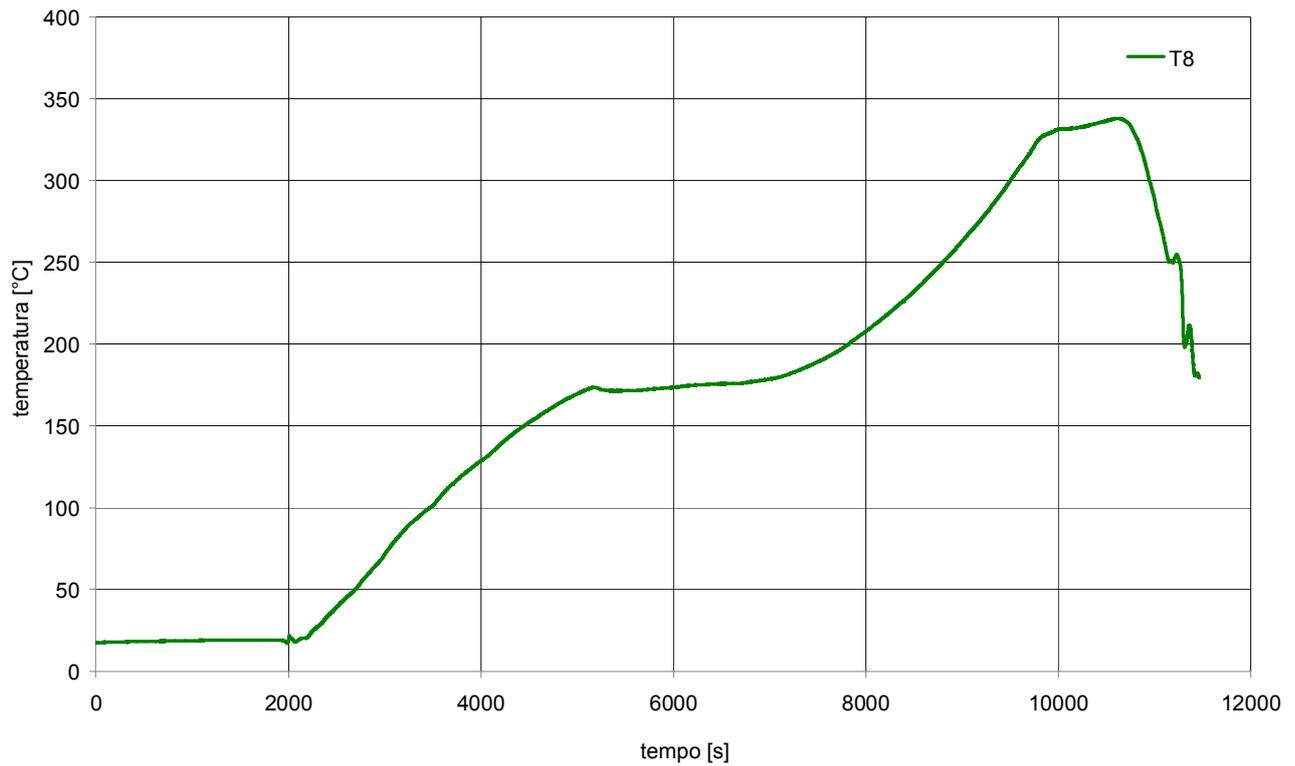
**Fig. 8. 22 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°6**



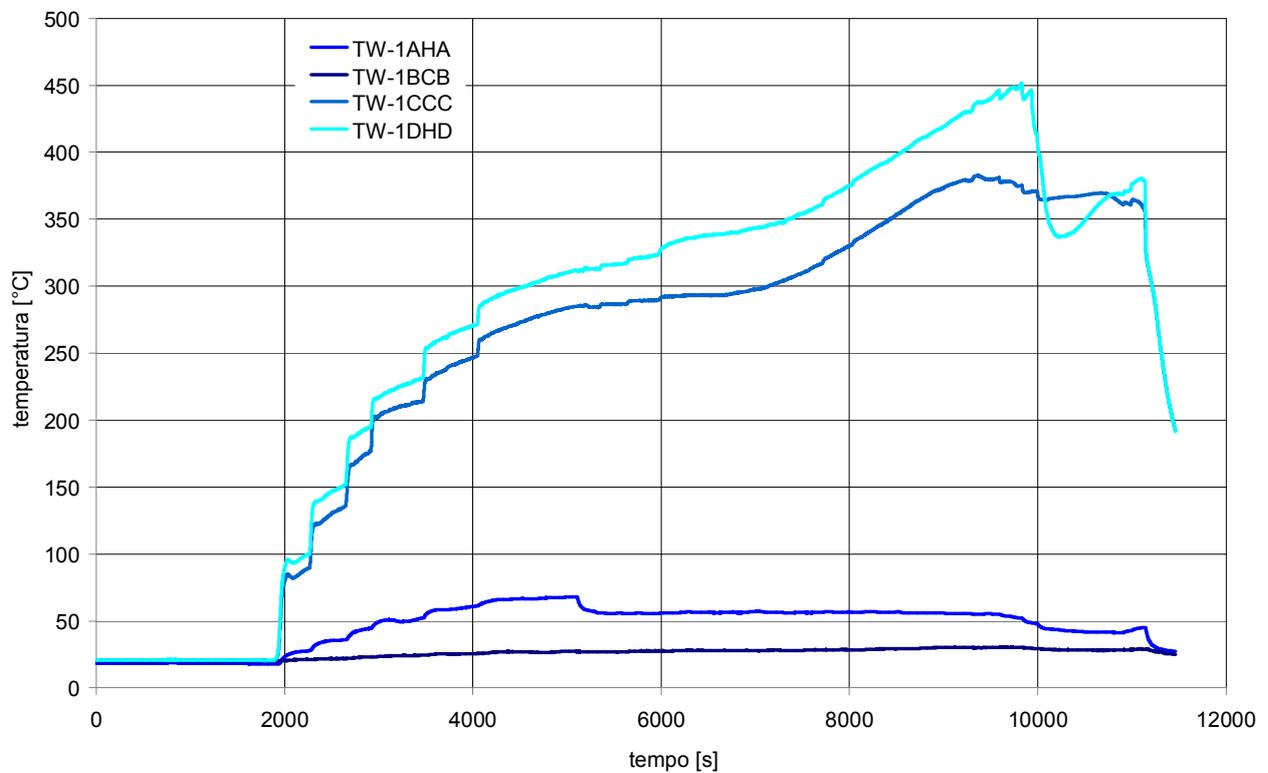
**Fig. 8. 23 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°6**



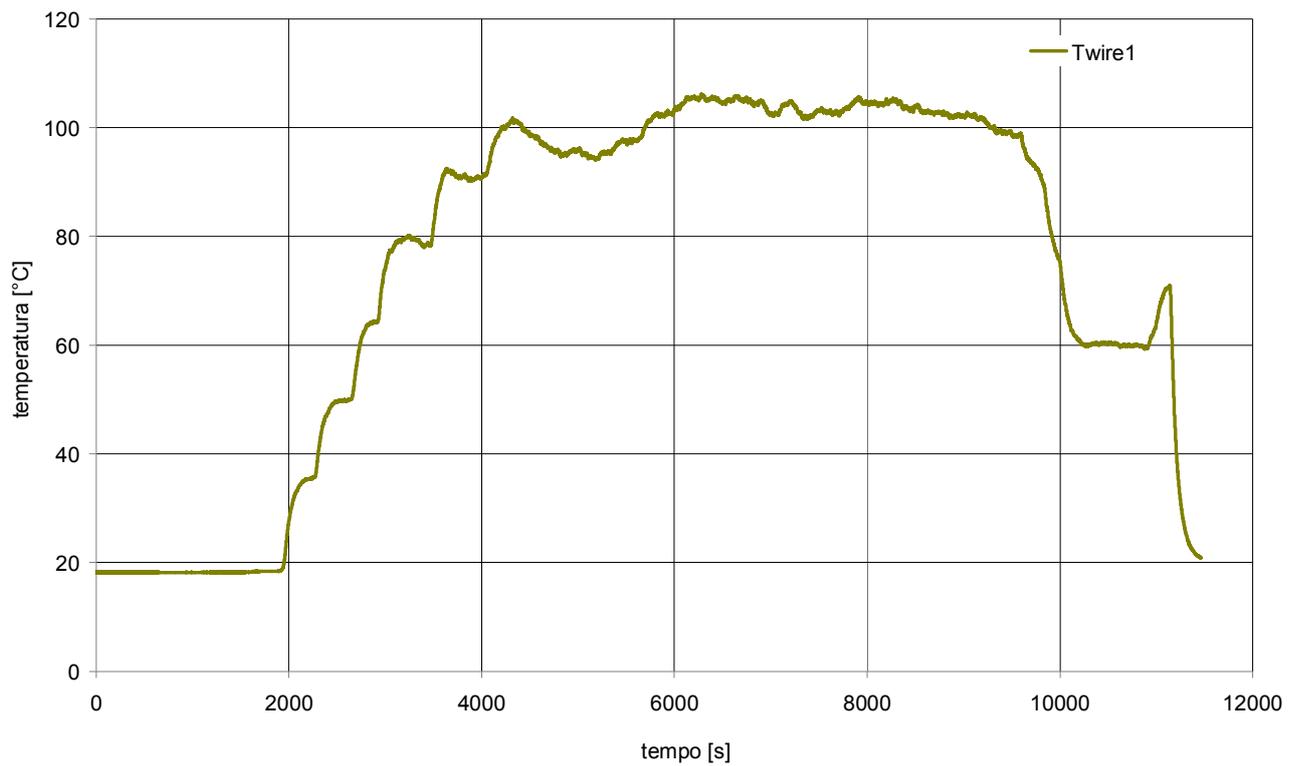
**Fig. 8. 24 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°6**



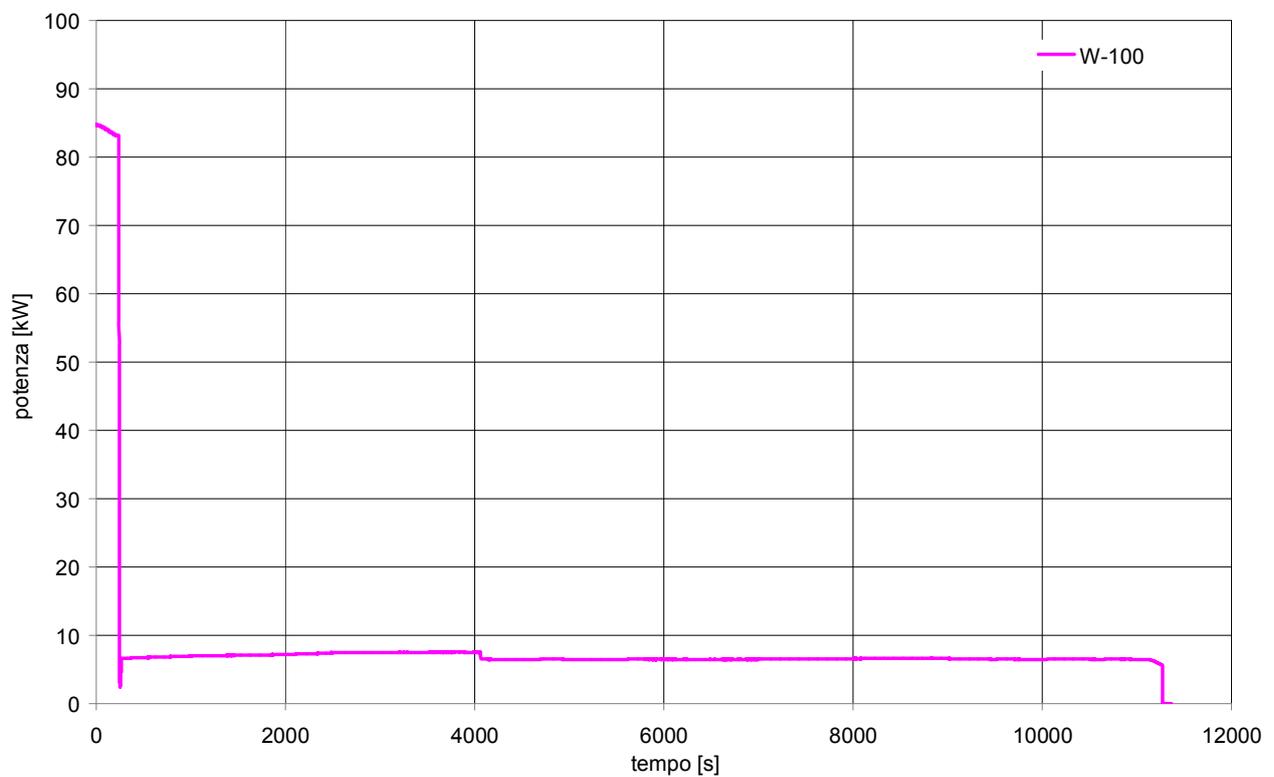
**Fig. 8. 25 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°6**



**Fig. 8. 26 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°6**



**Fig. 8. 27 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°6**



**Fig. 8. 28 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°7**

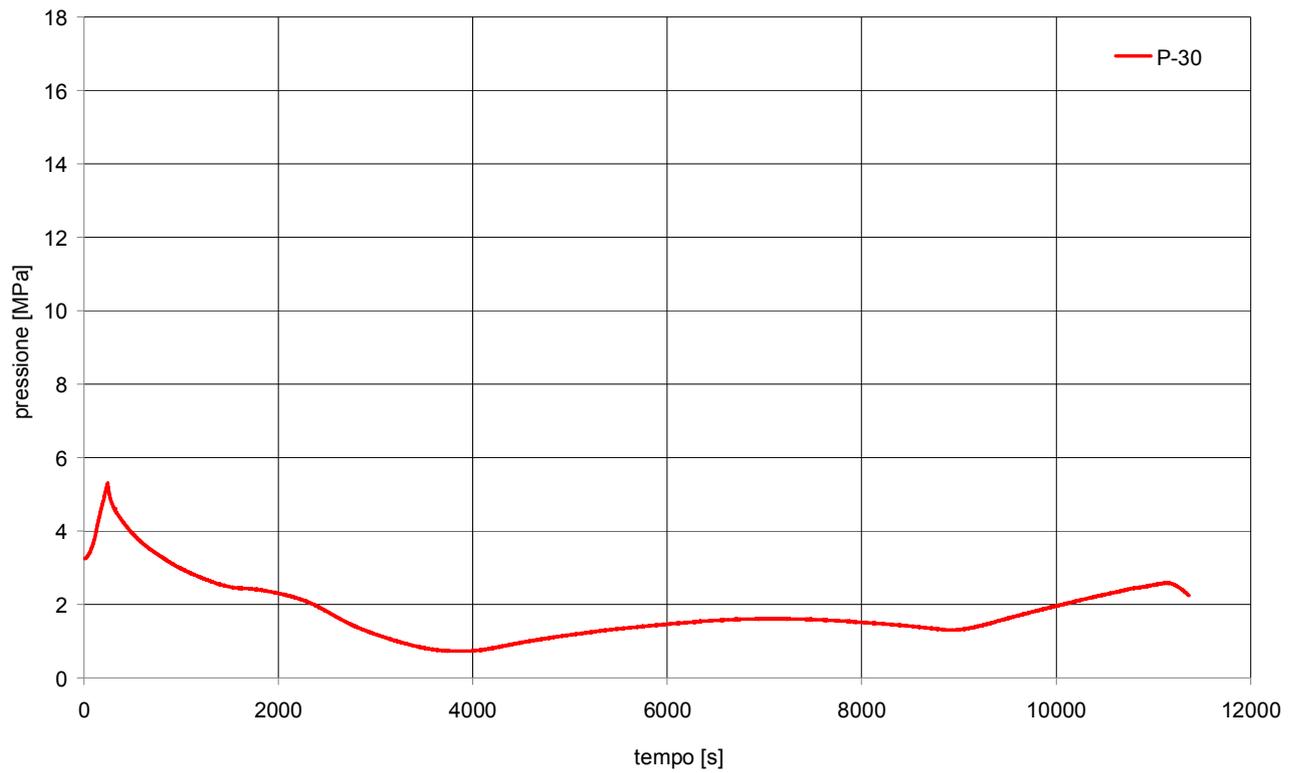


Fig. 8.29 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°7

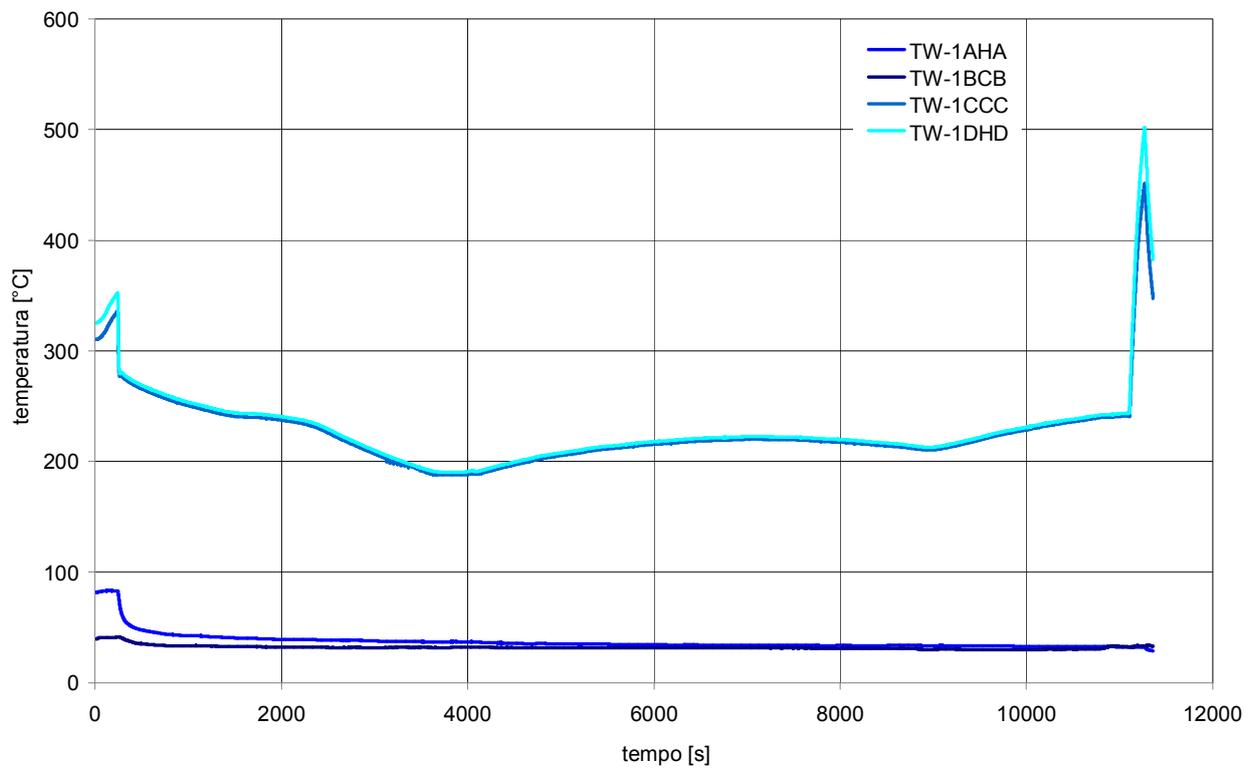


Fig. 8.30 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°7

## 8.2 Nominal test

In questo paragrafo sono descritte le prove di ciclaggio termico.

Per le principali fasi operative delle prove di ciclaggio si rimanda al paragrafo 7.3 in cui è descritta la procedura di prova.

In Tab.8. 5 sono identificati i 30 test eseguiti, successivamente commentati in Tab.8. 6.

**Tab.8. 5 – Elenco dei Nominal Test effettuati**

#	nome_file_acquisizione	descrizione prova
8	2011-05-12_14:42.xls	NOMINAL TEST
9	2011-05-13_9:53.xls	NOMINAL TEST
10	2011-05-16_10:23.xls	NOMINAL TEST
11	2011-05-18_9:48.xls	NOMINAL TEST
12	2011-05-19_9:46.xls	NOMINAL TEST
13	2011-05-19_12:58.xls	NOMINAL TEST
14	2011-05-20_9:34.xls	NOMINAL TEST
15	2011-05-23_8:54.xls	NOMINAL TEST
16	2011-05-23_12:37.xls	NOMINAL TEST
17	2011-05-23_14:41.xls	NOMINAL TEST
18	2011-05-24_8:35.xls	NOMINAL TEST
19	2011-05-24_11:18.xls	NOMINAL TEST
20	2011-05-24_12:41.xls	NOMINAL TEST
21	2011-05-25_8:26.xls	NOMINAL TEST
22	2011-05-25_11:21.xls	NOMINAL TEST
23	2011-05-25_12:56.xls	NOMINAL TEST
24	2011-05-25_14:27.xls	NOMINAL TEST
25	2011-05-26_8:34.xls	NOMINAL TEST
26	2011-05-26_11:01.xls	NOMINAL TEST
27	2011-05-26_12:26.xls	NOMINAL TEST
28	2011-05-26_13:42.xls	NOMINAL TEST
29	2011-05-27_8:18.xls	NOMINAL TEST
30	2011-05-27_11:32.xls	NOMINAL TEST
31	2011-05-27_12:57.xls	NOMINAL TEST
32	2011-05-27_14:08.xls	NOMINAL TEST
33	2011-05-30_8:43.xls	NOMINAL TEST
34	2011-05-30_11:21.xls	NOMINAL TEST
35	2011-05-30_13:01.xls	NOMINAL TEST
36	2011-05-31_8:40.xls	NOMINAL TEST
37	2011-05-31_11:29.xls	NOMINAL TEST

**Tab.8. 6 – Dettagli sui Nominal Test elencati in Tab.8. 5**

#	Figure di riferimento	Commenti sul test
8	Fig. 8.31 Fig. 8.32 Fig. 8.33 Fig. 8.34 Fig. 8.35 Fig. 8.36 Fig. 8.37	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare uno sgancio di potenza per il raggiungimento della soglia di allarme per massima pressione (17 MPa) al tempo $t \approx 7000$ s, vedi Fig. 8.32.
9	Fig. 8.38 Fig. 8.39 Fig. 8.40 Fig. 8.41 Fig. 8.42 Fig. 8.43 Fig. 8.44	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare una diminuzione della potenza sotto il valore ridotto del 7% durante la depressurizzazione del sistema; ciò è da imputare alla maggiore riduzione di resistenza con il decrescere della temperatura, vedi Fig. 8.39.
10	Fig. 8.45 Fig. 8.46 Fig. 8.47 Fig. 8.48 Fig. 8.49 Fig. 8.50 Fig. 8.51 Fig. 8.52	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare anomalia registrata al tempo $t \approx 3500$ s dovuta all'aumento della temperatura di barra intorno ai valori di progetto secondo [1]. L'anomalia è stata causata da un asciugamento per l'interruzione della portata in circolazione naturale, come mostrato in Fig. 8.52.
11	Fig. 8.53 Fig. 8.54 Fig. 8.55 Fig. 8.56 Fig. 8.57 Fig. 8.58 Fig. 8.59	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
12	Fig. 8.60 Fig. 8.61 Fig. 8.62 Fig. 8.63 Fig. 8.64 Fig. 8.65 Fig. 8.66	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare una diminuzione di potenza al tempo $t \approx 6500$ s, Fig. 8.61, per limitare la salita rapida in pressione del sistema.
13	Fig. 8.67 Fig. 8.68 Fig. 8.69 Fig. 8.70 Fig. 8.71 Fig. 8.72 Fig. 8.73	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare alcuni sganci di potenza per superamento della soglia di allarme di pressione elevata (17 MPa), Fig. 8.68; ulteriori sganci di potenza manuali per stabilizzare il sistema.
14	Fig. 8.74 Fig. 8.75 Fig. 8.76 Fig. 8.77 Fig. 8.78 Fig. 8.79 Fig. 8.80	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare sganci di potenza, Fig. 8.80, per superamento soglia di allarme per elevata temperatura della termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" ( $T=195$ °C).

#	Figure di riferimento	Commenti sul test
15	Fig. 8.81 Fig. 8.82 Fig. 8.83 Fig. 8.84 Fig. 8.85 Fig. 8.86 Fig. 8.87	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
16	Fig. 8.88 Fig. 8.89 Fig. 8.90 Fig. 8.91 Fig. 8.92 Fig. 8.93 Fig. 8.94	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
17	Fig. 8.95 Fig. 8.96 Fig. 8.97 Fig. 8.98 Fig. 8.99 Fig. 8.100 Fig. 8.101	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare uno sgancio di potenza al tempo $t \approx 650$ s per superamento soglia di allarme temperatura "terminazioni elettriche barre scaldanti" ( $T=195$ °C).
18	Fig. 8.102 Fig. 8.103 Fig. 8.104 Fig. 8.105 Fig. 8.106 Fig. 8.107 Fig. 8.108	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
19	Fig. 8.109 Fig. 8.110 Fig. 8.111 Fig. 8.112 Fig. 8.113 Fig. 8.114 Fig. 8.115	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
20	Fig. 8.116 Fig. 8.117 Fig. 8.118 Fig. 8.119 Fig. 8.120 Fig. 8.121 Fig. 8.122	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
21	Fig. 8.123 Fig. 8.124 Fig. 8.125 Fig. 8.126 Fig. 8.127 Fig. 8.128 Fig. 8.129	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.

#	Figure di riferimento	Commenti sul test
22	Fig. 8.130 Fig. 8.131 Fig. 8.132 Fig. 8.133 Fig. 8.134 Fig. 8.135 Fig. 8.136	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
23	Fig. 8.137 Fig. 8.138 Fig. 8.139 Fig. 8.140 Fig. 8.141 Fig. 8.142 Fig. 8.143	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
24	Fig. 8.144 Fig. 8.145 Fig. 8.146 Fig. 8.147 Fig. 8.148 Fig. 8.149 Fig. 8.150 Fig. 8.151	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Si segnala una variazione della temperatura "circuito primario iniezione linea ritorno" al tempo $t \approx 4500$ s non in linea con le altre prove effettuate. Ciò è da attribuire alla riduzione della portata in circolazione naturale rispetto al suo valore nominale, Fig. 8.151, dopo l'apertura dell'EBT.
25	Fig. 8.152 Fig. 8.153 Fig. 8.154 Fig. 8.155 Fig. 8.156 Fig. 8.157 Fig. 8.158	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
26	Fig. 8.159 Fig. 8.160 Fig. 8.161 Fig. 8.162 Fig. 8.163 Fig. 8.164 Fig. 8.165	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
27	Fig. 8.166 Fig. 8.167 Fig. 8.168 Fig. 8.169 Fig. 8.170 Fig. 8.171 Fig. 8.172	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Da segnalare sgancio di potenza dovuto al superamento della soglia di allarme per alta pressione (17 MPa) al tempo $t \approx 900$ s.
28	Fig. 8.173 Fig. 8.174 Fig. 8.175 Fig. 8.176 Fig. 8.177 Fig. 8.178 Fig. 8.179	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.

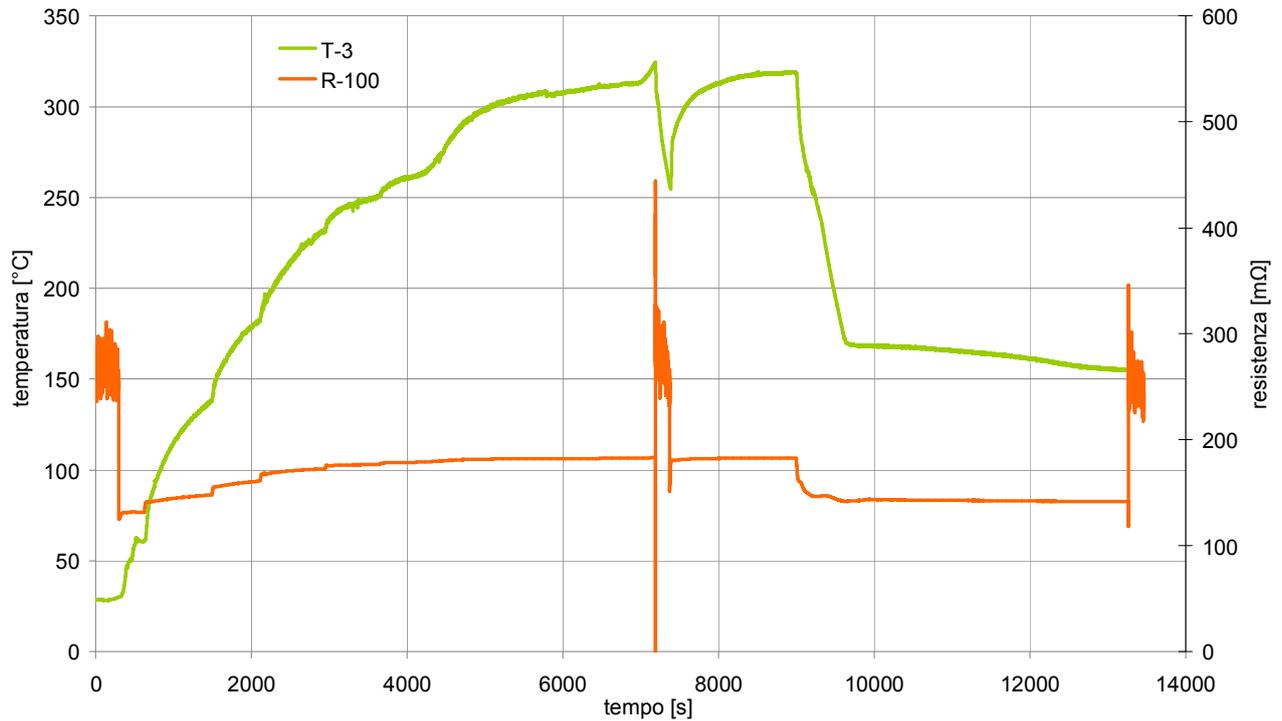
#	Figure di riferimento	Commenti sul test
29	Fig. 8.180 Fig. 8.181 Fig. 8.182 Fig. 8.183 Fig. 8.184 Fig. 8.185 Fig. 8.186	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
30	Fig. 8.187 Fig. 8.188 Fig. 8.189 Fig. 8.190 Fig. 8.191 Fig. 8.192 Fig. 8.193	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
31	Fig. 8.194 Fig. 8.195 Fig. 8.196 Fig. 8.197 Fig. 8.198 Fig. 8.199 Fig. 8.200	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
32	Fig. 8.201 Fig. 8.202 Fig. 8.203 Fig. 8.204 Fig. 8.205 Fig. 8.206 Fig. 8.207	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
33	Fig. 8.208 Fig. 8.209 Fig. 8.210 Fig. 8.211 Fig. 8.212 Fig. 8.213 Fig. 8.214	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
34	Fig. 8.215 Fig. 8.216 Fig. 8.217 Fig. 8.218 Fig. 8.219 Fig. 8.220 Fig. 8.221	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
35	Fig. 8.222 Fig. 8.223 Fig. 8.224 Fig. 8.225 Fig. 8.226 Fig. 8.227 Fig. 8.228 Fig. 8.229	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura. Si segnala una variazione della temperatura "circuito primario iniezione linea ritorno" al tempo $t \approx 2000$ s non in linea con le altre prove effettuate. Ciò è da attribuire alla riduzione della portata in circolazione naturale rispetto al suo valore nominale, Fig. 8.229, dopo l'apertura dell'EBT.

#	Figure di riferimento	Commenti sul test
36	Fig. 8.230 Fig. 8.231 Fig. 8.232 Fig. 8.233 Fig. 8.234 Fig. 8.235 Fig. 8.236	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.
37	Fig. 8.237 Fig. 8.238 Fig. 8.239 Fig. 8.240 Fig. 8.241 Fig. 8.242 Fig. 8.243	Test eseguito secondo quanto indicato in procedura.

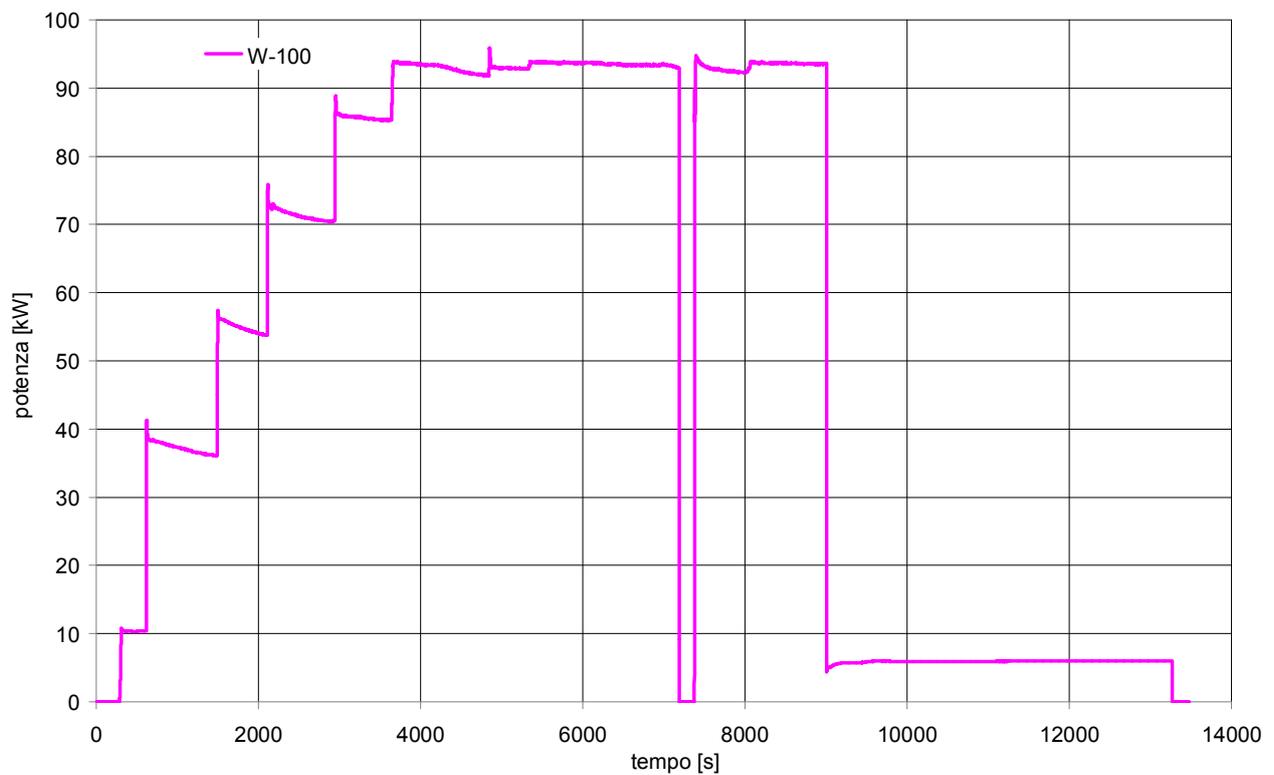
Prima della lettura dei grafici si tende a precisare che le prove di ciclaggio hanno avuto una durata variabile, non standardizzata per quanto riguarda sia i tempi di raggiungimento delle condizioni stazionarie e sia quelli di depressurizzazione completa del sistema.

Ciò è dovuto ai seguenti fattori:

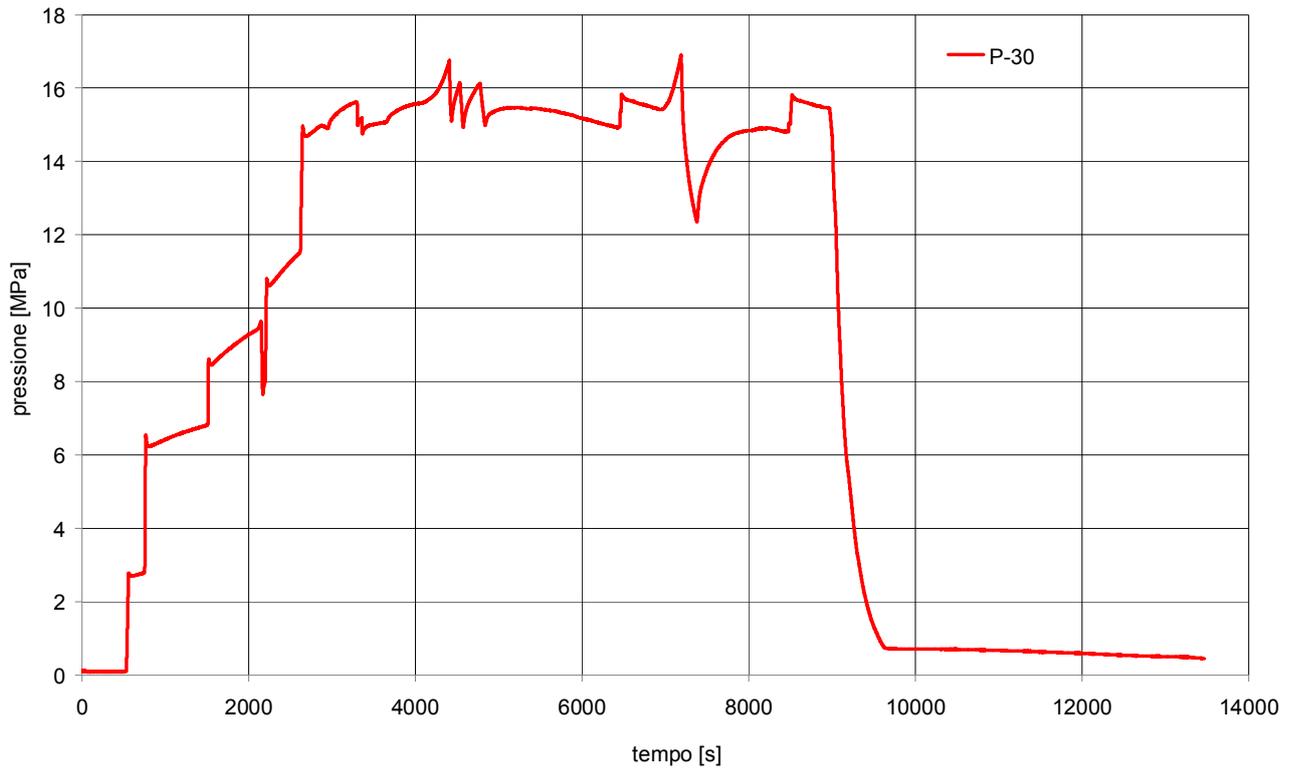
- Esperienza dell'operatore che gestisce l'impianto; le prime prove di ciclaggio risultano essere di durata maggiore per verificare la corretta impostazione dei principali parametri e per approfondire una conoscenza dell'impianto.
- Eventuali anomalie avvenute in fase di prova; ad esempio le prove sono durate di più nel caso di sganci di potenza per superamento di soglie di allarme oppure per salite troppo rapide in potenza o pressione che hanno destabilizzato il sistema.
- Depressurizzazione del sistema dipendente dal grado di apertura della valvola di sfiato manuale posta sulla sommità dell'impianto.



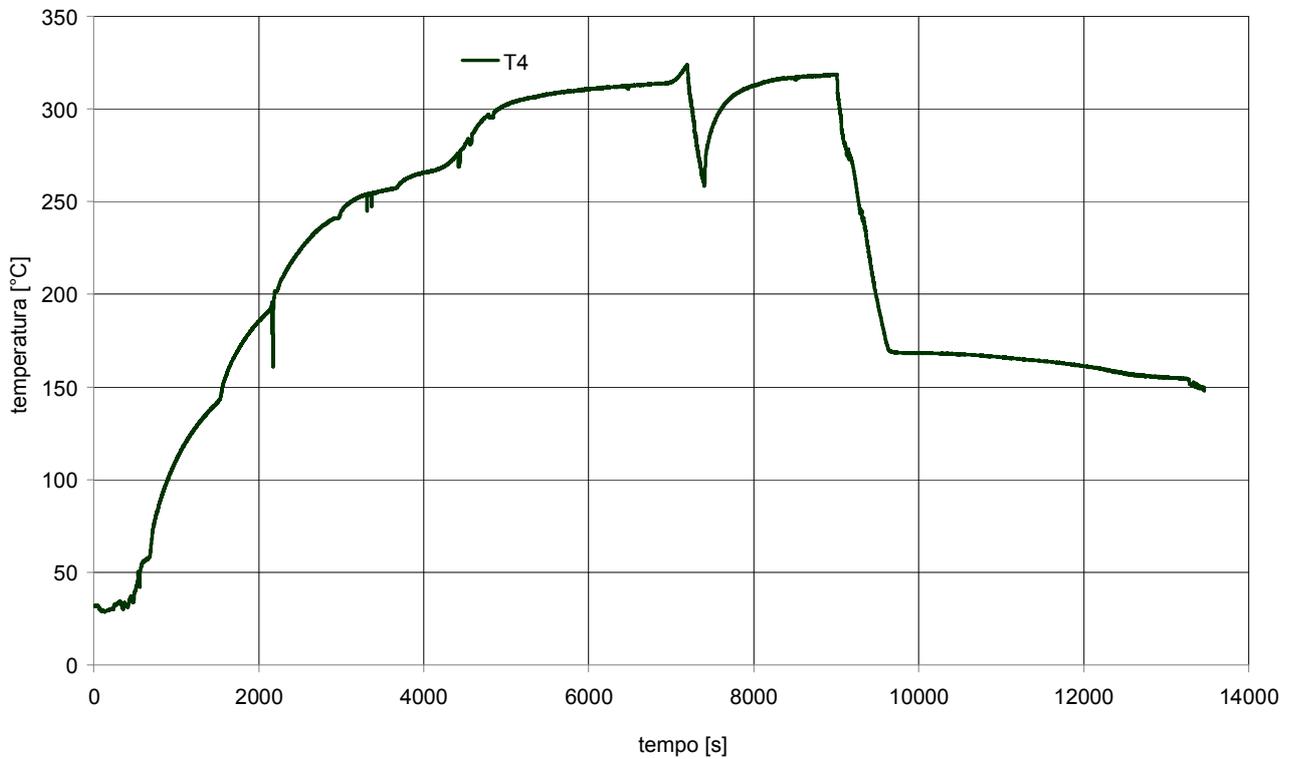
**Fig. 8. 31 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°8**



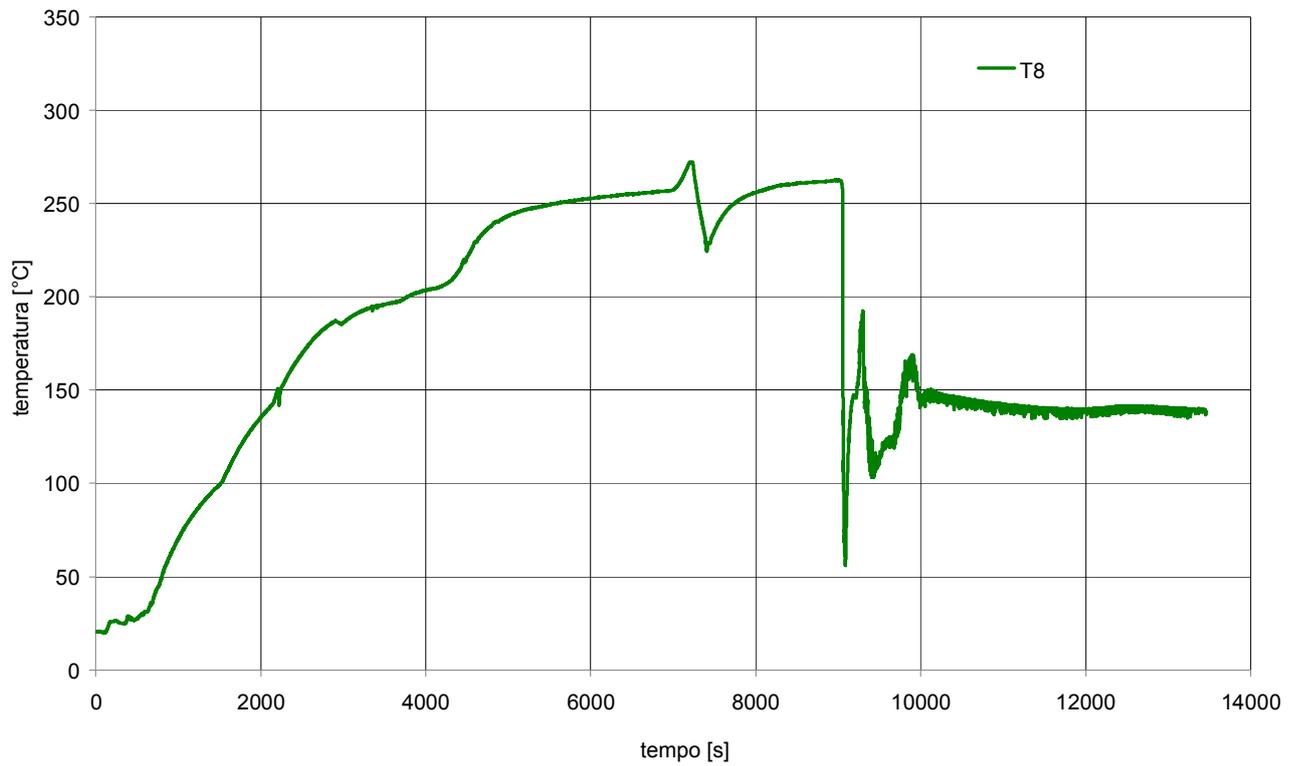
**Fig. 8. 32 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°8**



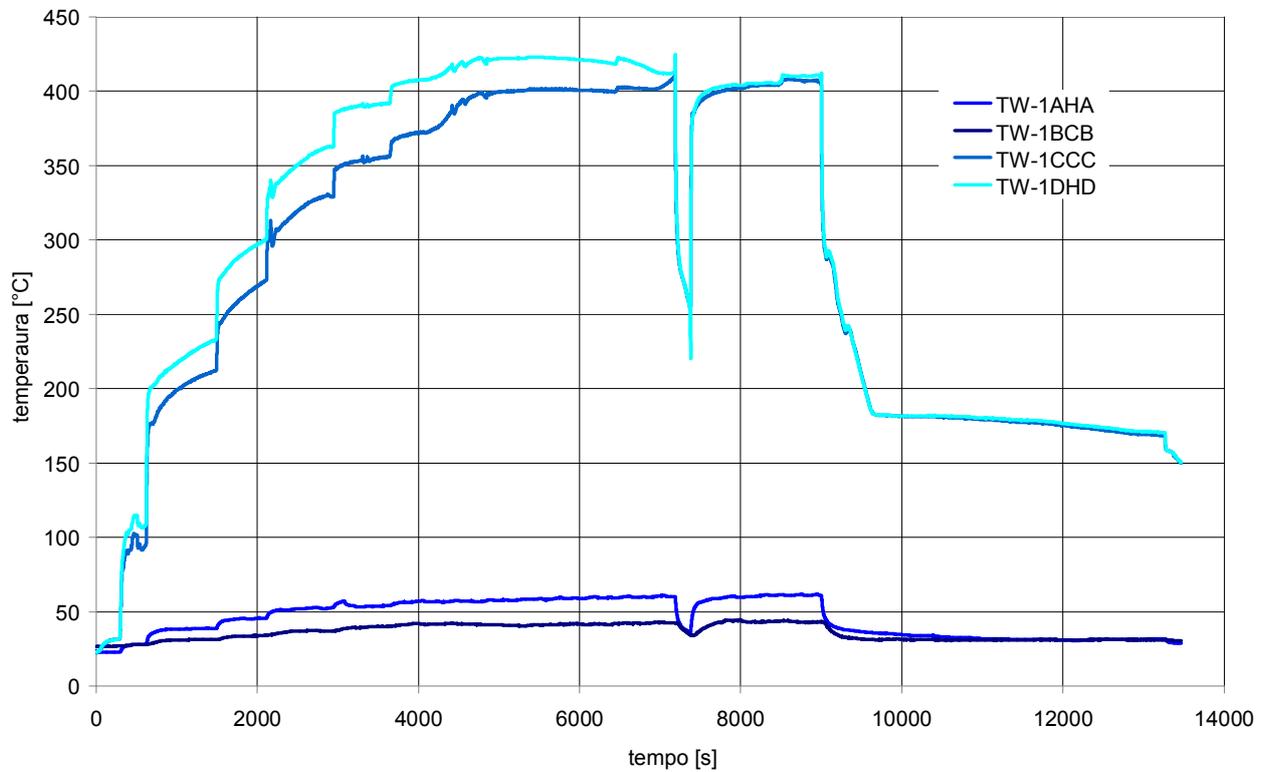
**Fig. 8. 33 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°8**



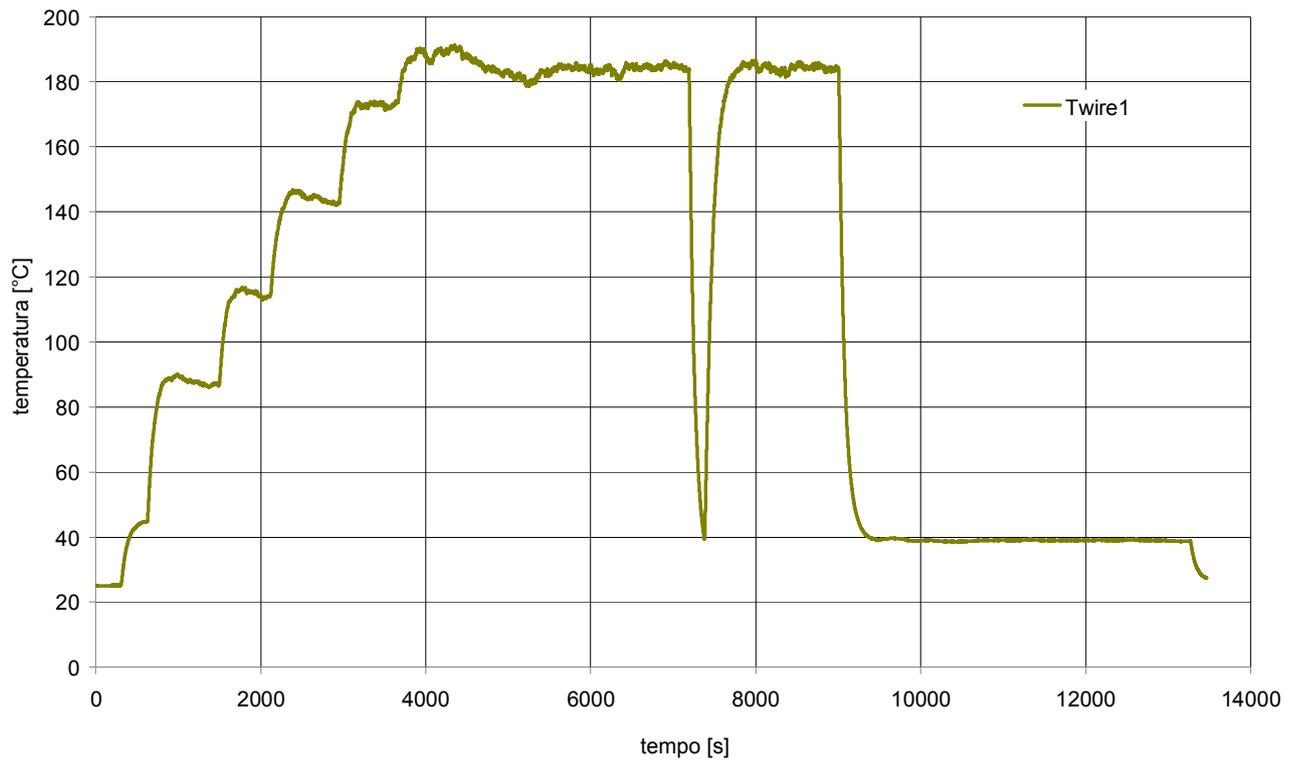
**Fig. 8. 34 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°8**



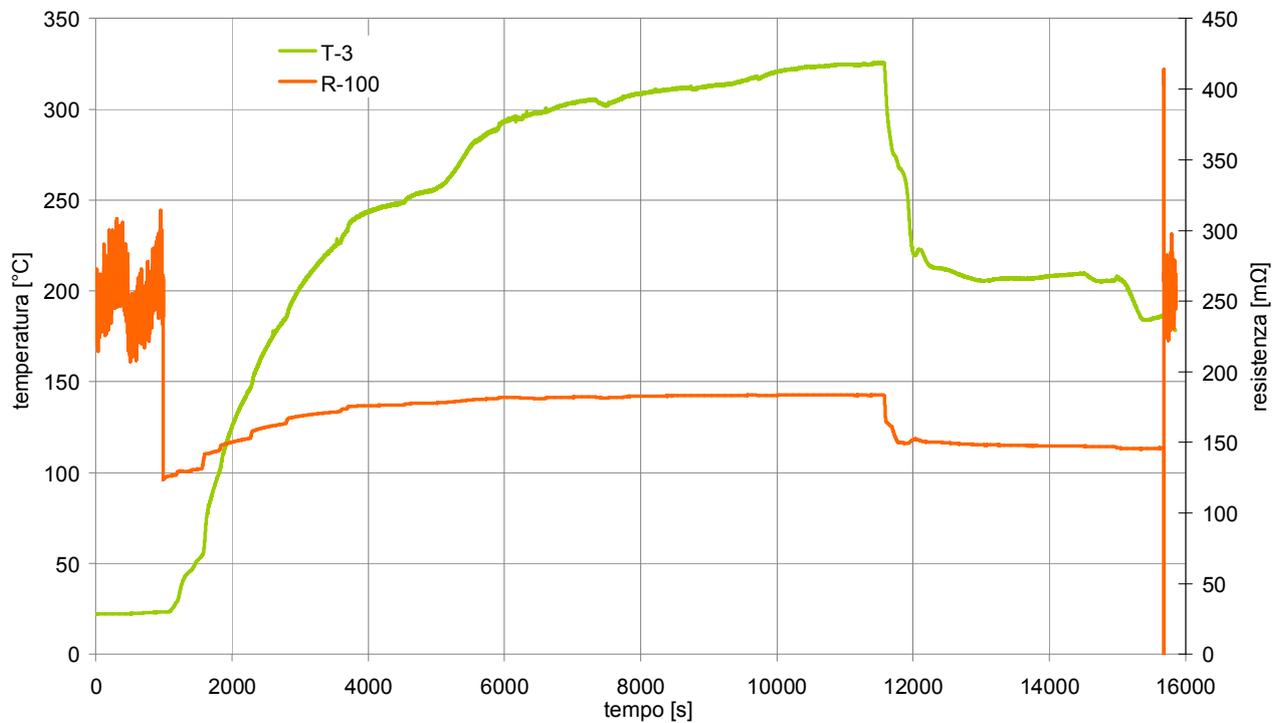
**Fig. 8. 35 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°8**



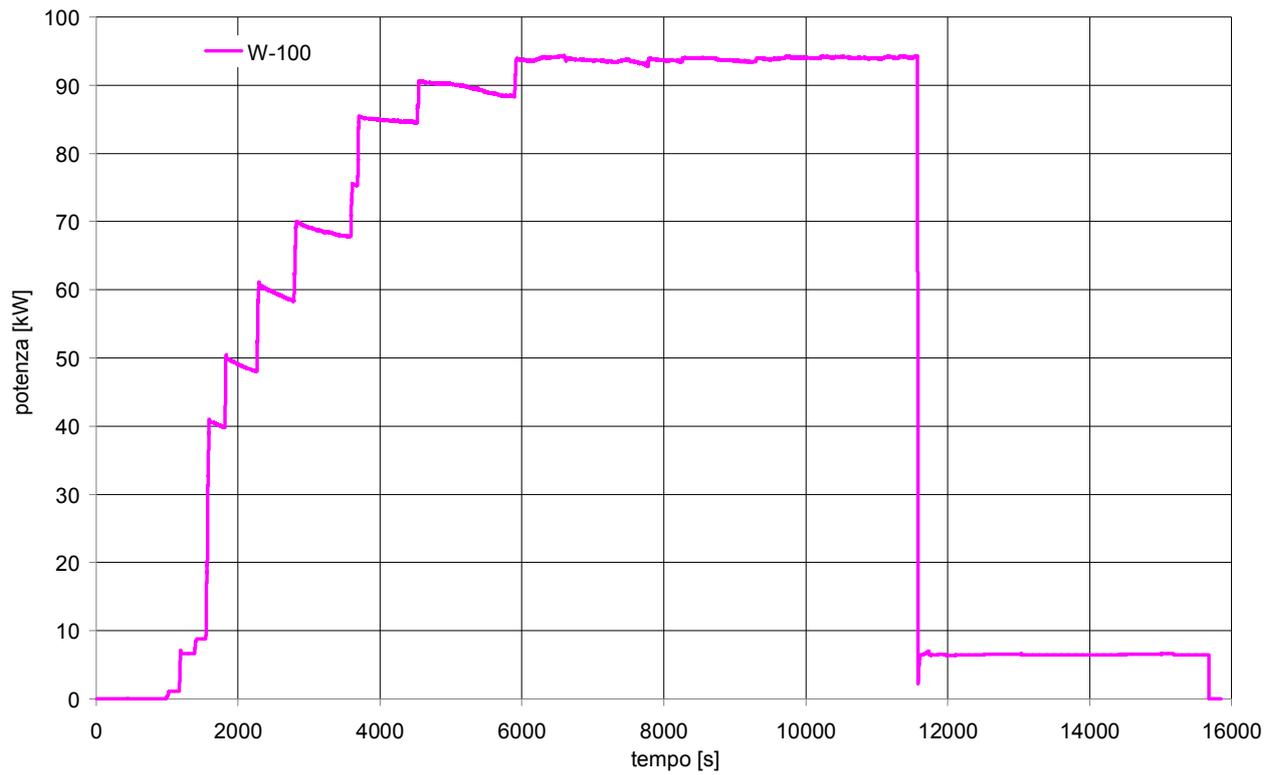
**Fig. 8. 36 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°8**



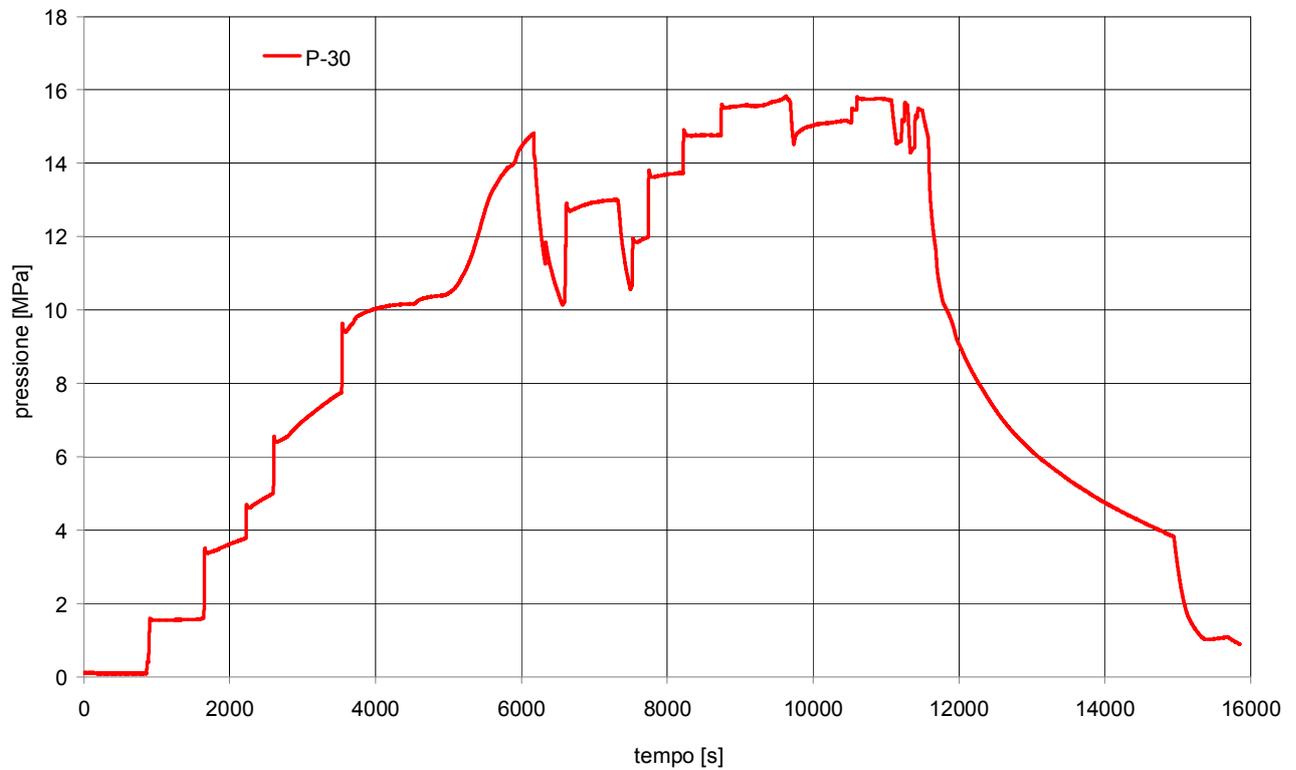
**Fig. 8.37 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°8**



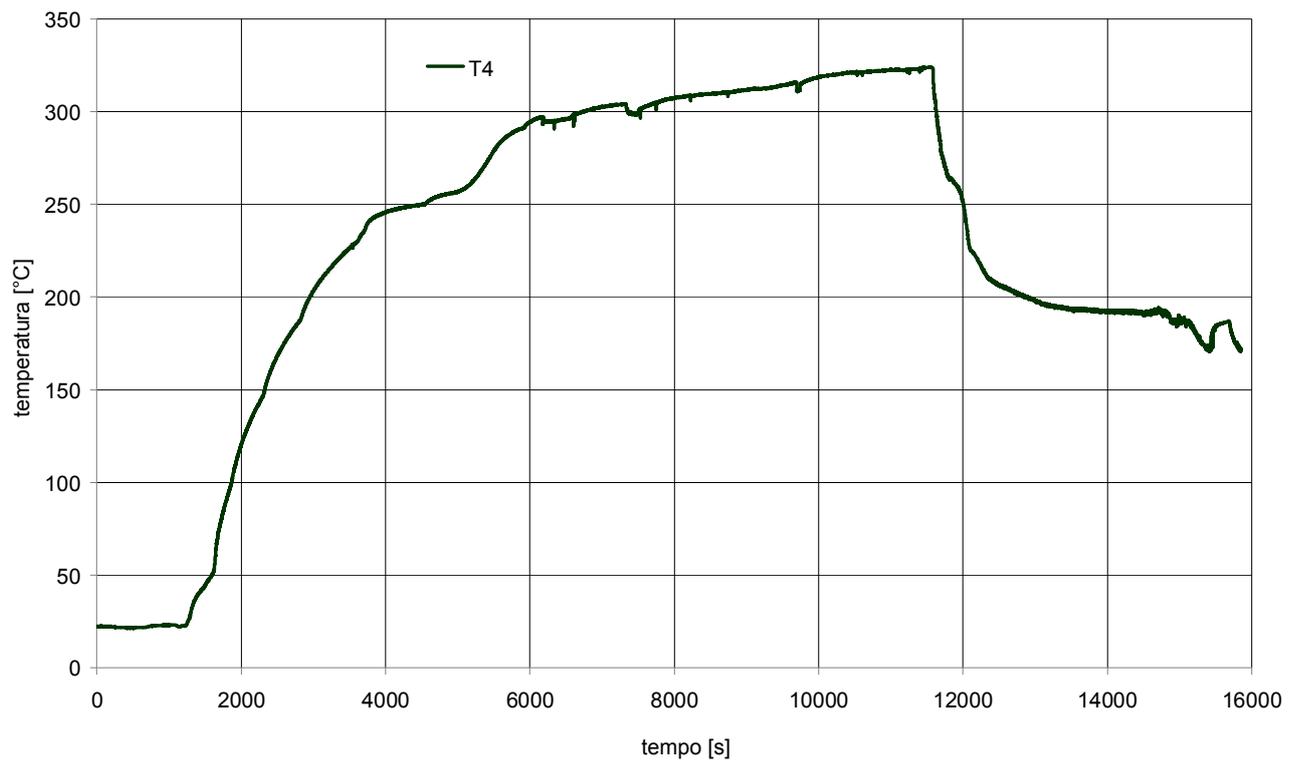
**Fig. 8.38 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°9**



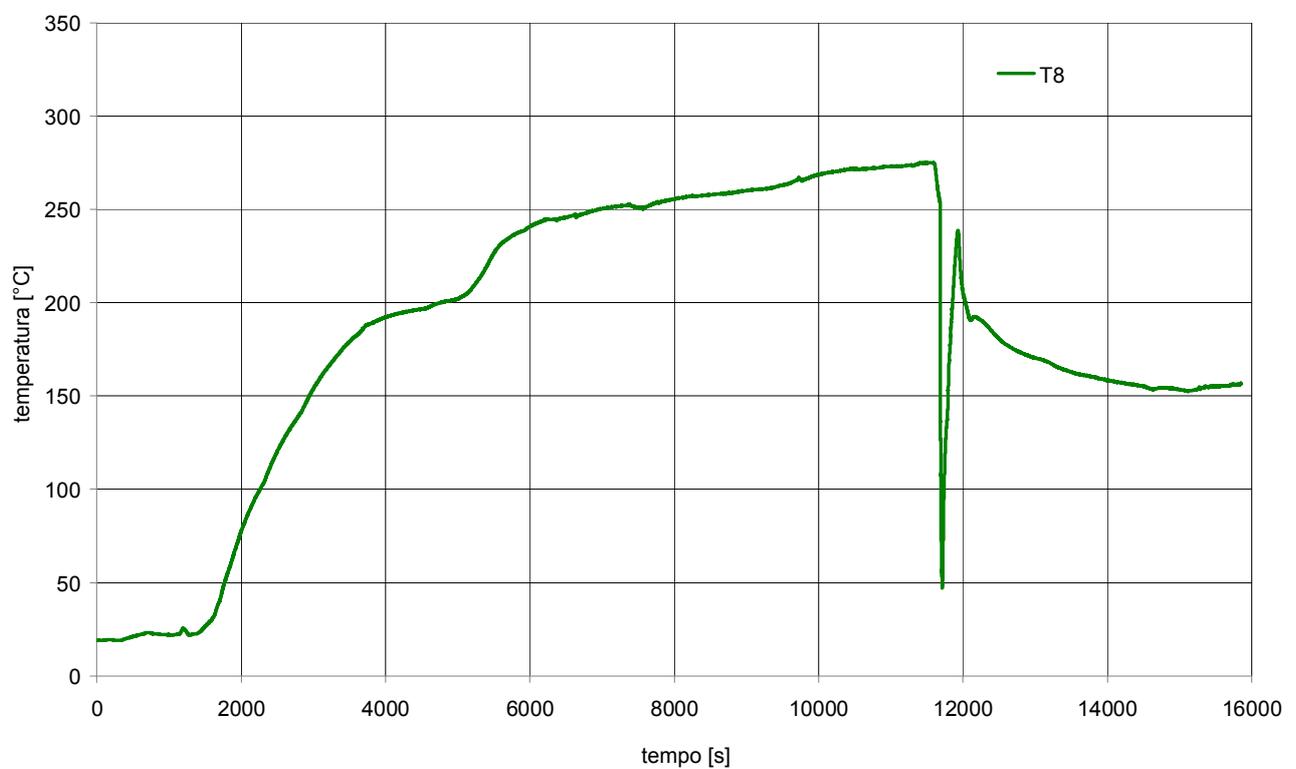
**Fig. 8. 39 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°9**



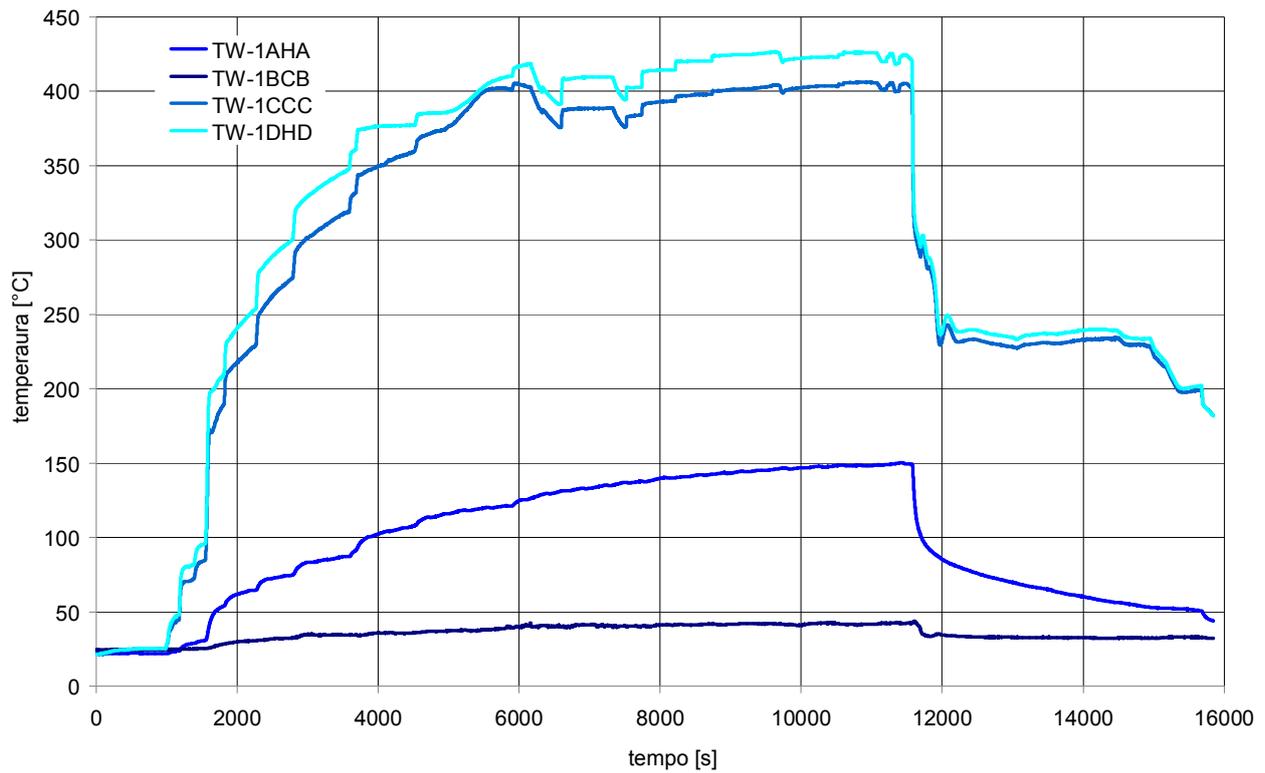
**Fig. 8. 40 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°9**



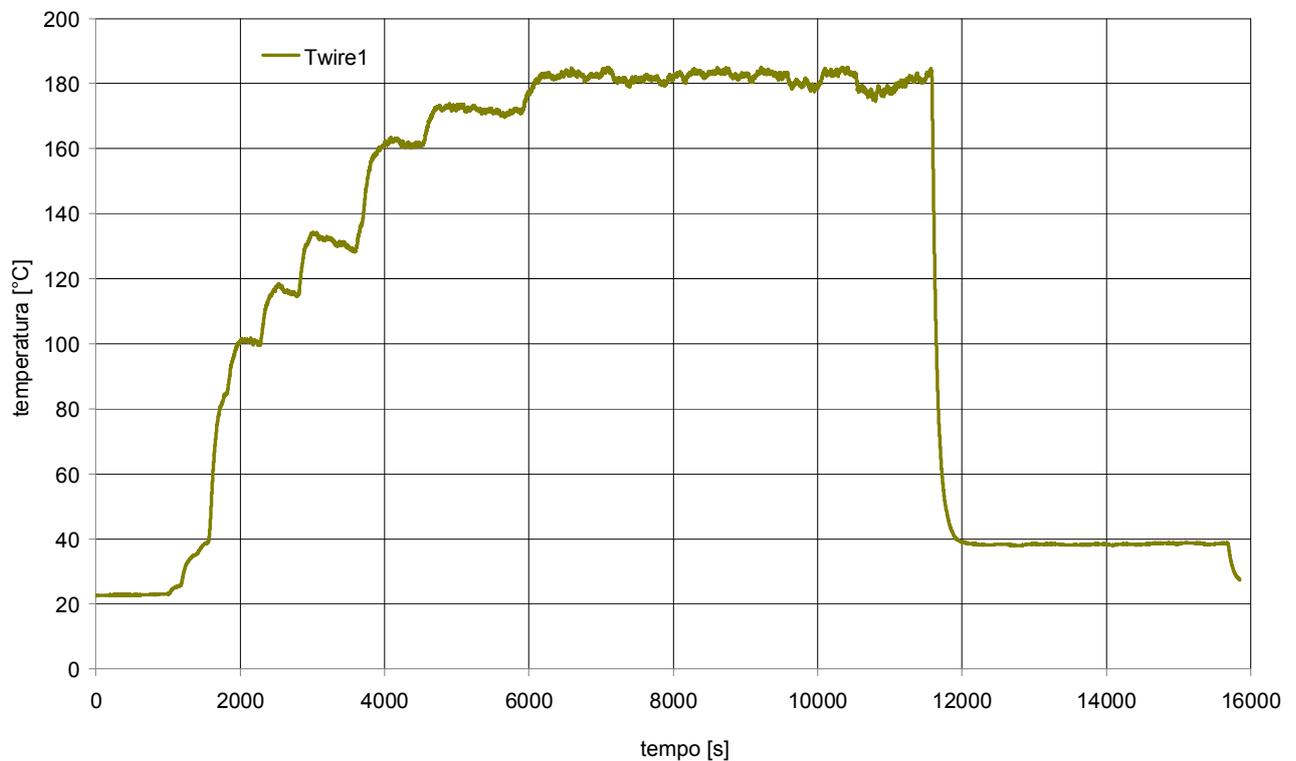
**Fig. 8. 41 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°9**



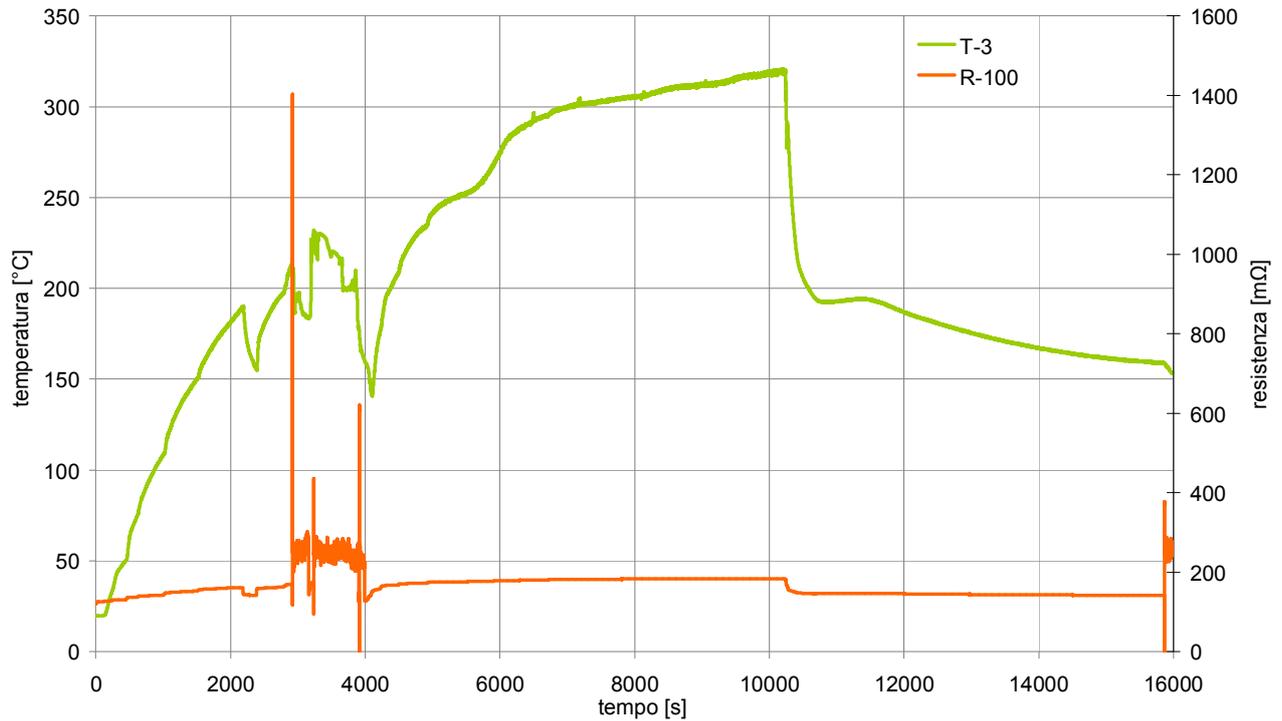
**Fig. 8. 42 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°9**



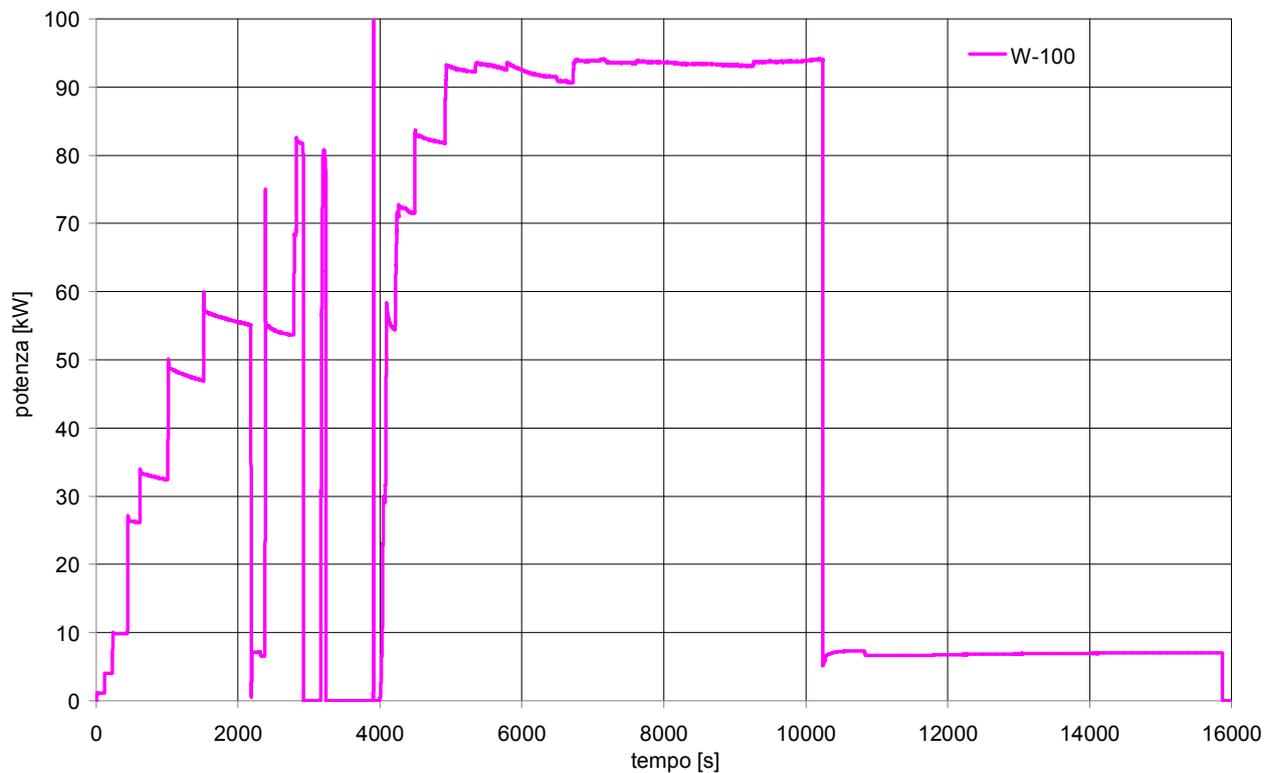
**Fig. 8. 43 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°9**



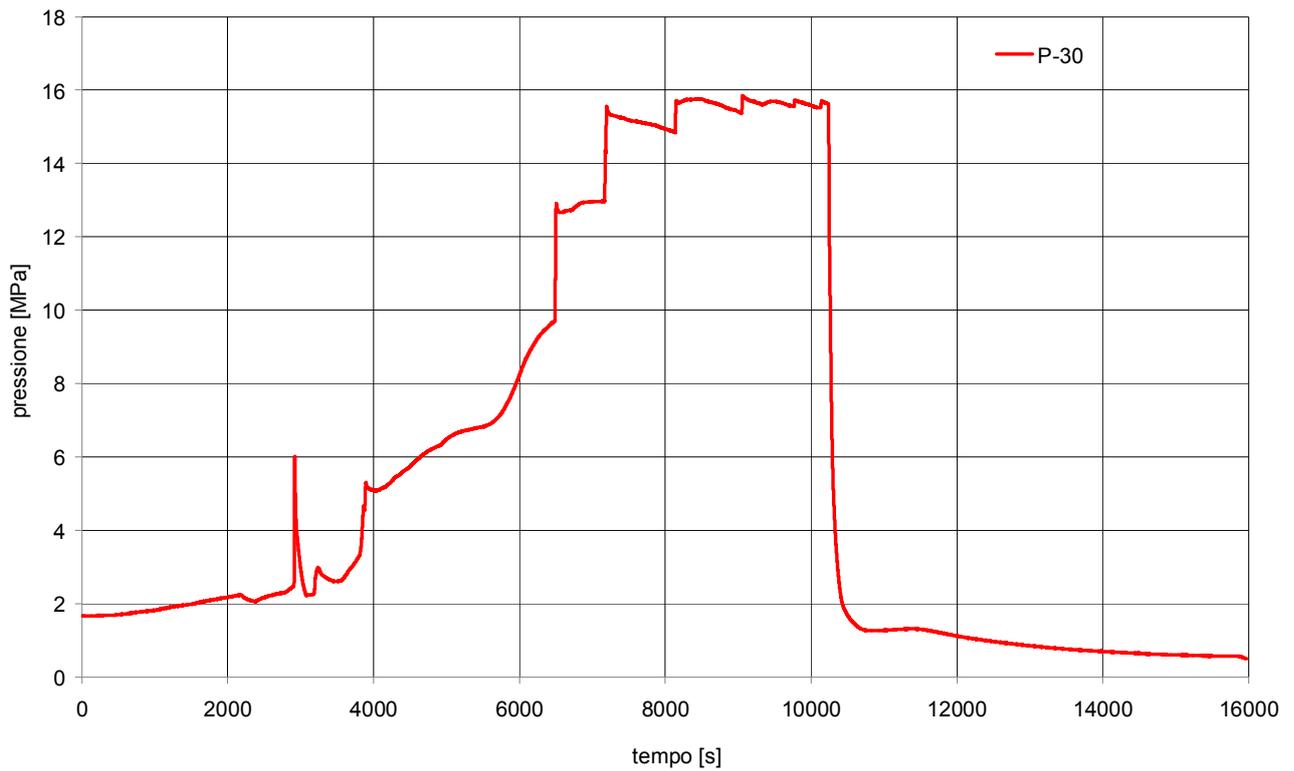
**Fig. 8. 44 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°8**



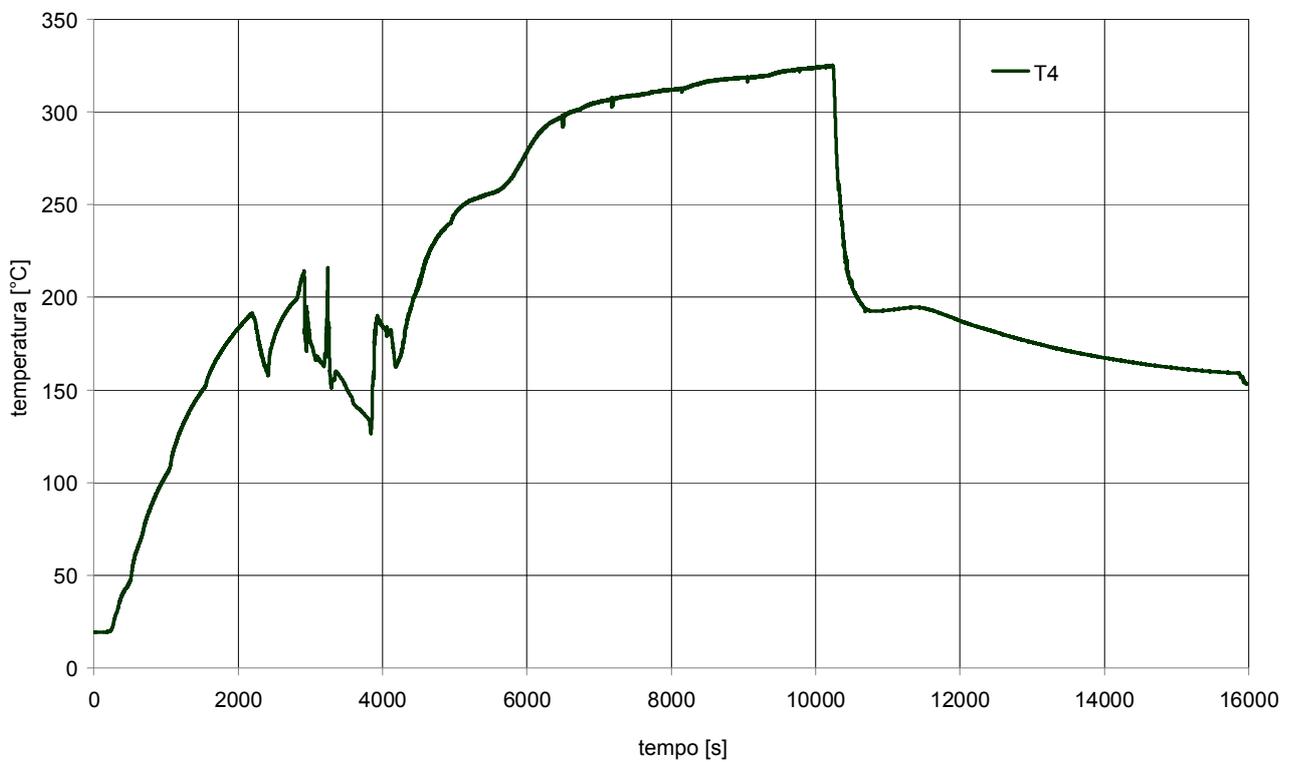
**Fig. 8. 45 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°10**



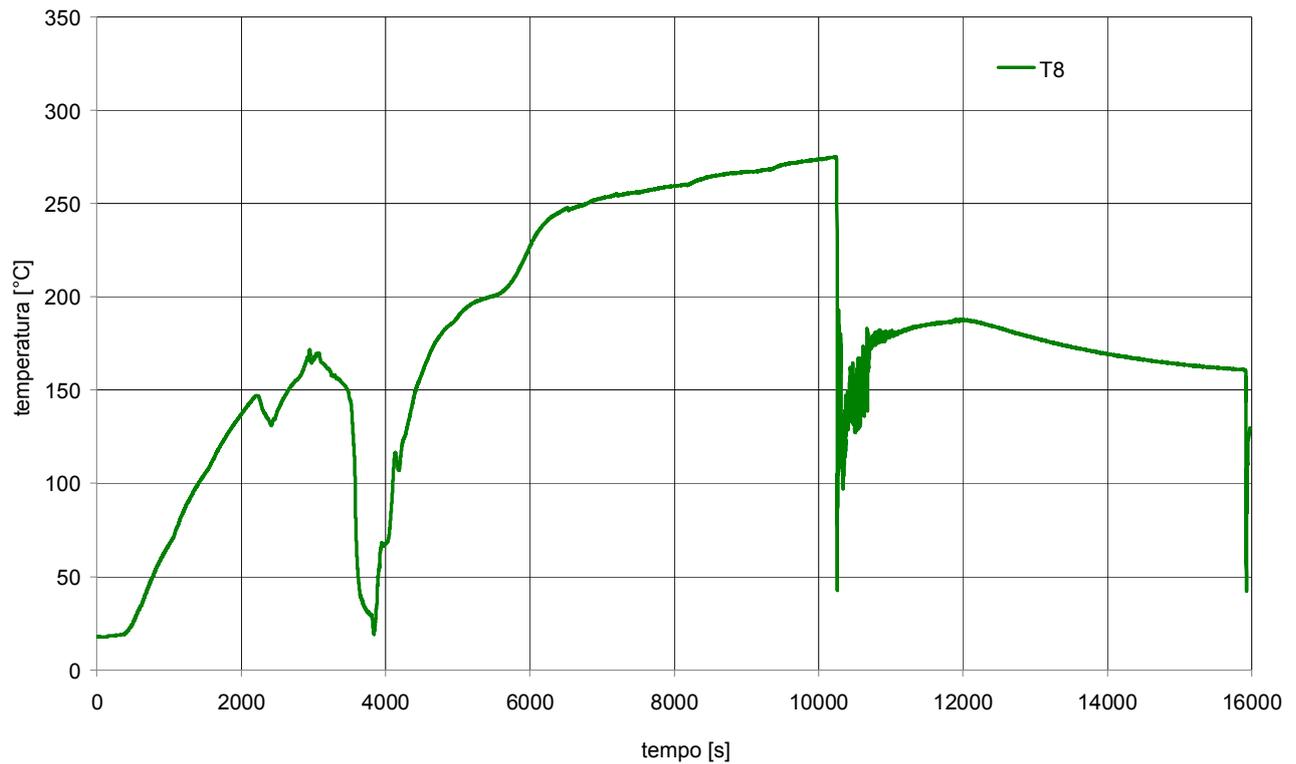
**Fig. 8. 46 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°10**



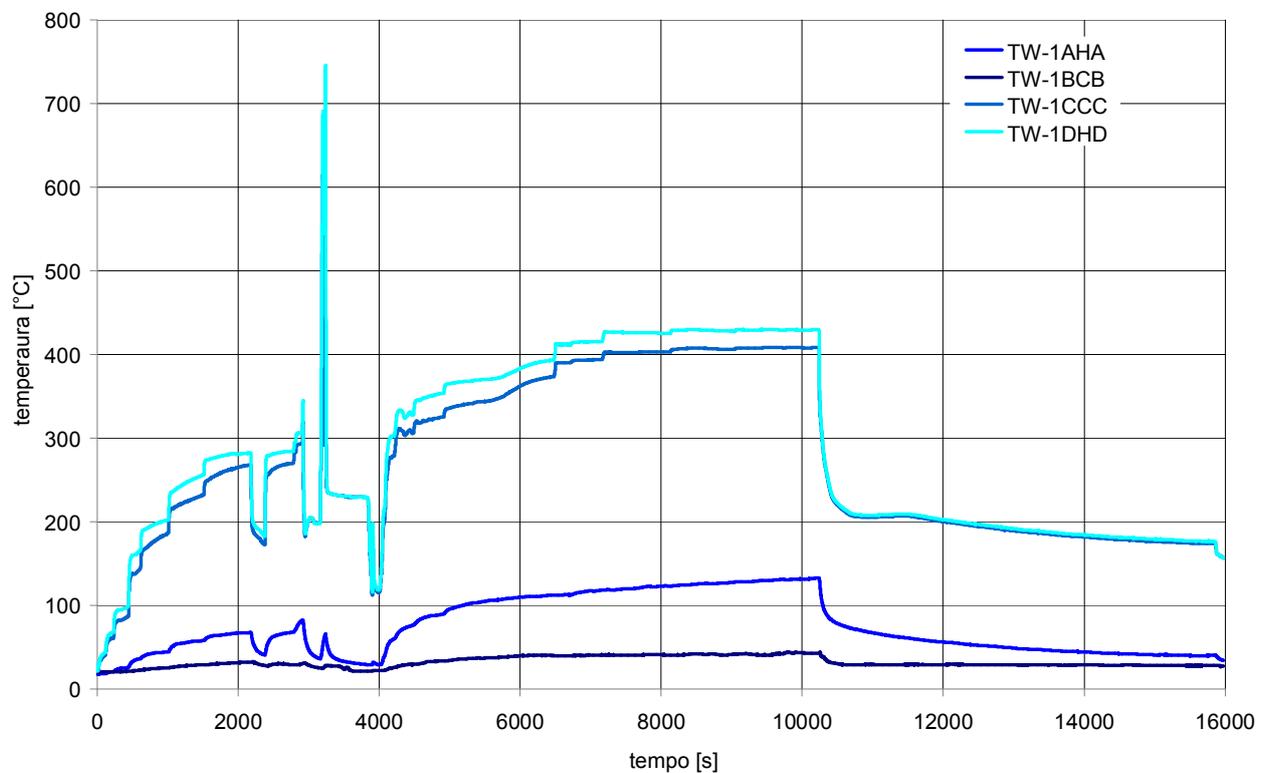
**Fig. 8. 47 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°10**



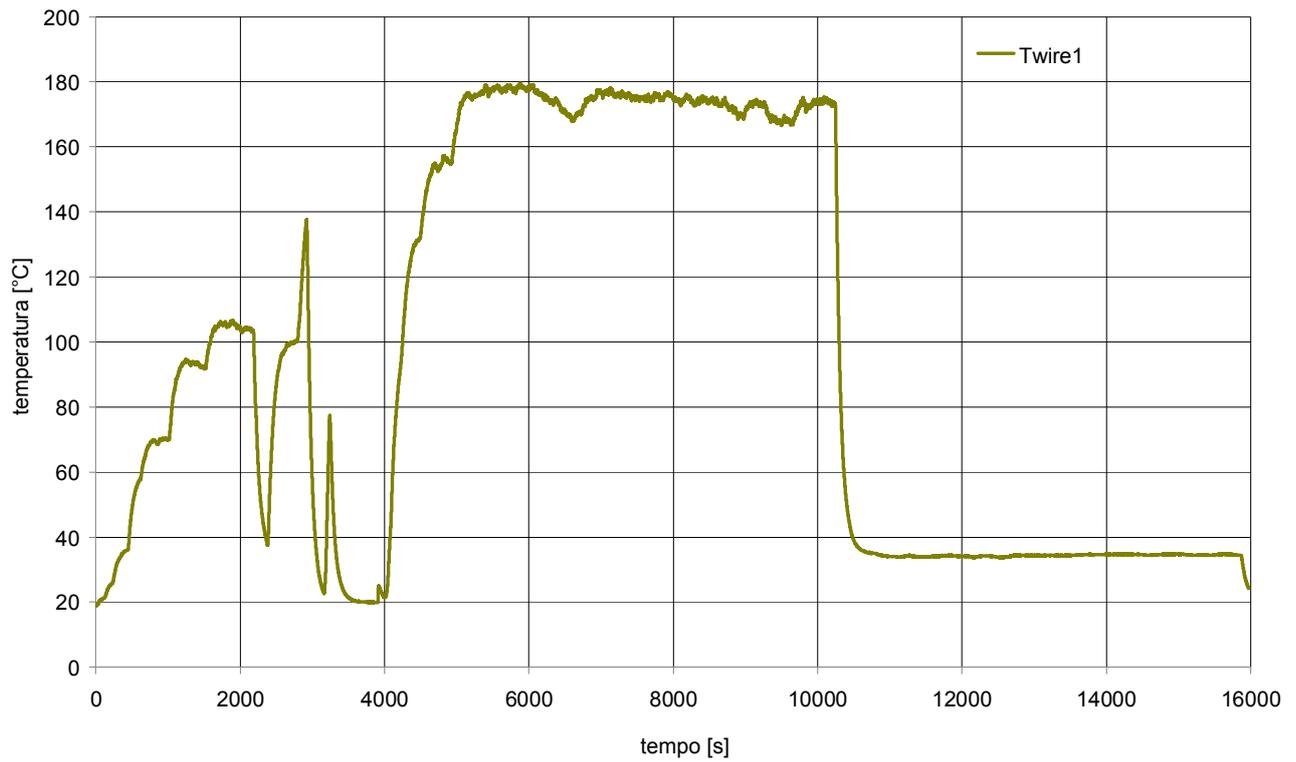
**Fig. 8. 48 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°10**



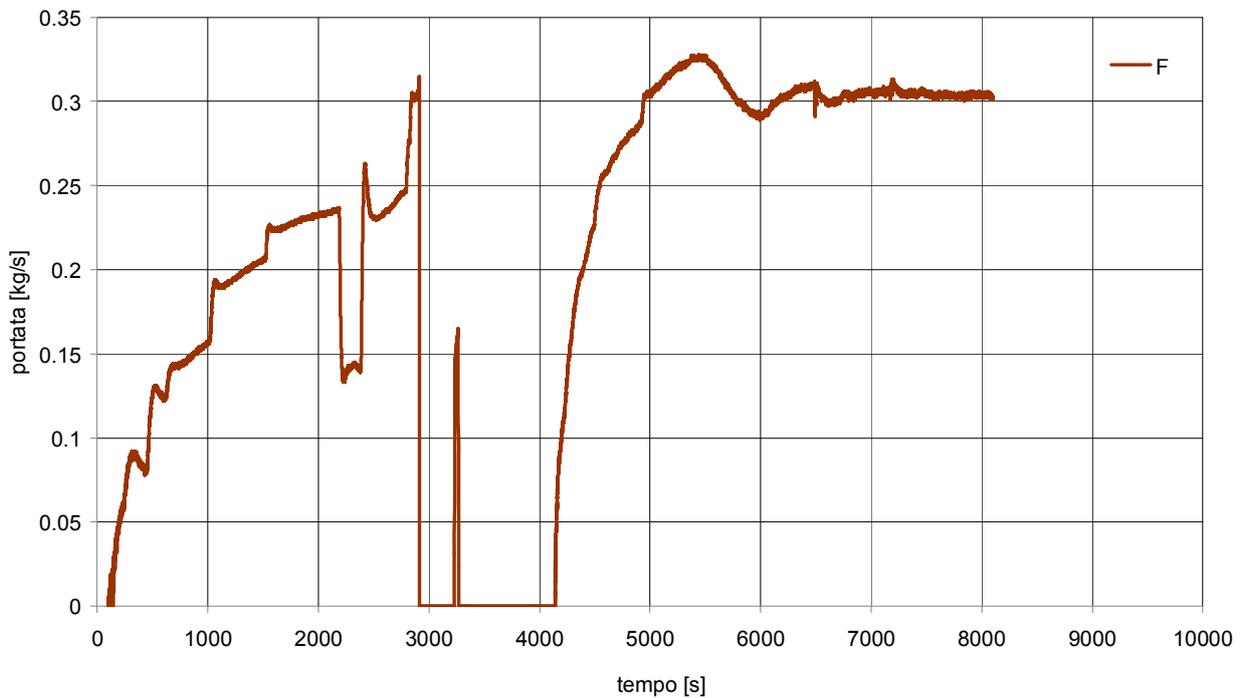
**Fig. 8. 49 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°10**



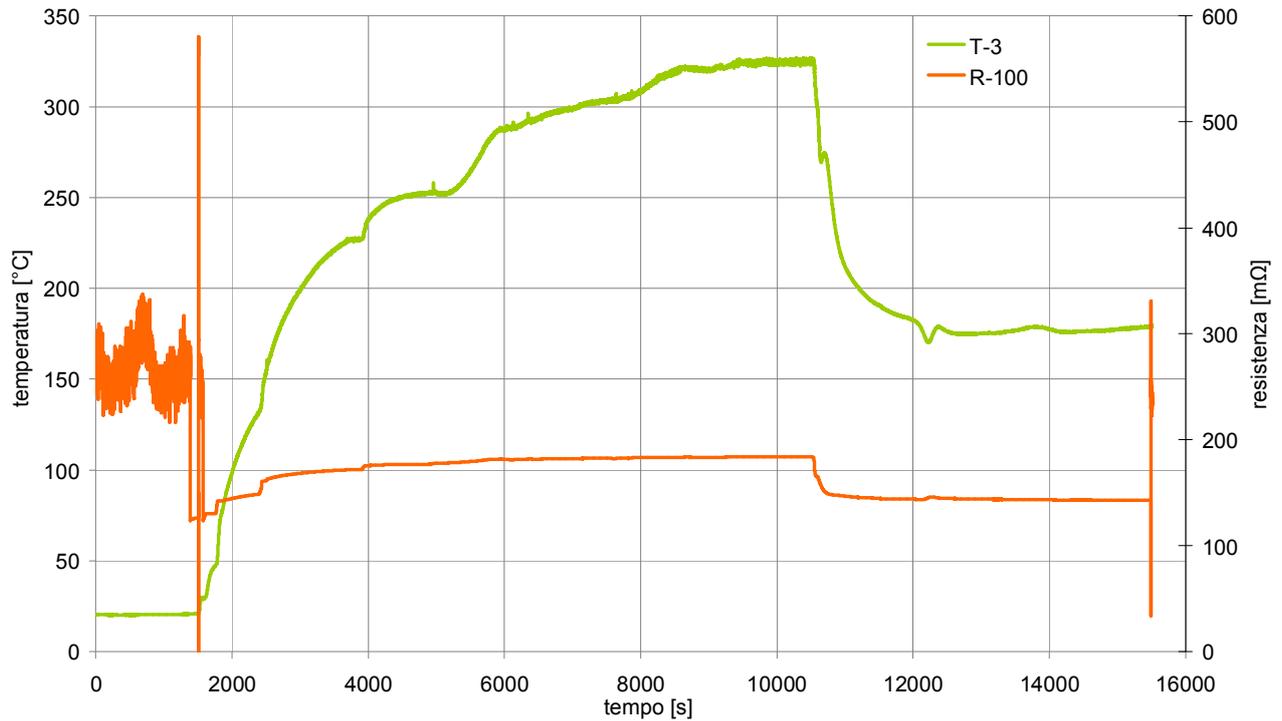
**Fig. 8. 50 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°10**



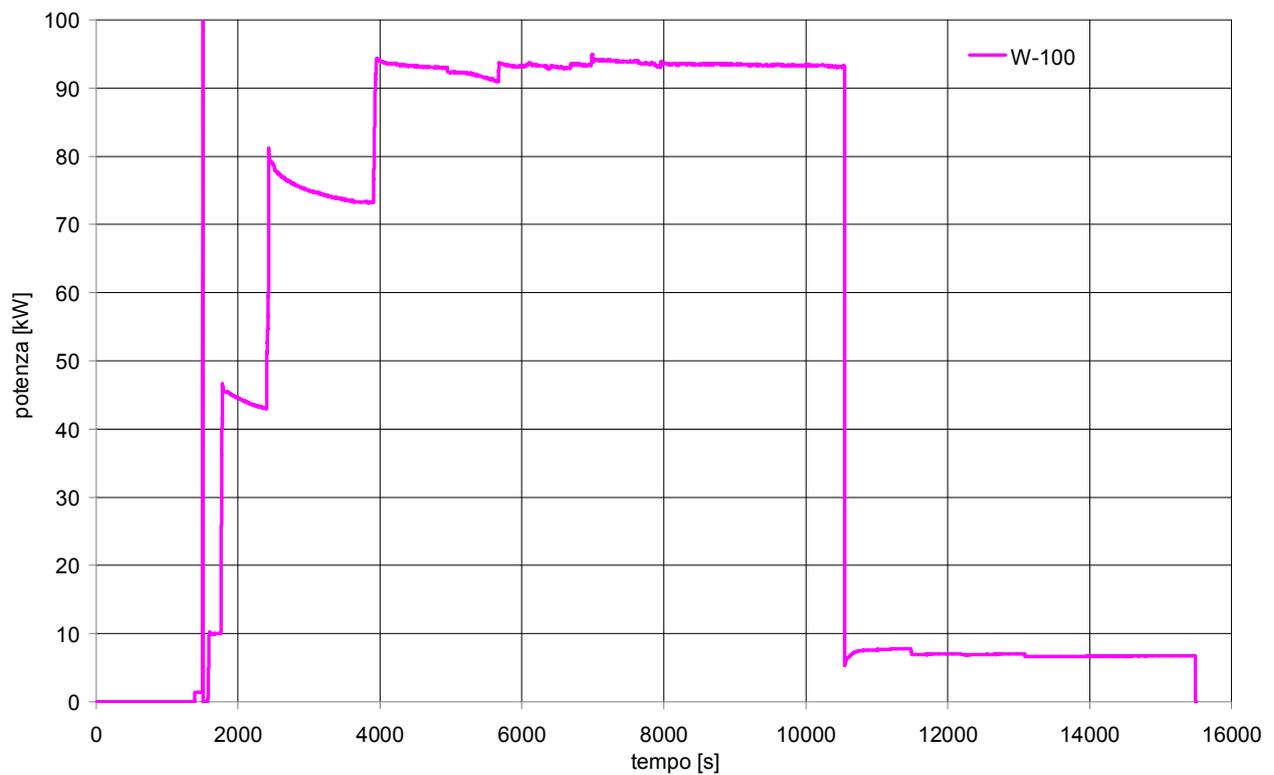
**Fig. 8. 51 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°10**



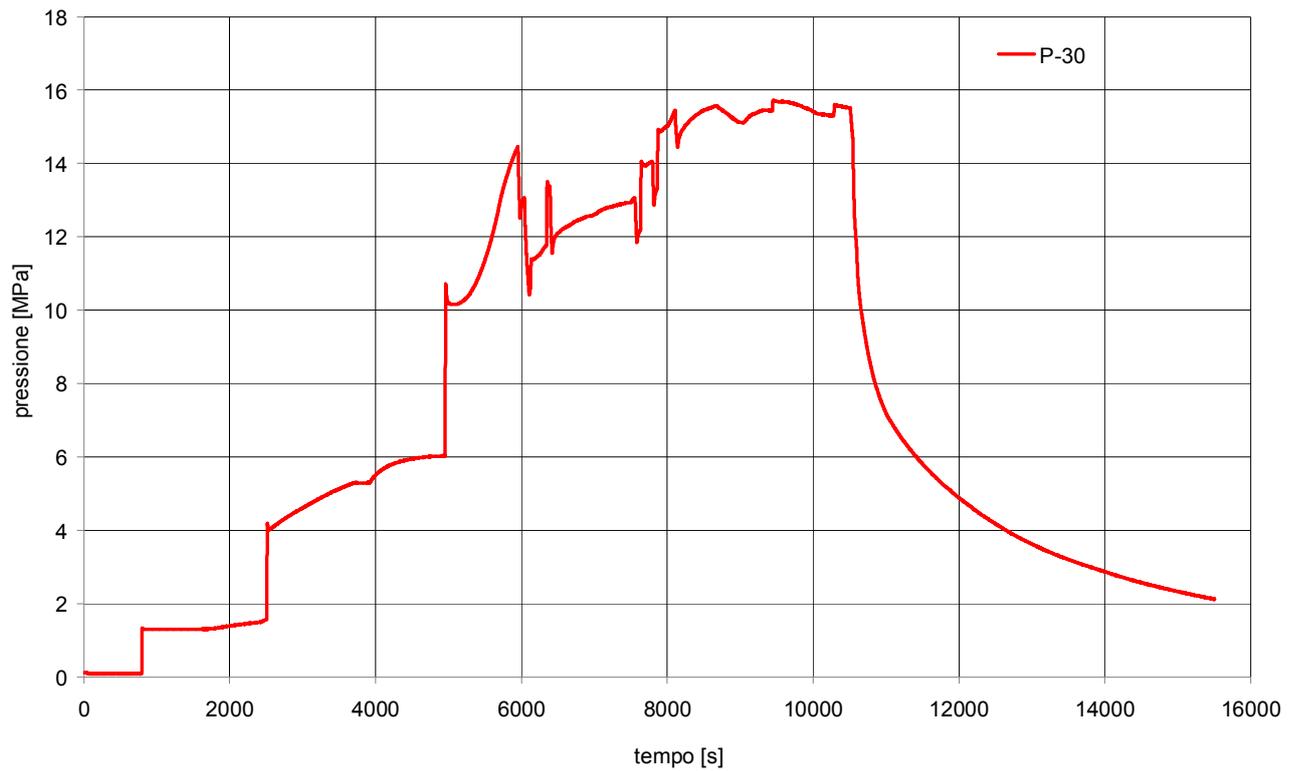
**Fig. 8. 52 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°10**



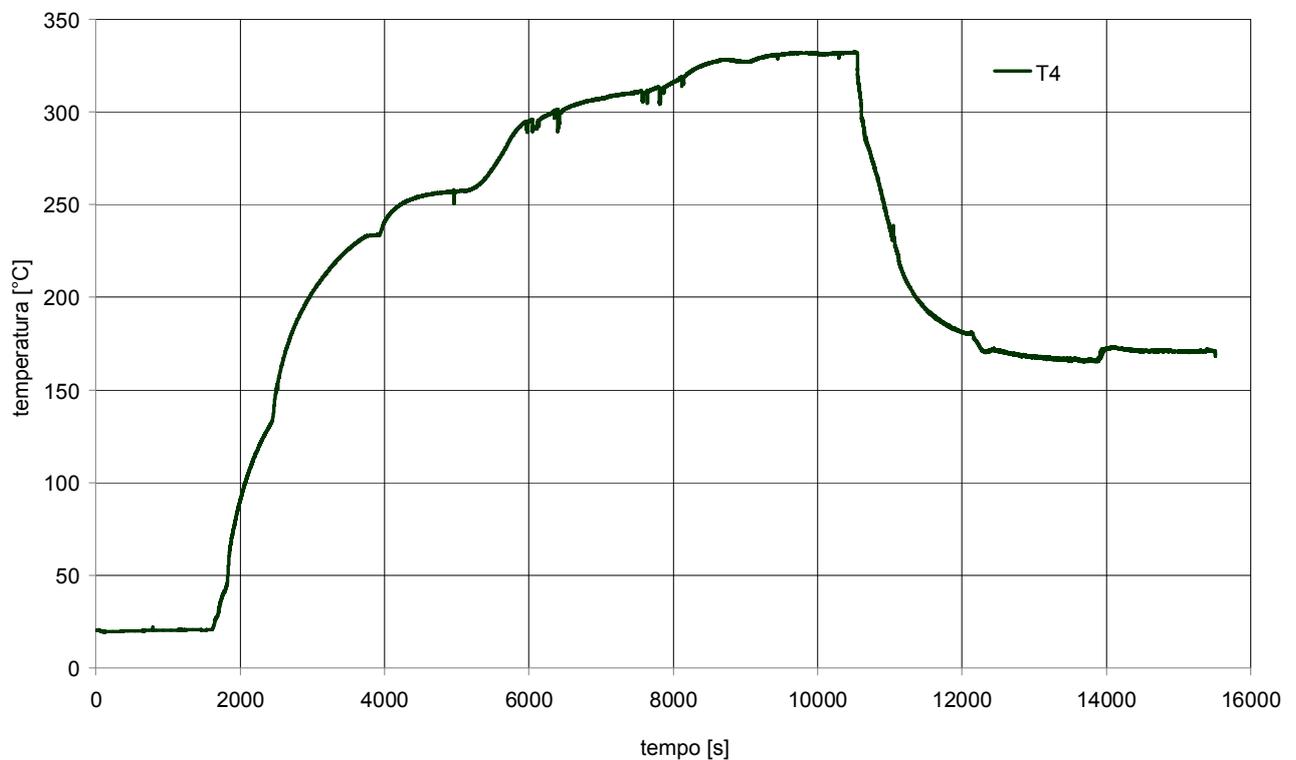
**Fig. 8. 53 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°11**



**Fig. 8. 54 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°11**



**Fig. 8. 55 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°11**



**Fig. 8. 56 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°11**

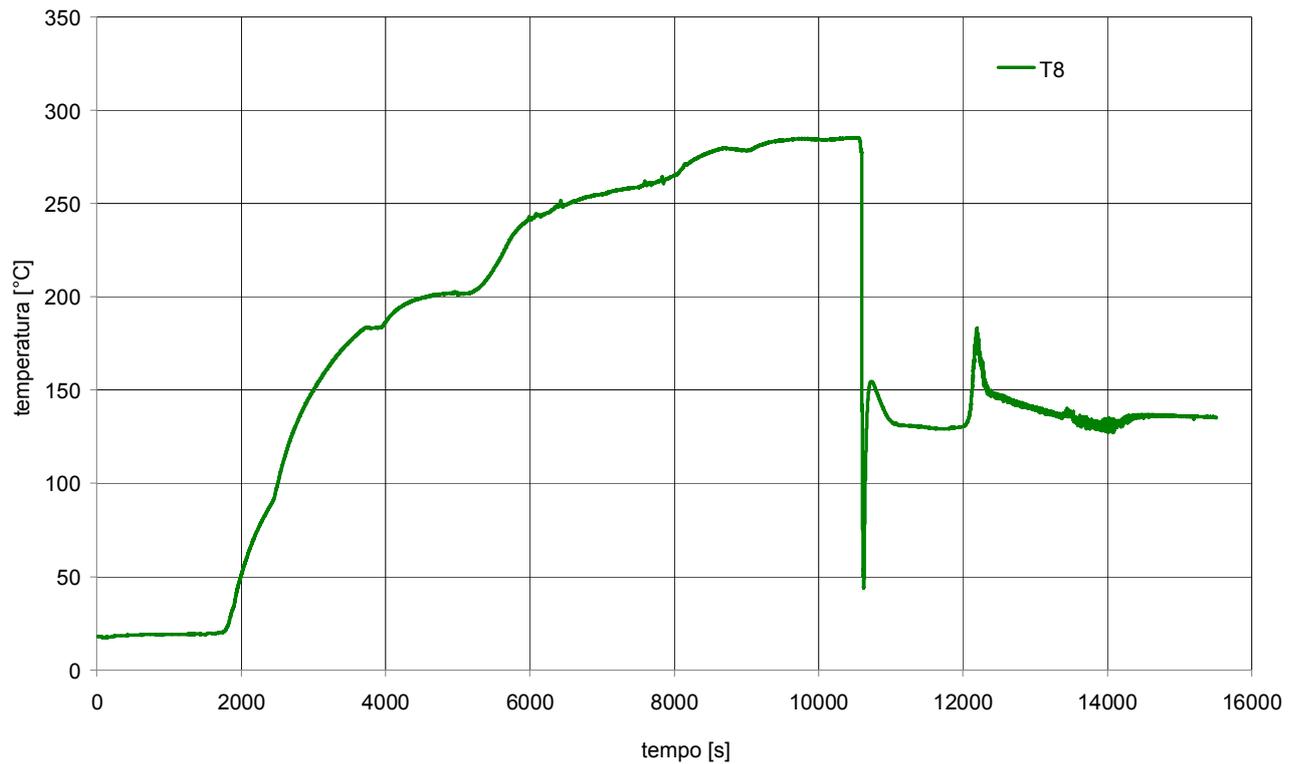


Fig. 8. 57 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°11

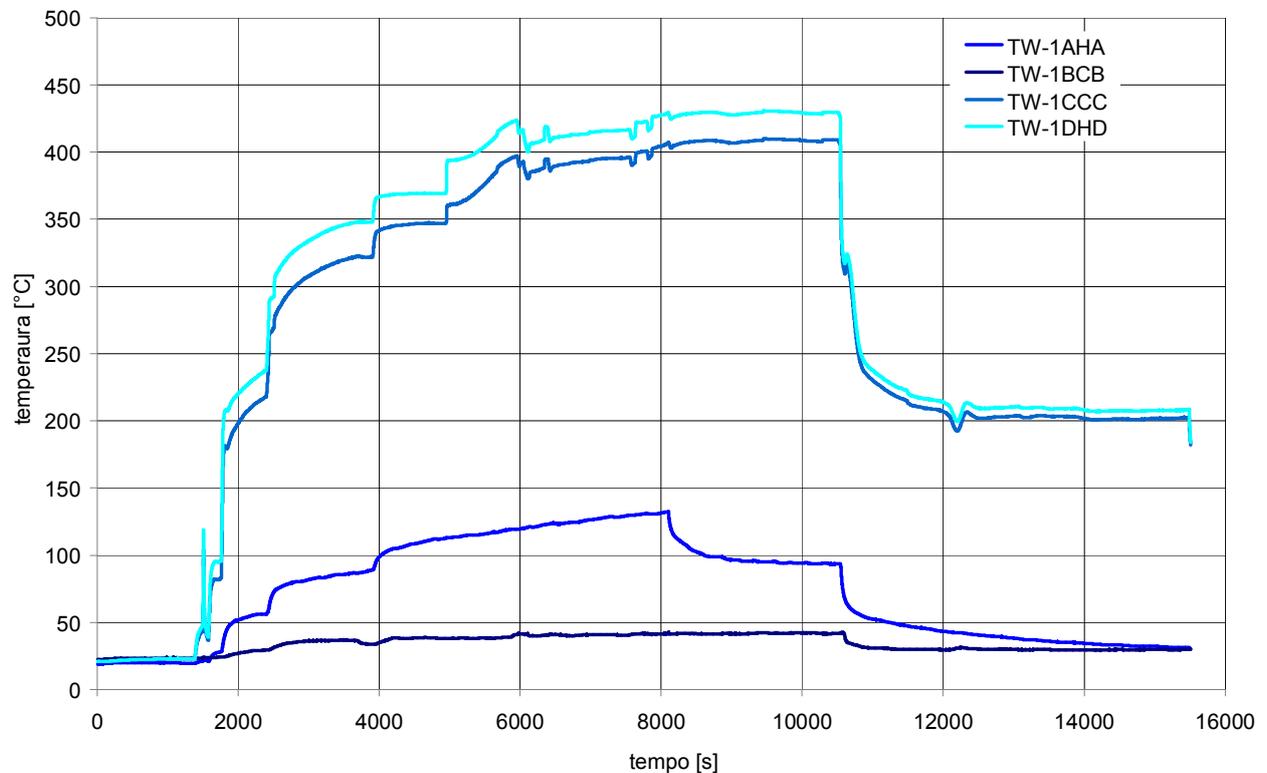
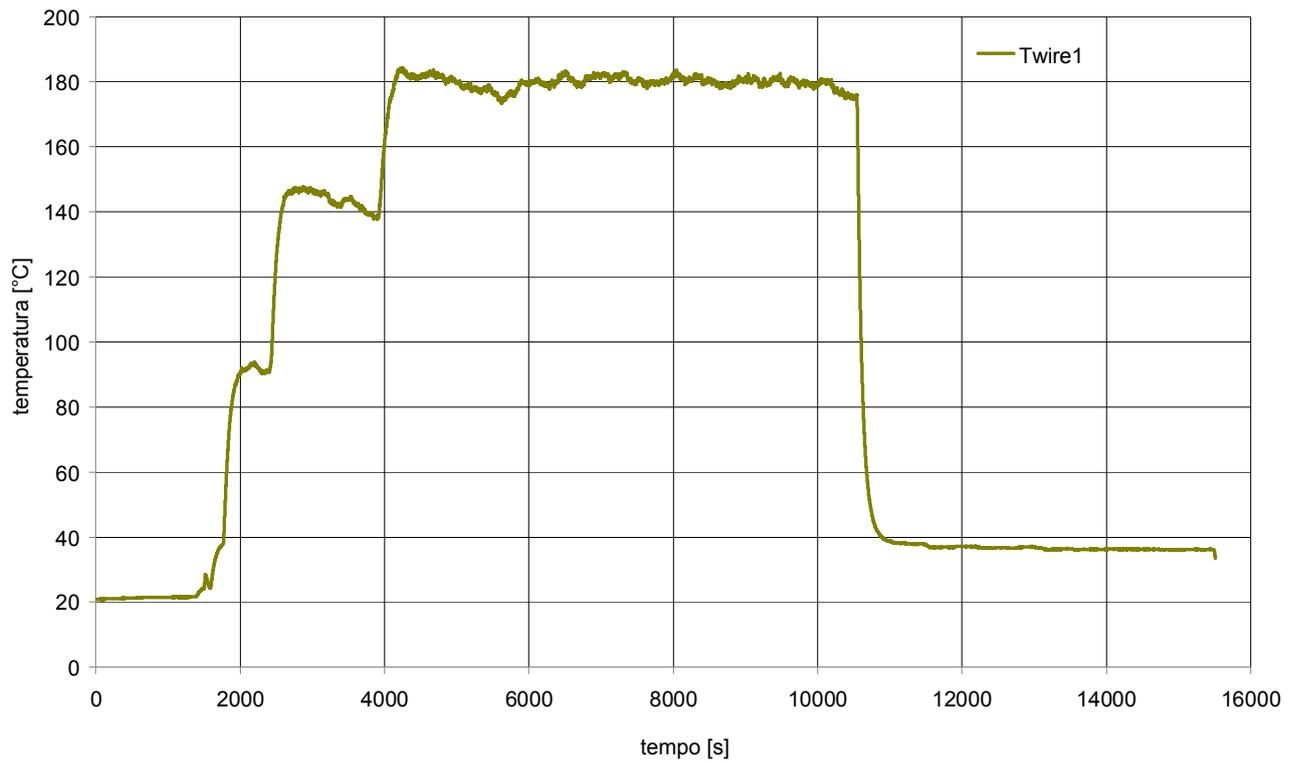
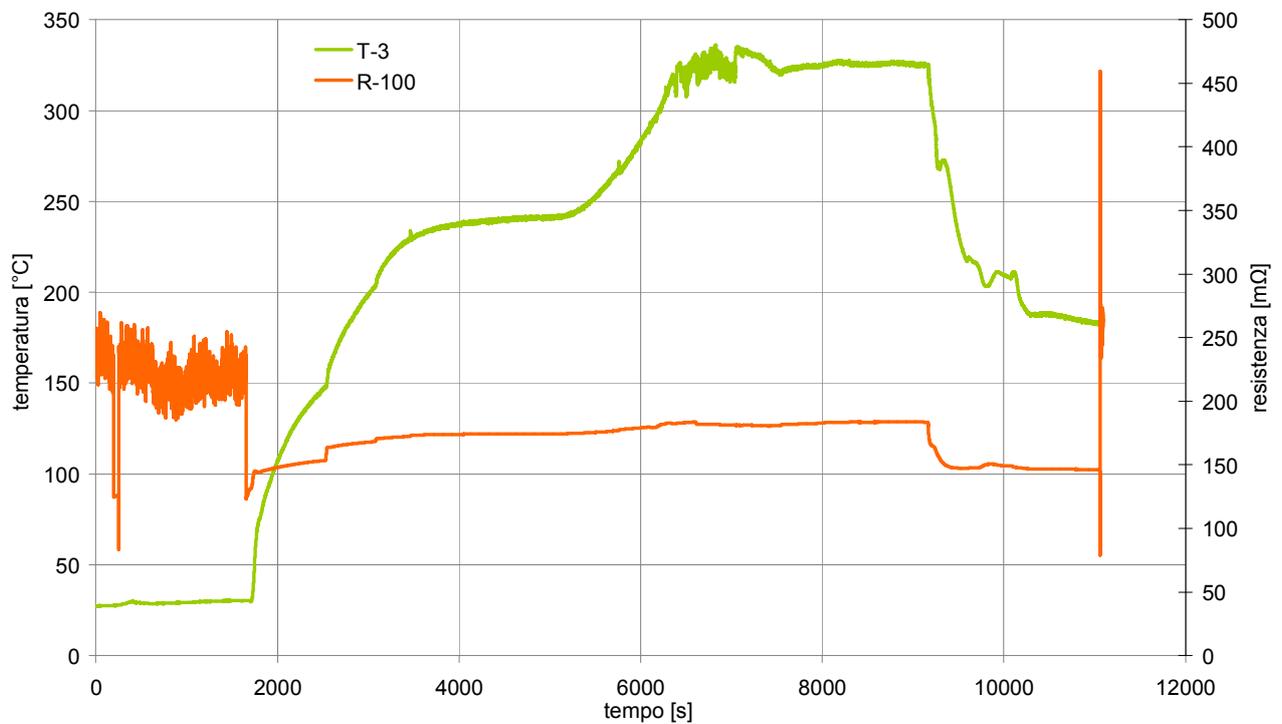


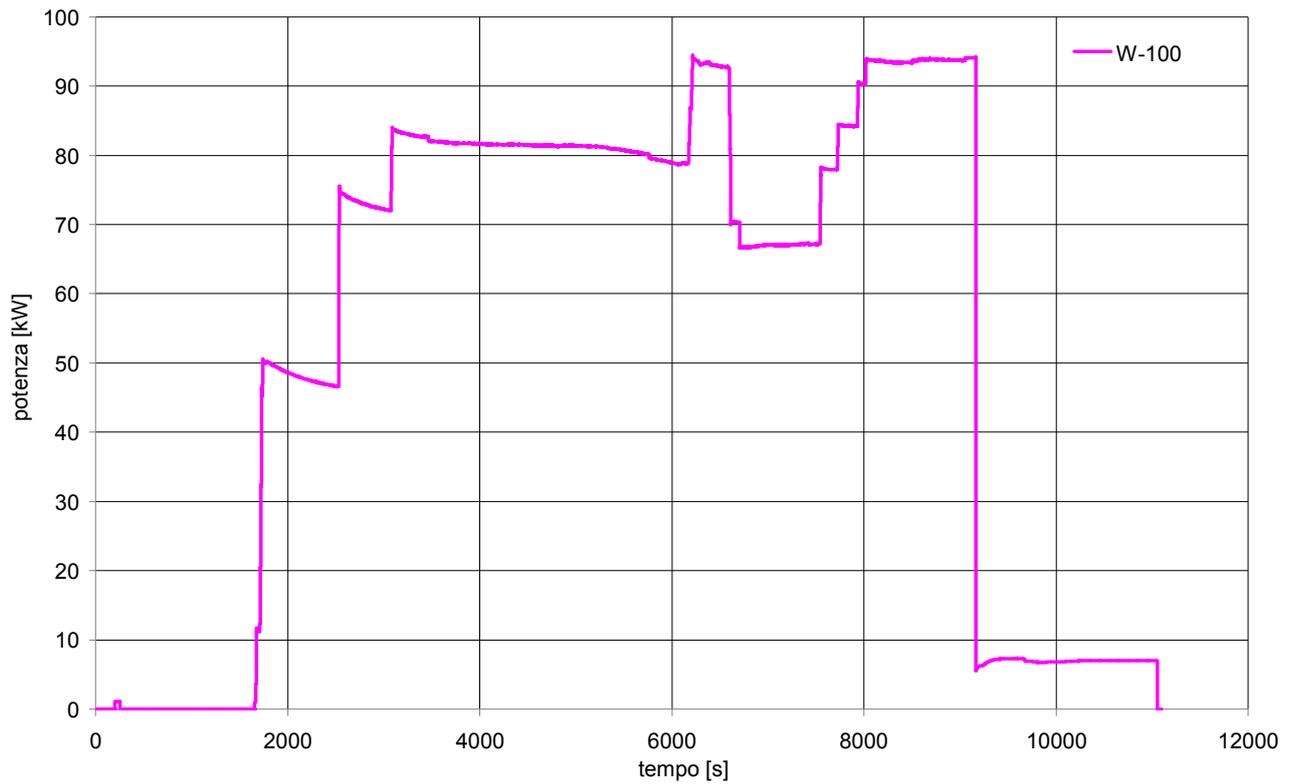
Fig. 8. 58 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°8



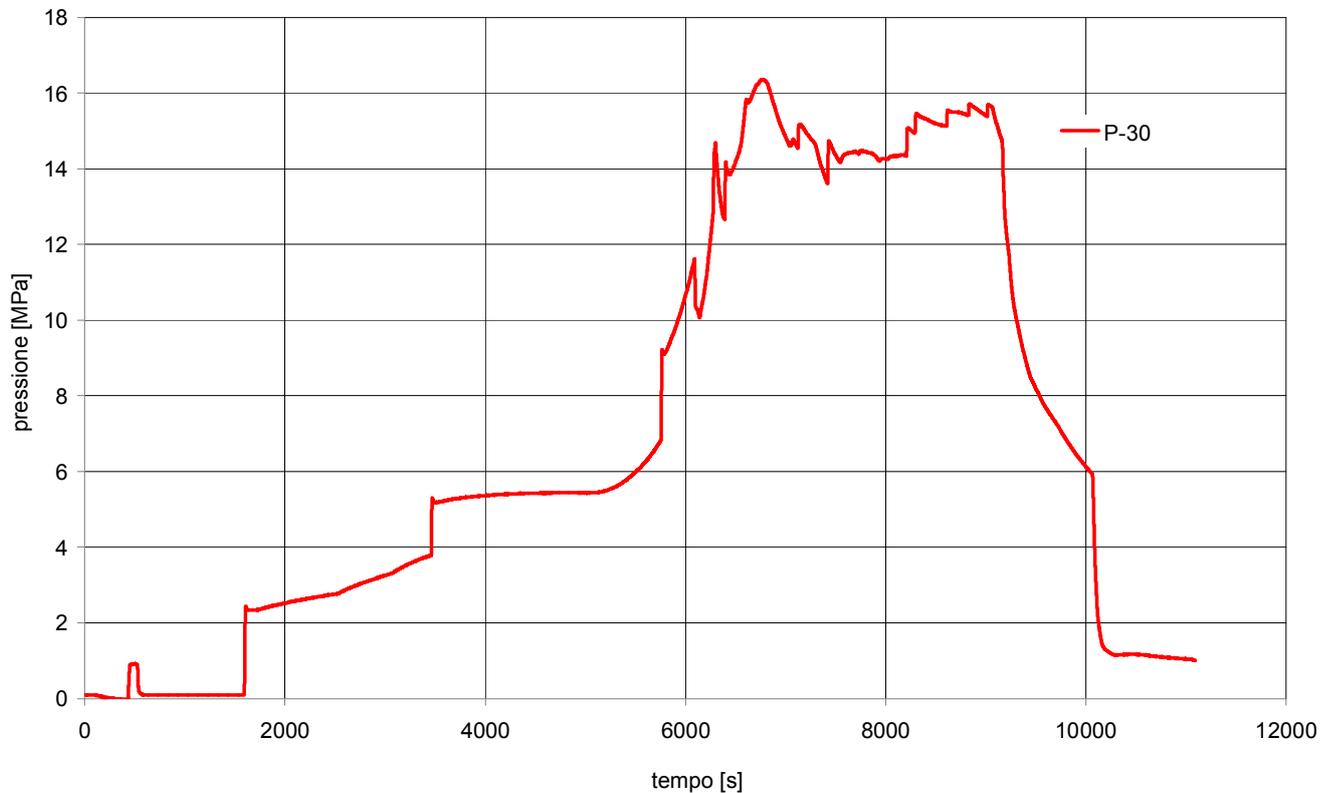
**Fig. 8. 59 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°10**



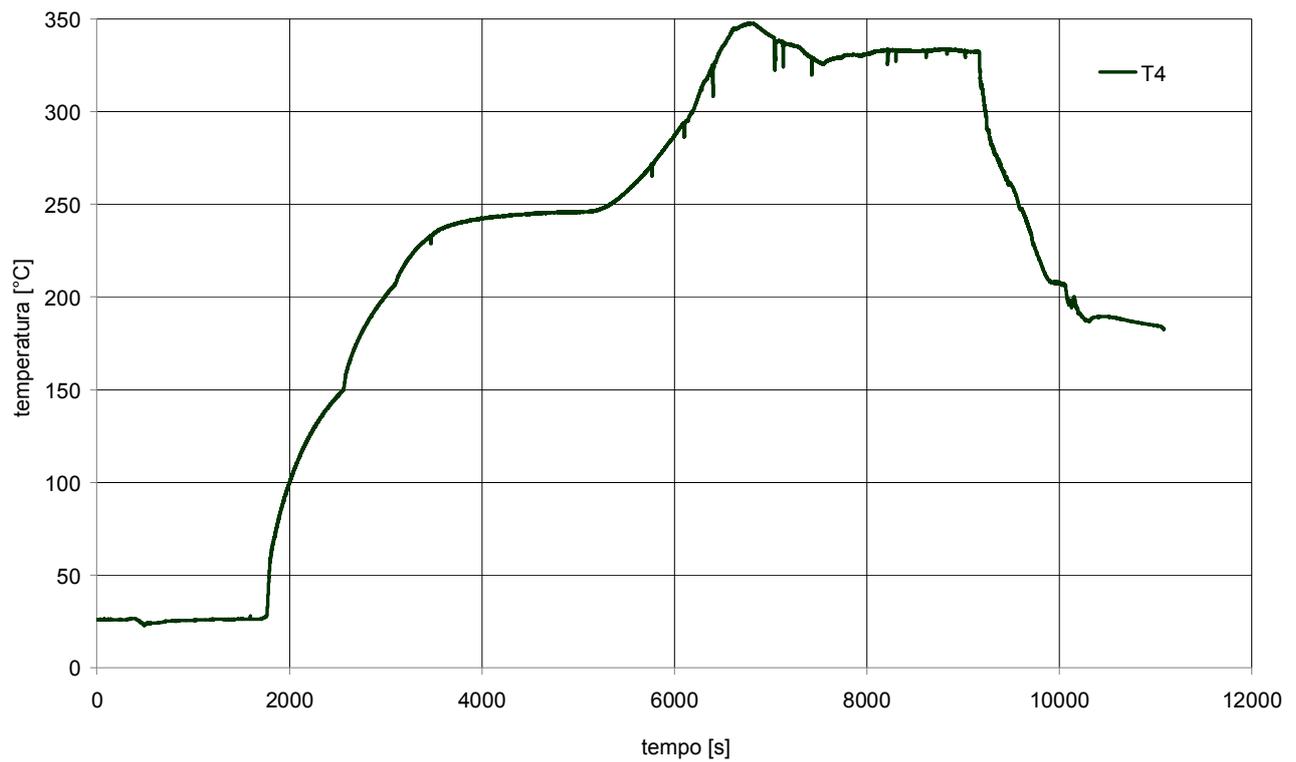
**Fig. 8. 60 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°12**



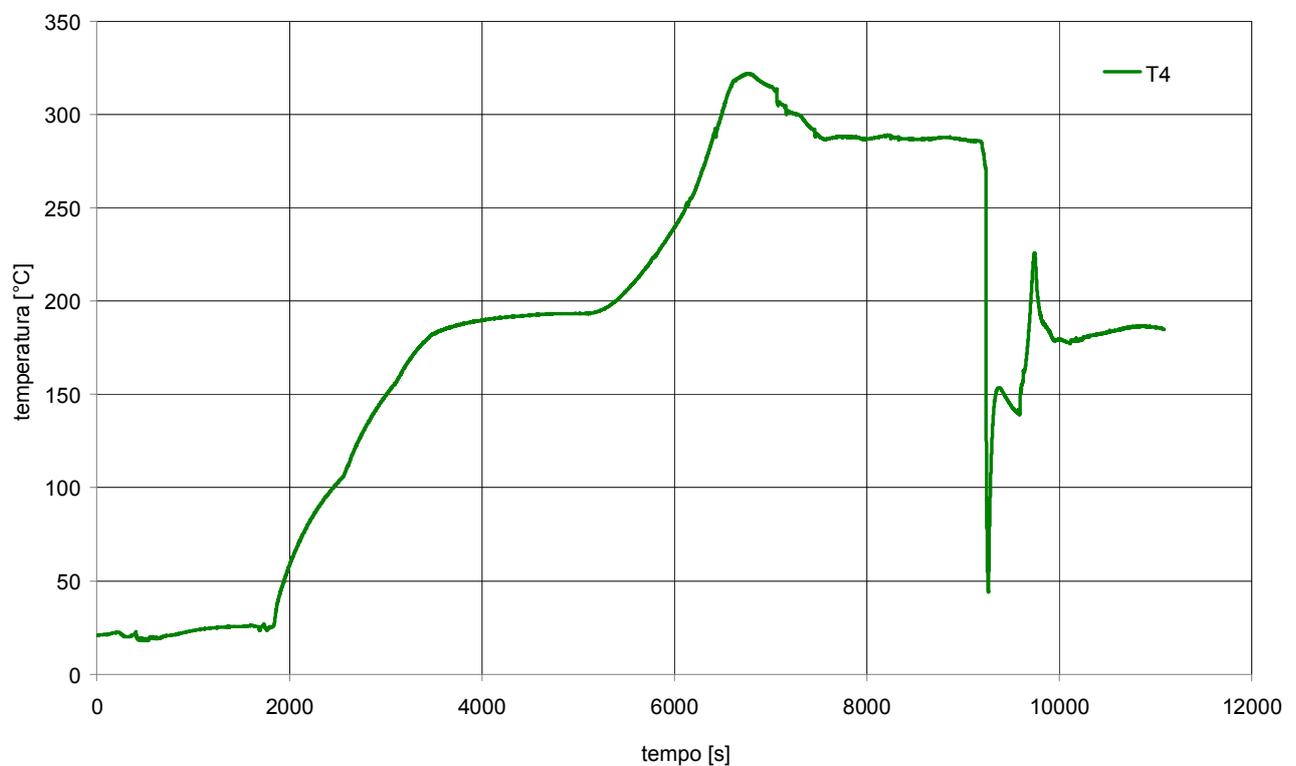
**Fig. 8.61 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°12**



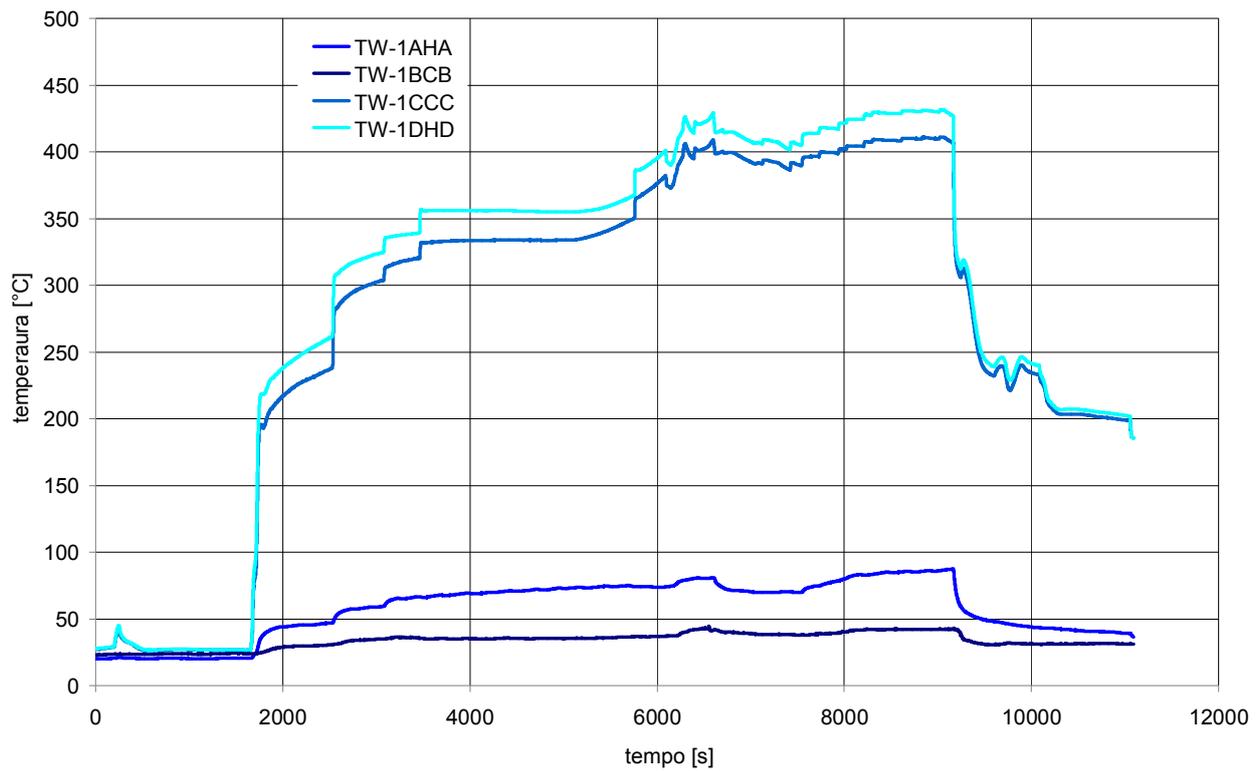
**Fig. 8.62 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°12**



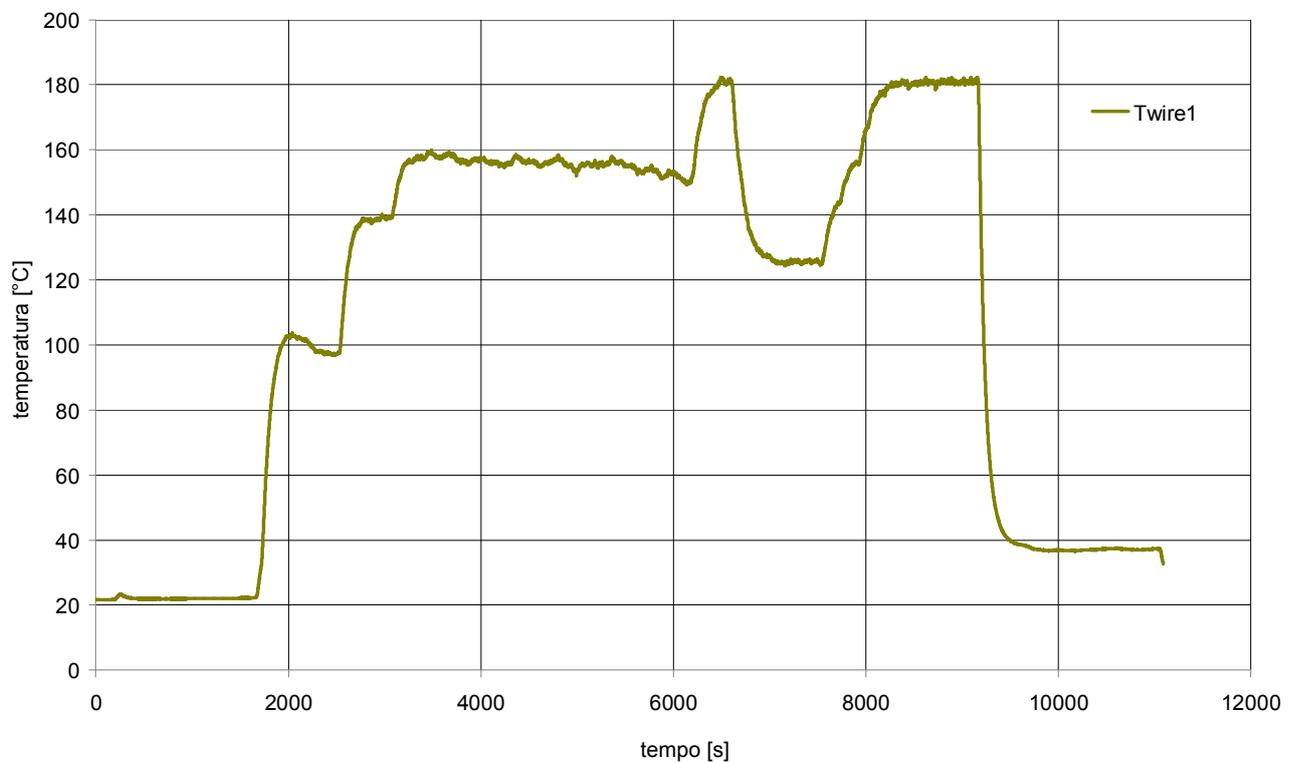
**Fig. 8. 63 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°12**



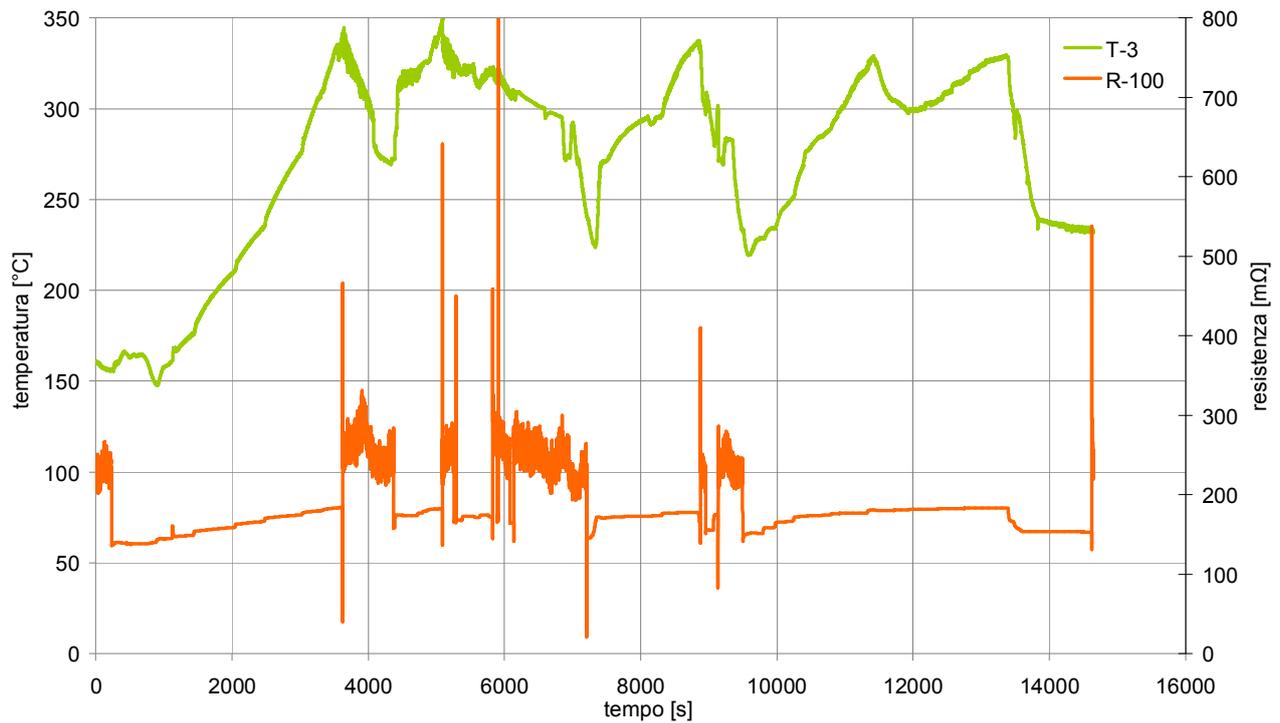
**Fig. 8. 64 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°12**



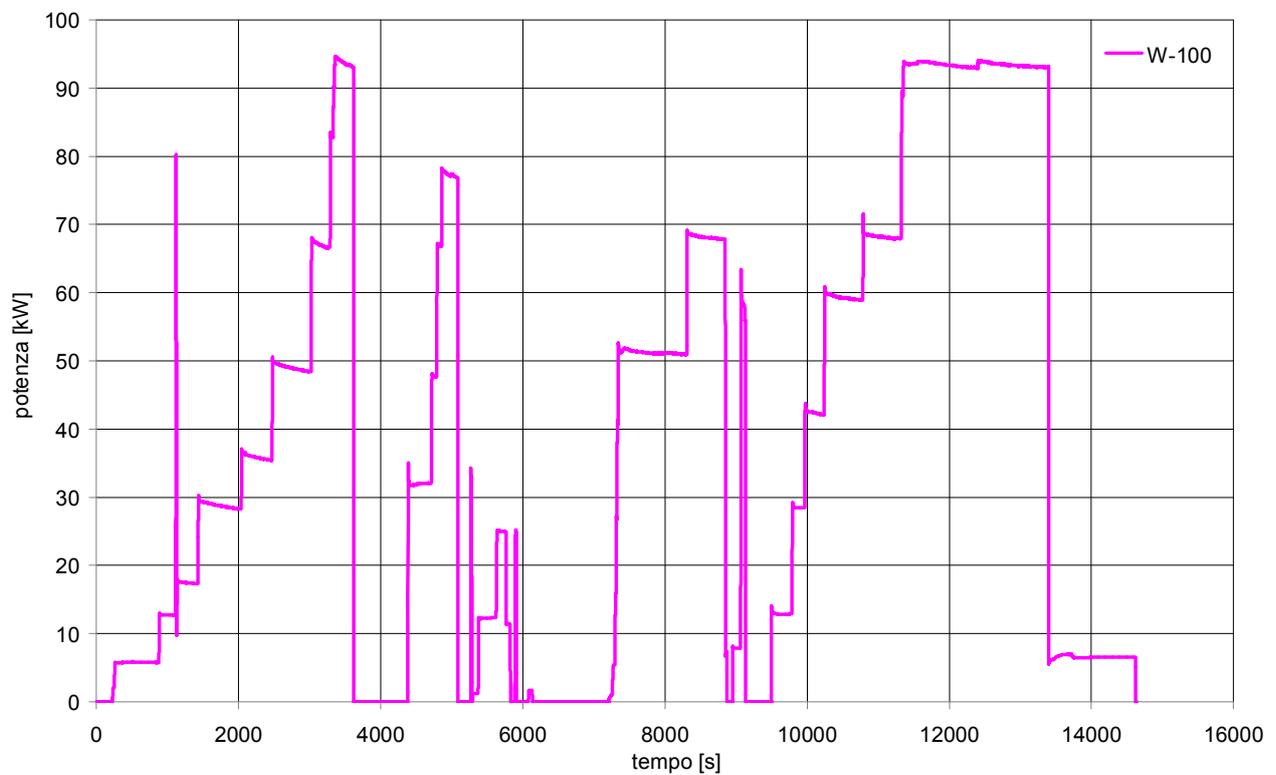
**Fig. 8. 65 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°12**



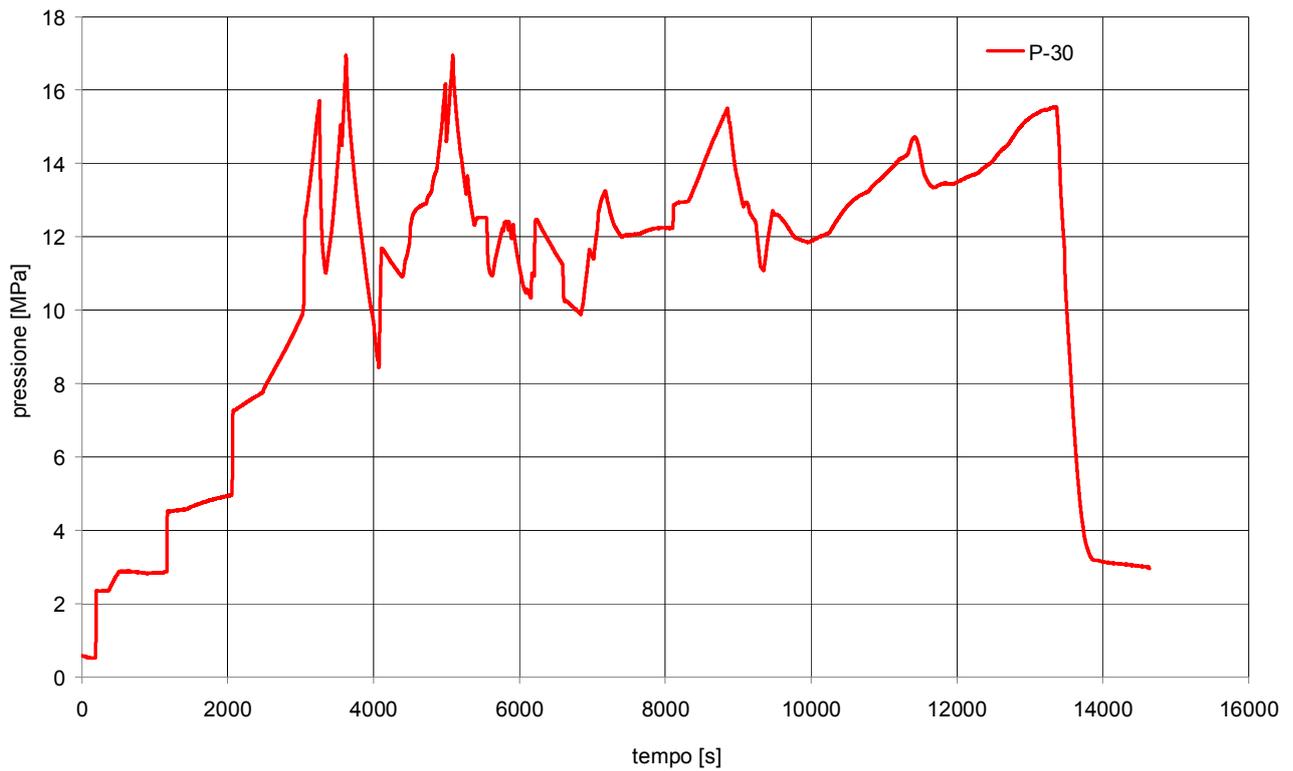
**Fig. 8. 66 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°12**



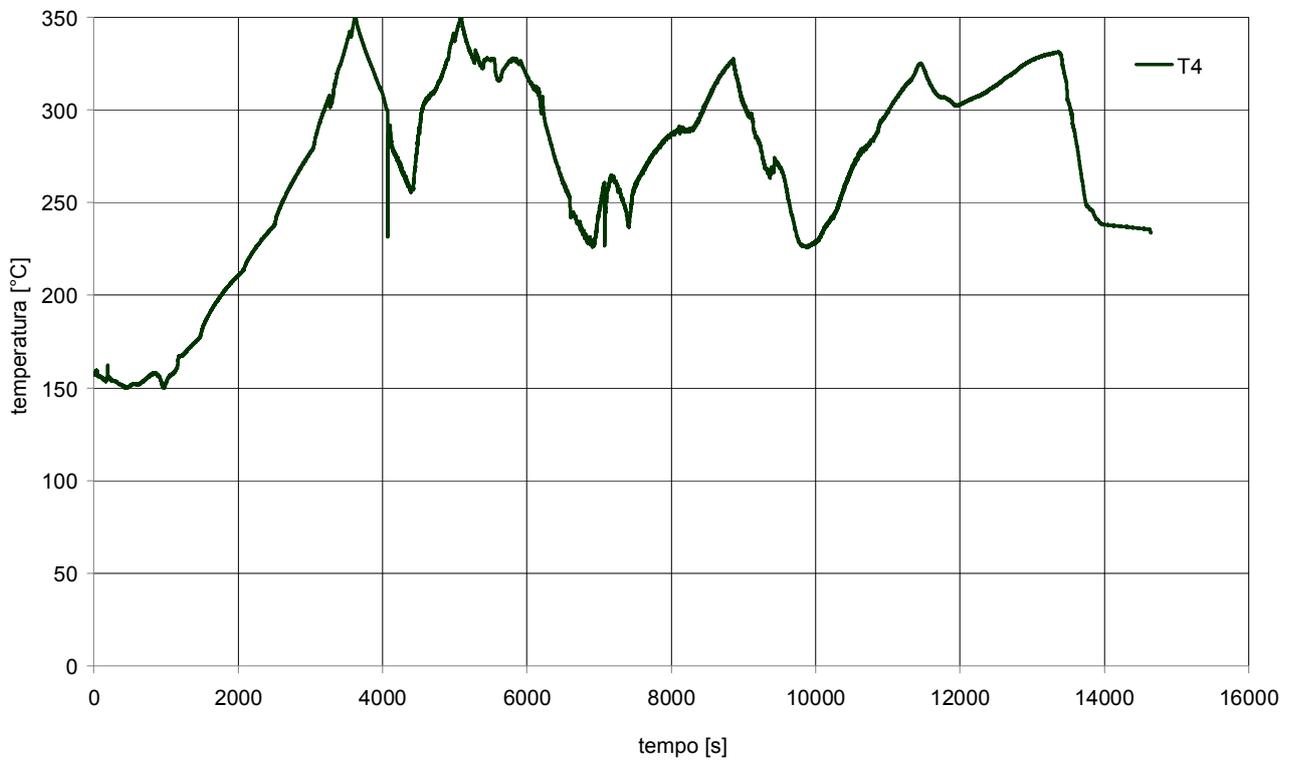
**Fig. 8. 67 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°13**



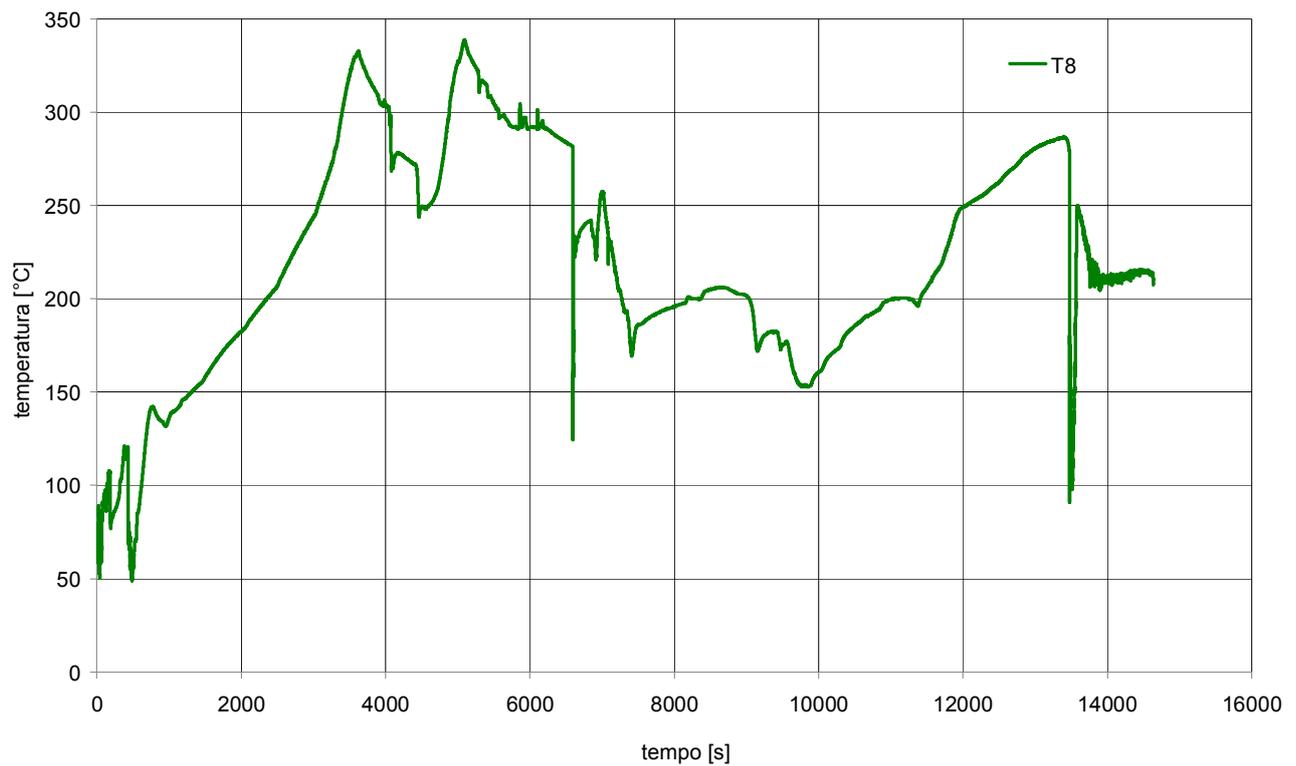
**Fig. 8. 68 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°13**



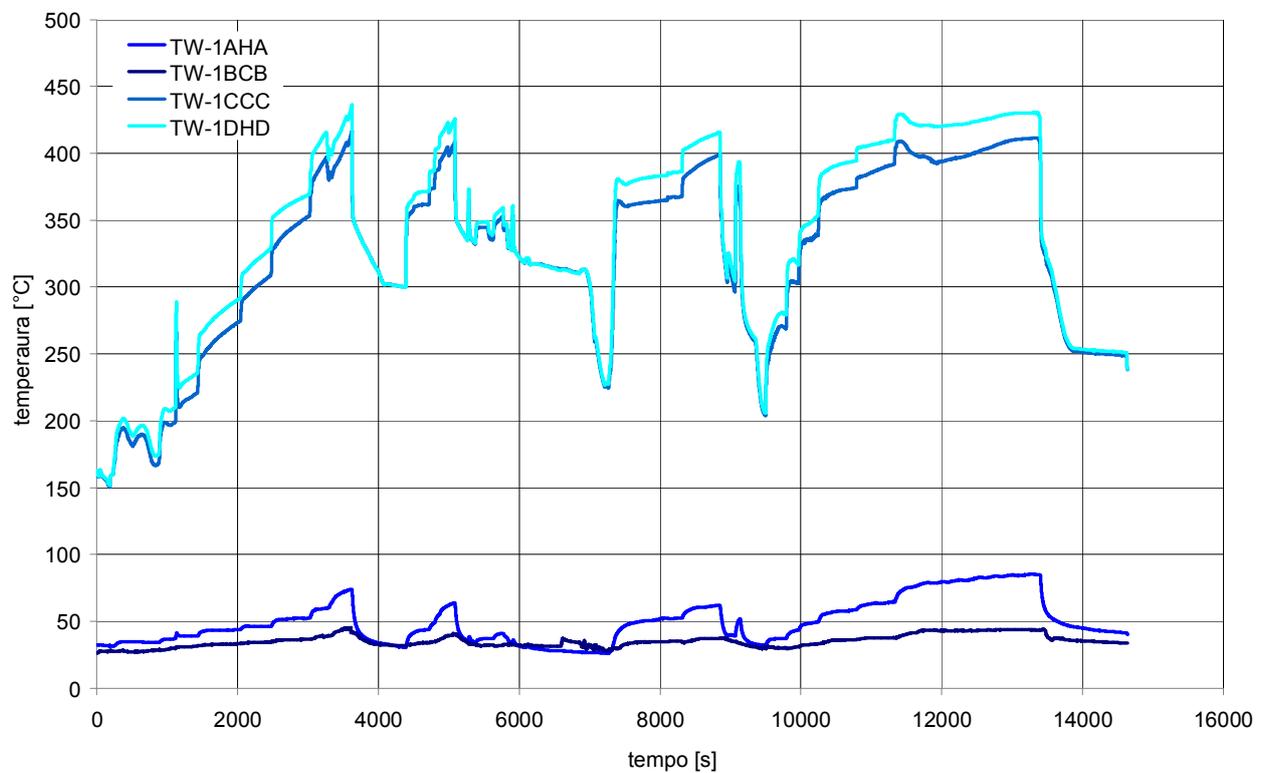
**Fig. 8. 69 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°13**



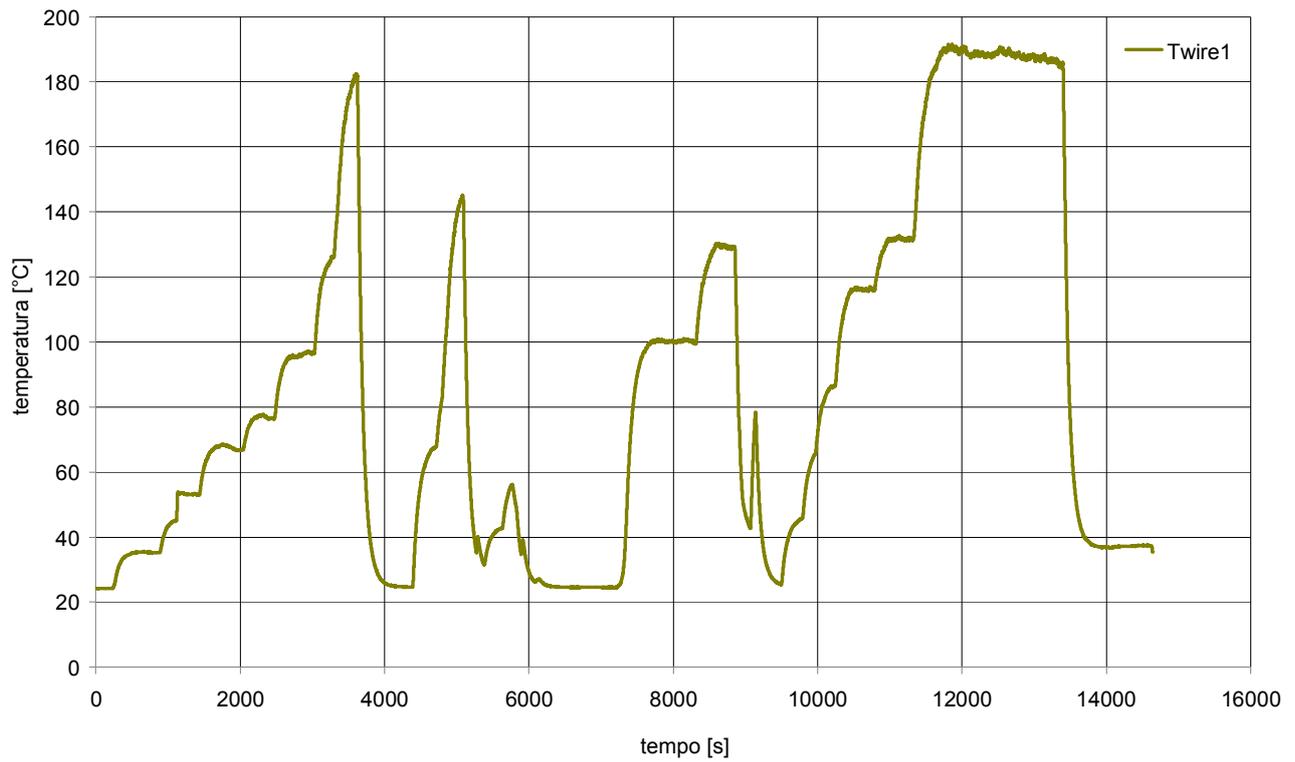
**Fig. 8. 70 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°13**



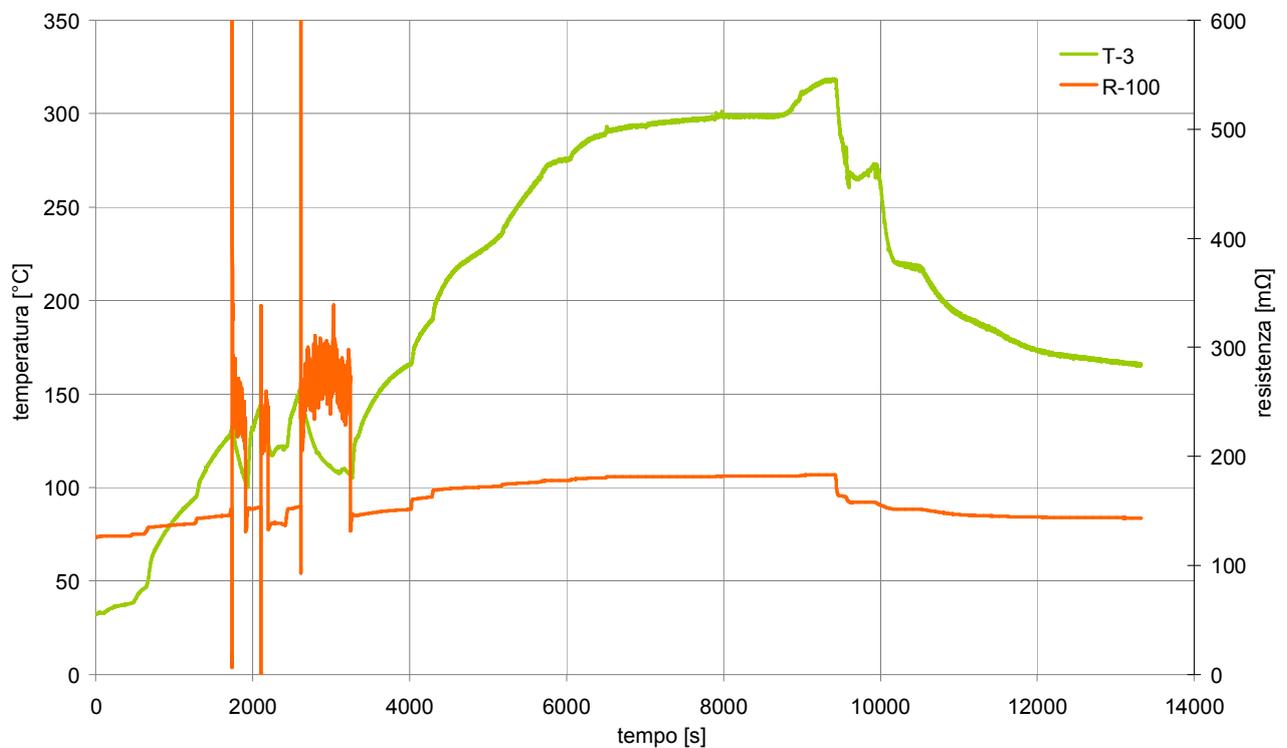
**Fig. 8. 71 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°13**



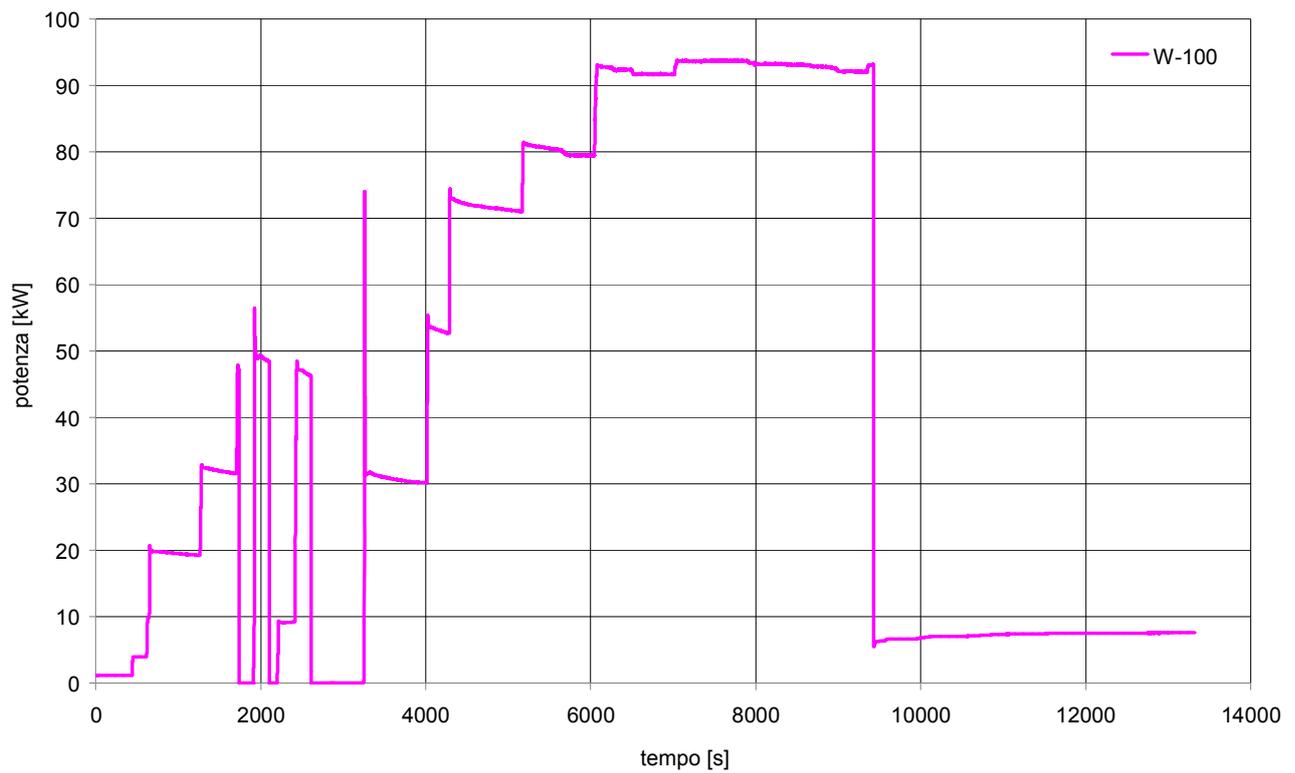
**Fig. 8. 72 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°13**



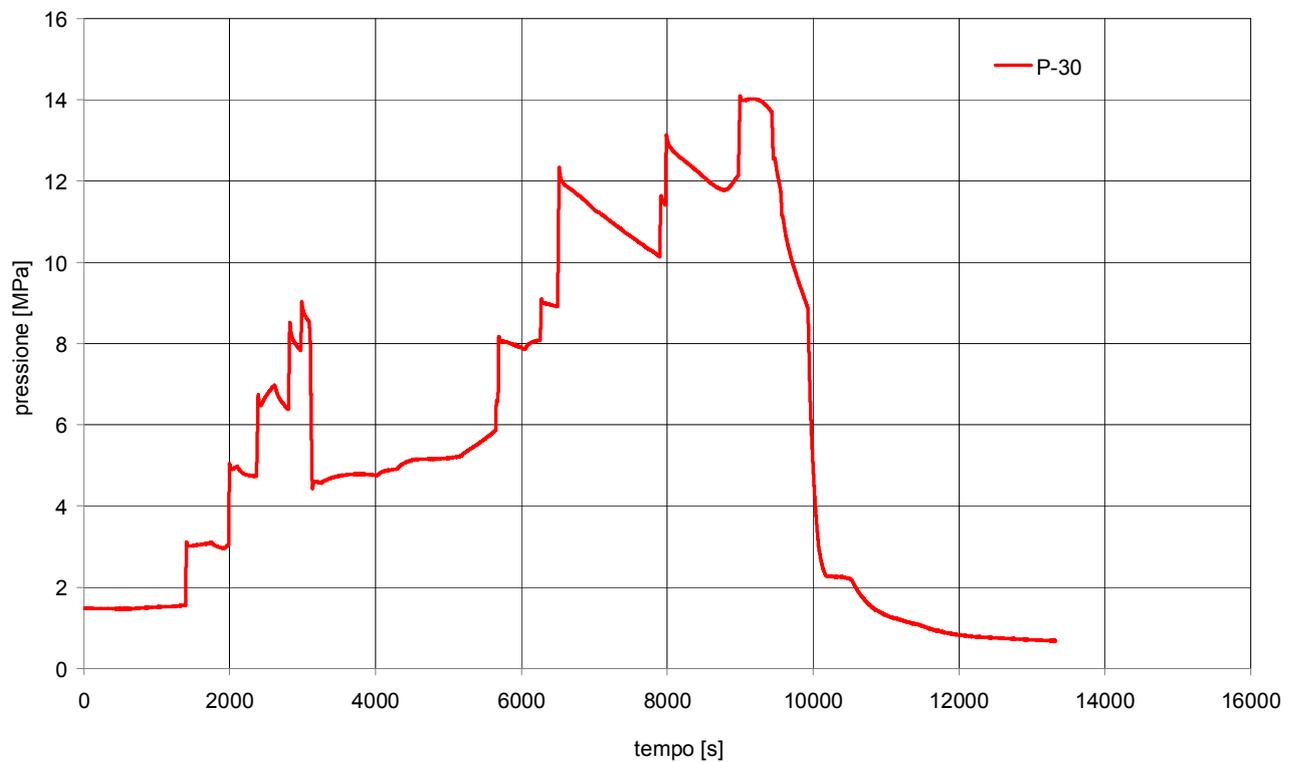
**Fig. 8. 73 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°13**



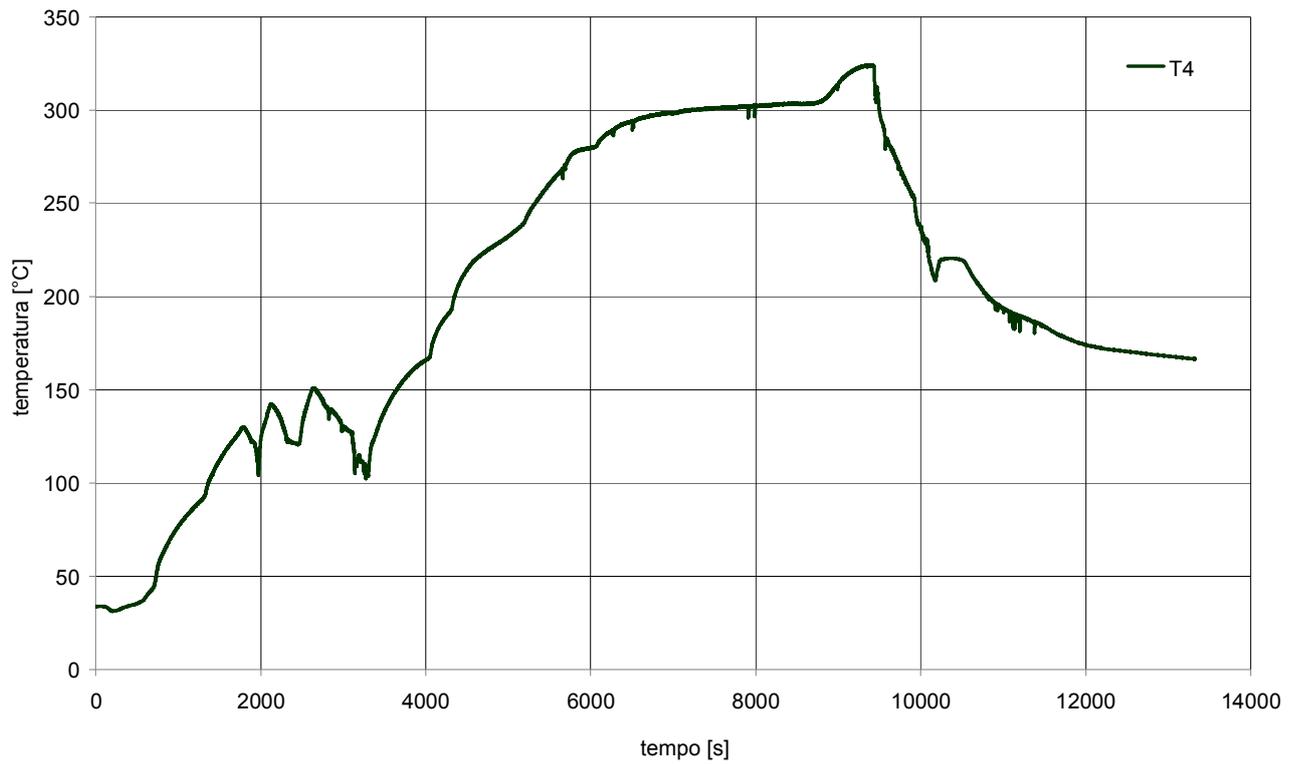
**Fig. 8. 74 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°14**



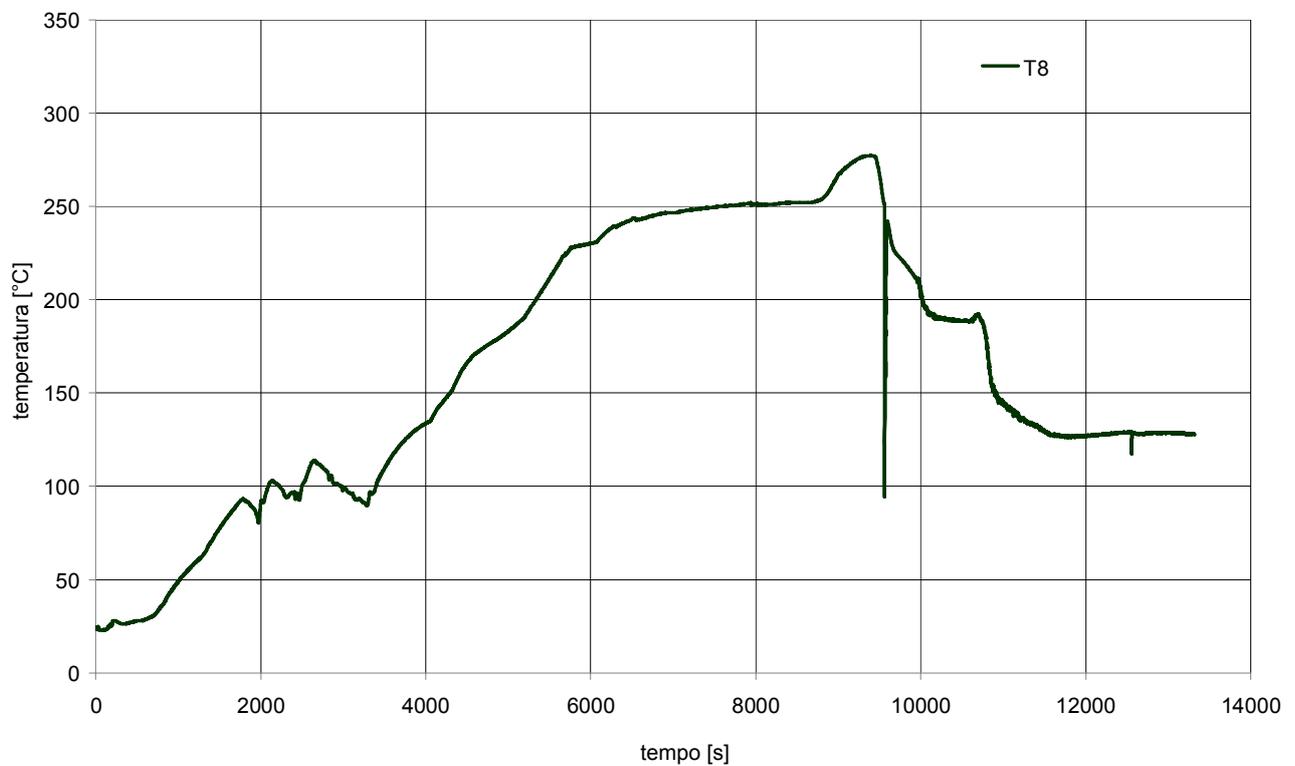
**Fig. 8.75 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°14**



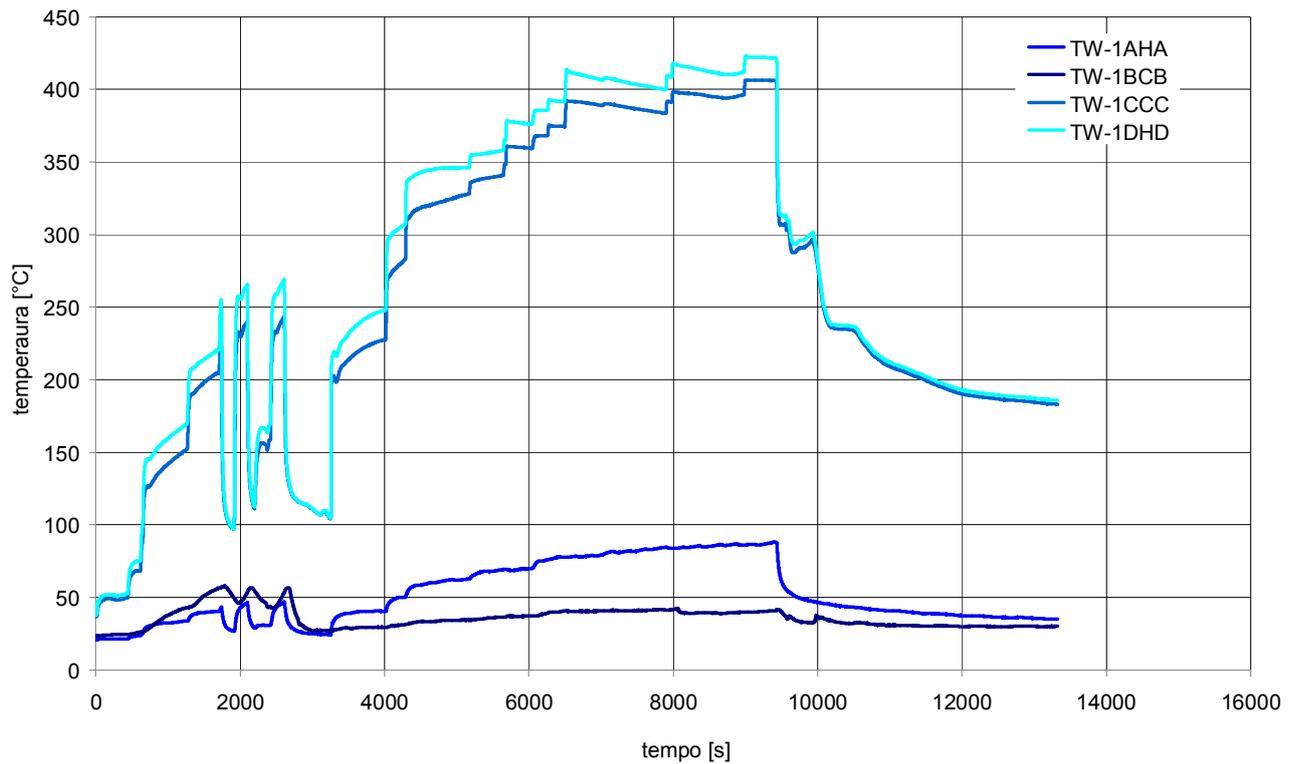
**Fig. 8.76 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°14**



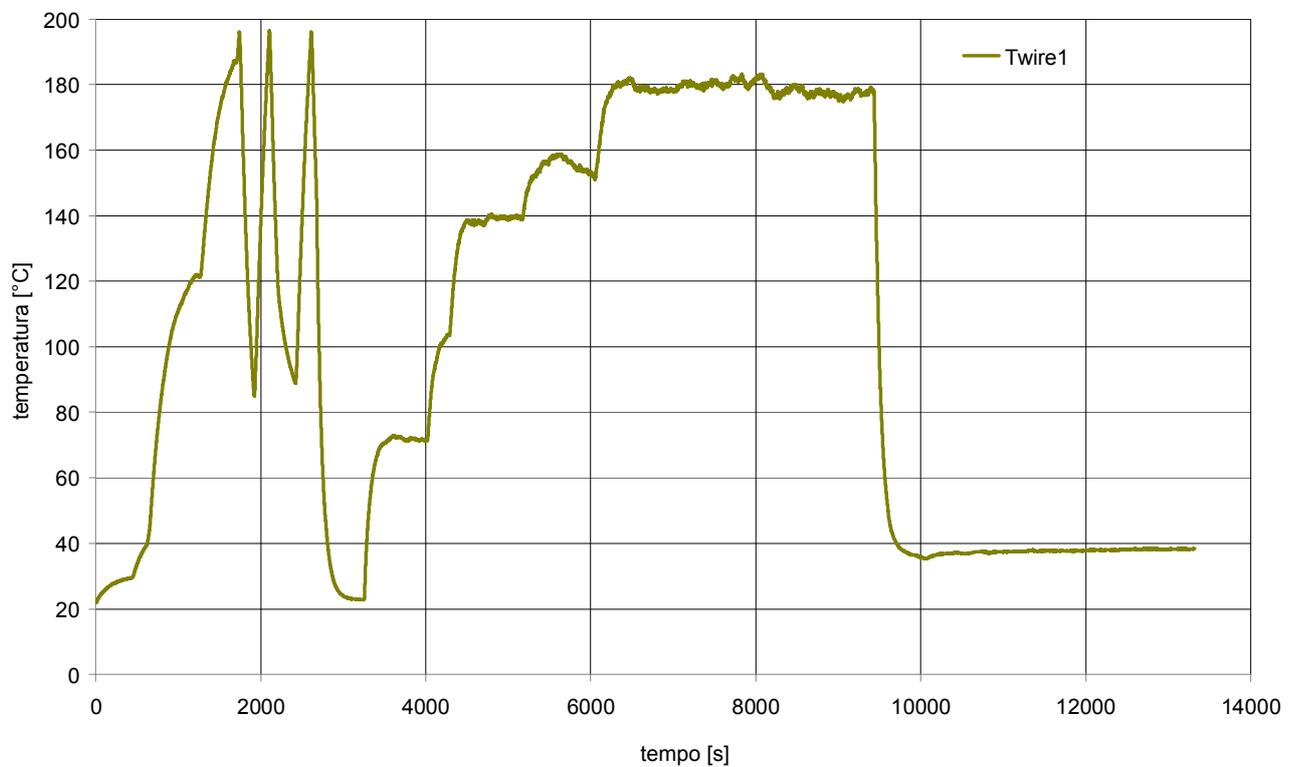
**Fig. 8. 77 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°14**



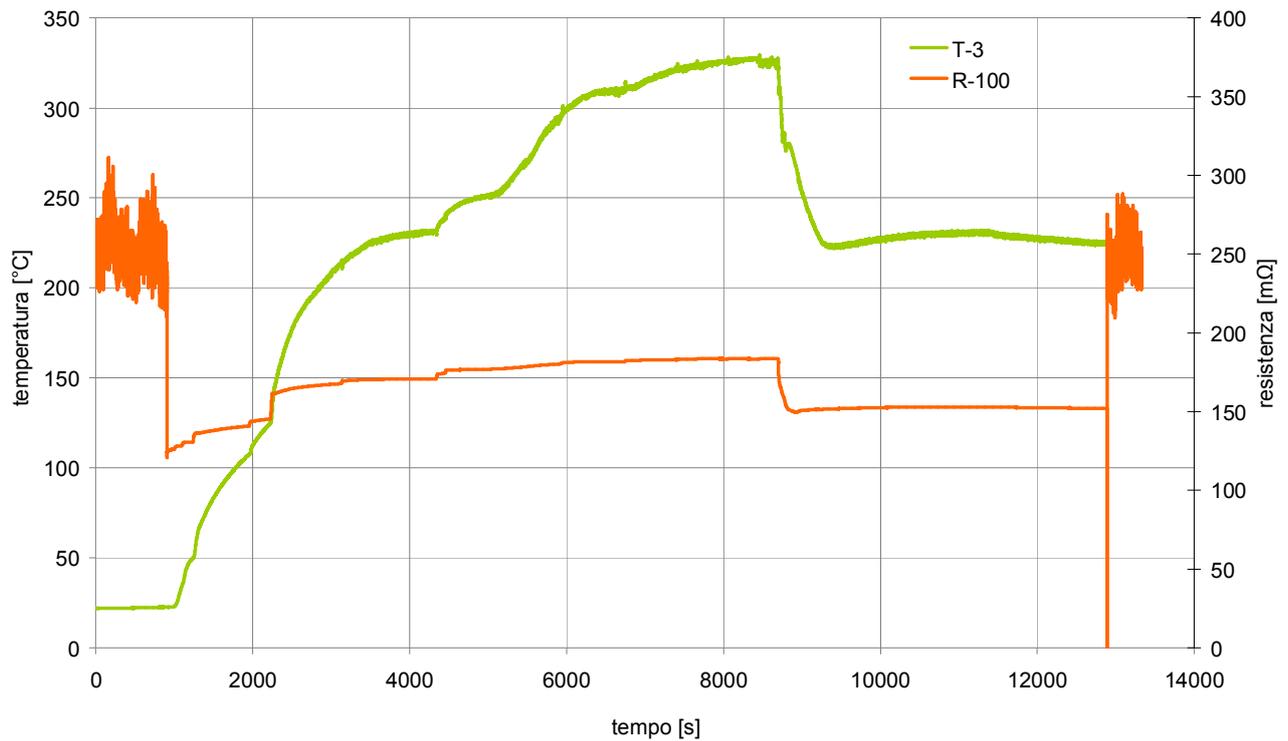
**Fig. 8. 78 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°14**



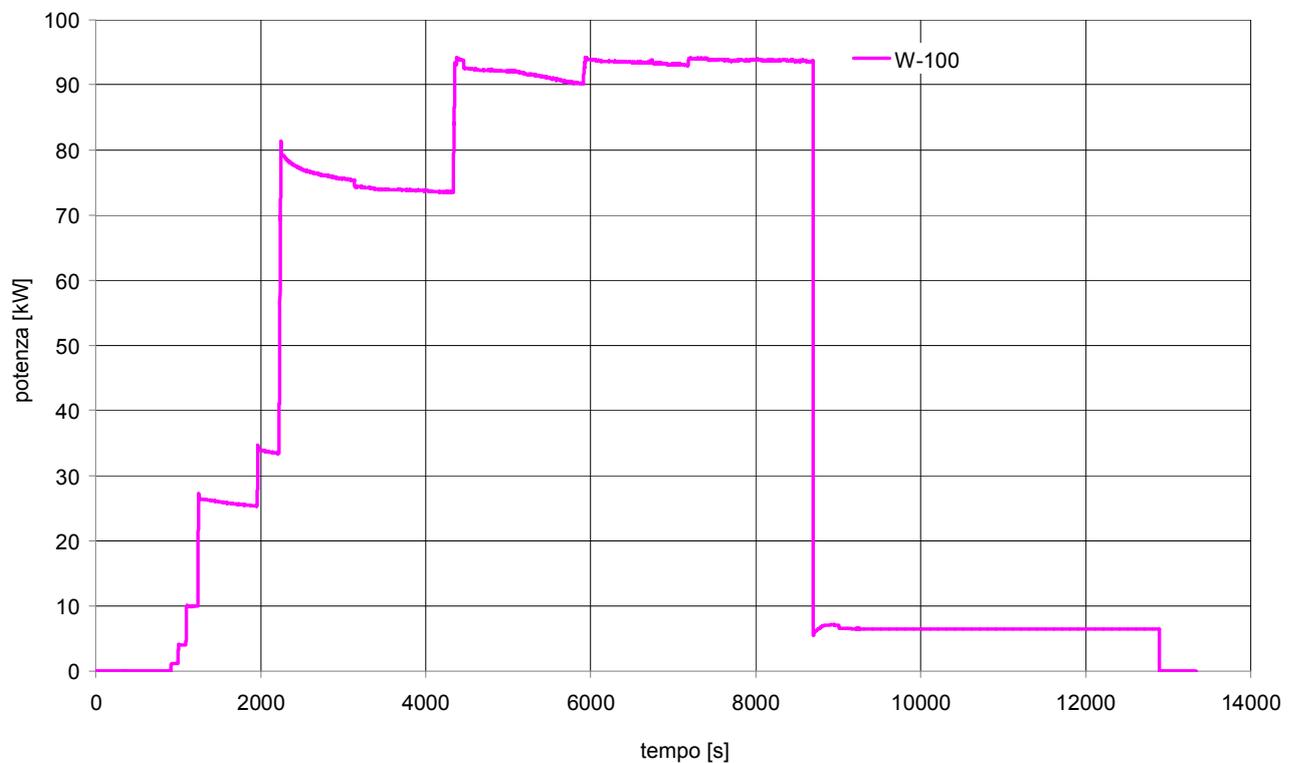
**Fig. 8. 79 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°14**



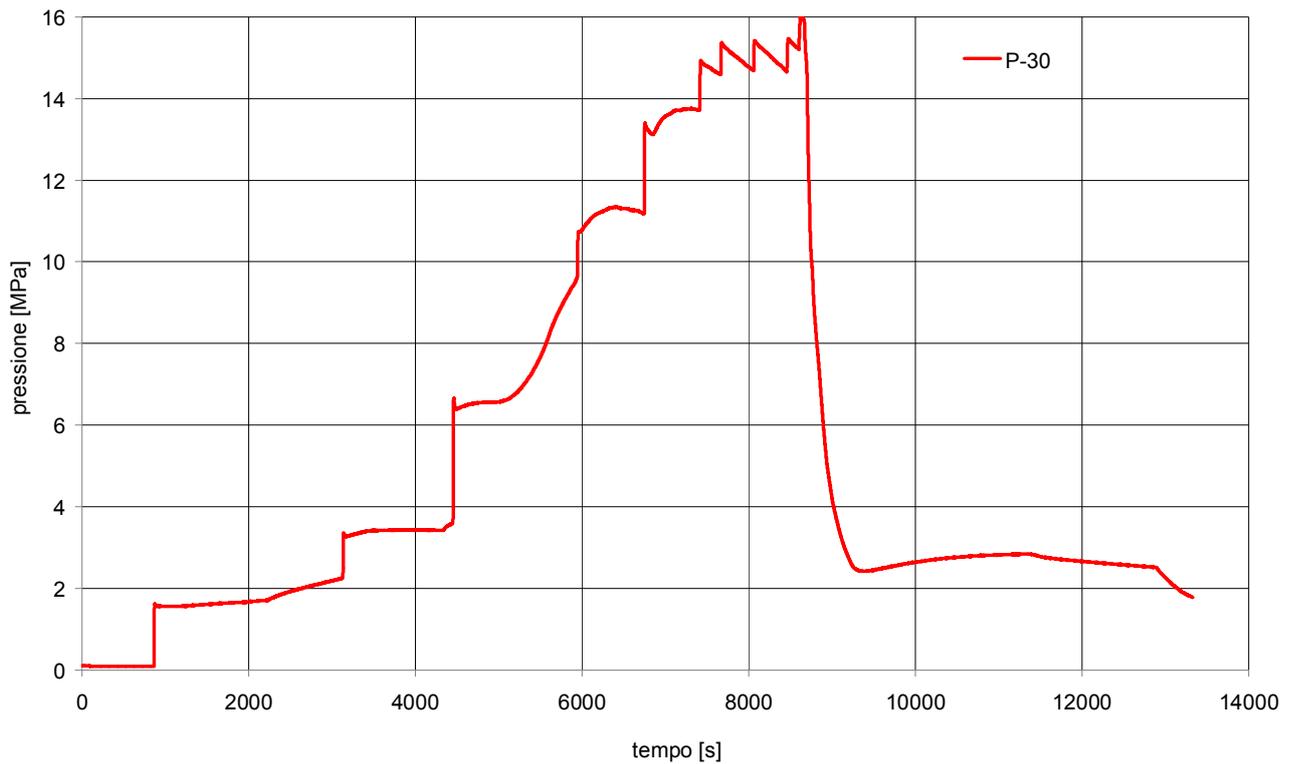
**Fig. 8. 80 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°14**



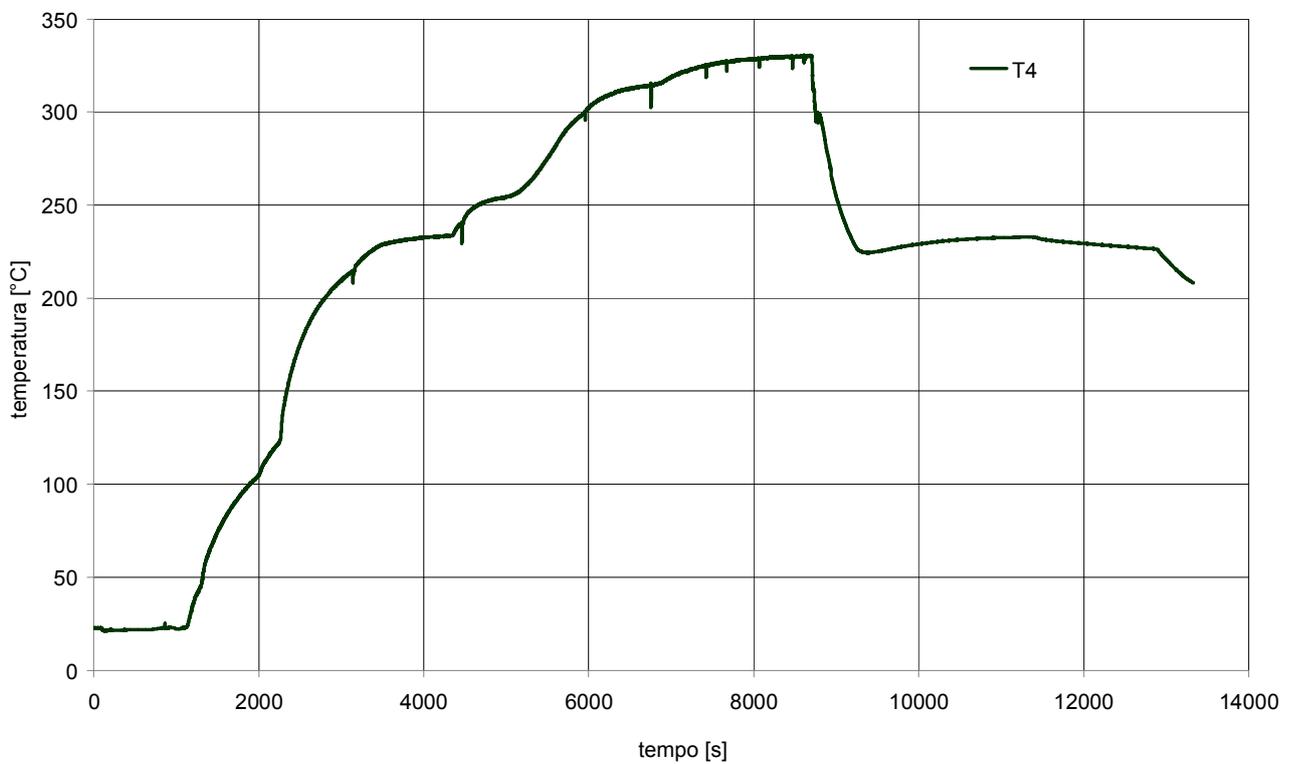
**Fig. 8. 81 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°15**



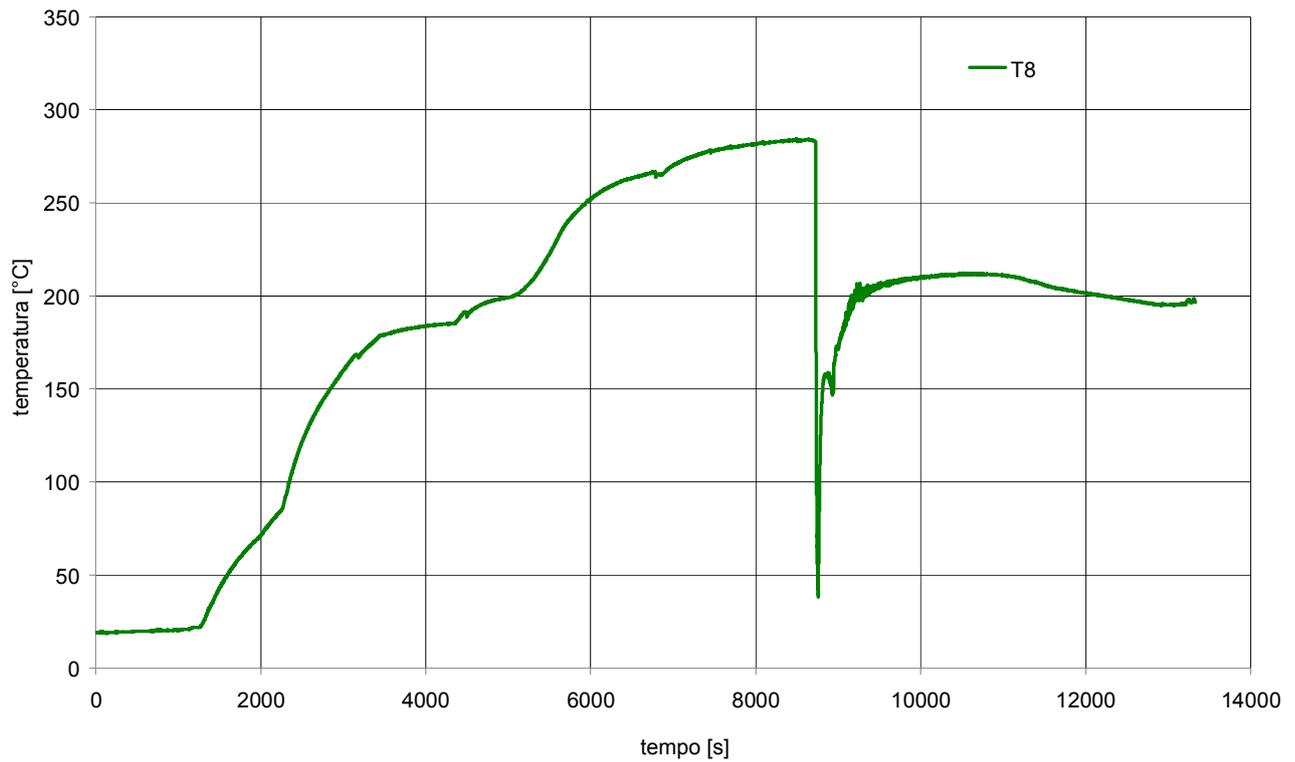
**Fig. 8. 82 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°15**



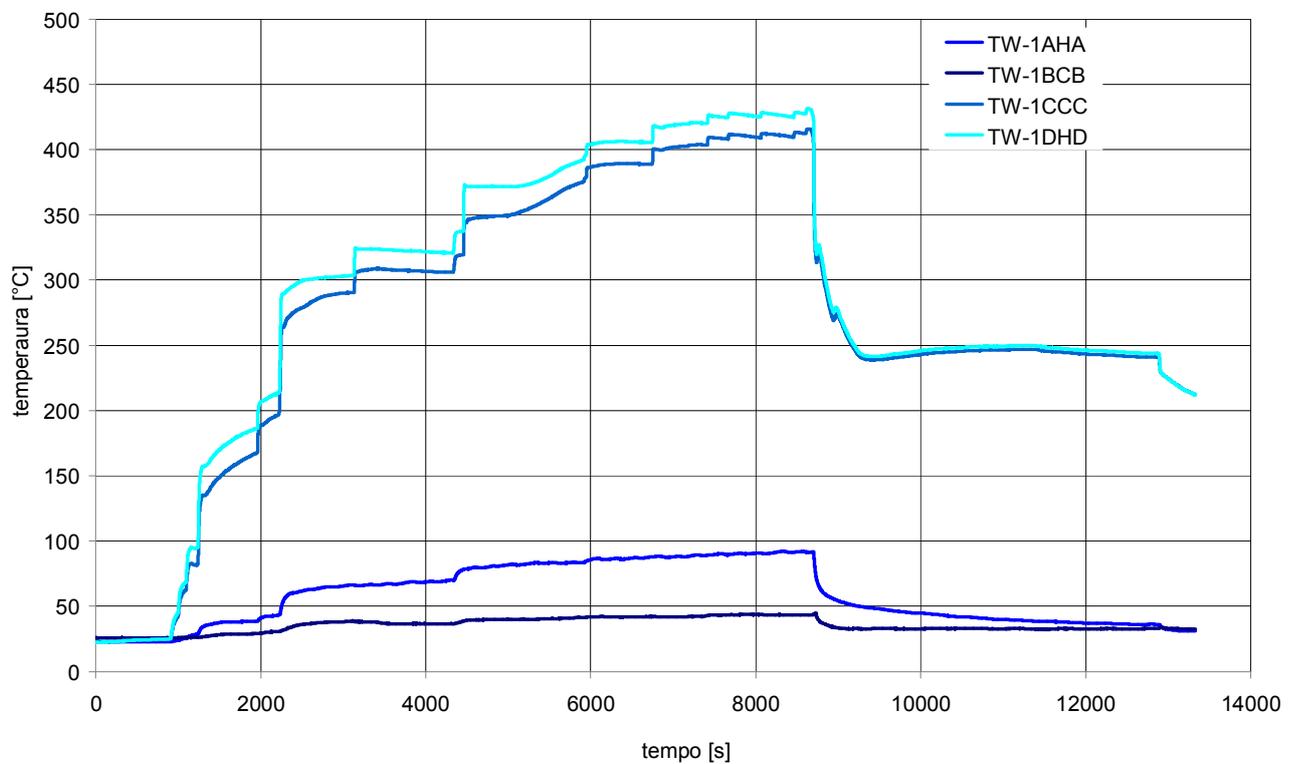
**Fig. 8. 83 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°15**



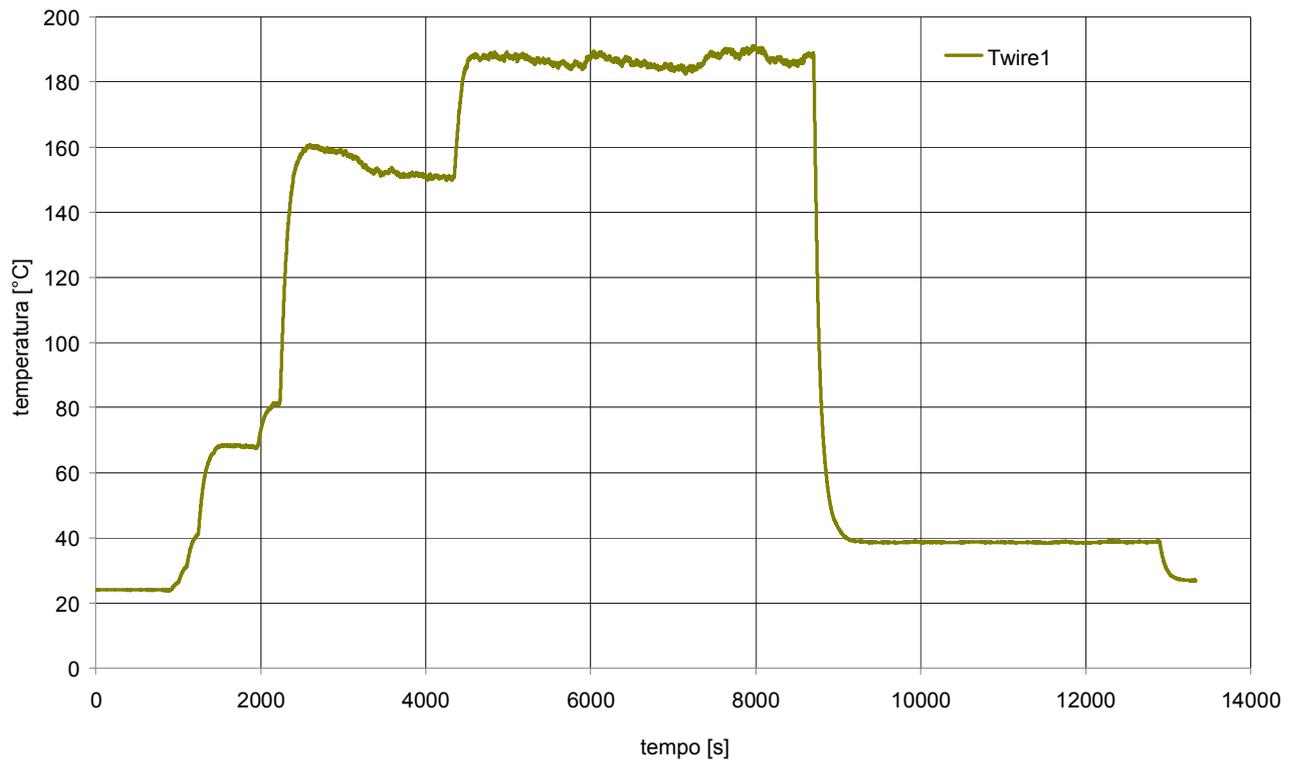
**Fig. 8. 84 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°15**



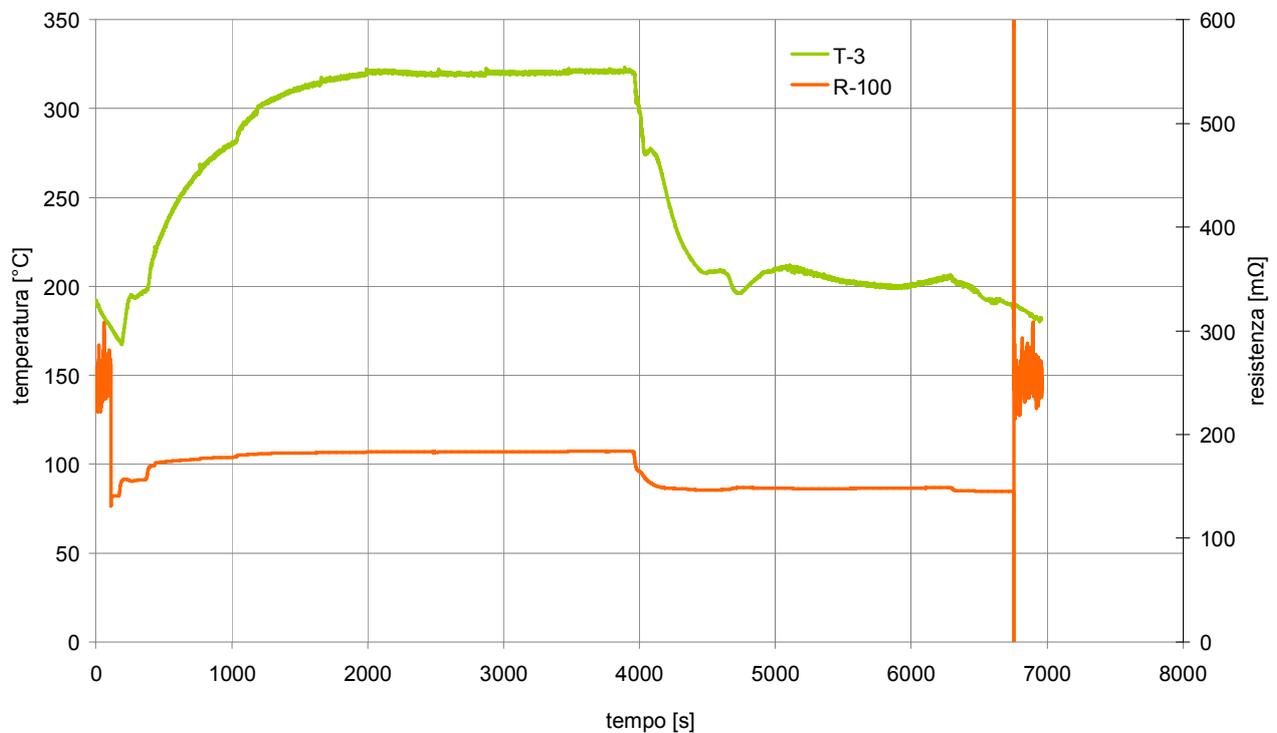
**Fig. 8. 85 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°15**



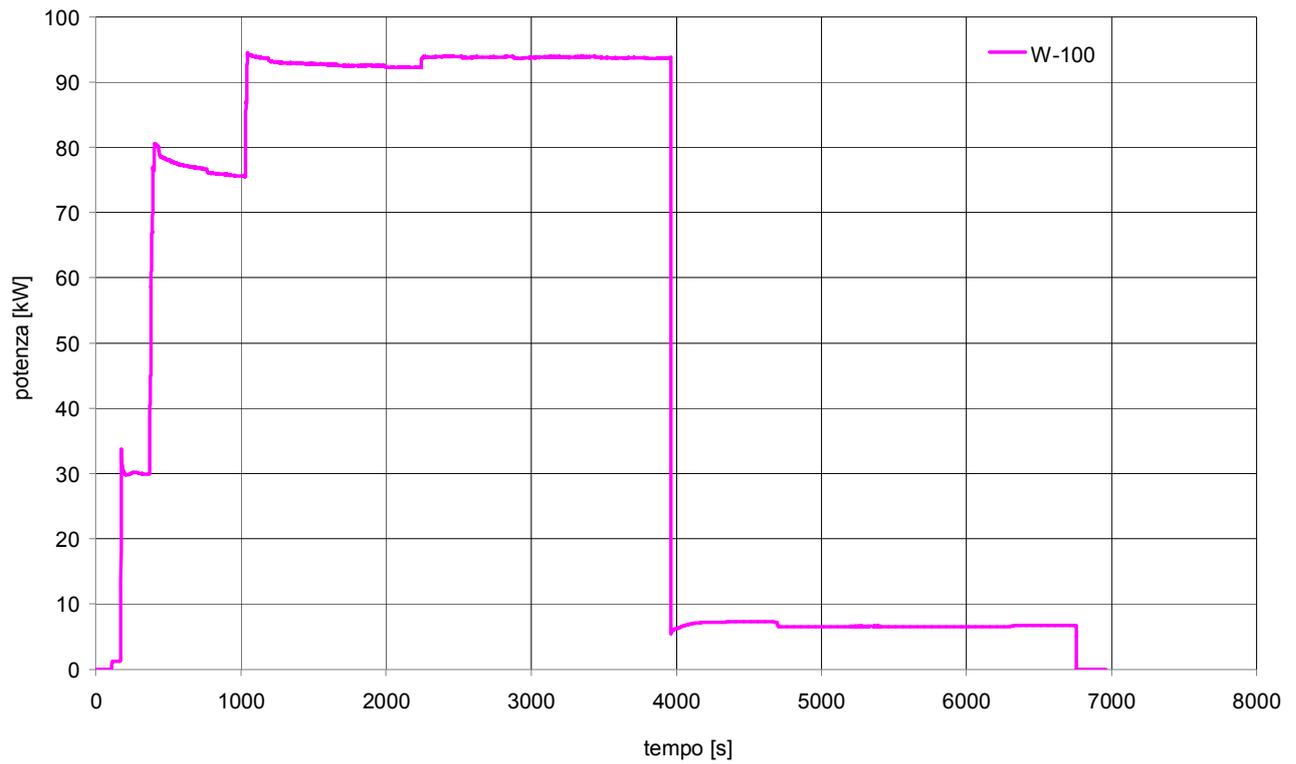
**Fig. 8. 86 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°15**



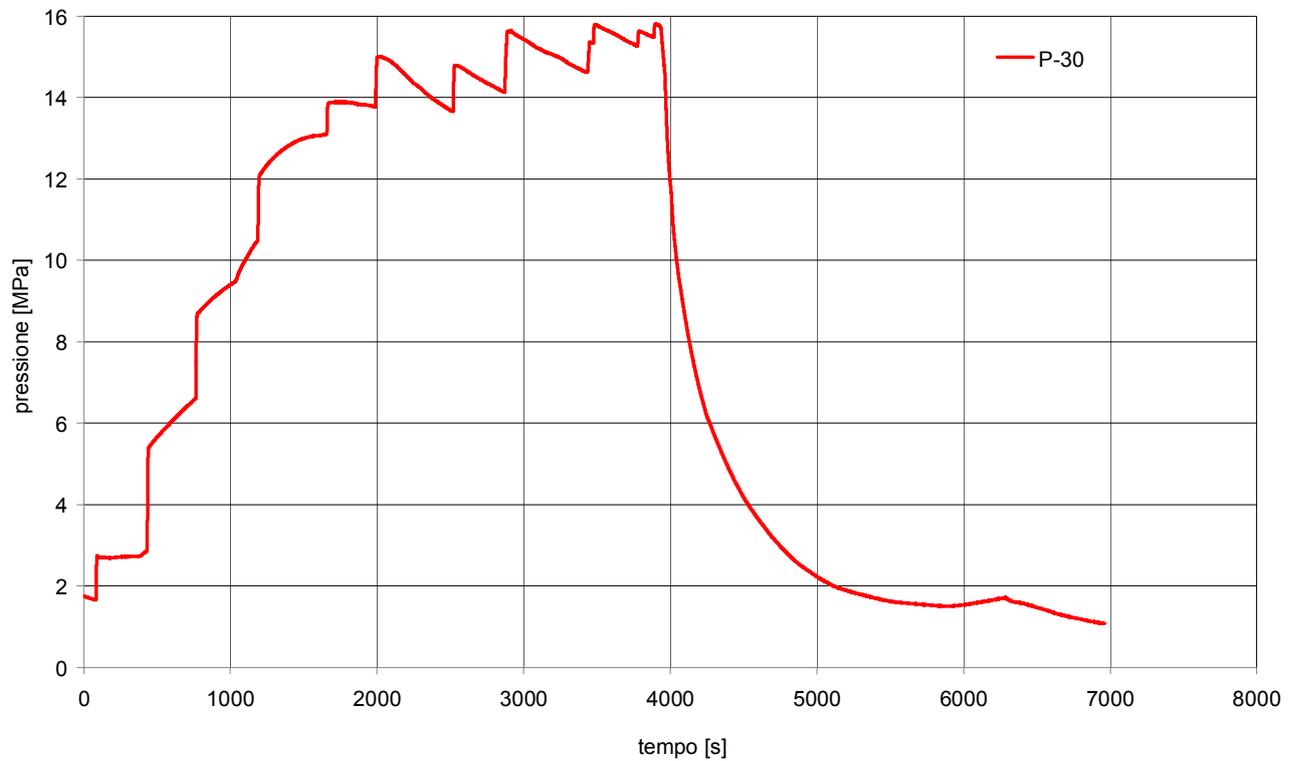
**Fig. 8.87 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°8**



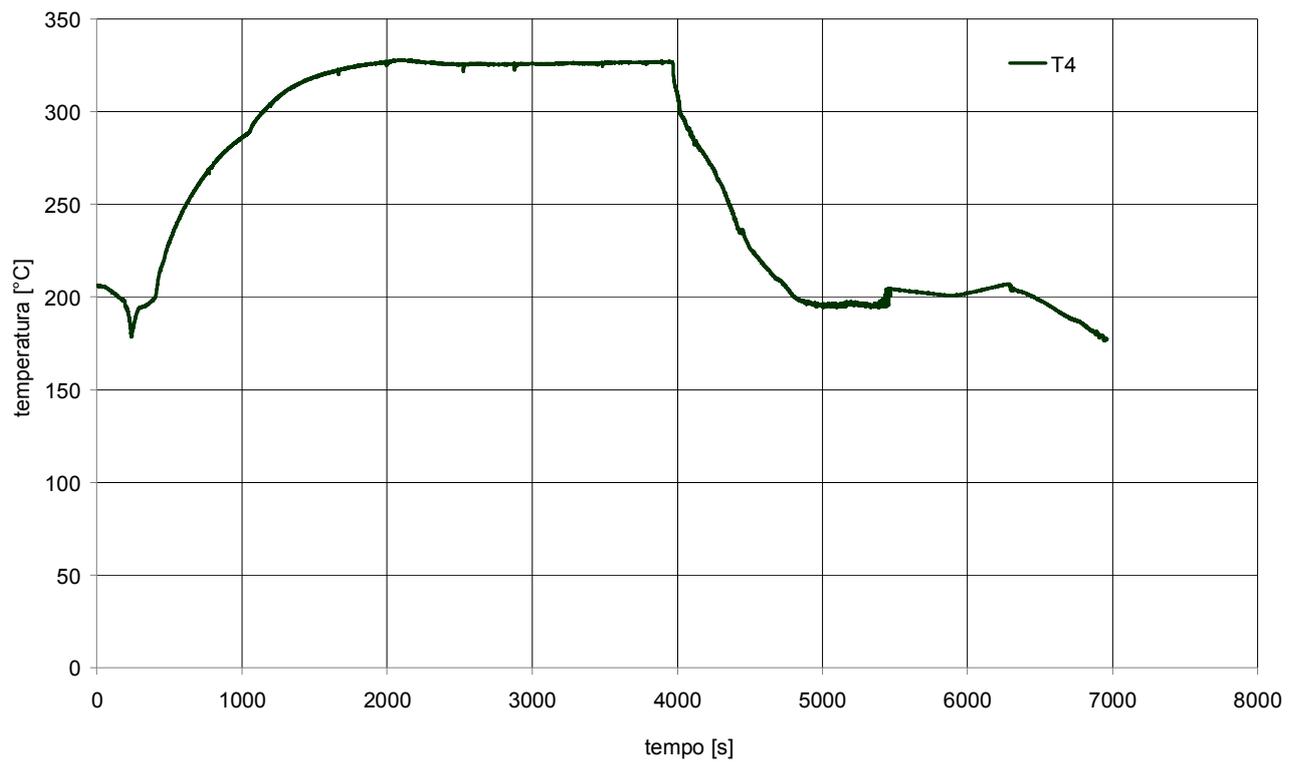
**Fig. 8.88 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°16**



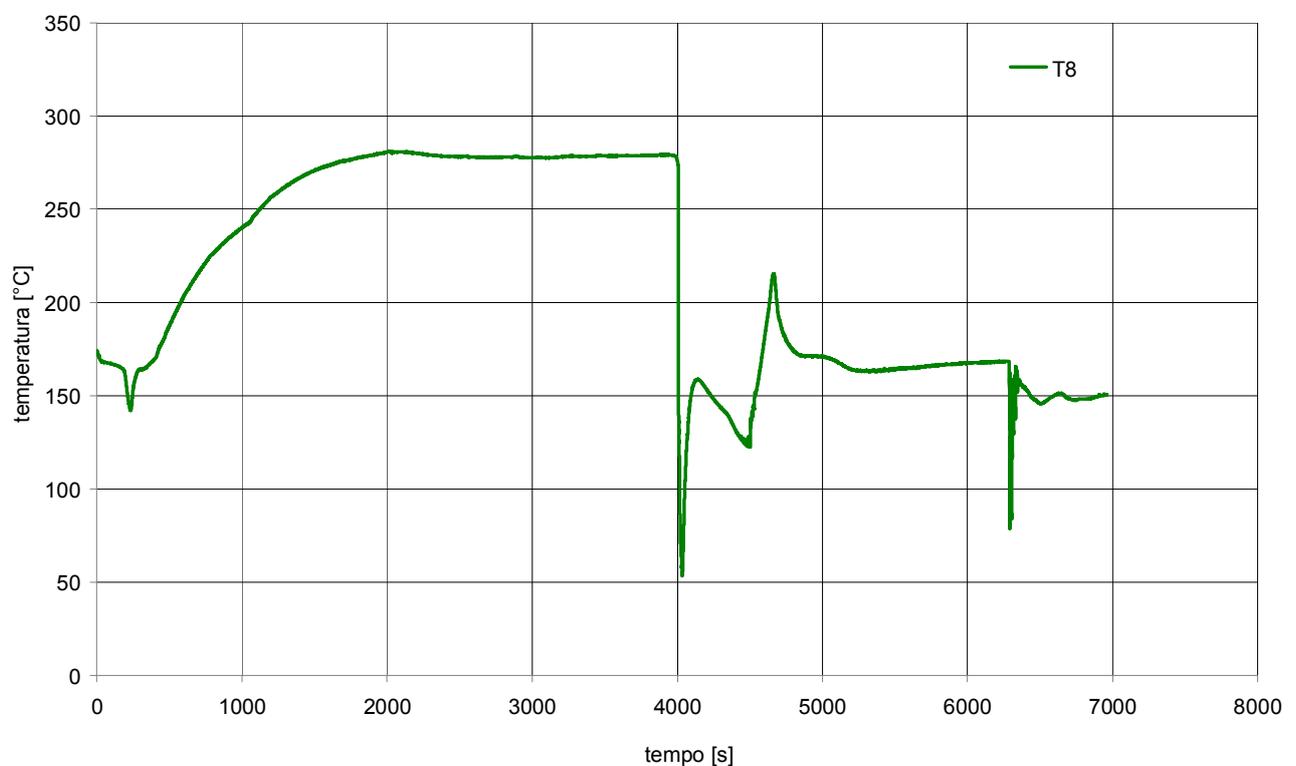
**Fig. 8.89 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°16**



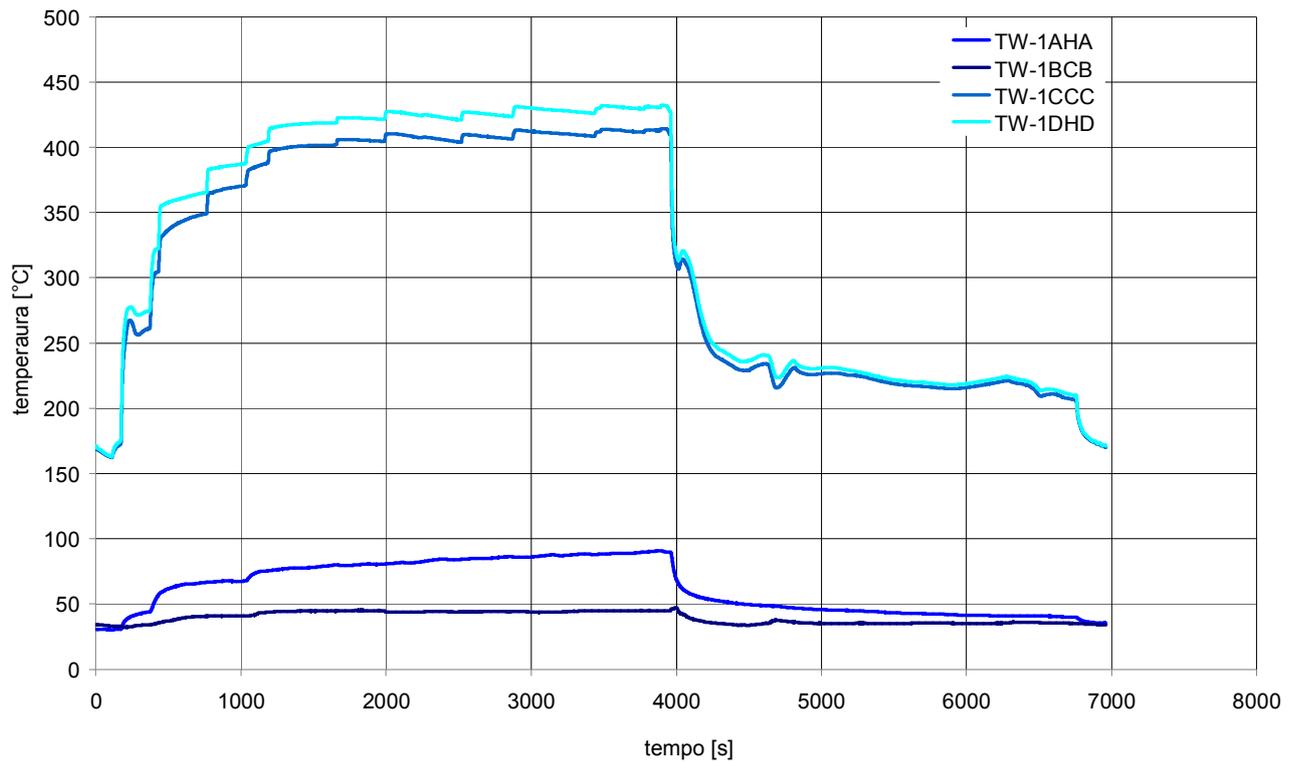
**Fig. 8.90 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°16**



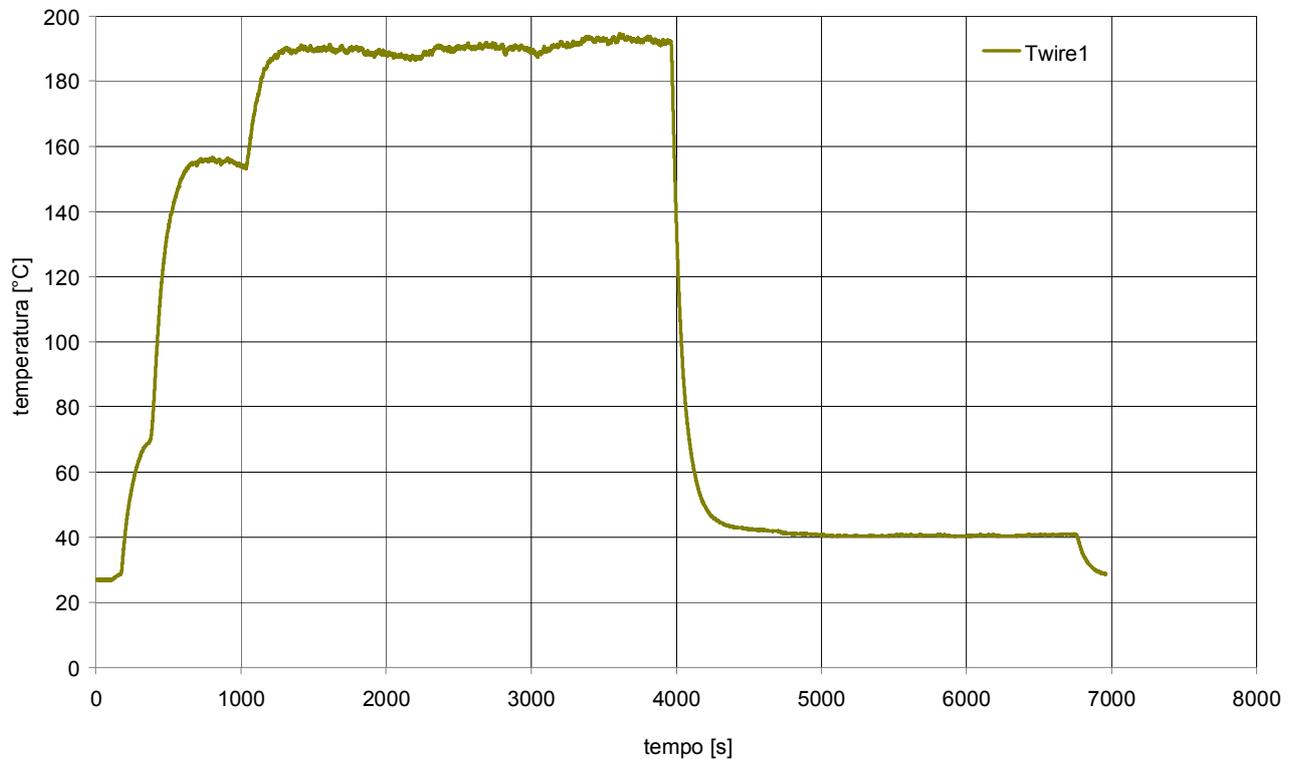
**Fig. 8.91 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°16**



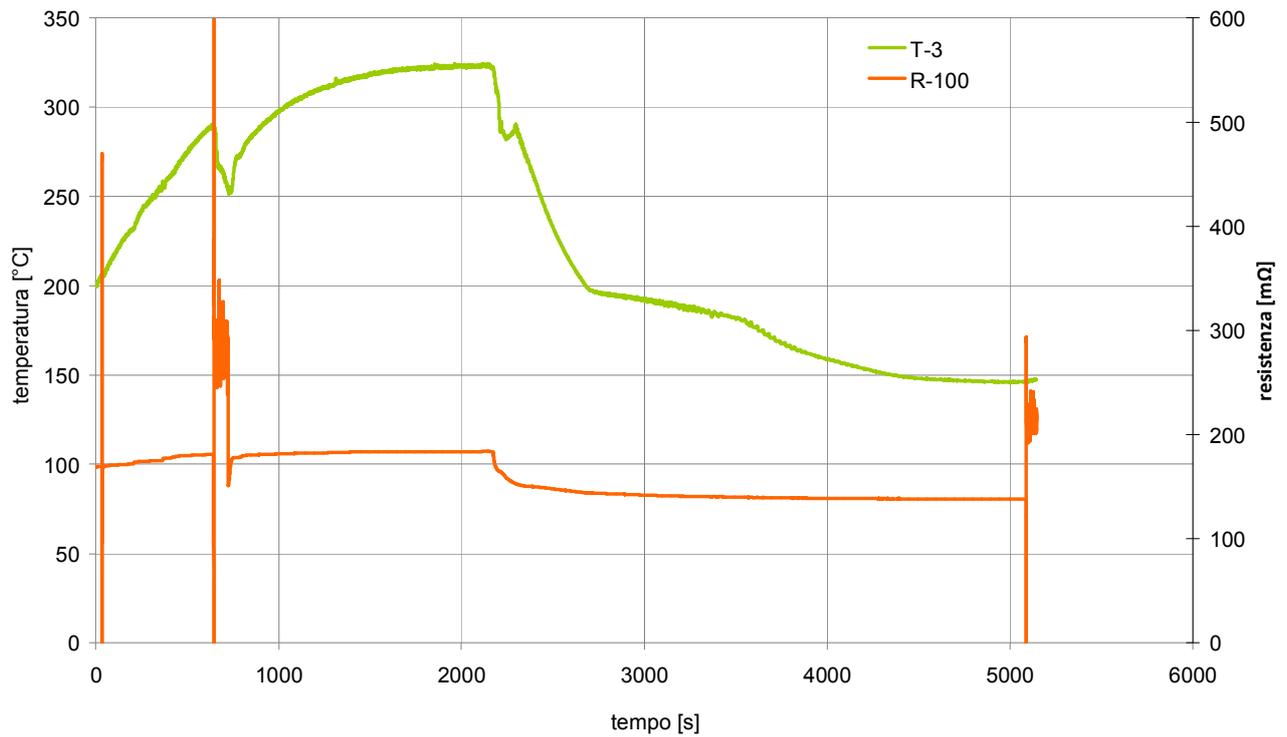
**Fig. 8.92 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°16**



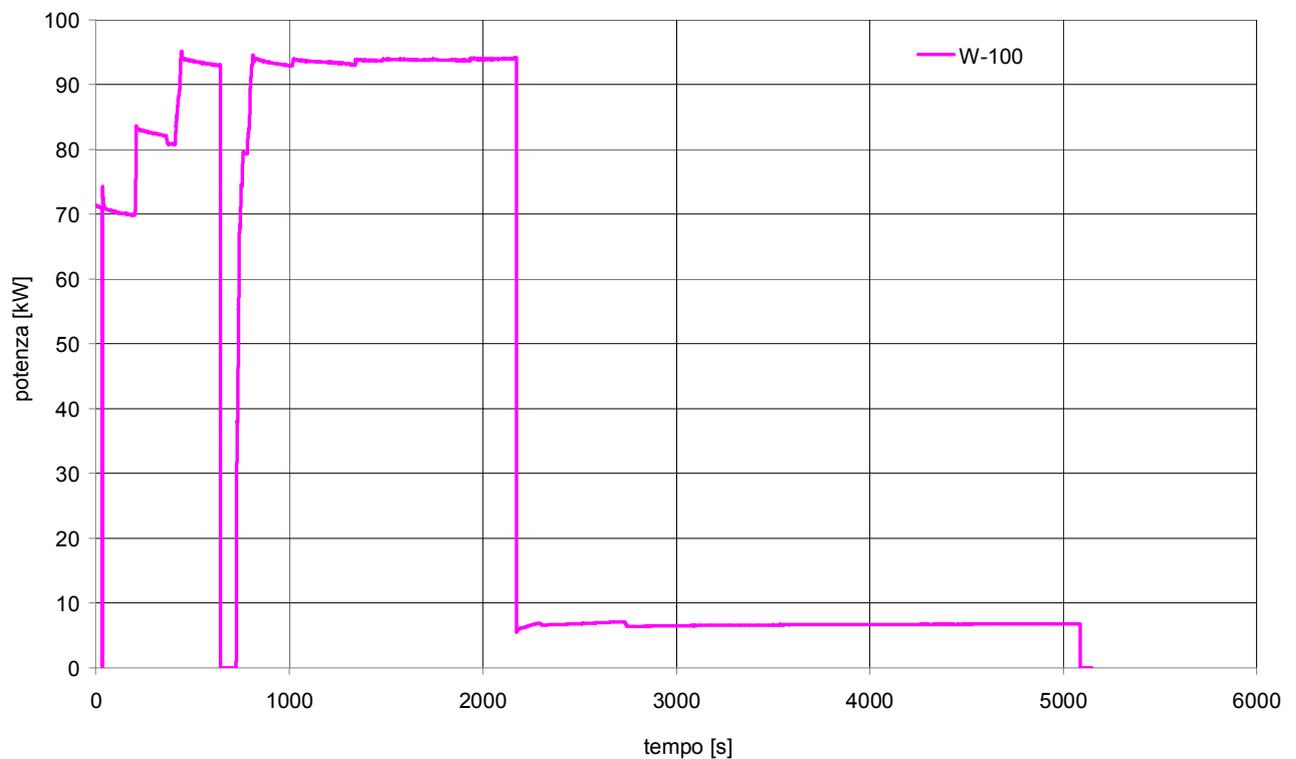
**Fig. 8. 93 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°16**



**Fig. 8. 94 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°16**



**Fig. 8. 95 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°17**



**Fig. 8. 96 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°17**

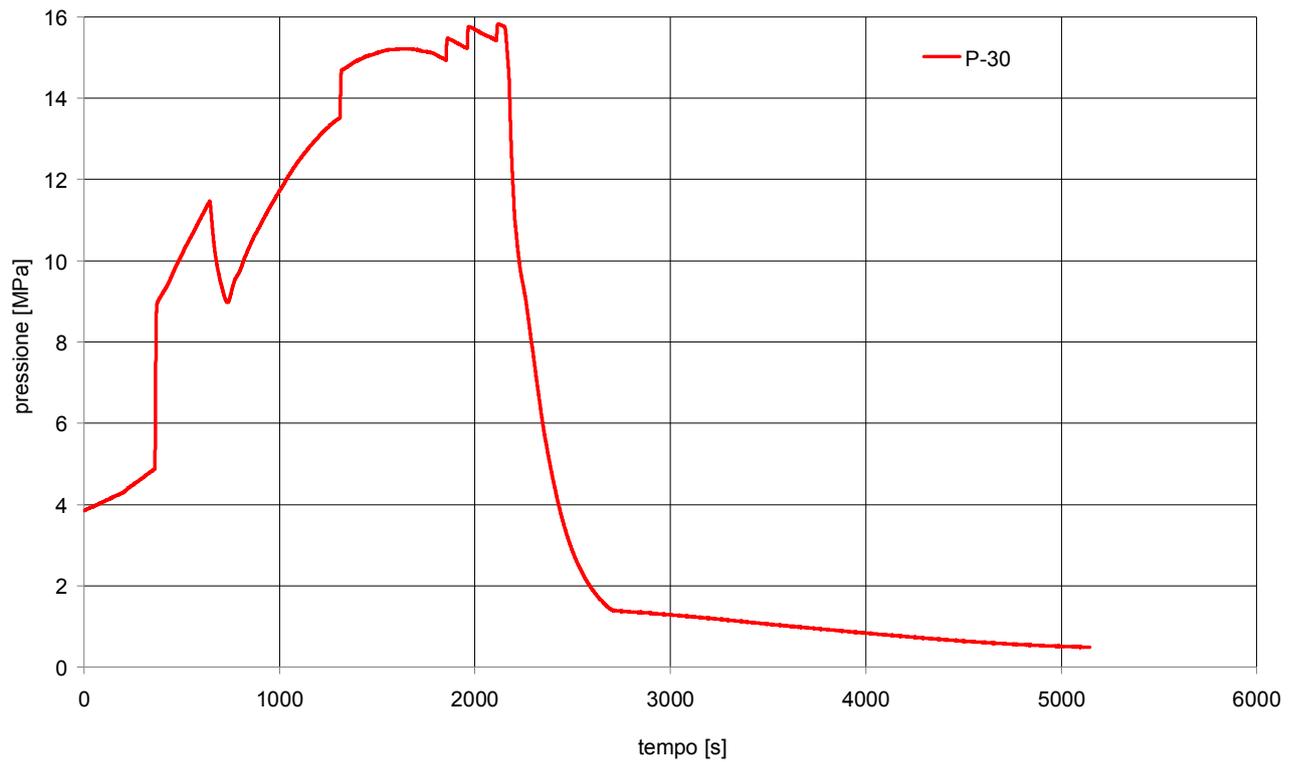


Fig. 8. 97 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°17

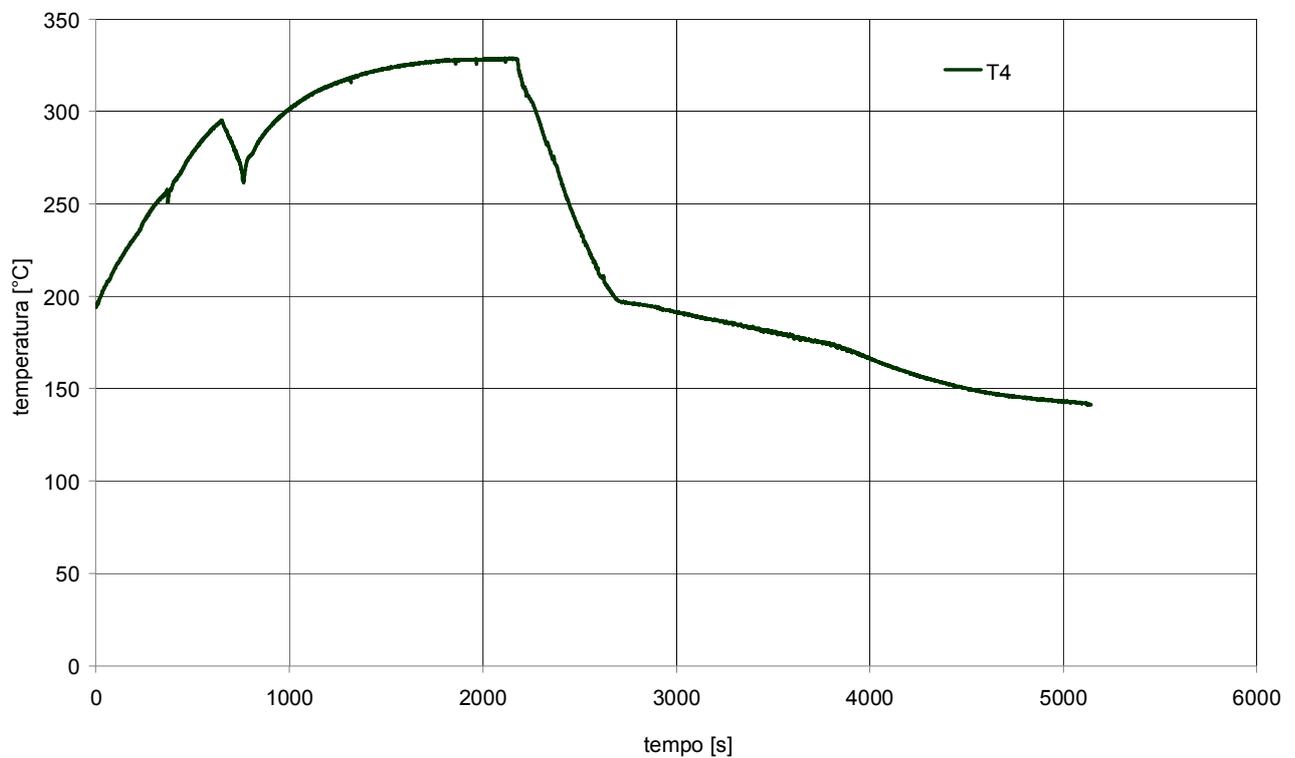
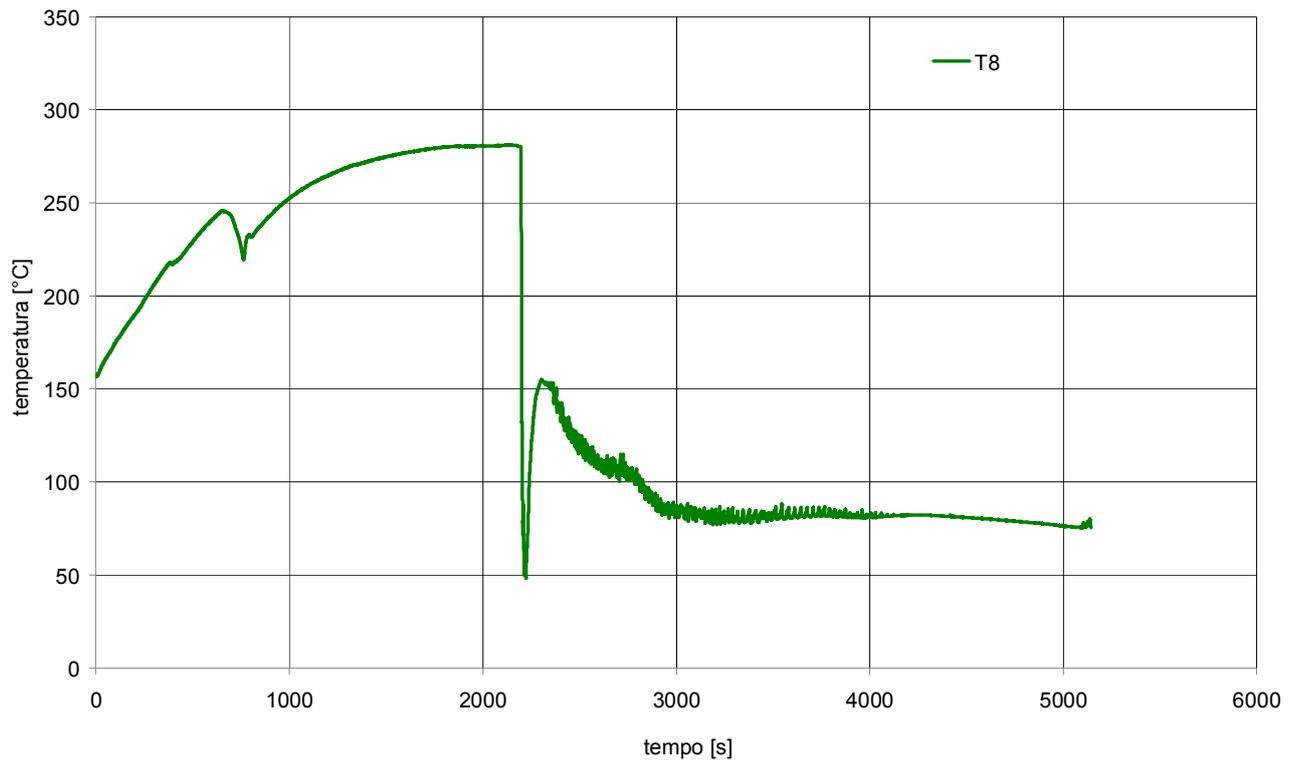
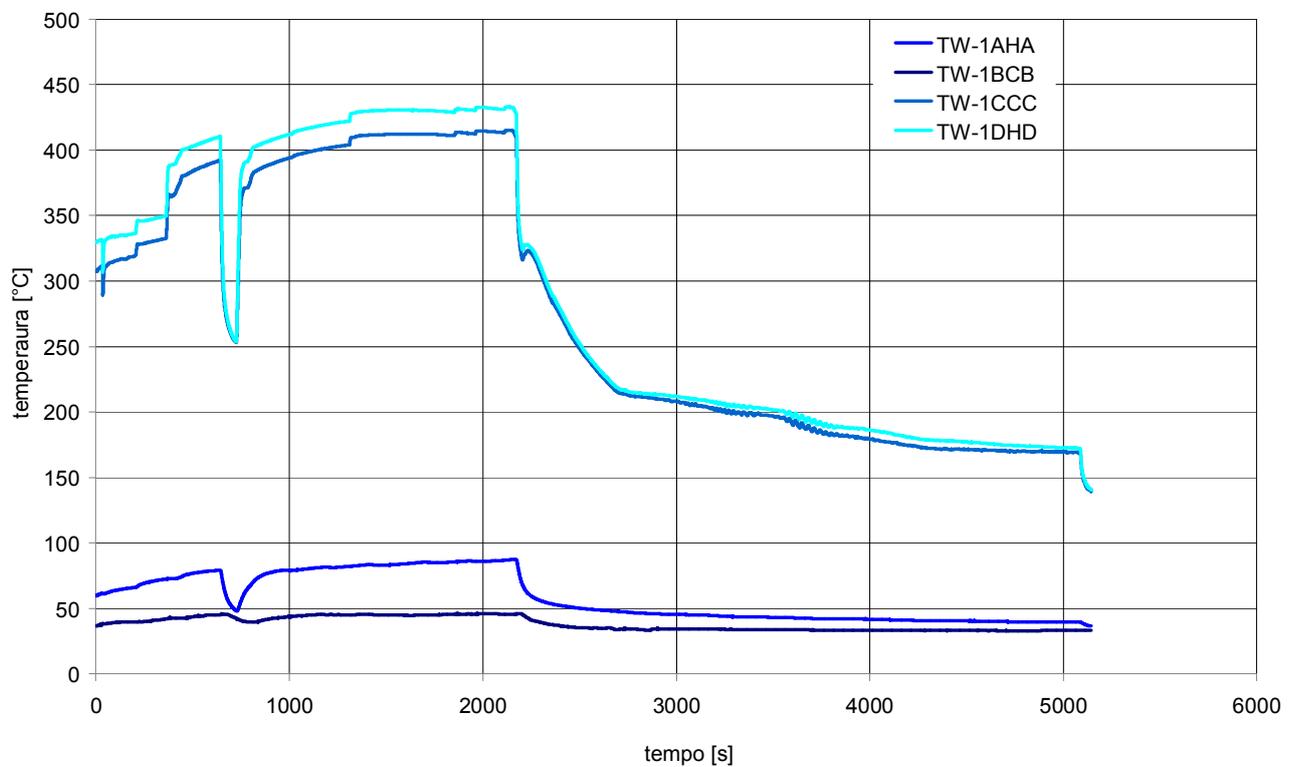


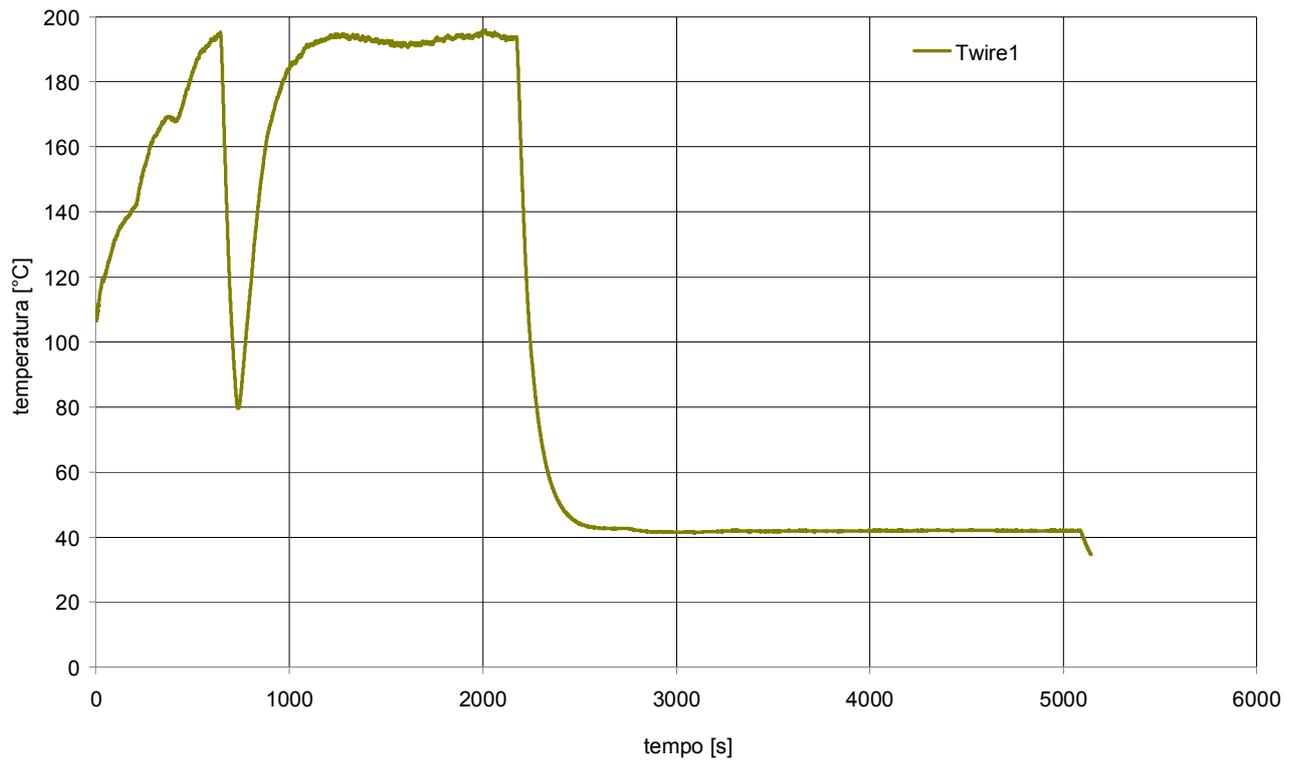
Fig. 8. 98 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°17



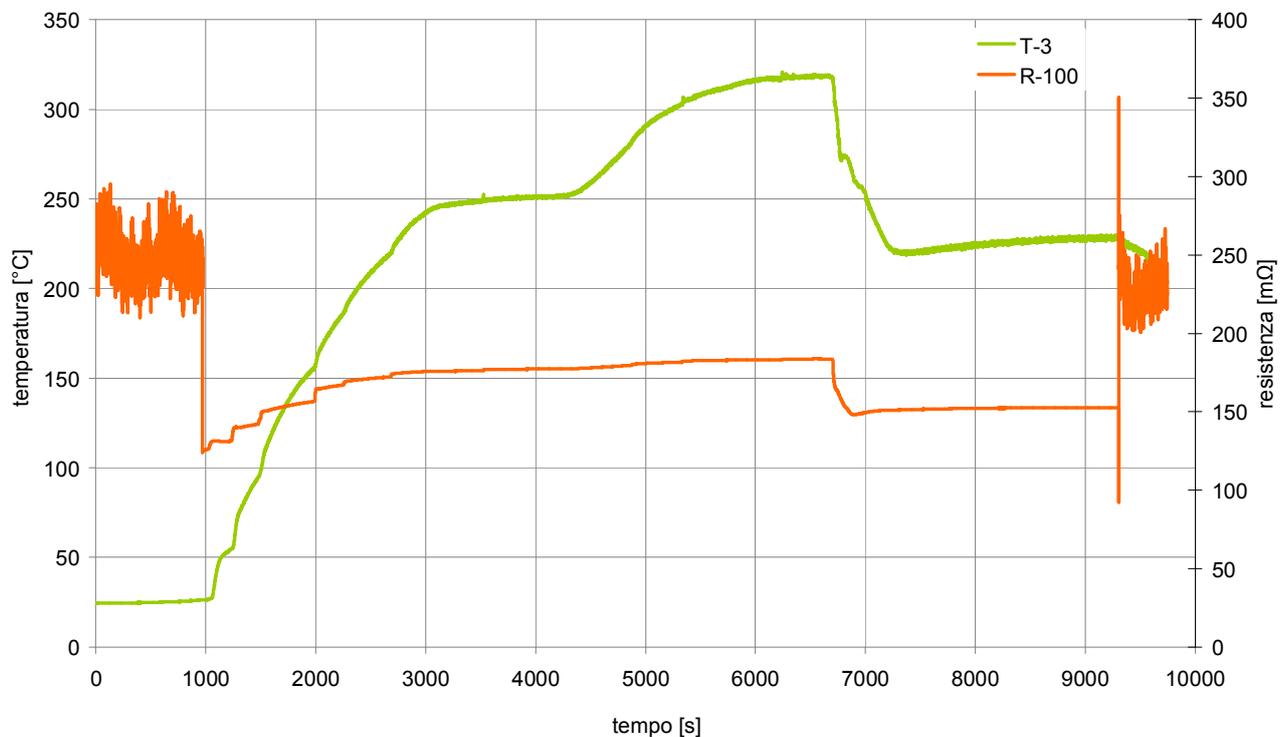
**Fig. 8. 99 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°17**



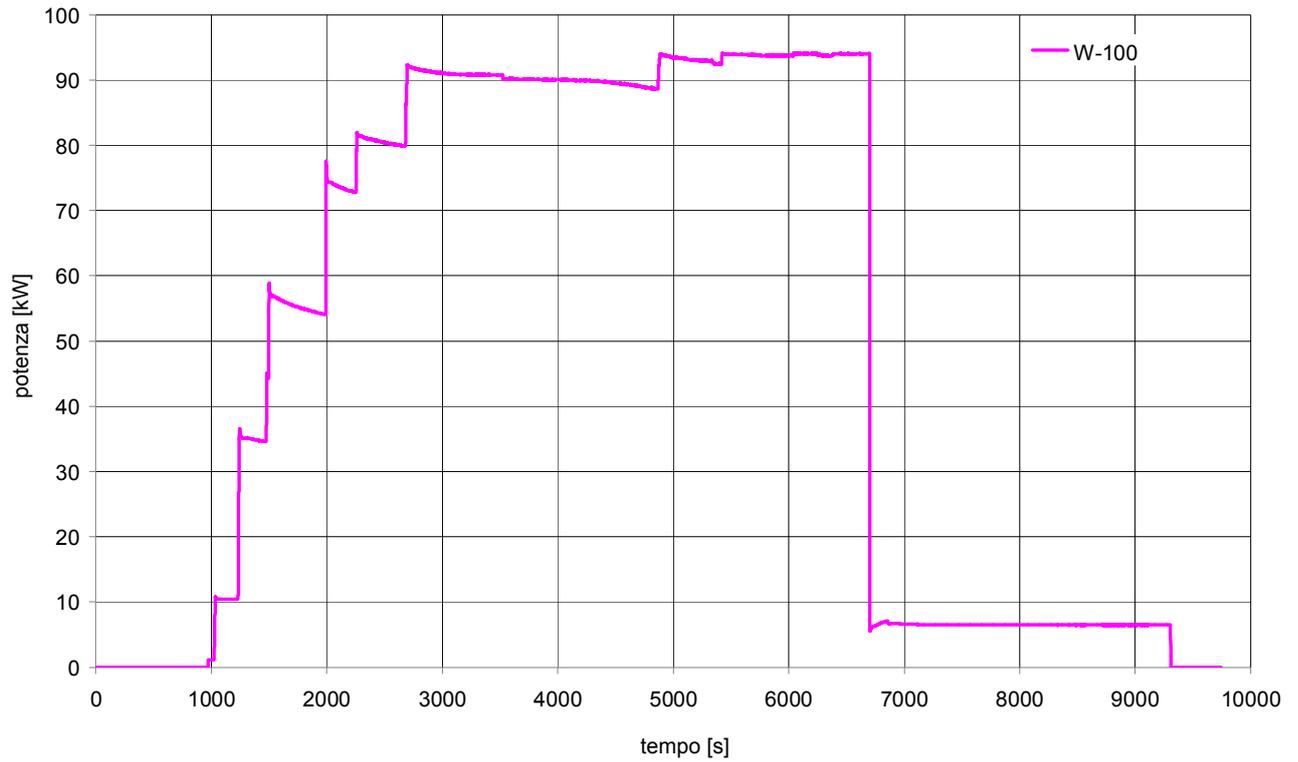
**Fig. 8. 100 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°17**



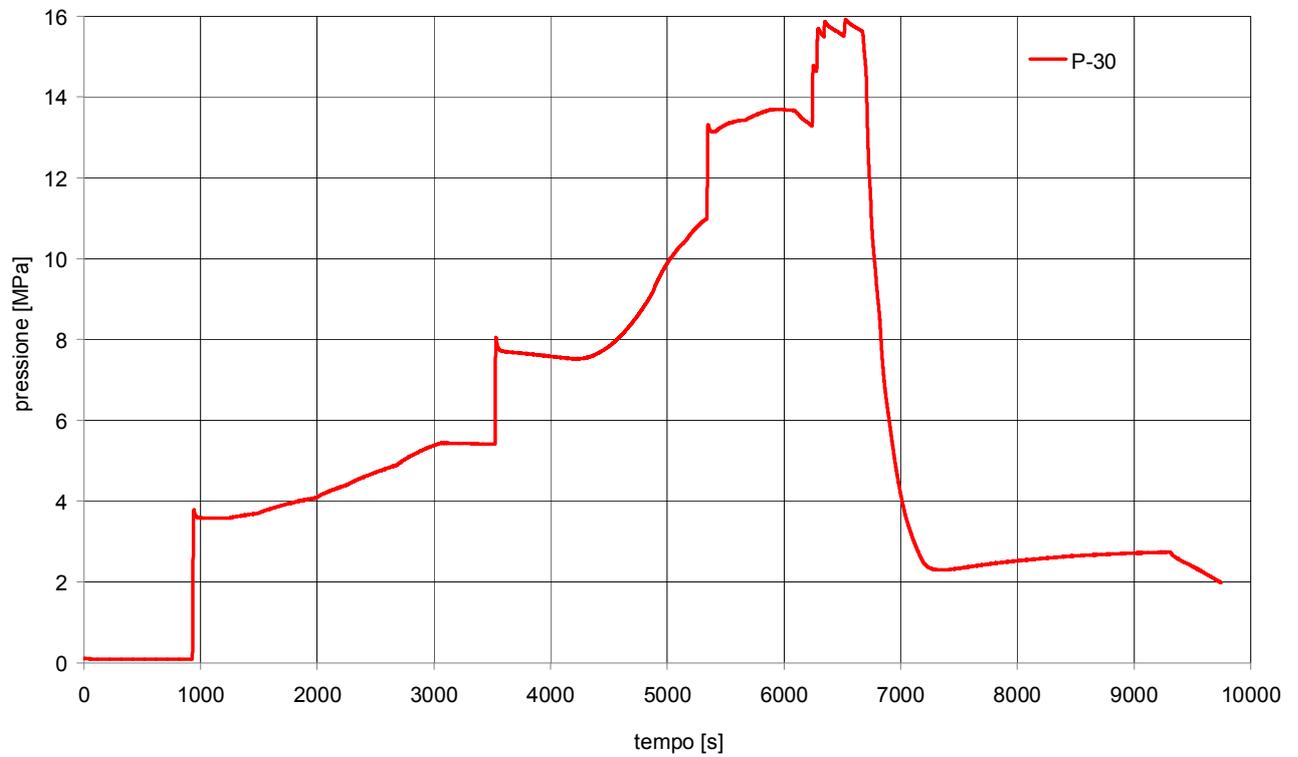
**Fig. 8. 101 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°17**



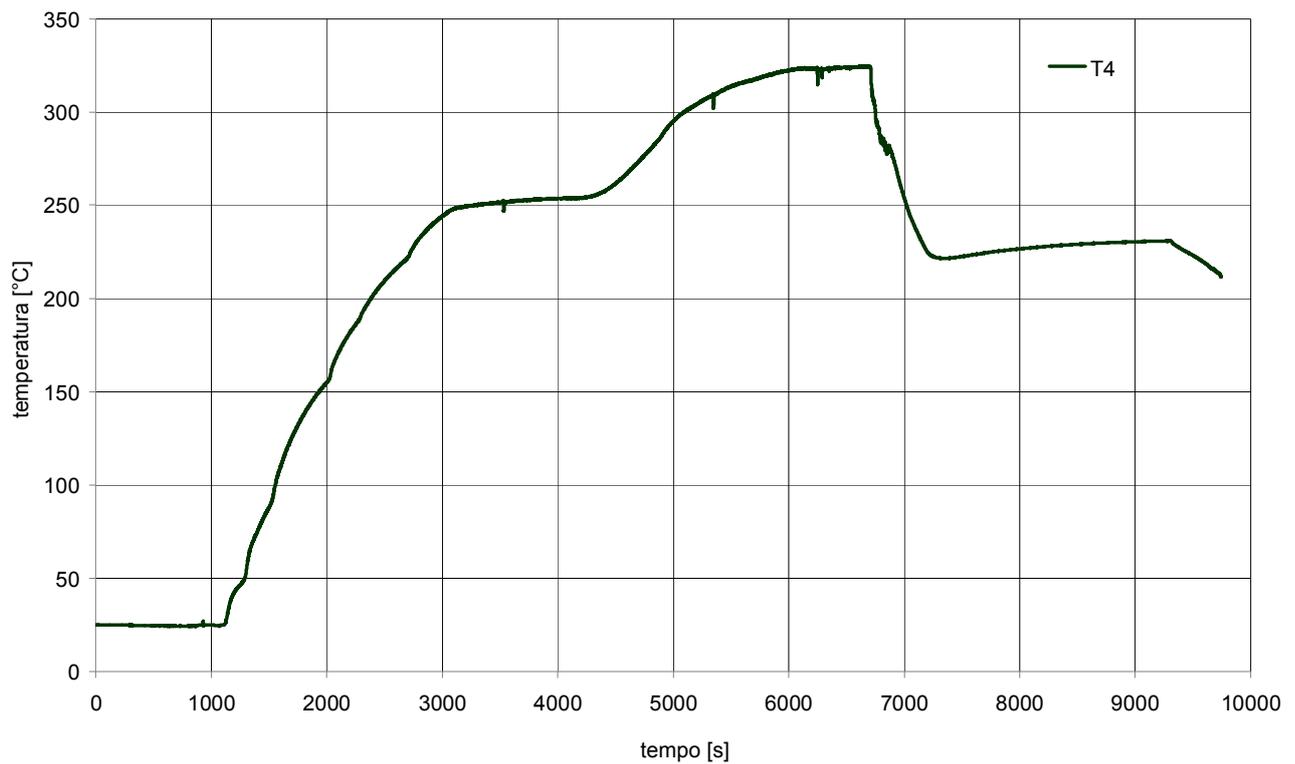
**Fig. 8. 102 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°18**



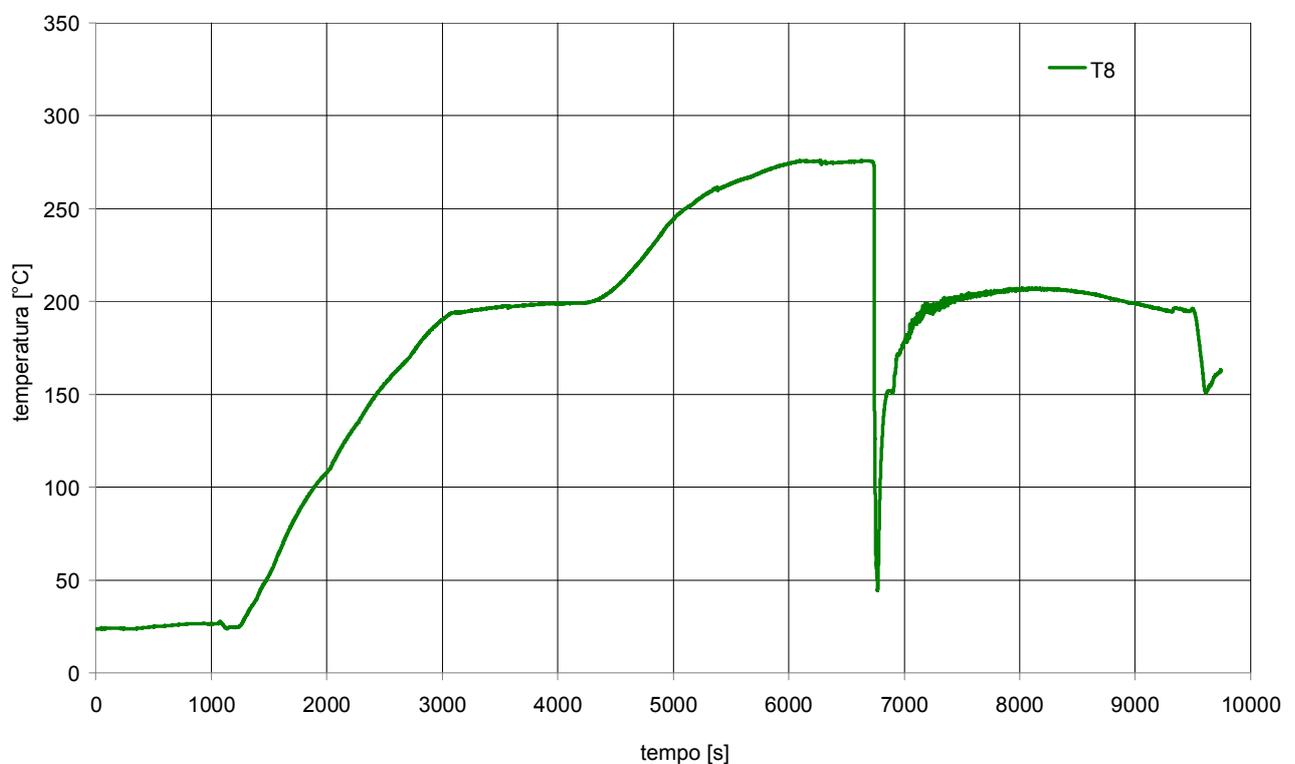
**Fig. 8. 103 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°18**



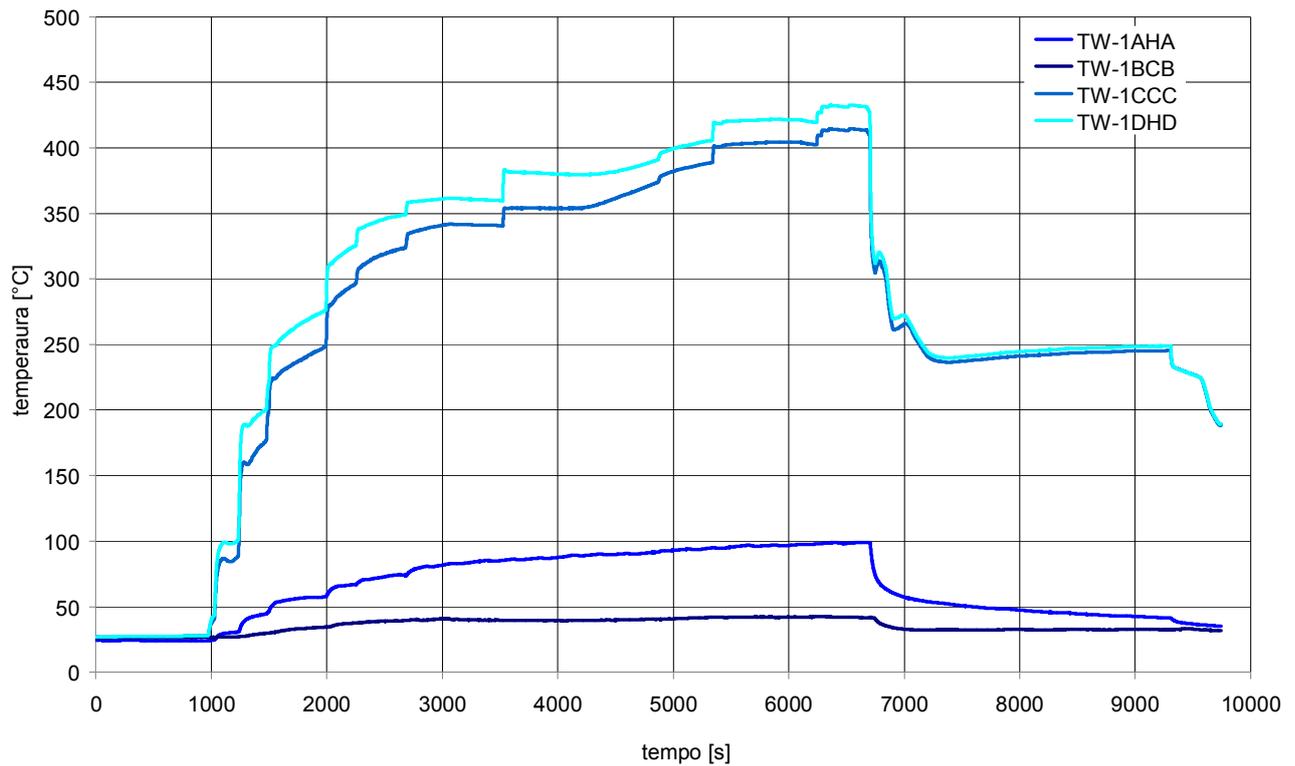
**Fig. 8. 104 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°18**



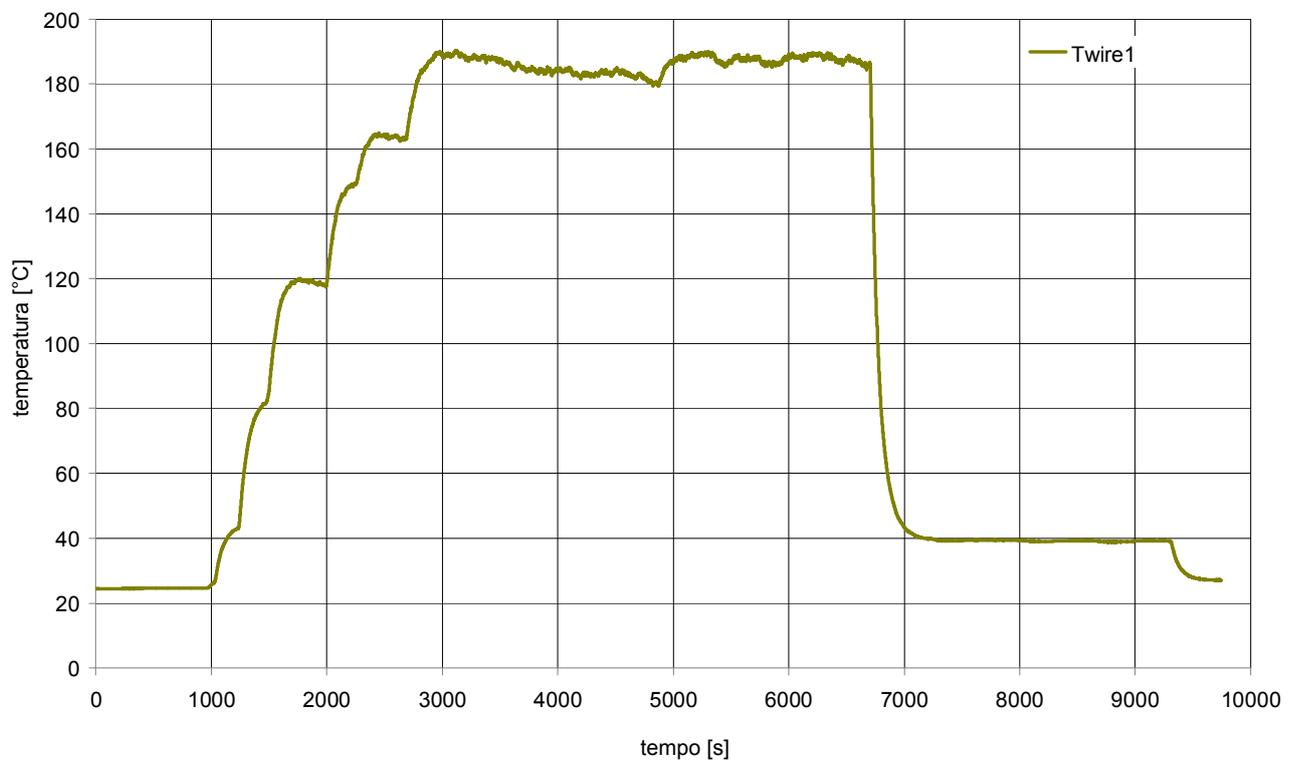
**Fig. 8. 105 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°18**



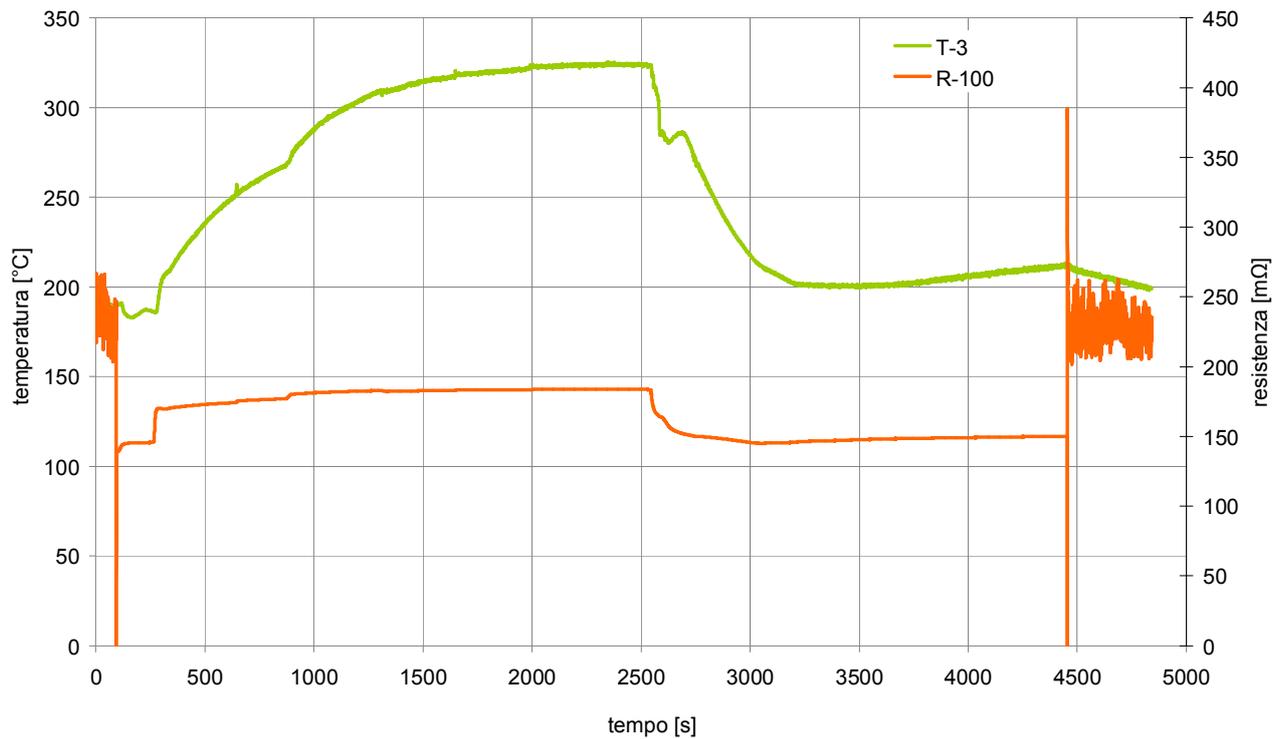
**Fig. 8. 106 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°18**



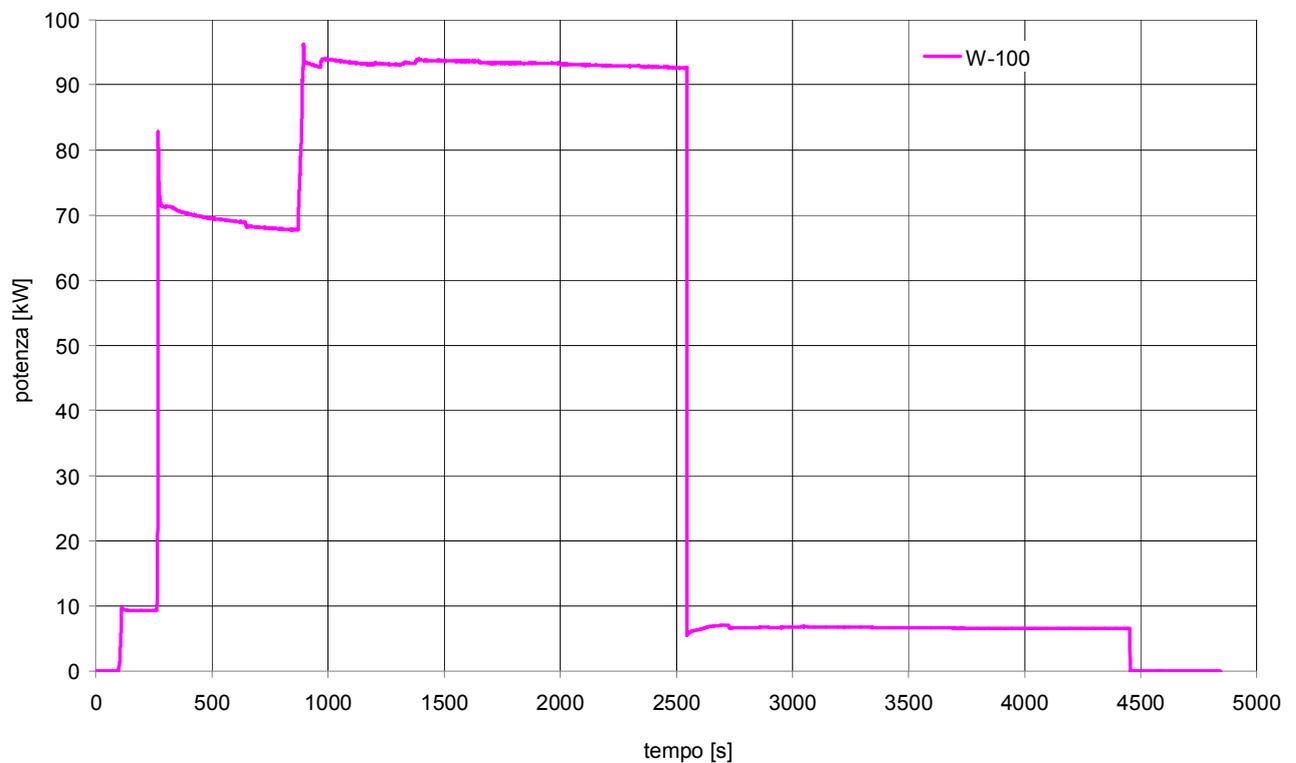
**Fig. 8. 107 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°18**



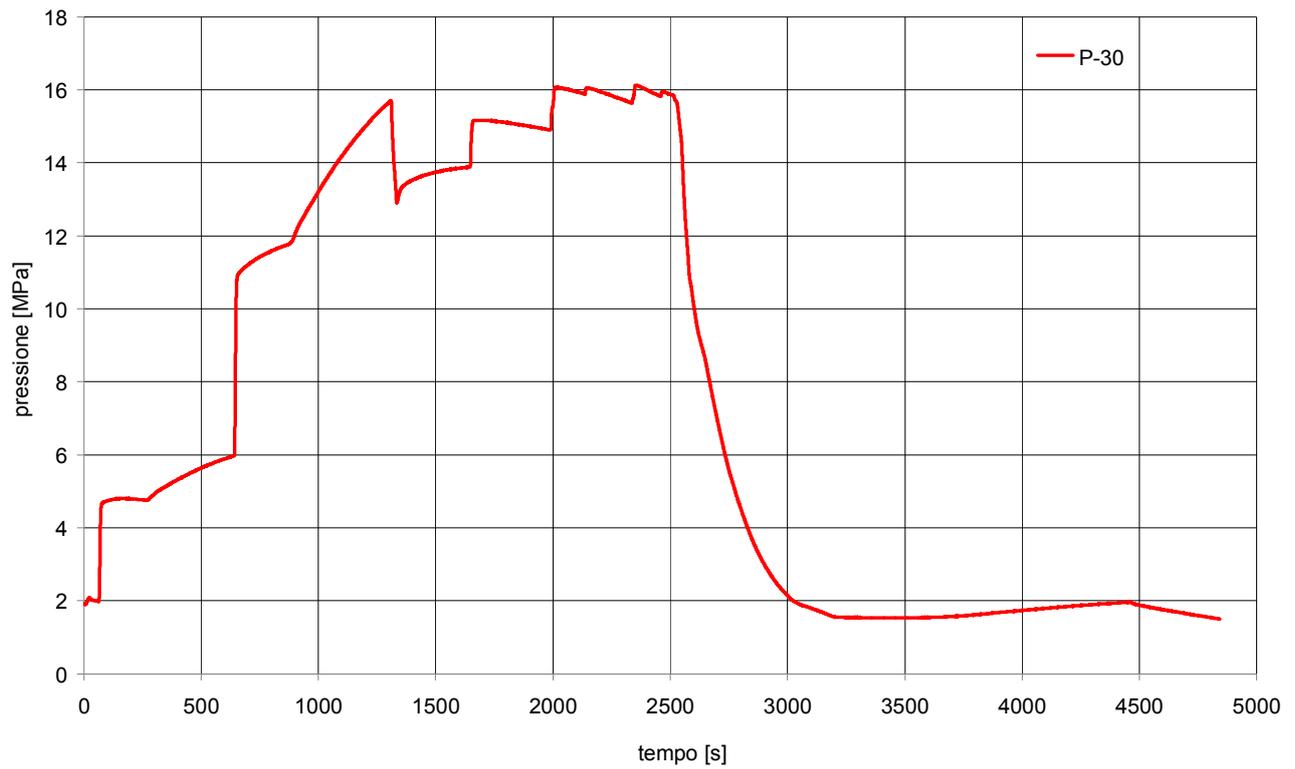
**Fig. 8. 108 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°18**



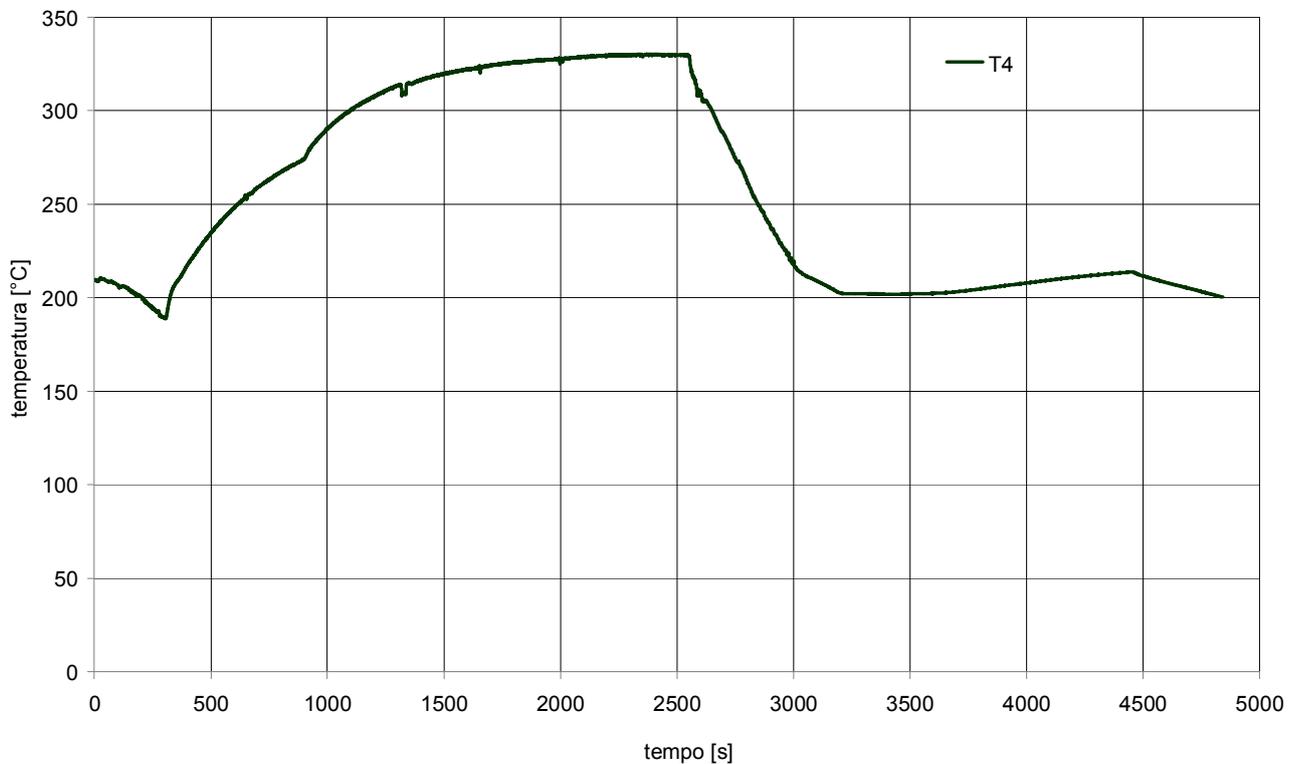
**Fig. 8. 109 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°19**



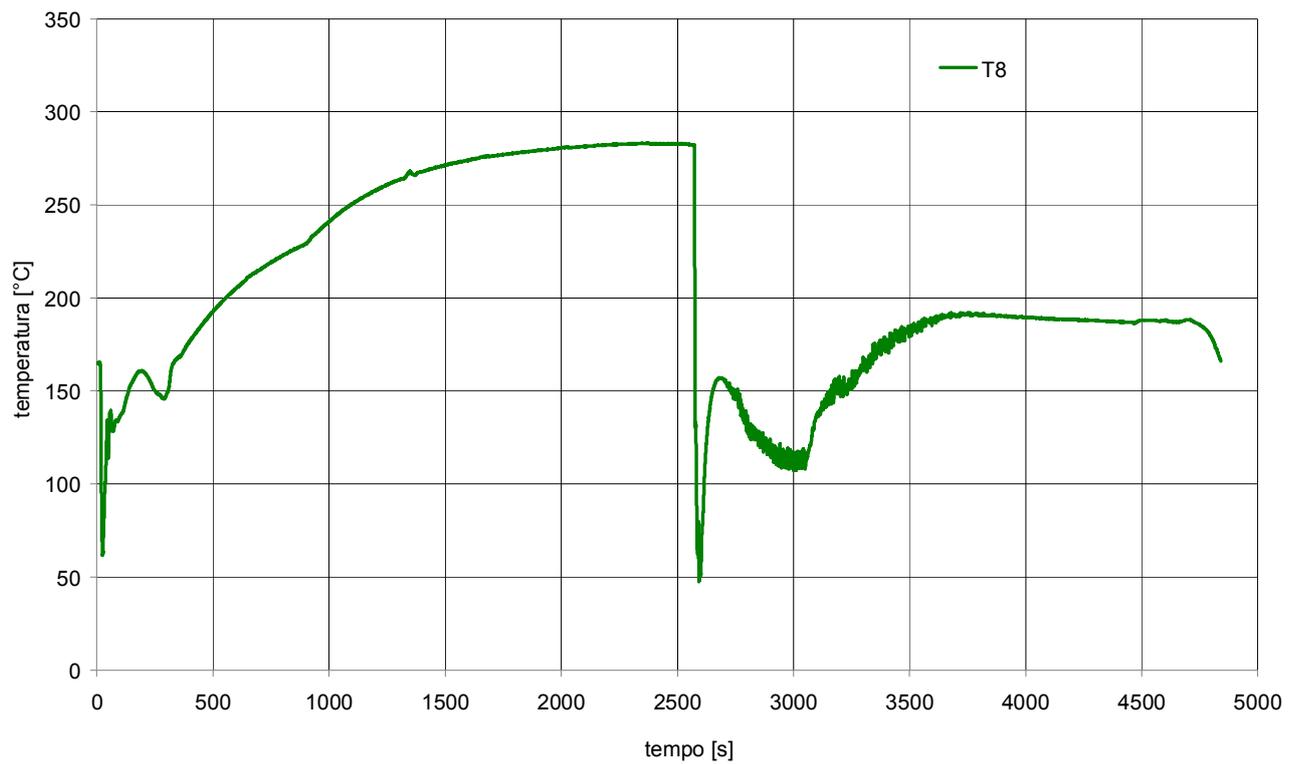
**Fig. 8. 110 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°19**



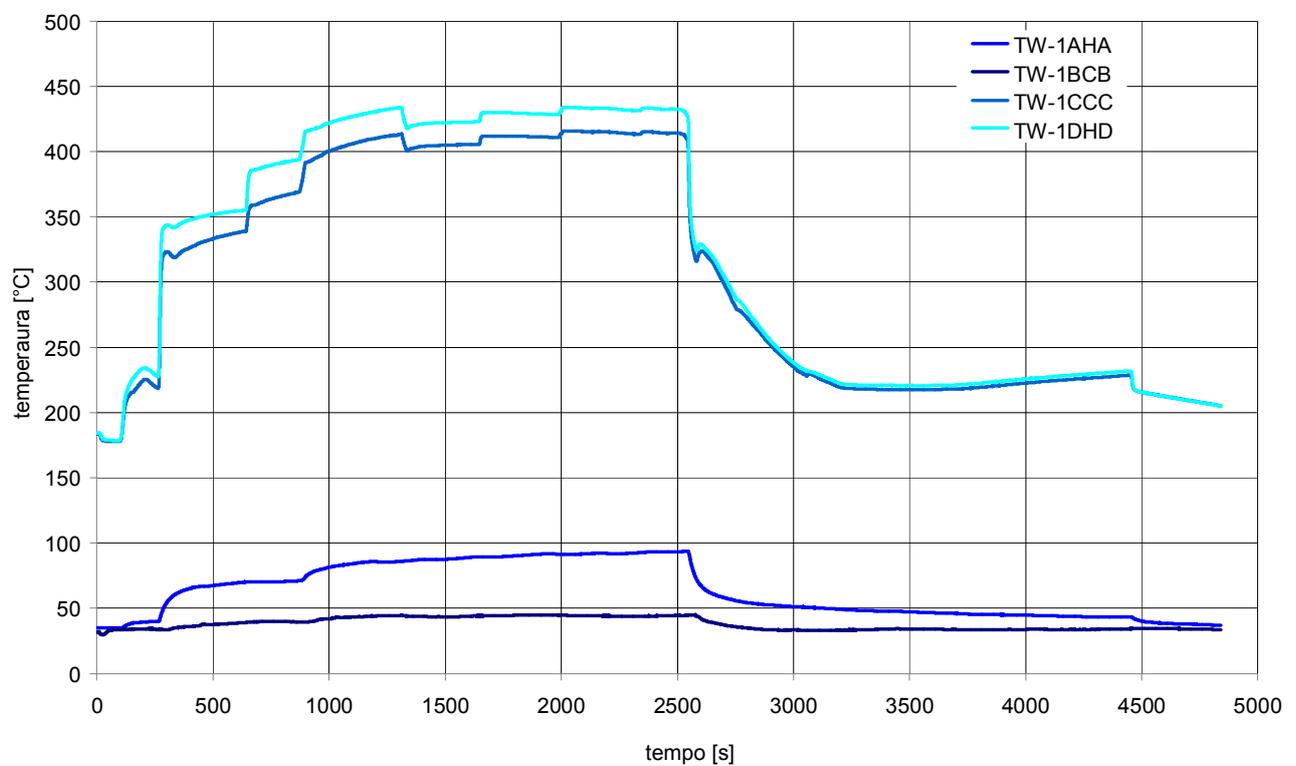
**Fig. 8.111 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°19**



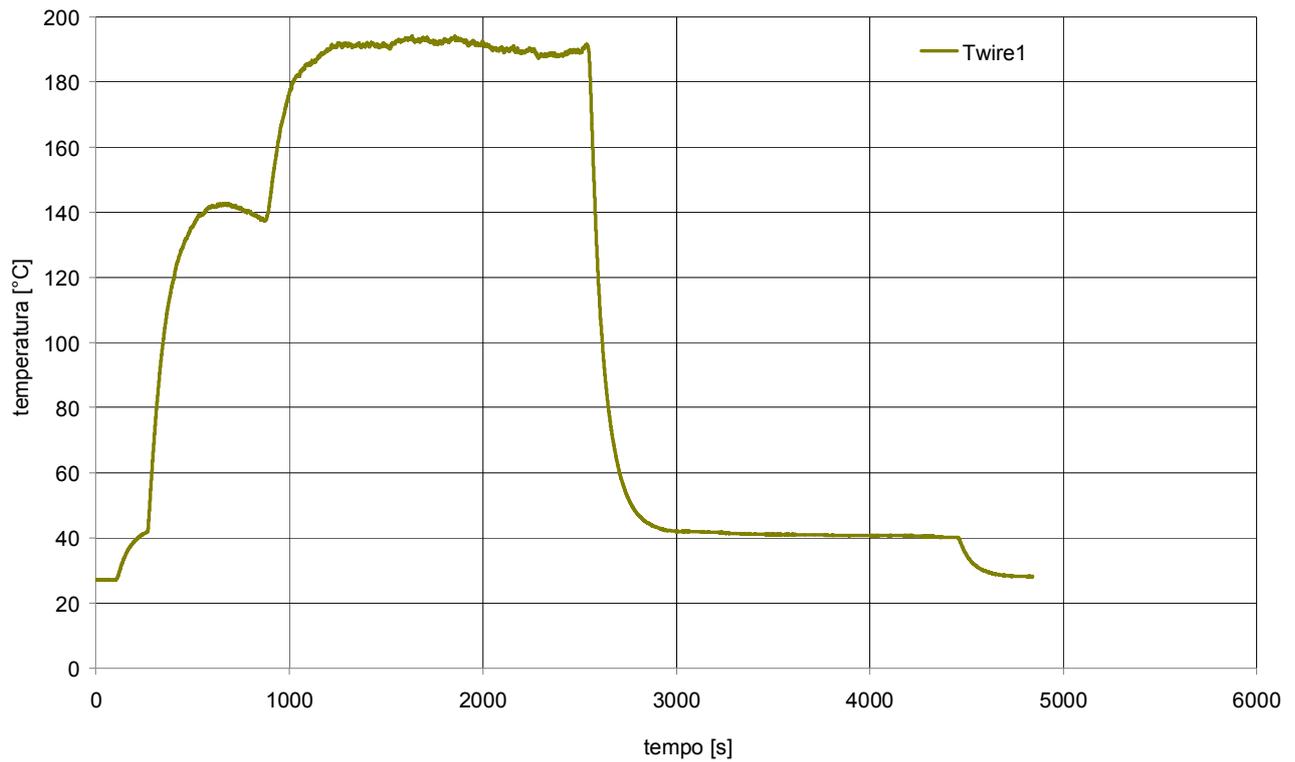
**Fig. 8.112 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°19**



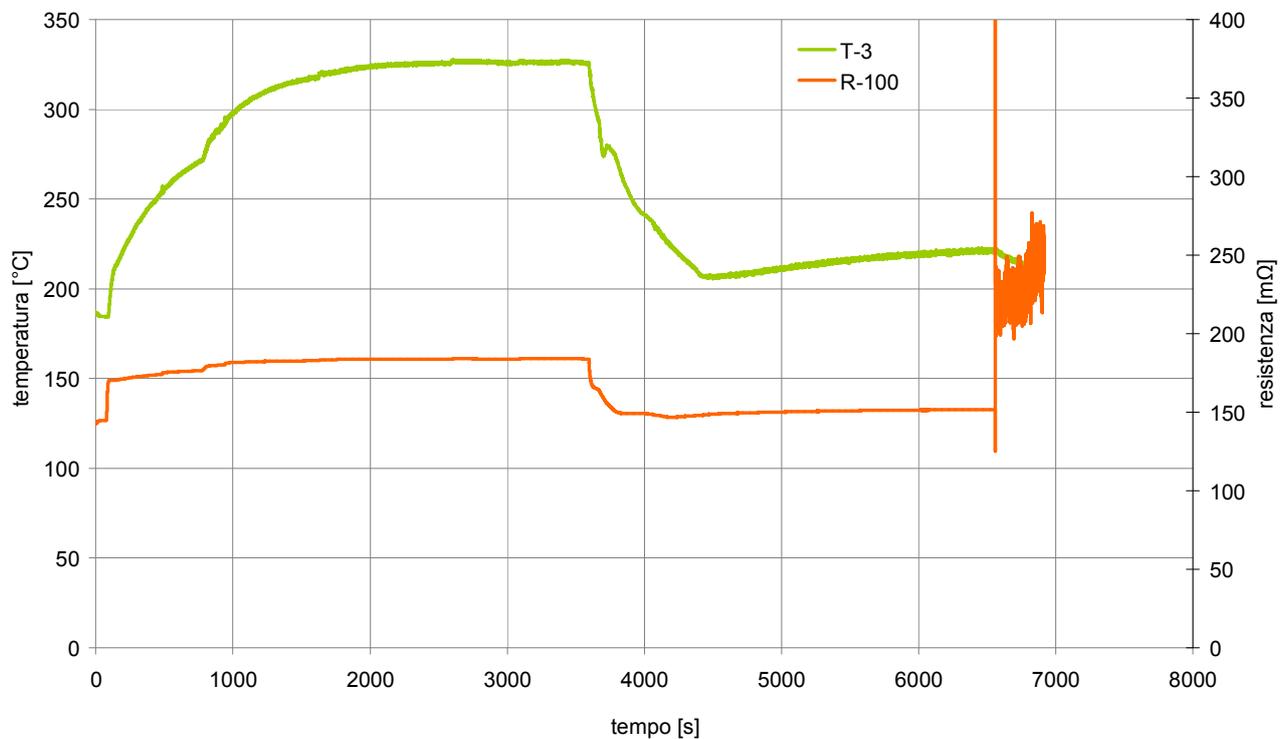
**Fig. 8. 113 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°19**



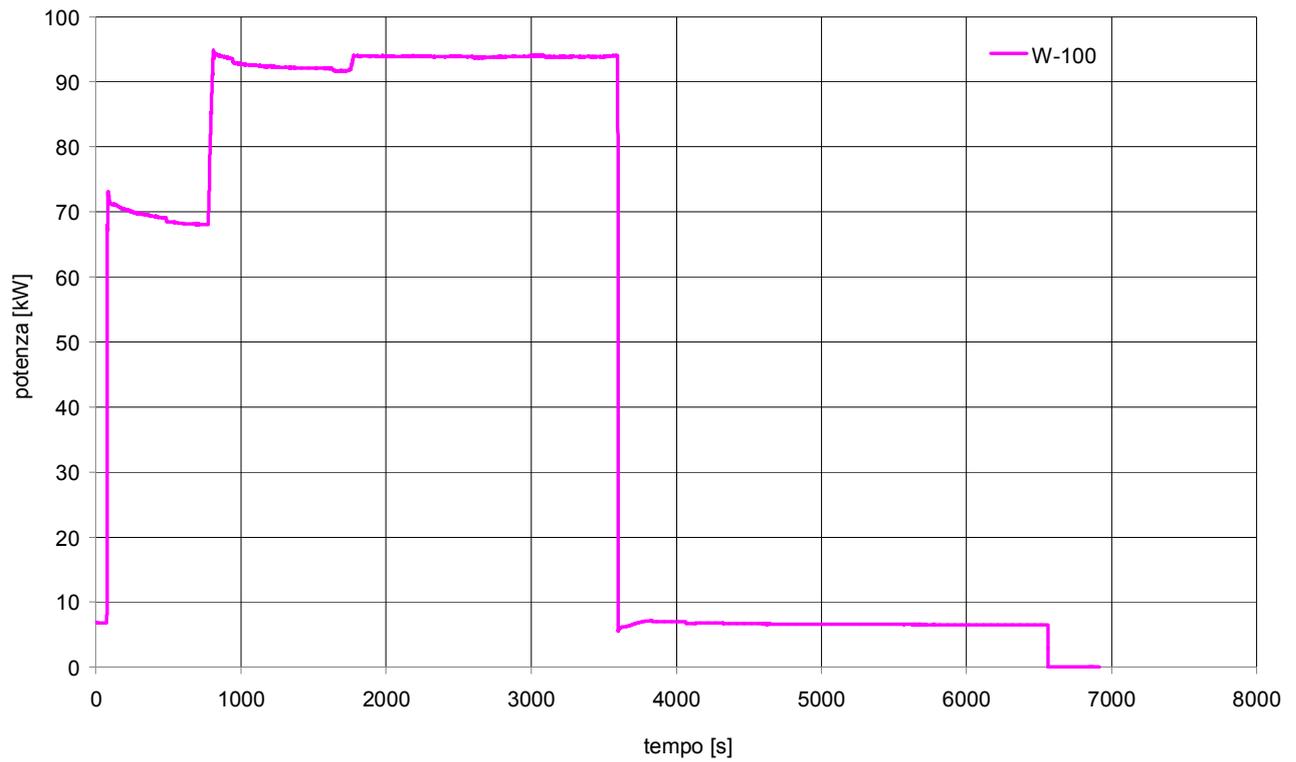
**Fig. 8. 114 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°19**



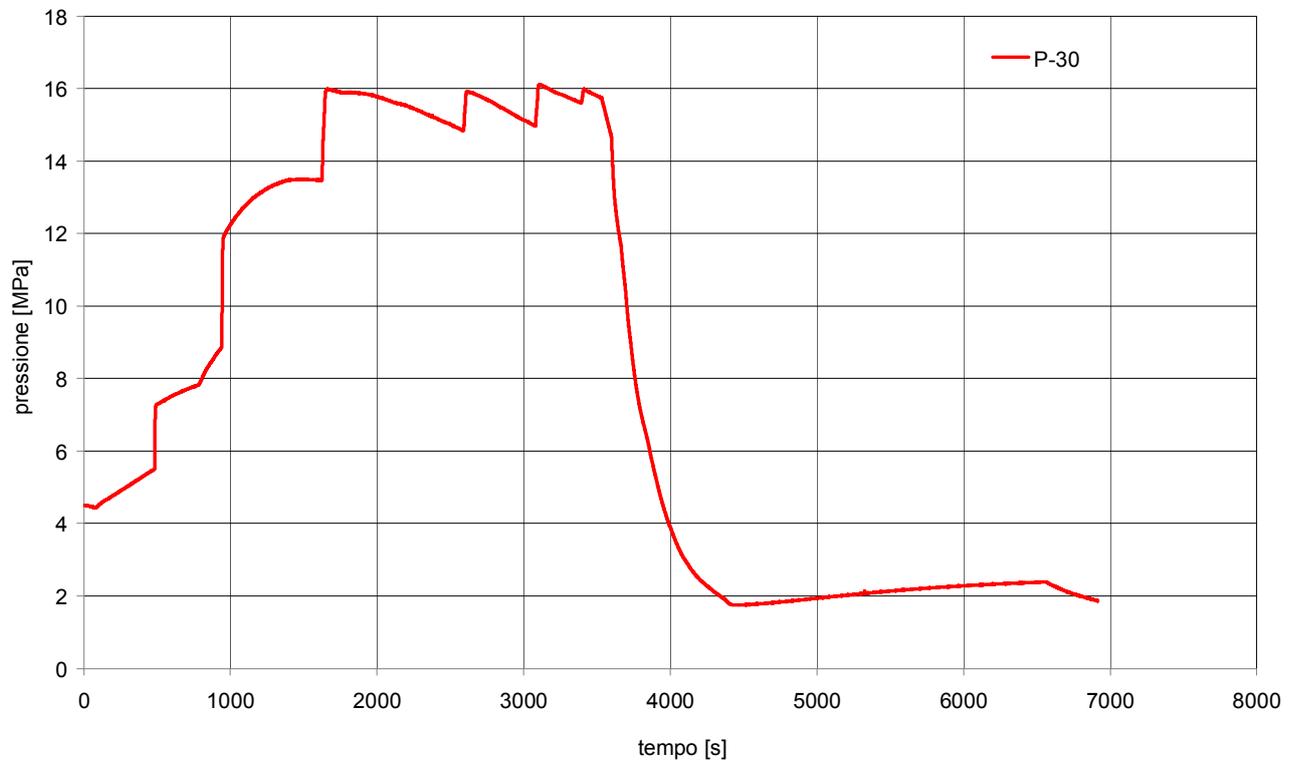
**Fig. 8. 115 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°19**



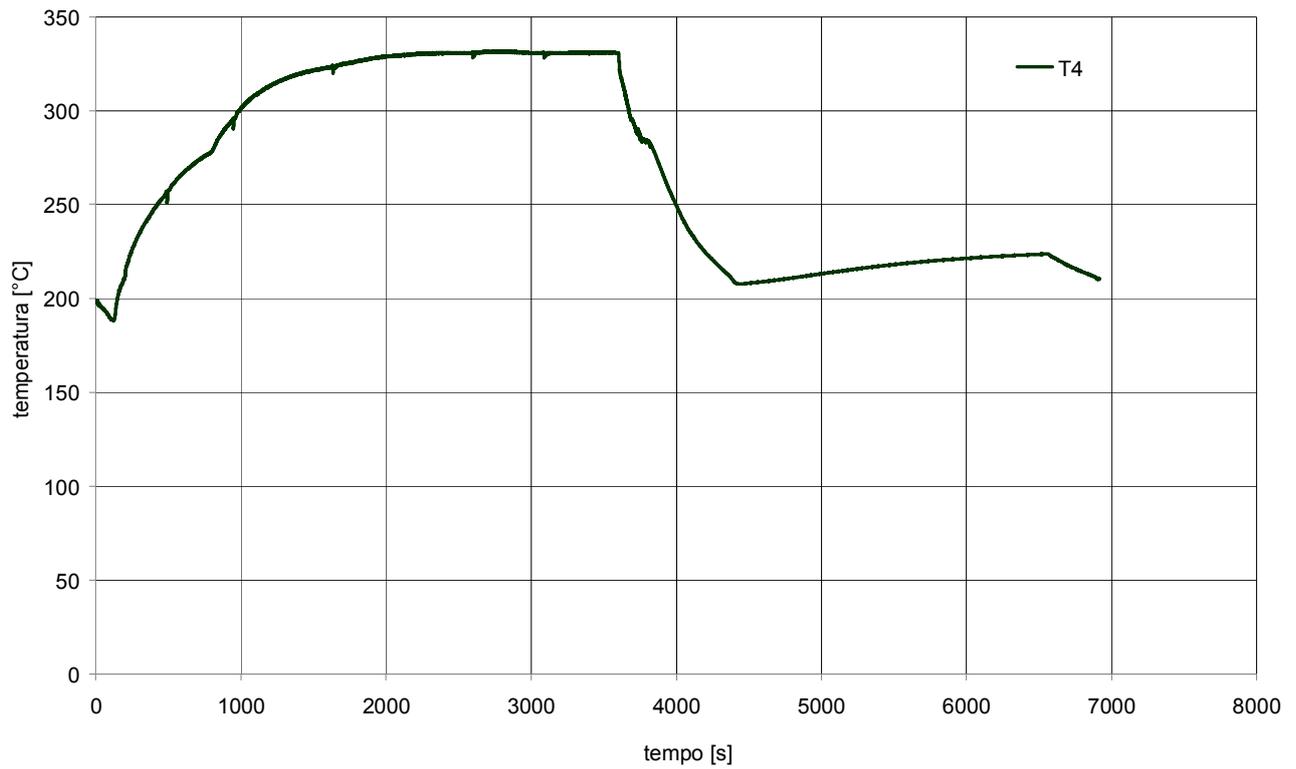
**Fig. 8. 116 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°20**



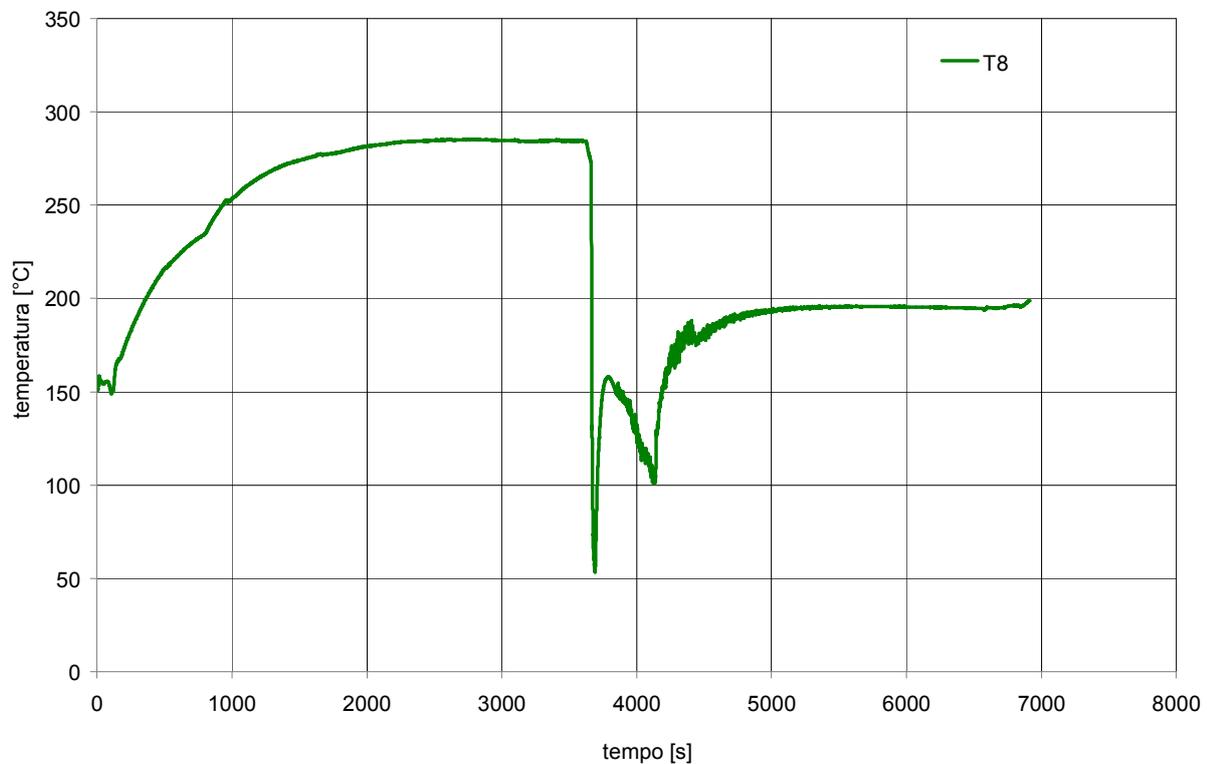
**Fig. 8. 117 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°20**



**Fig. 8. 118 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°20**



**Fig. 8. 119 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°20**



**Fig. 8. 120 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°20**

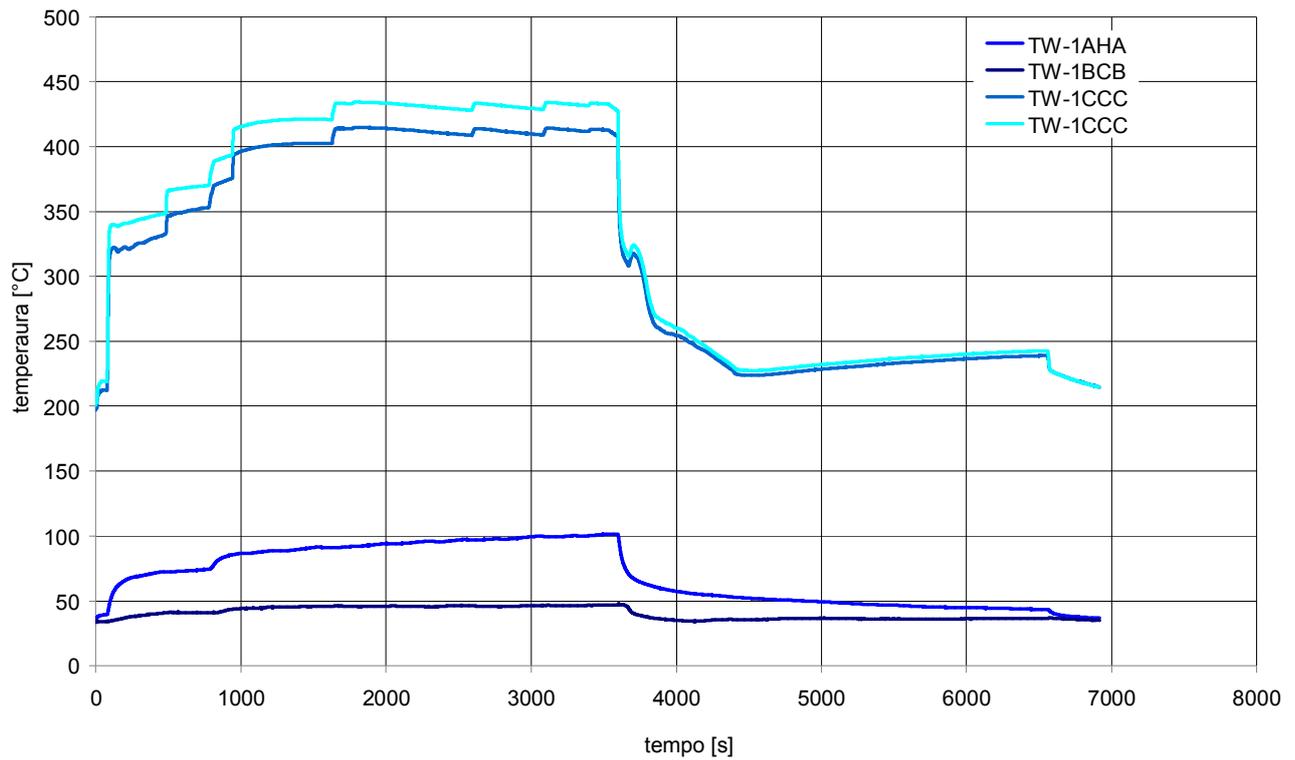


Fig. 8. 121 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°20

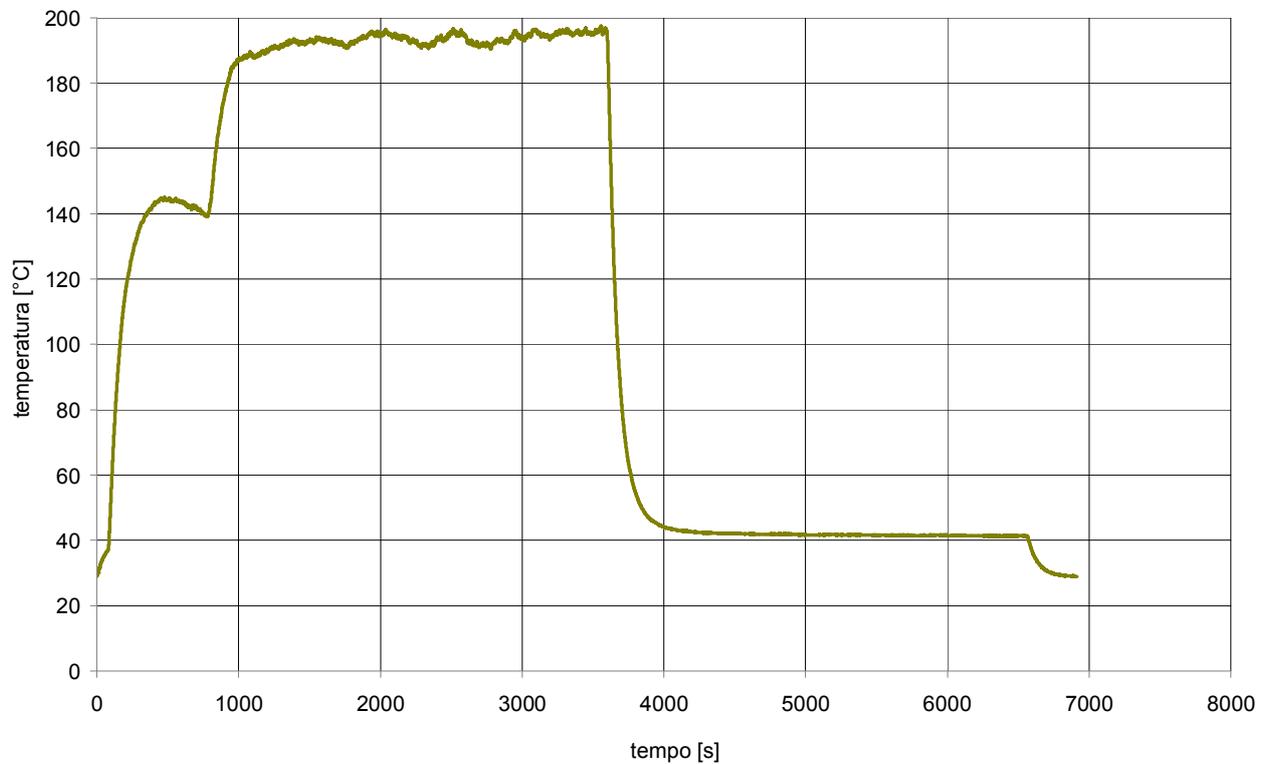
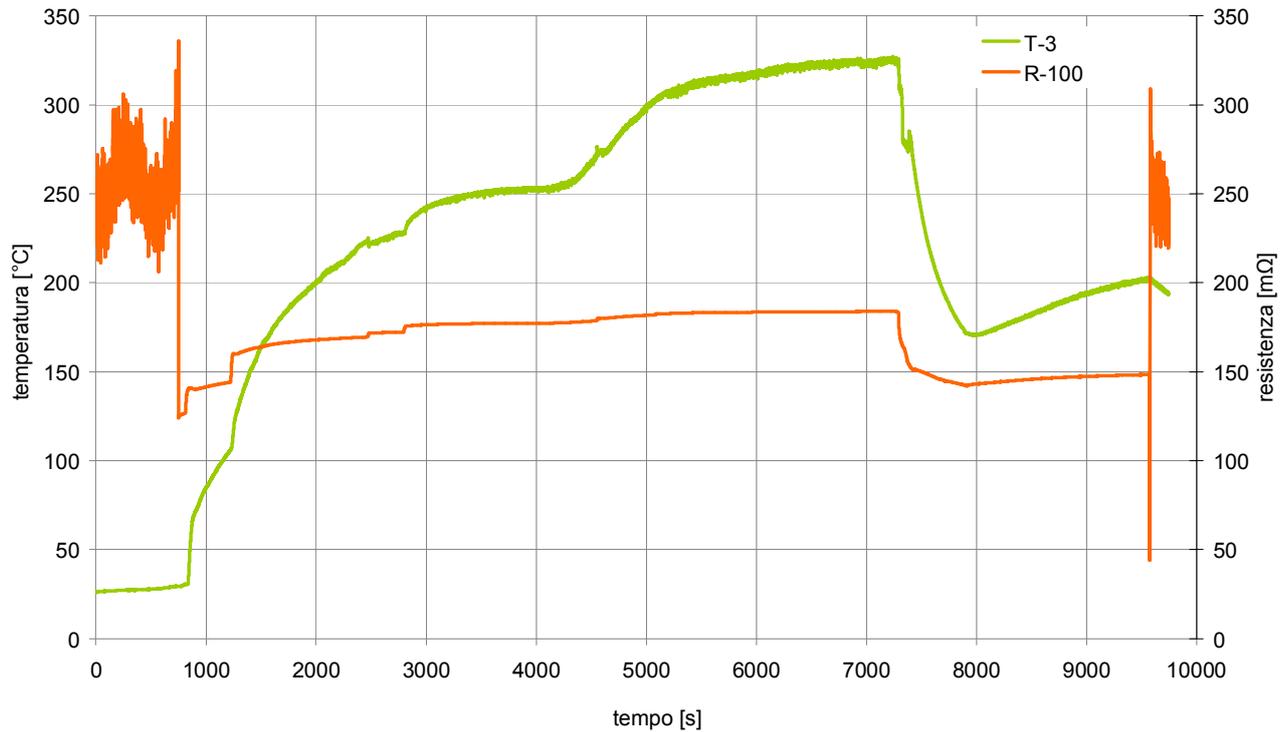
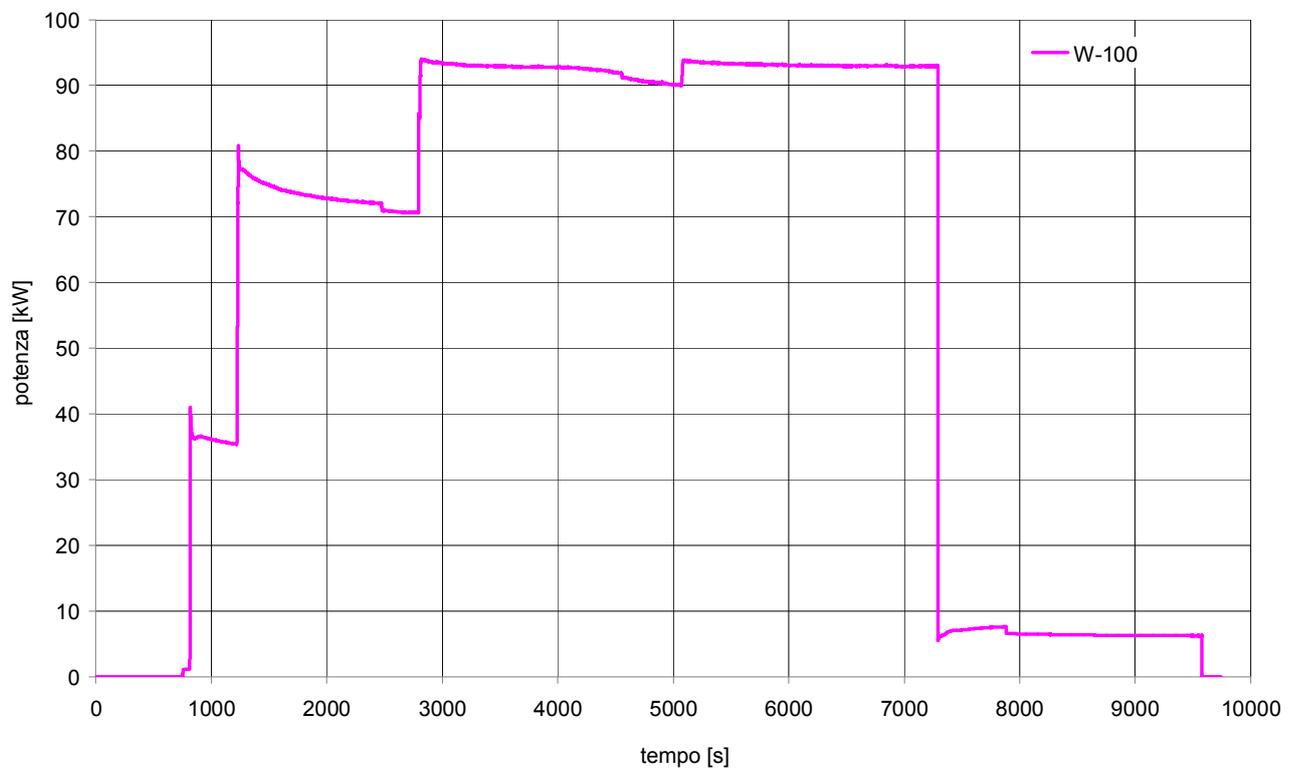


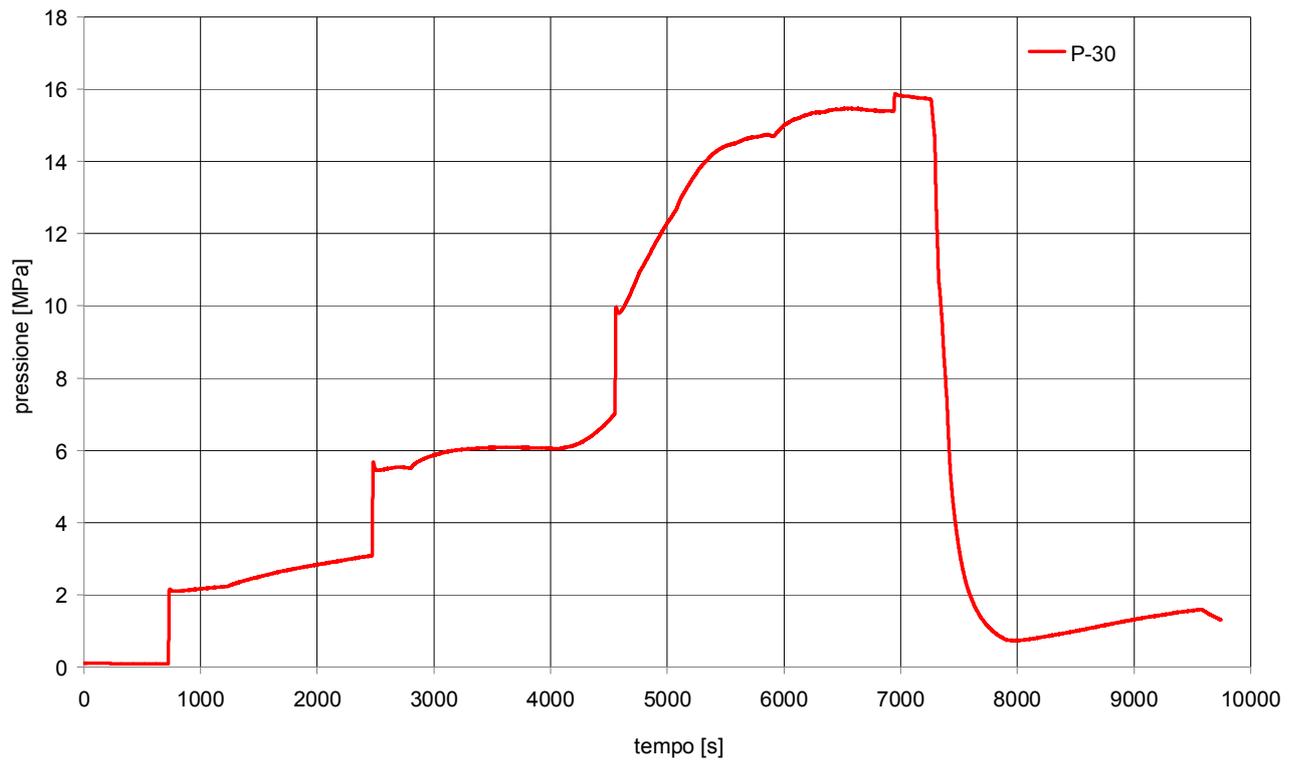
Fig. 8. 122 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°20



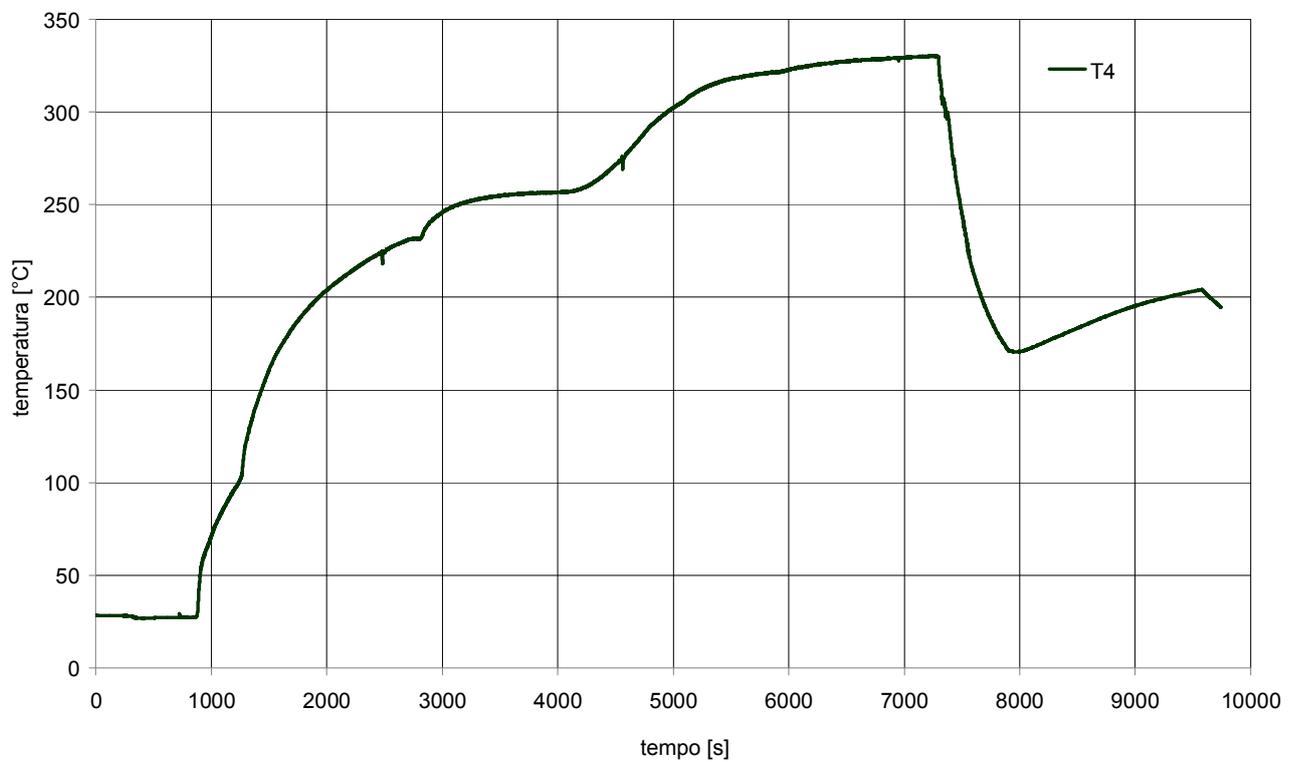
**Fig. 8. 123 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°21**



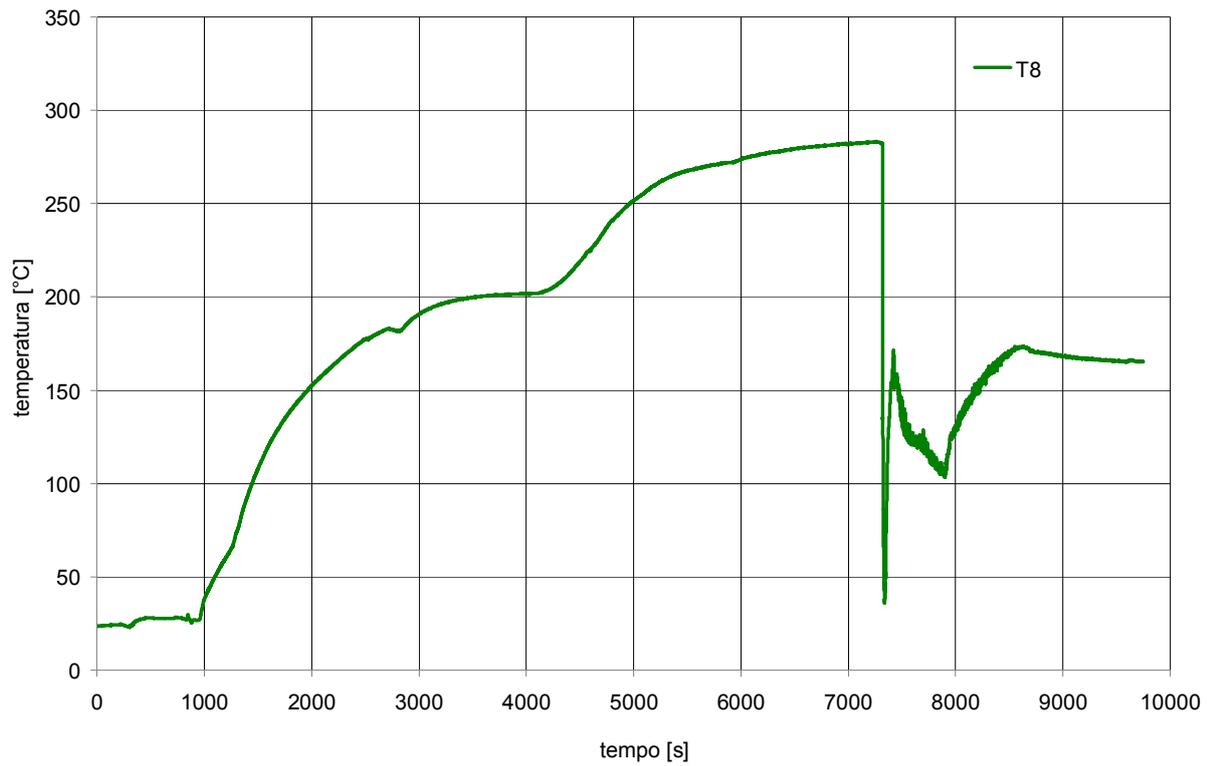
**Fig. 8. 124 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°21**



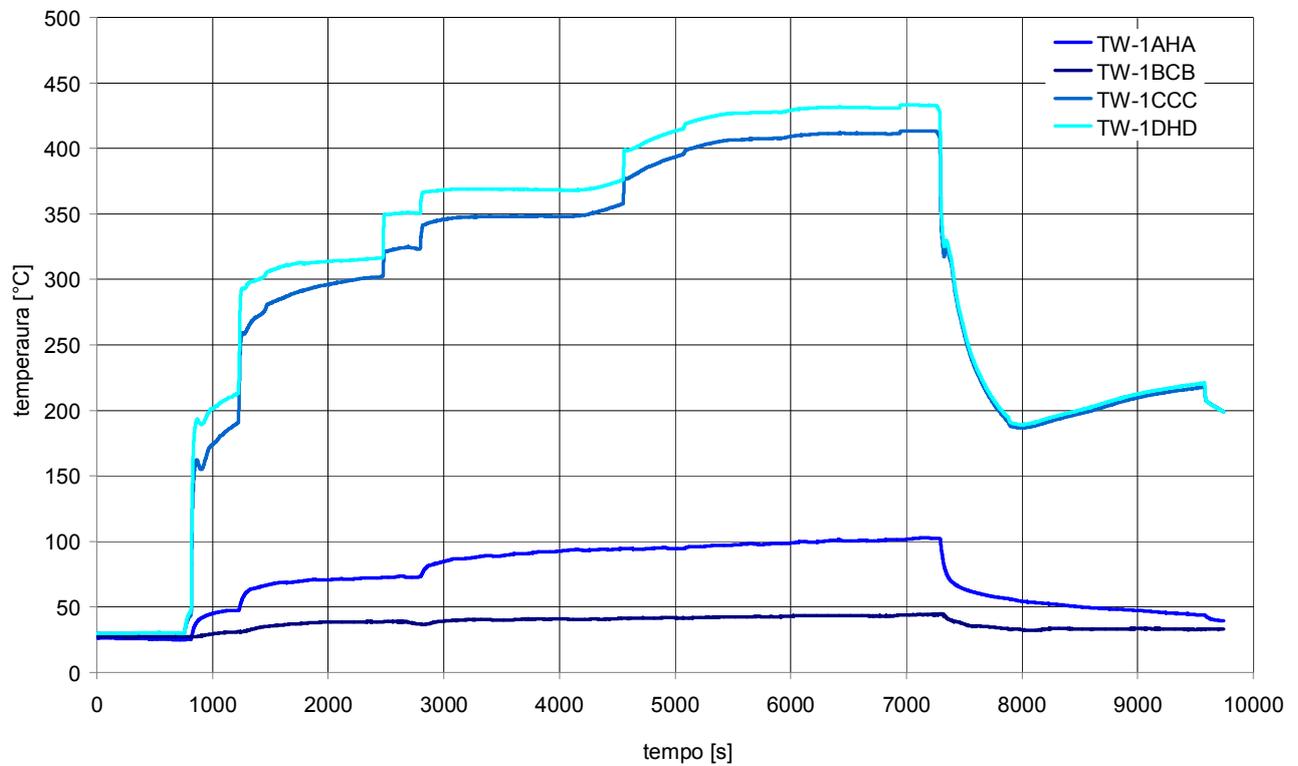
**Fig. 8. 125 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°21**



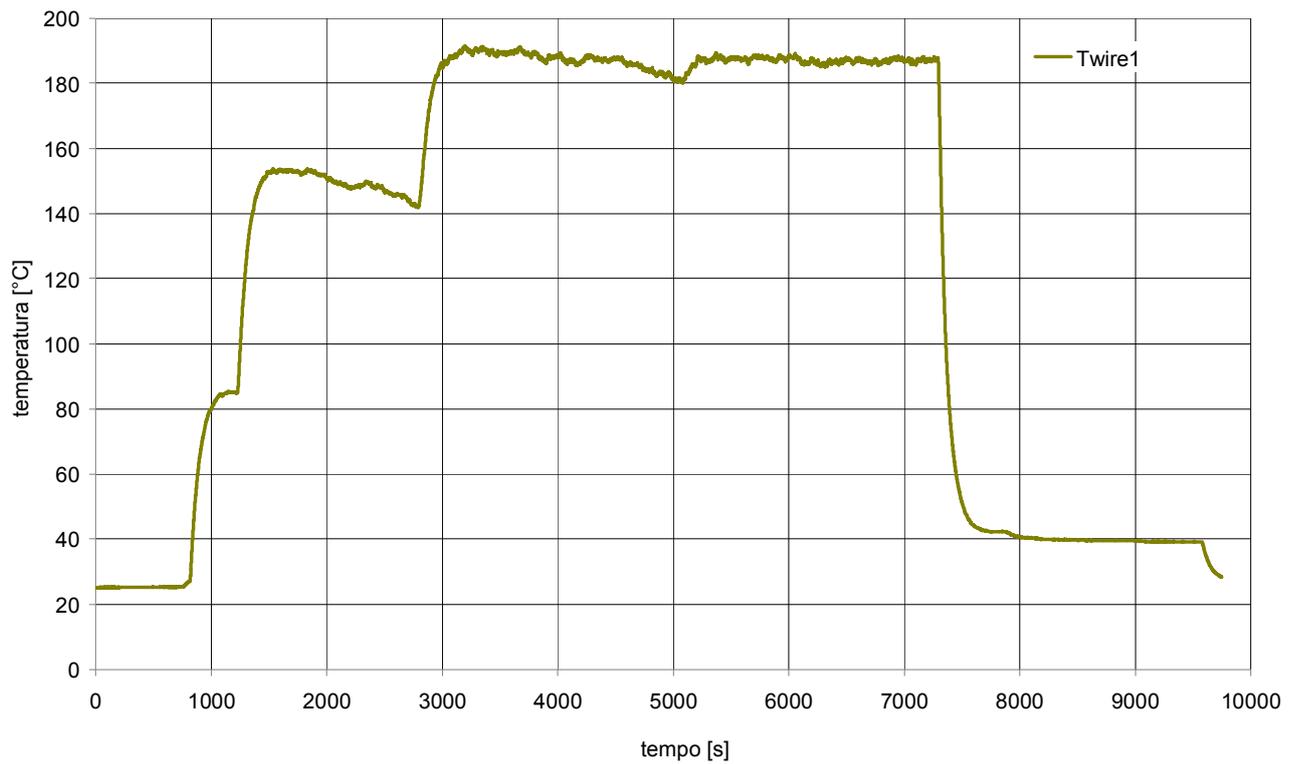
**Fig. 8. 126 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°21**



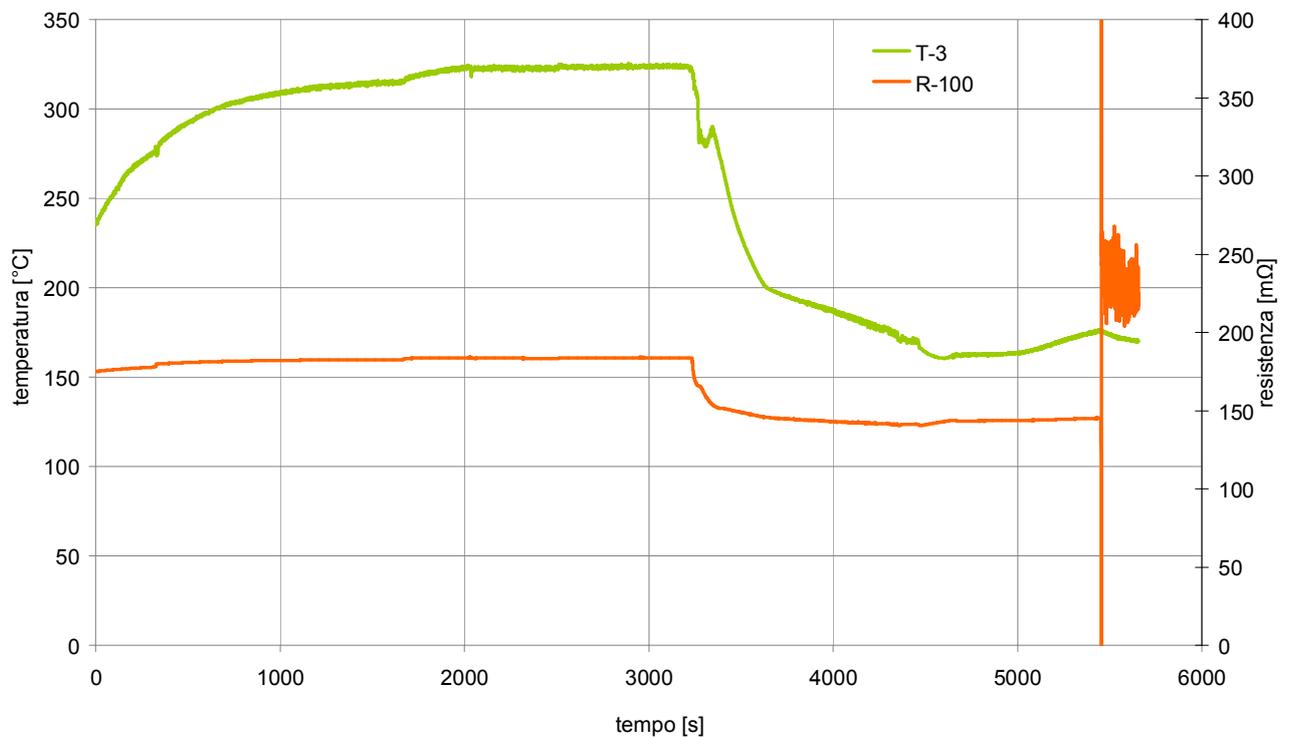
**Fig. 8. 127 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°21**



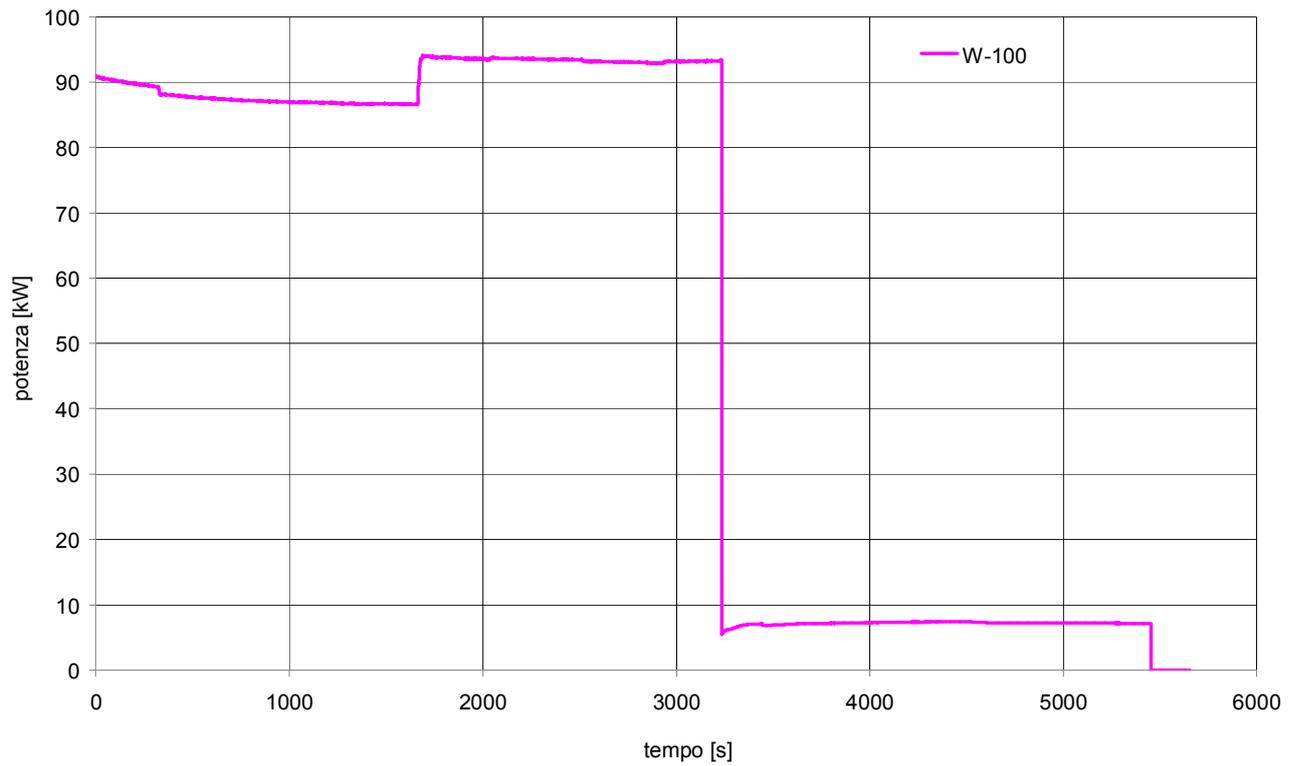
**Fig. 8. 128 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°21**



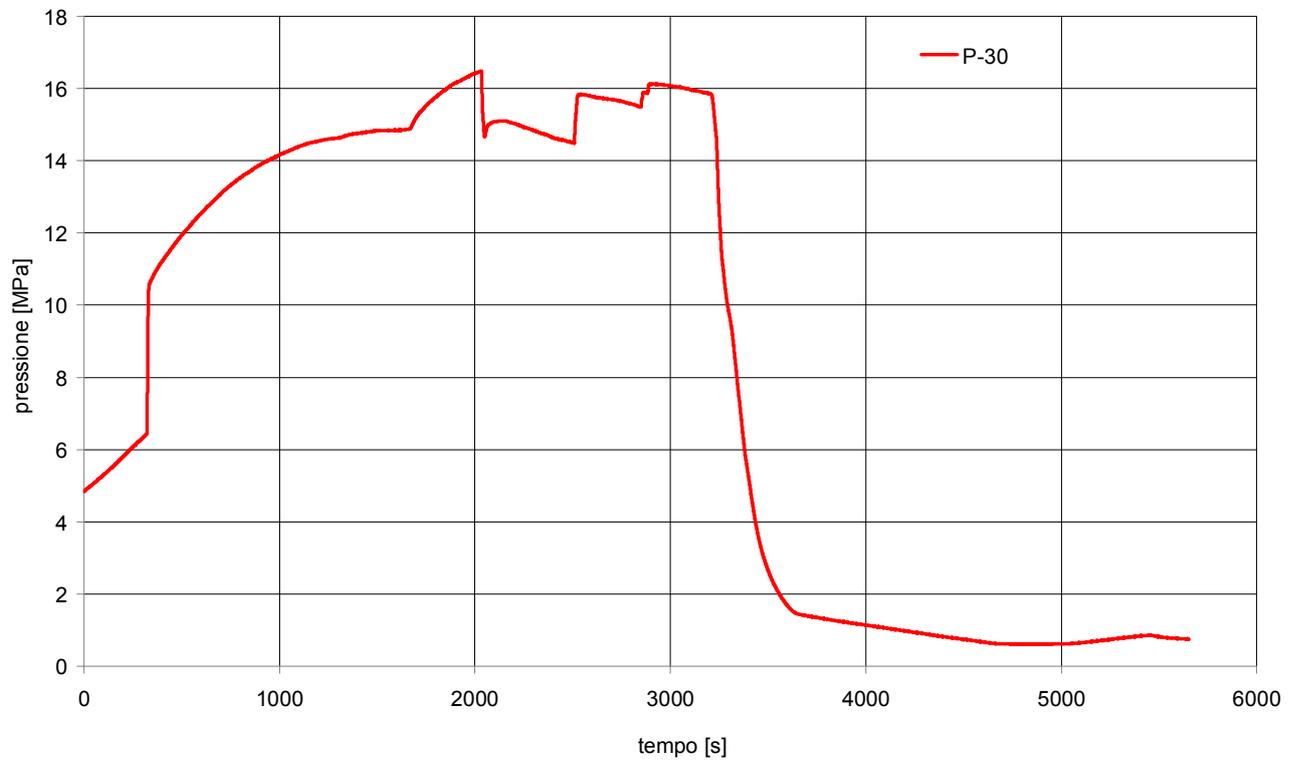
**Fig. 8. 129 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°21**



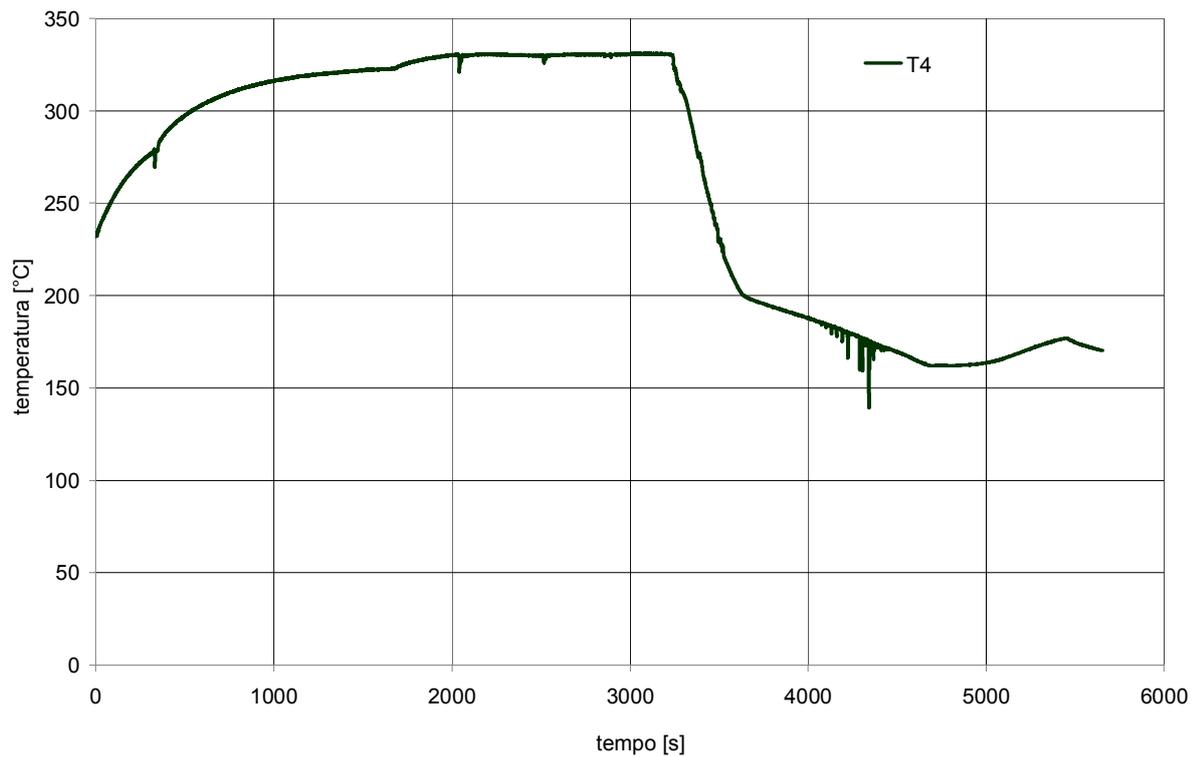
**Fig. 8. 130 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°22**



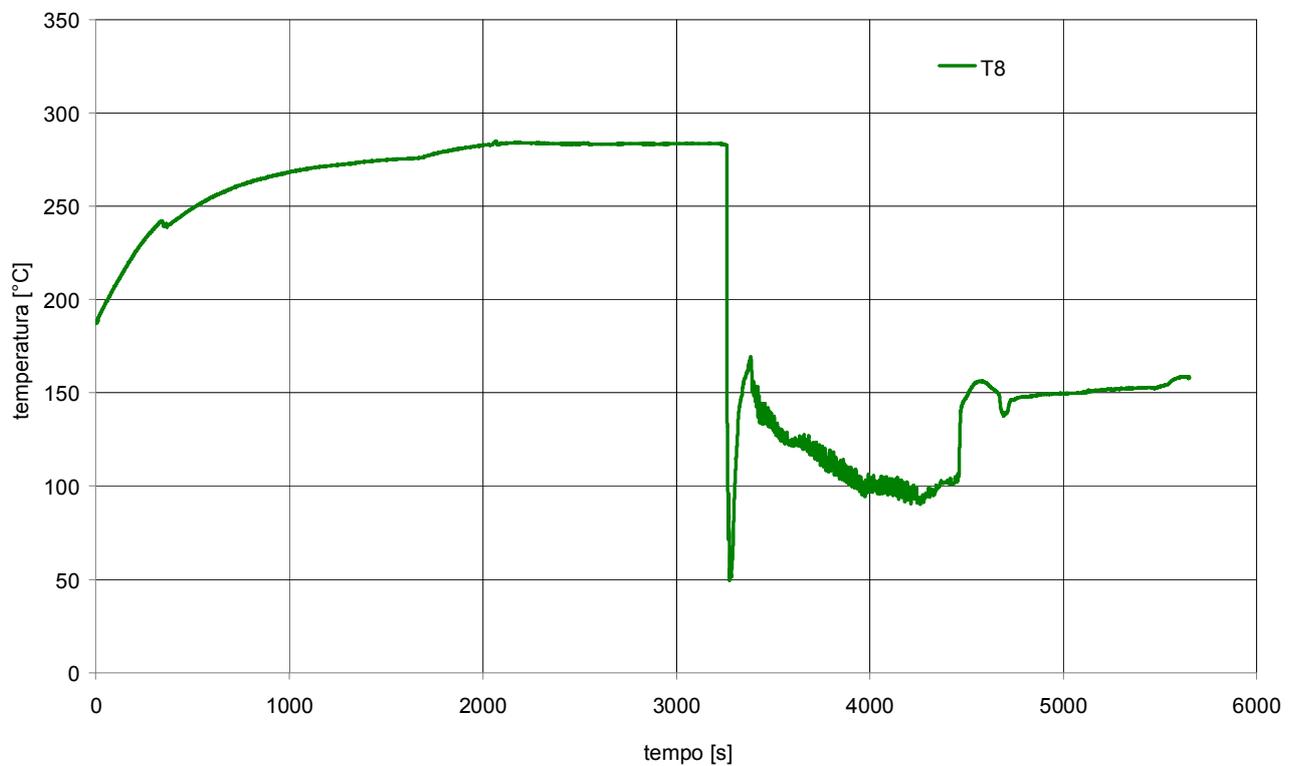
**Fig. 8. 131 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°22**



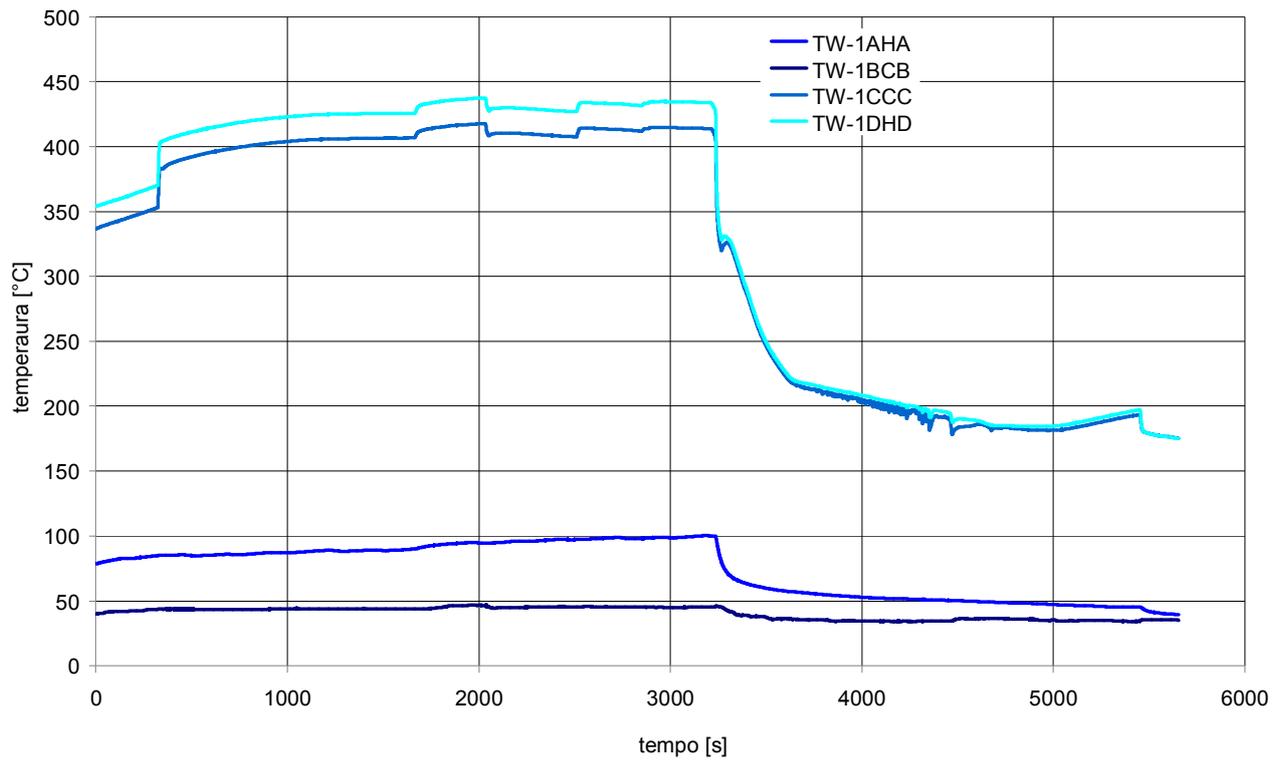
**Fig. 8. 132 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°22**



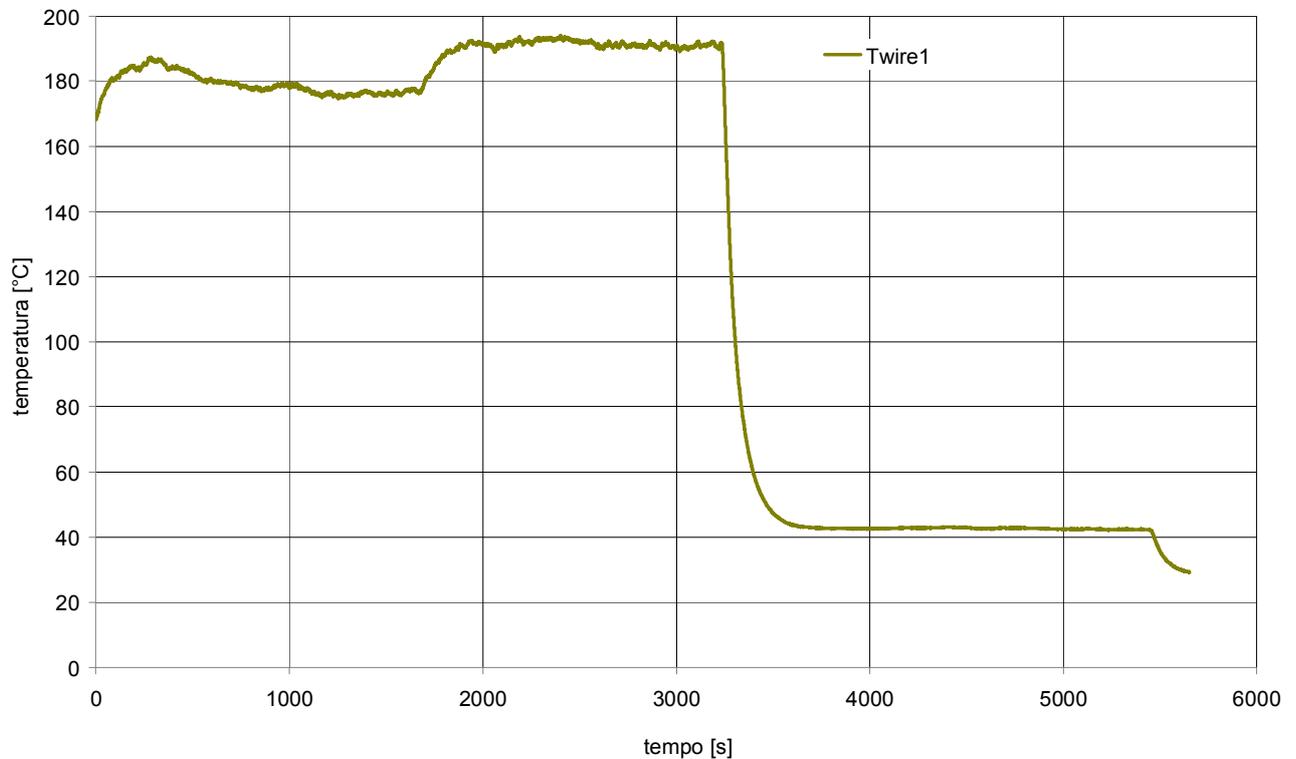
**Fig. 8. 133 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°22**



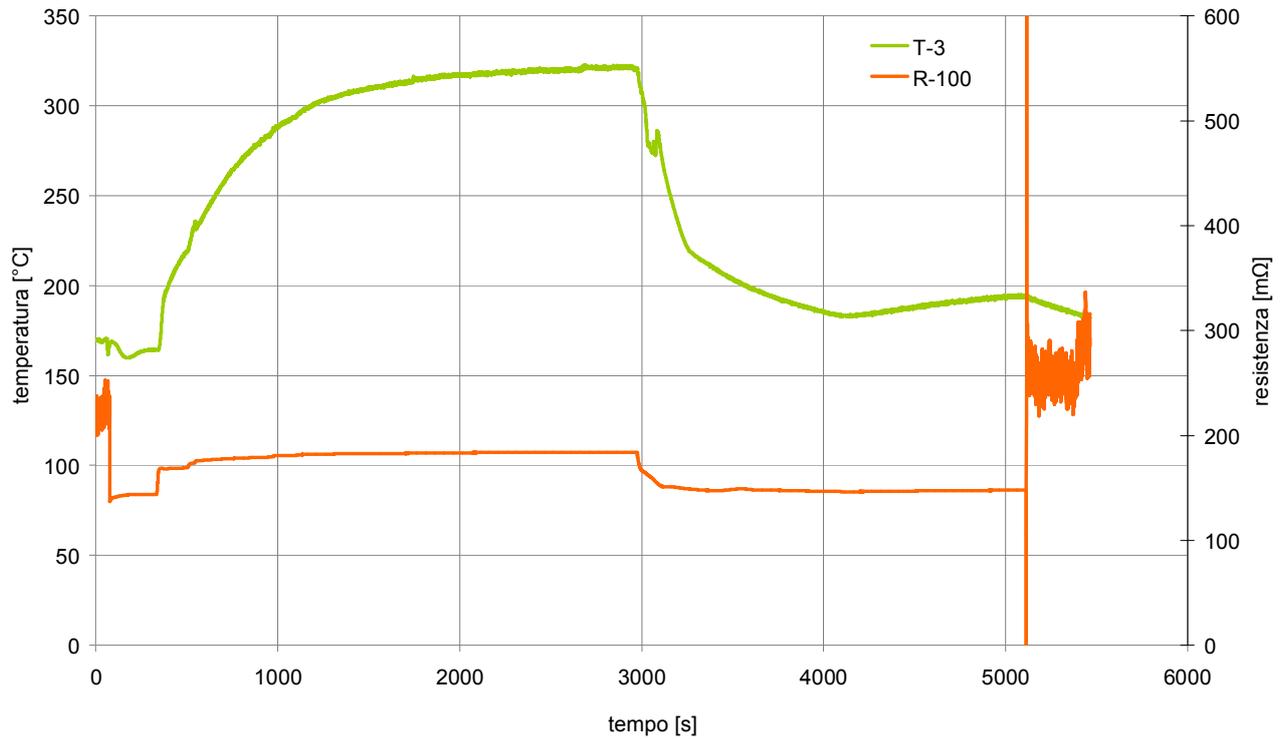
**Fig. 8. 134 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°22**



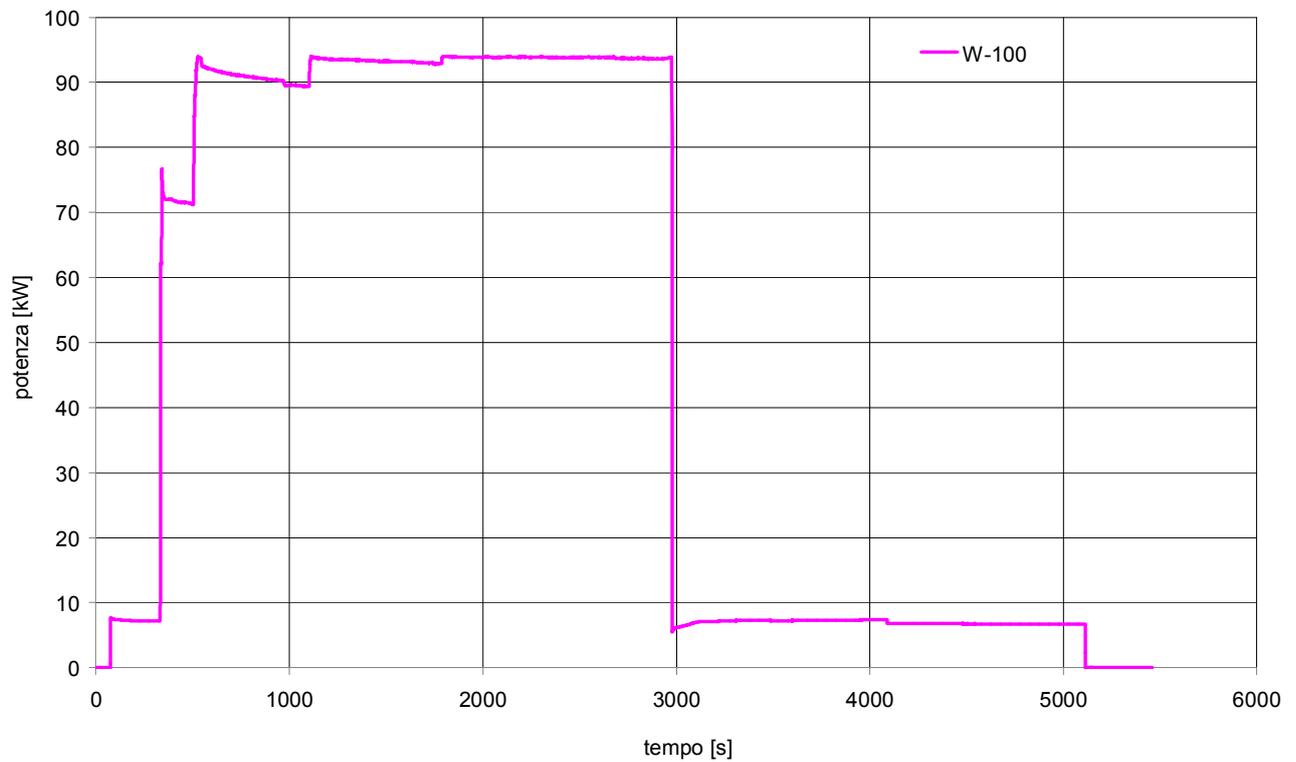
**Fig. 8. 135 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°22**



**Fig. 8. 136 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°22**



**Fig. 8. 137 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°23**



**Fig. 8. 138 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°23**

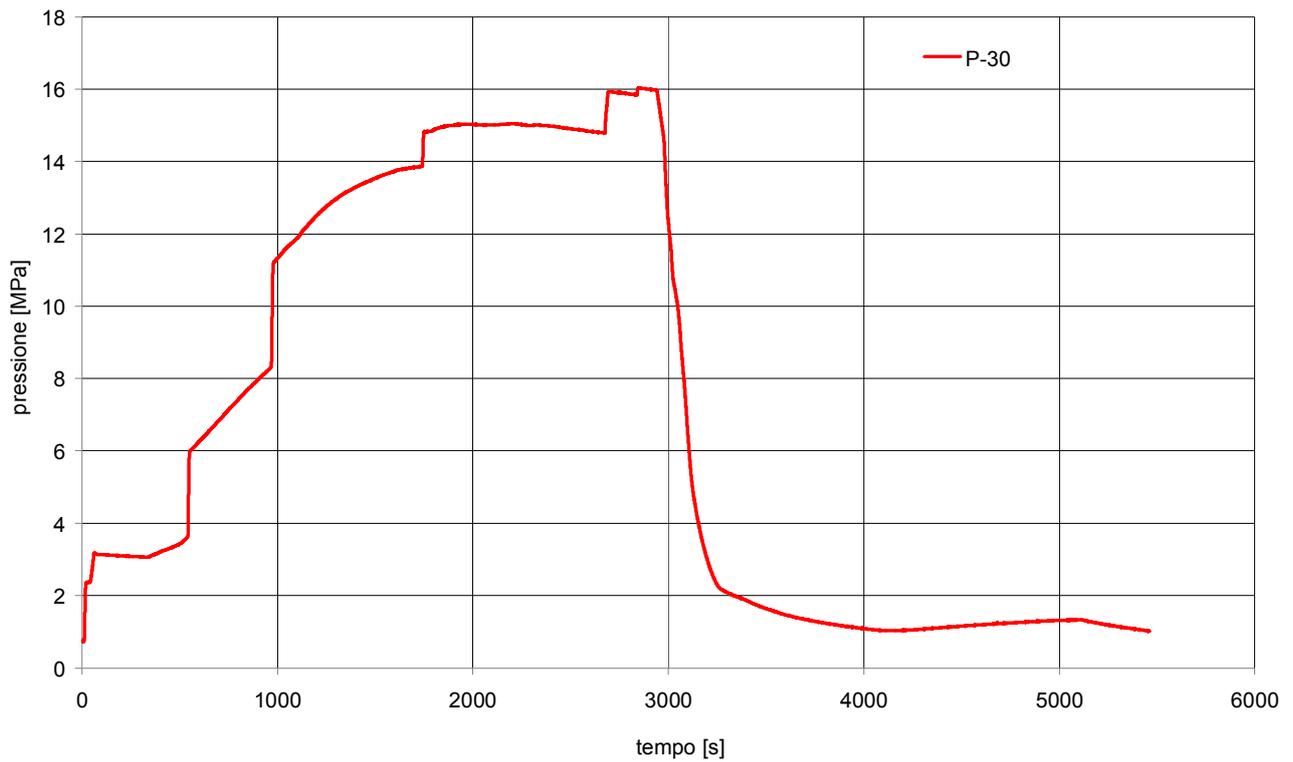


Fig. 8.139 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°23

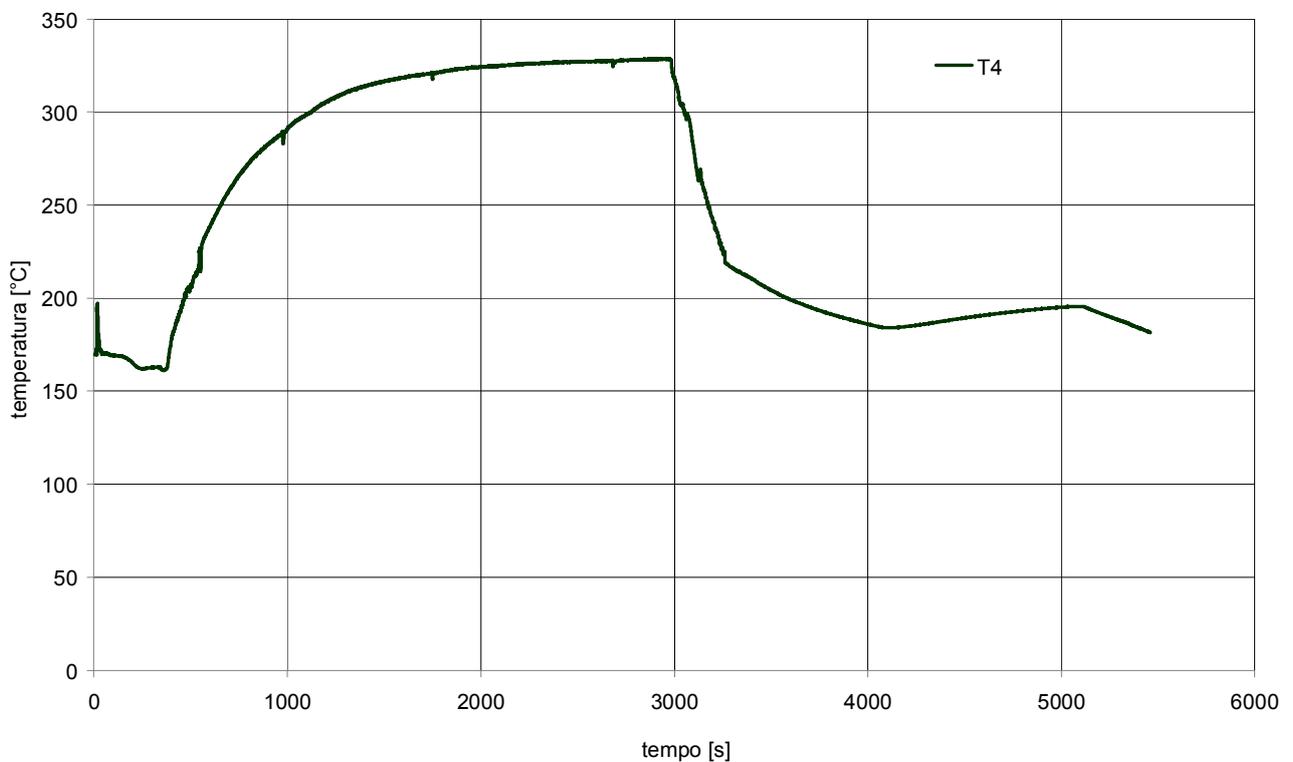
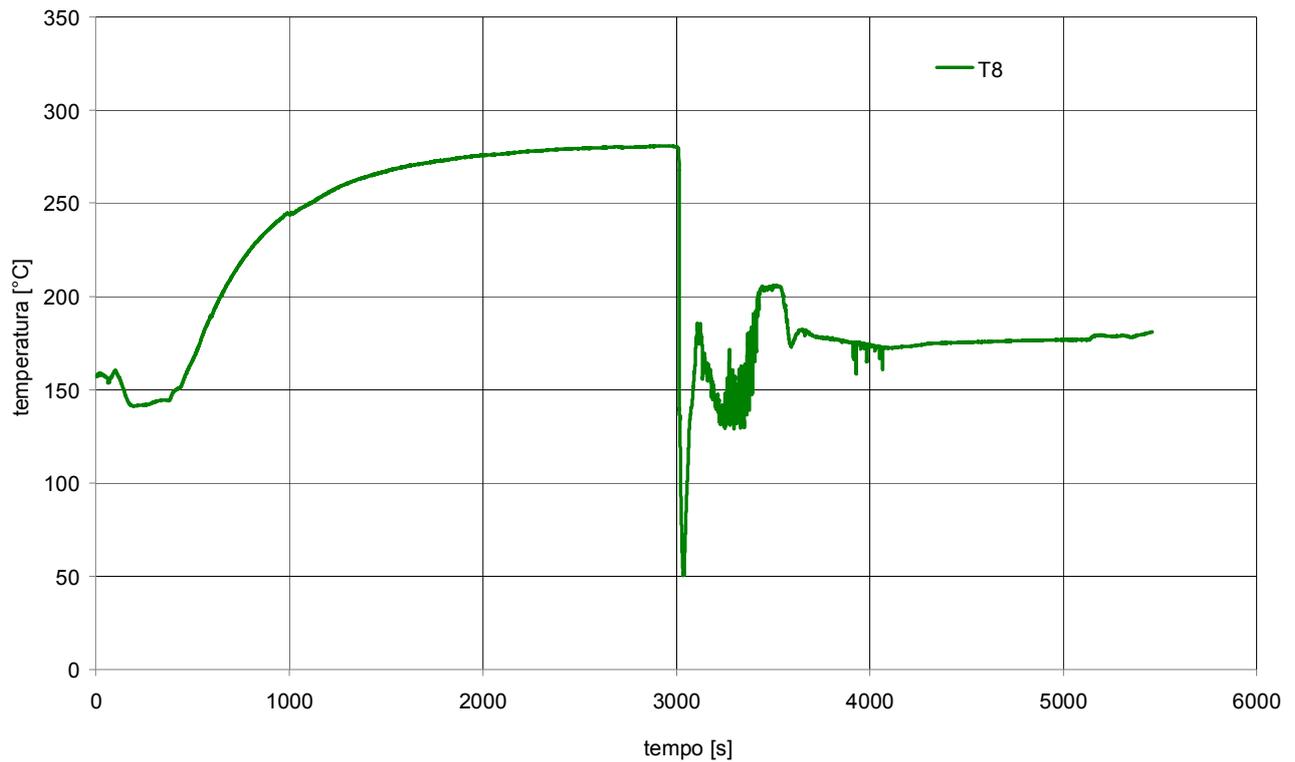
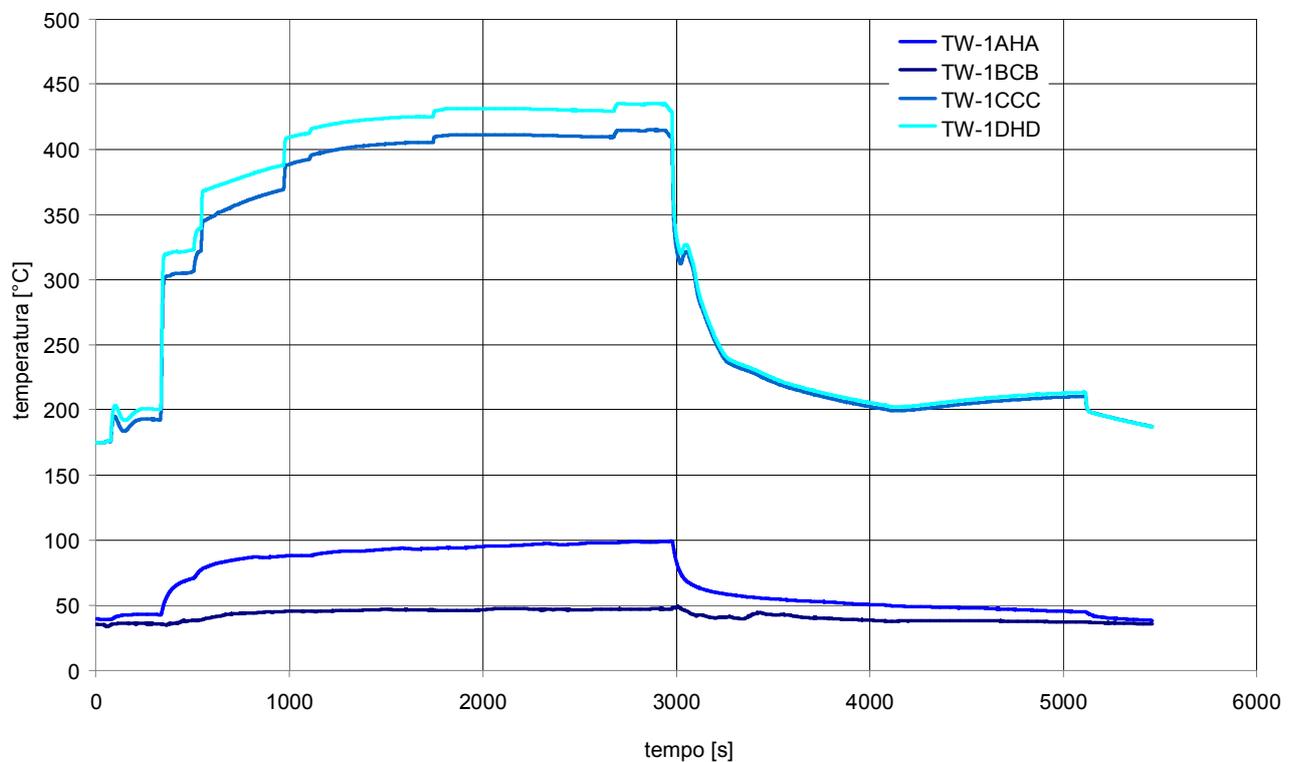


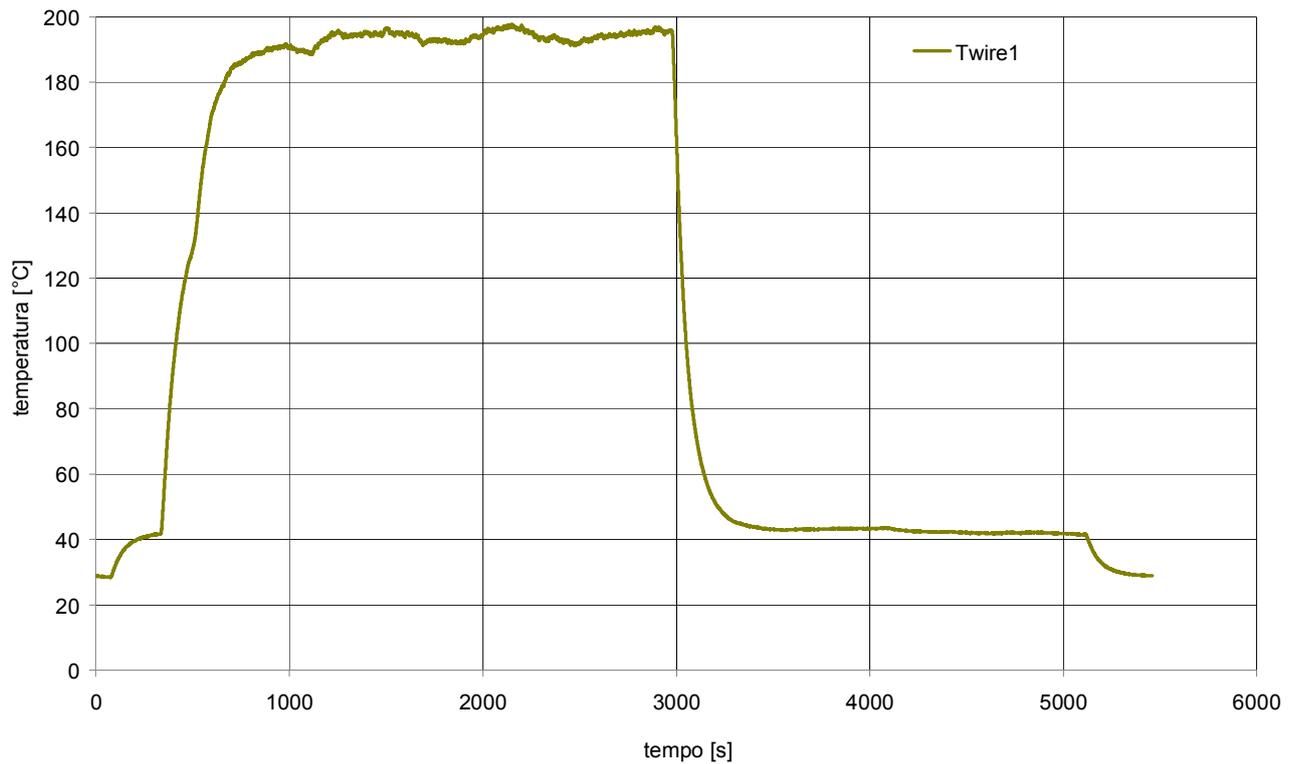
Fig. 8.140 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°23



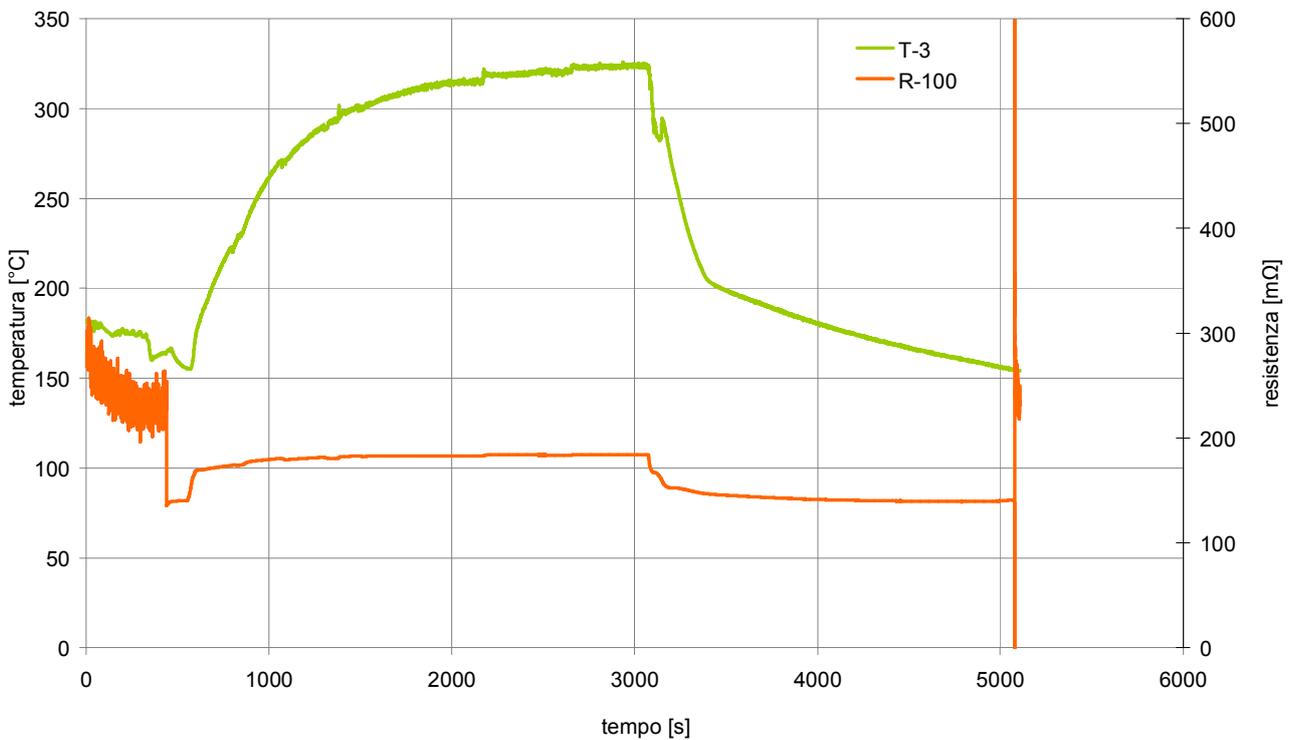
**Fig. 8. 141 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°23**



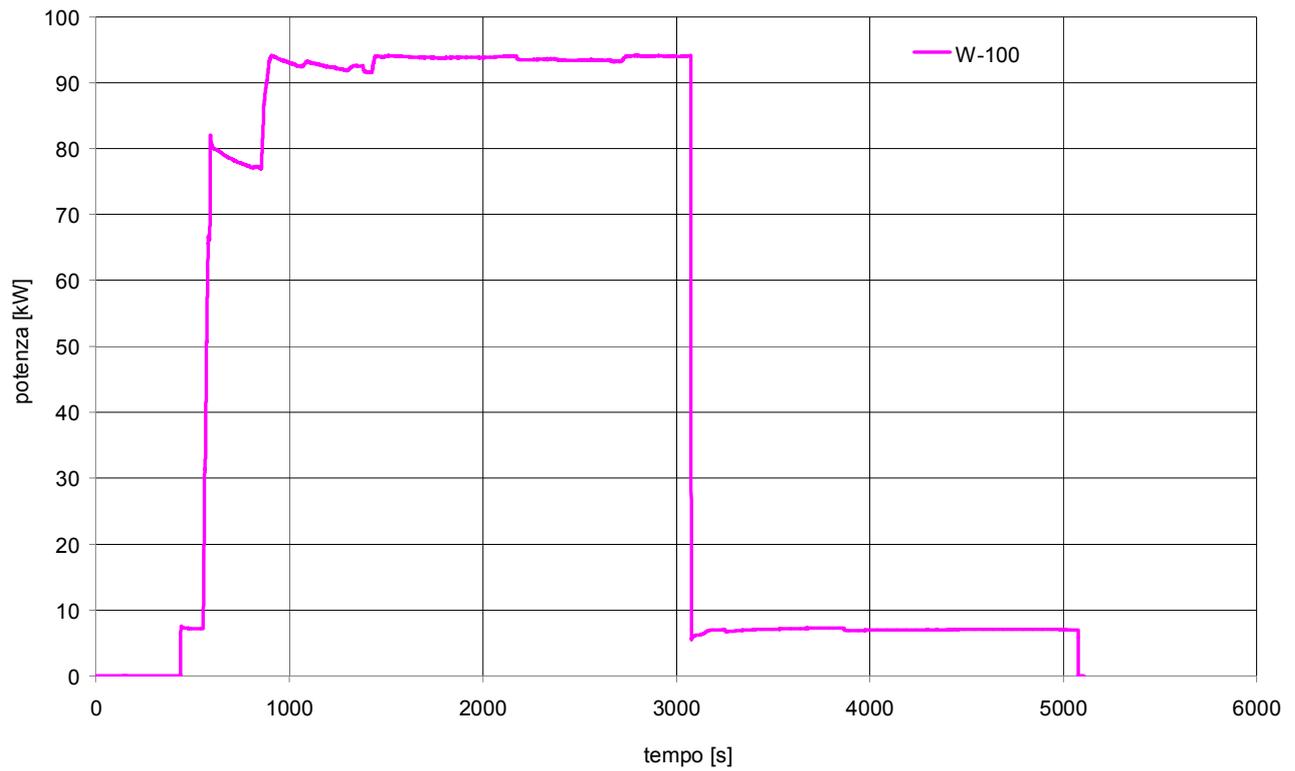
**Fig. 8. 142 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°23**



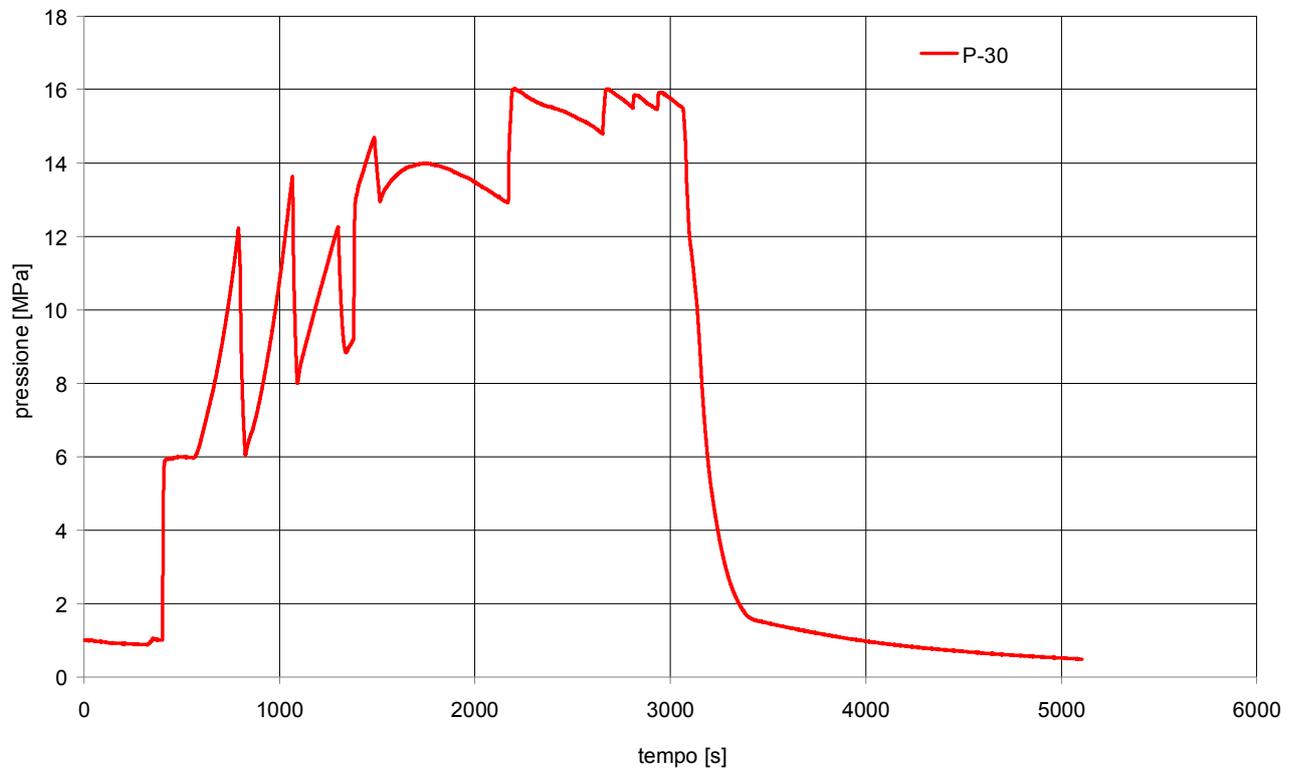
**Fig. 8. 143 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°23**



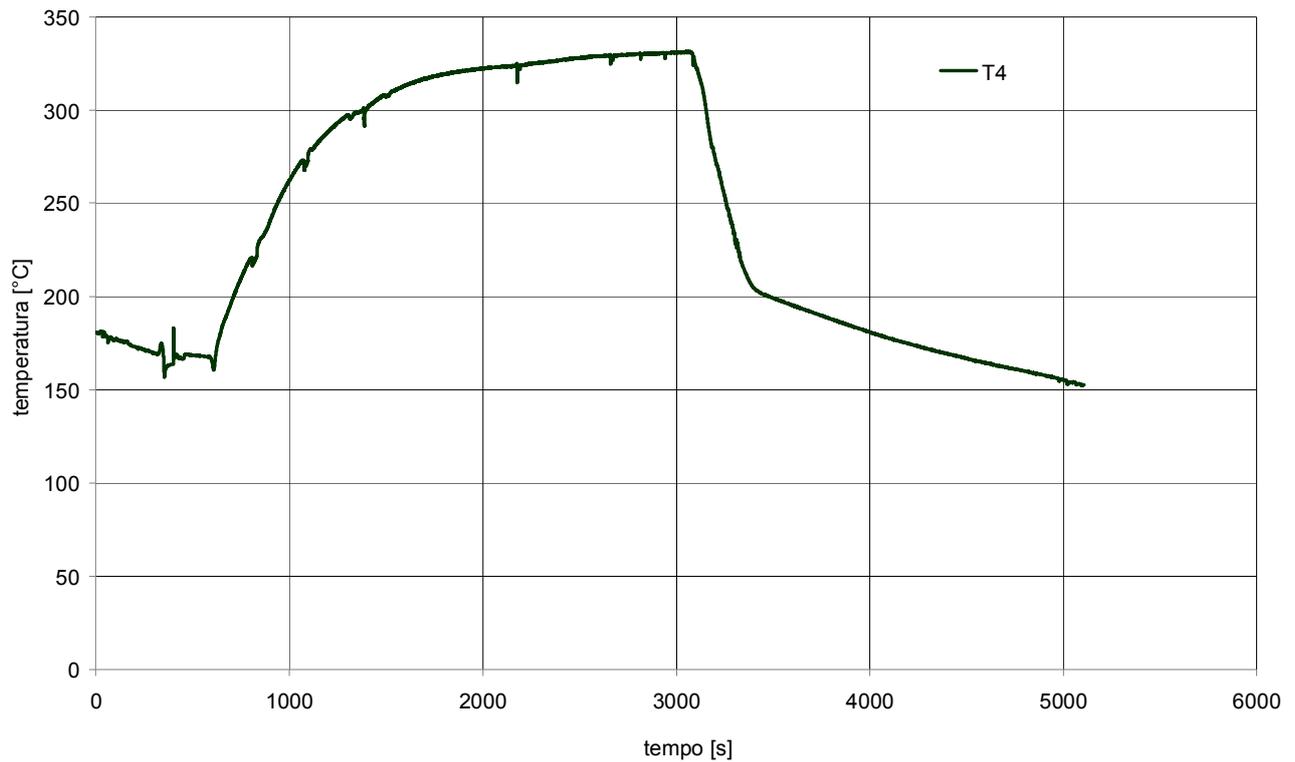
**Fig. 8. 144 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°24**



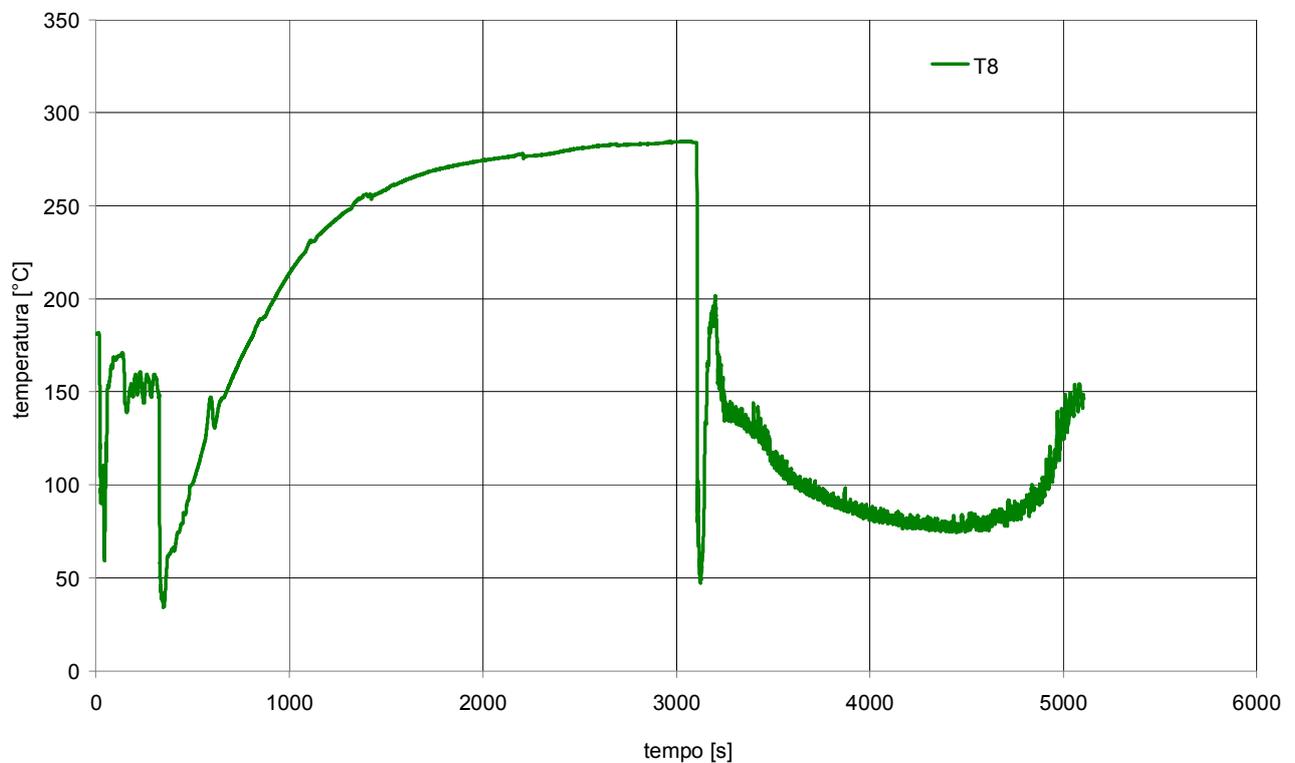
**Fig. 8. 145 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°24**



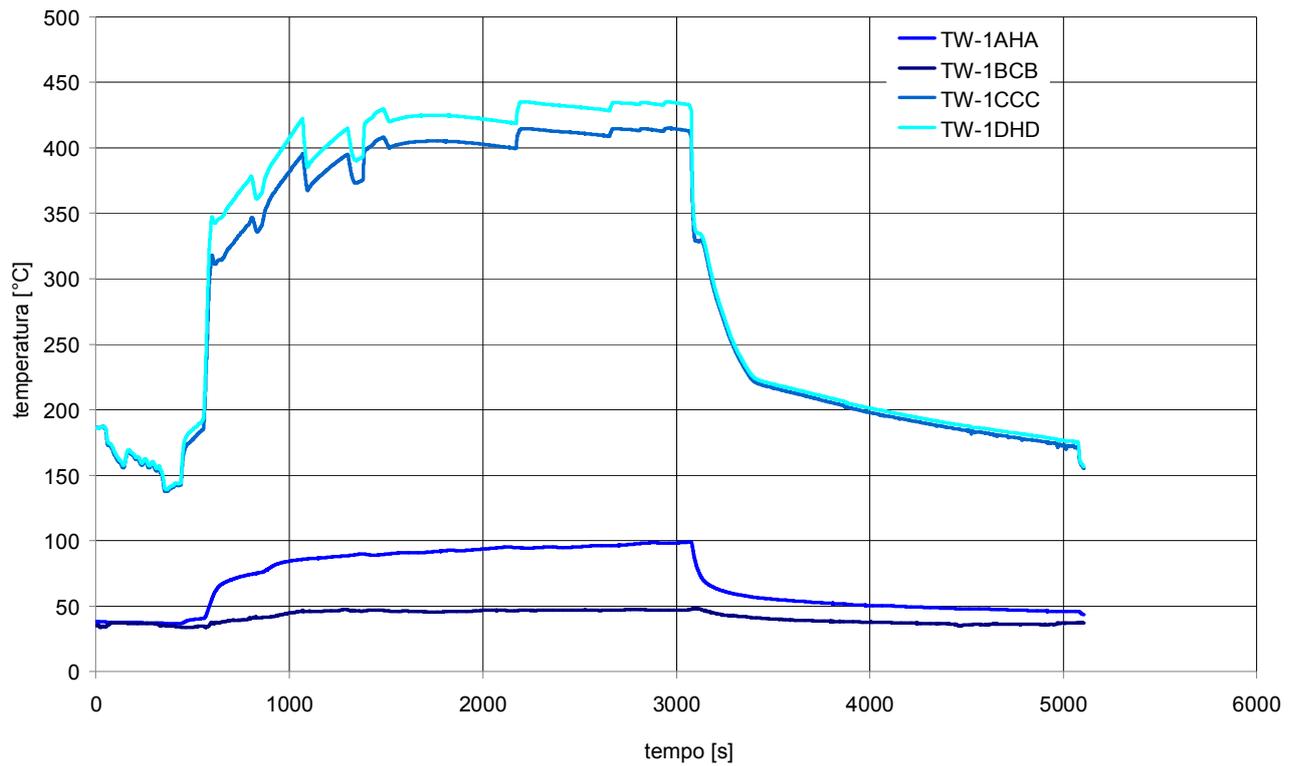
**Fig. 8. 146 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°24**



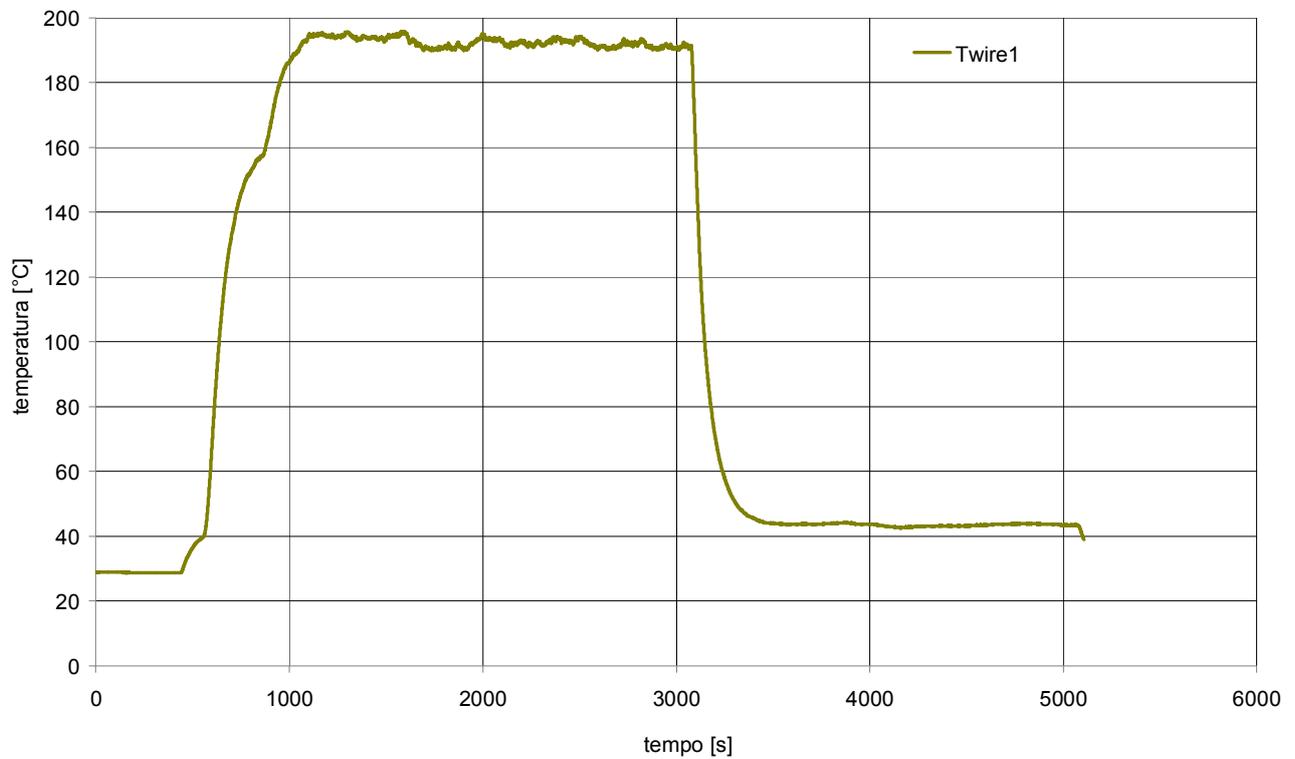
**Fig. 8. 147 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°24**



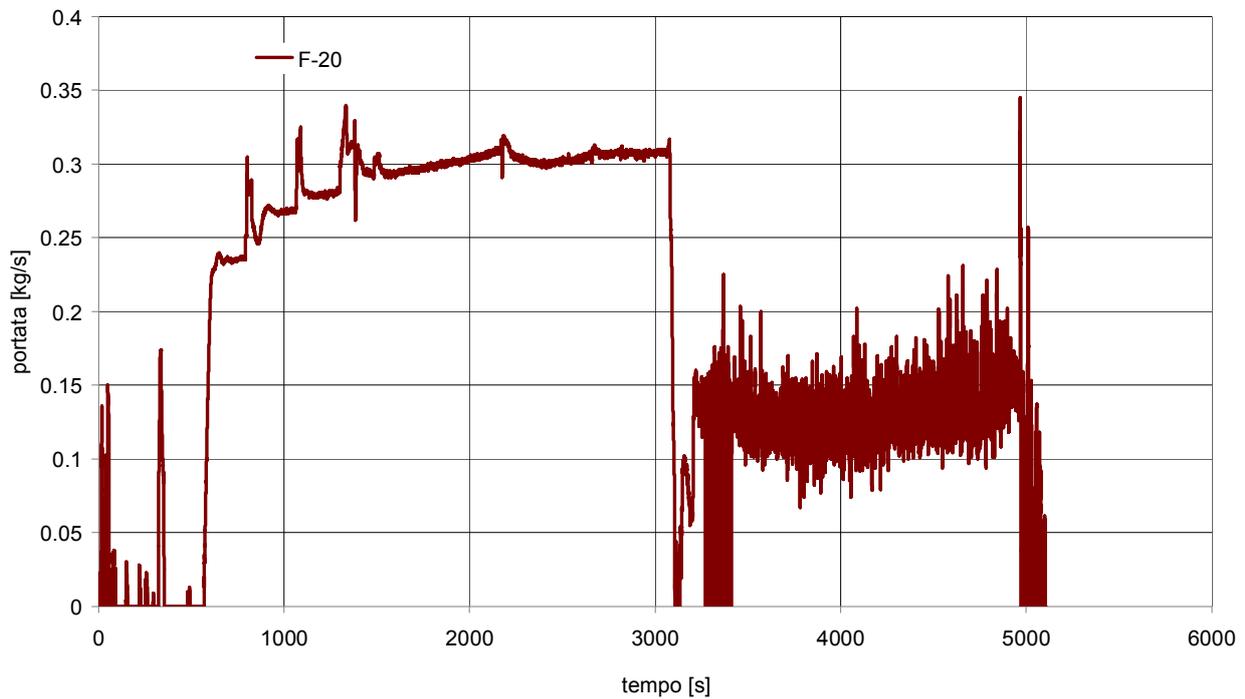
**Fig. 8. 148 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°24**



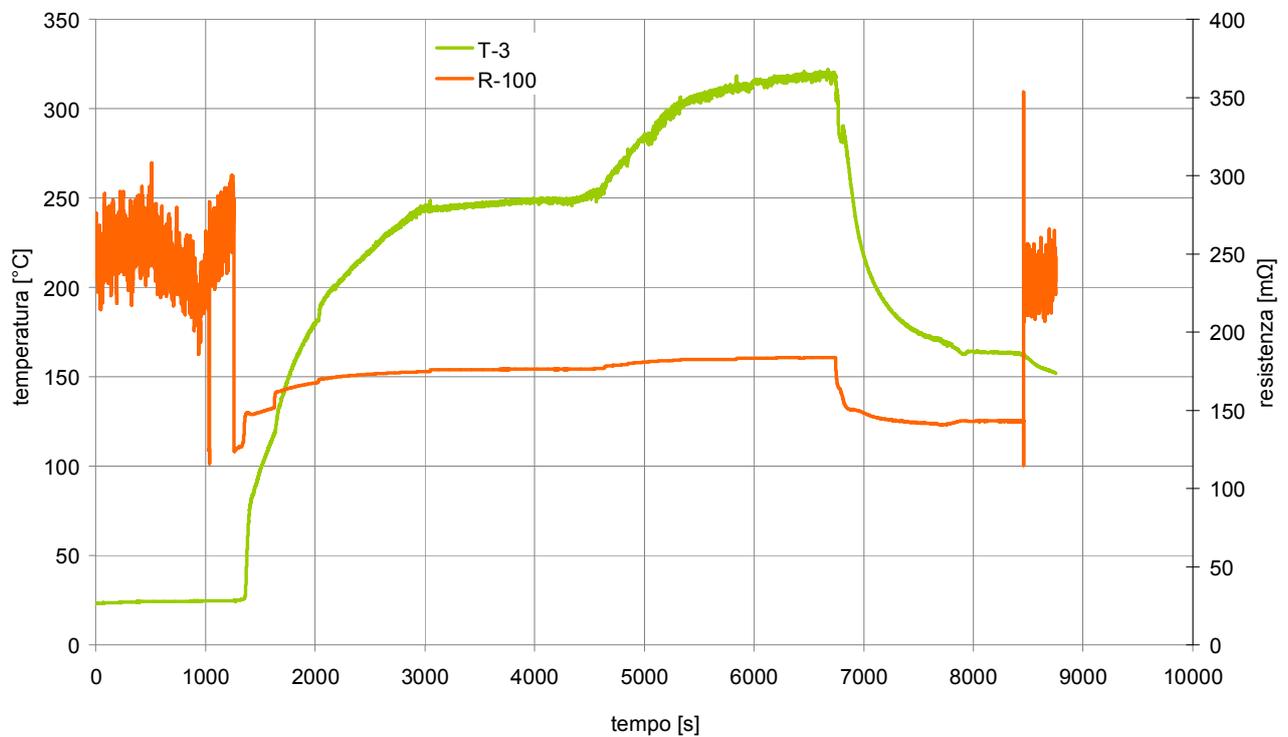
**Fig. 8. 149 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°24**



**Fig. 8. 150 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°24**



**Fig. 8. 151 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°24**



**Fig. 8. 152 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°25**

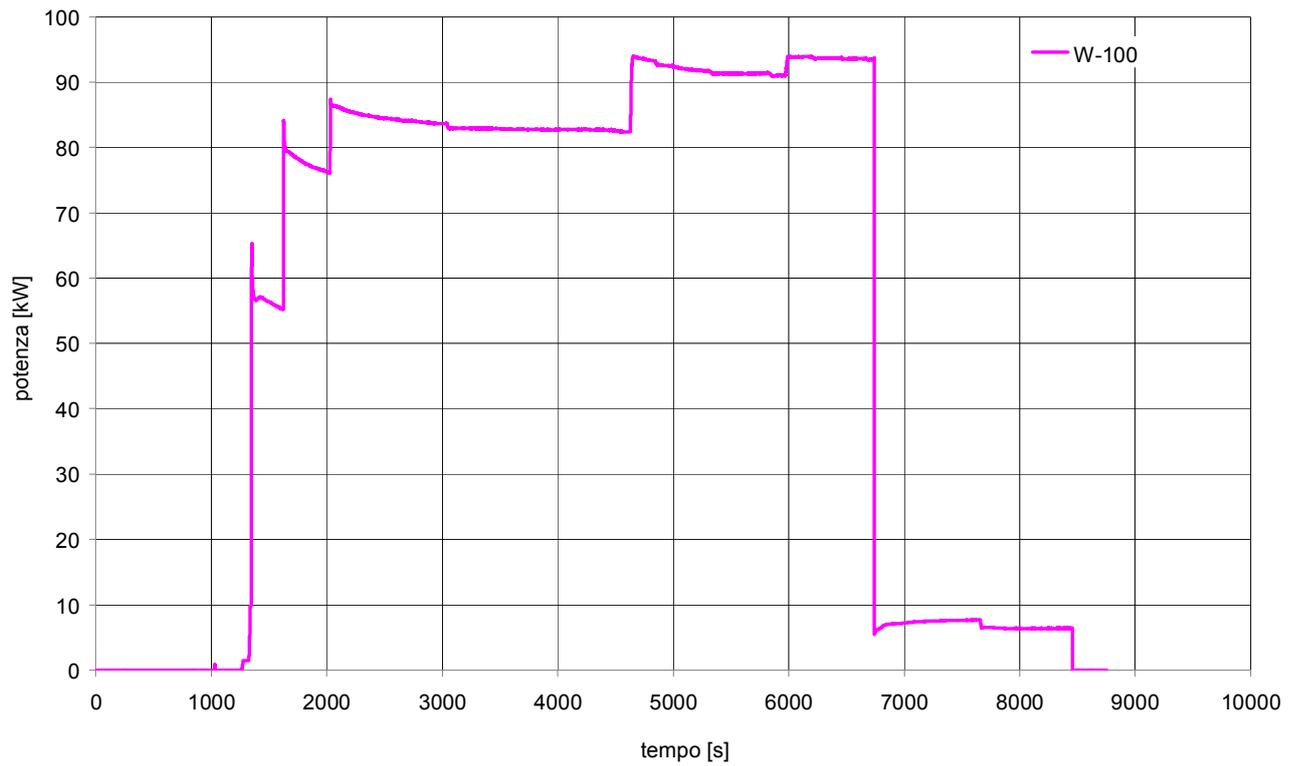


Fig. 8. 153 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°25

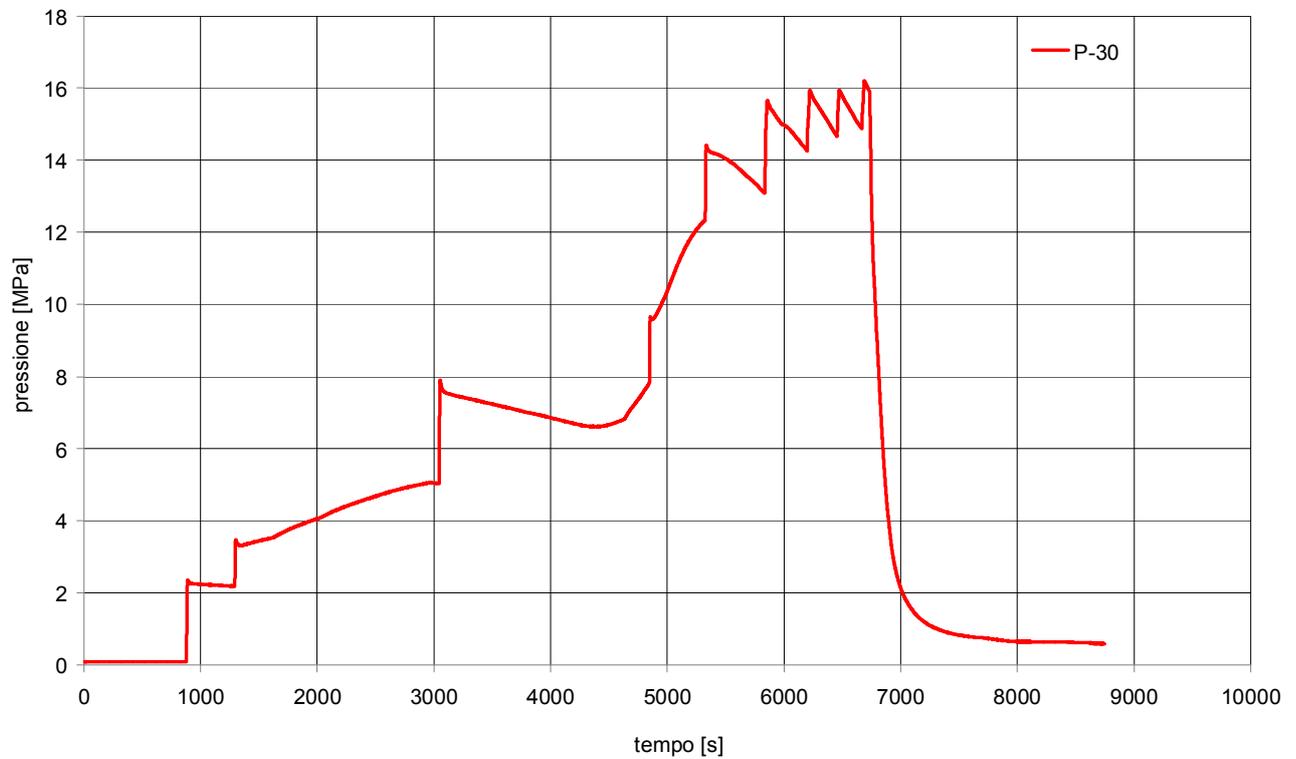
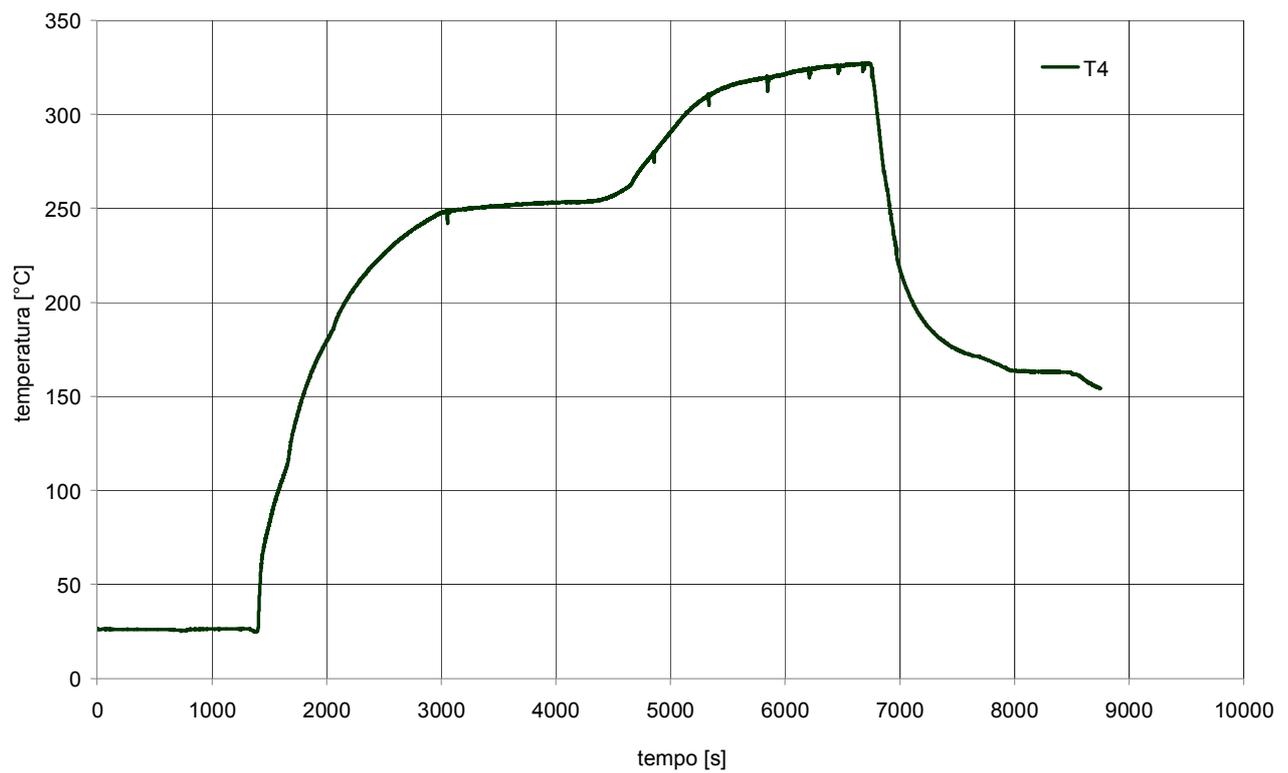
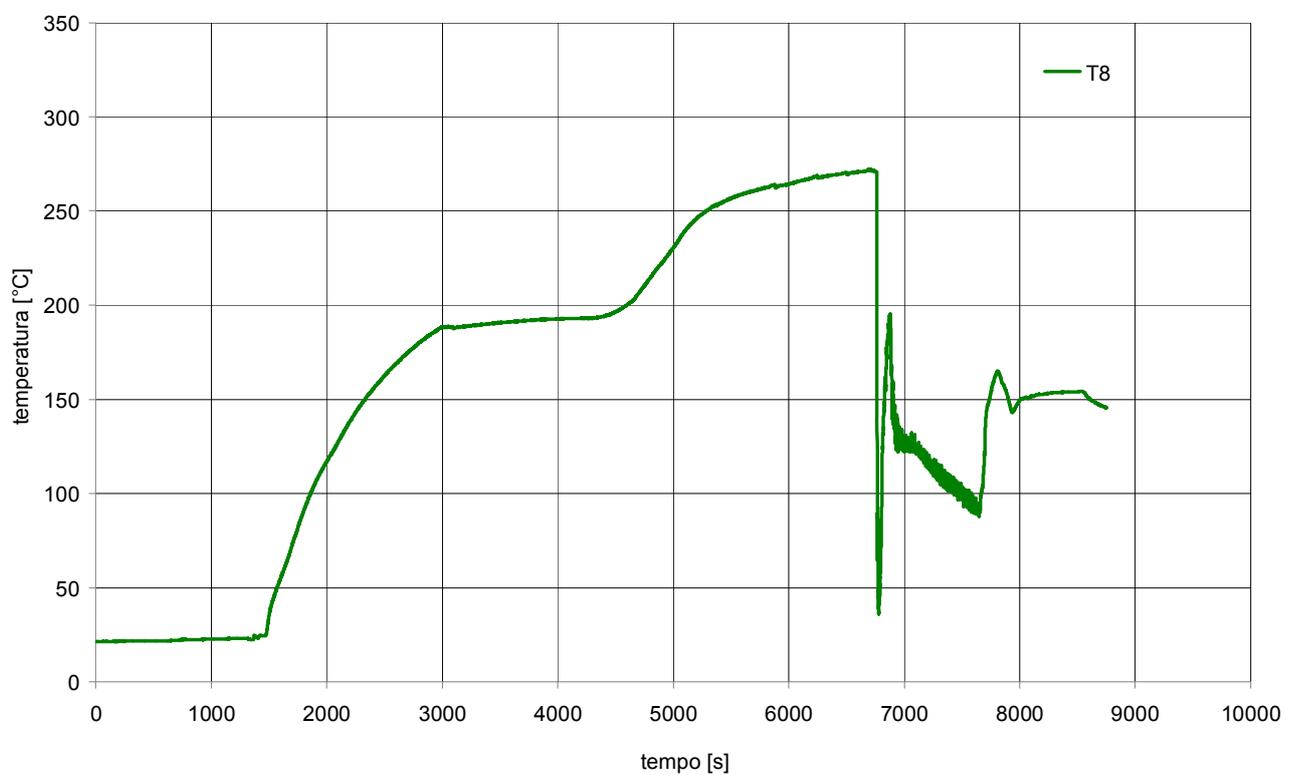


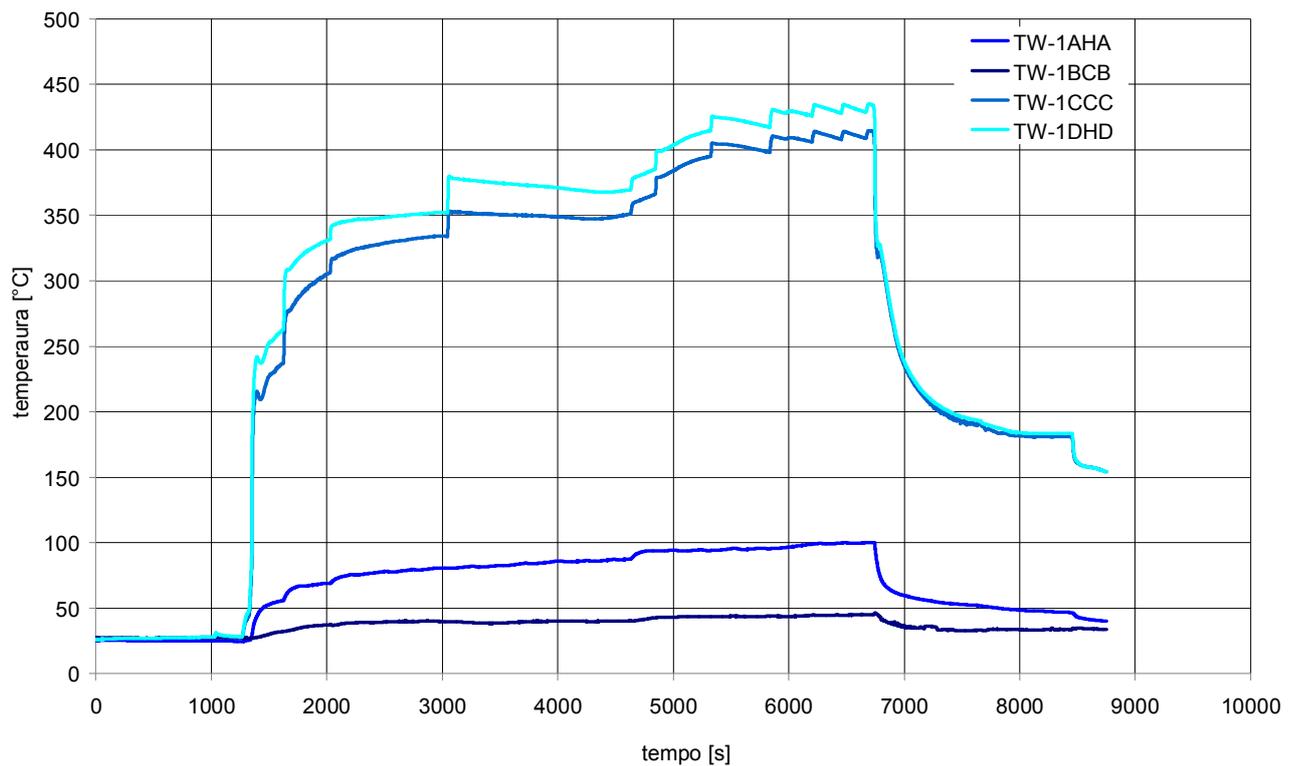
Fig. 8. 154 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°25



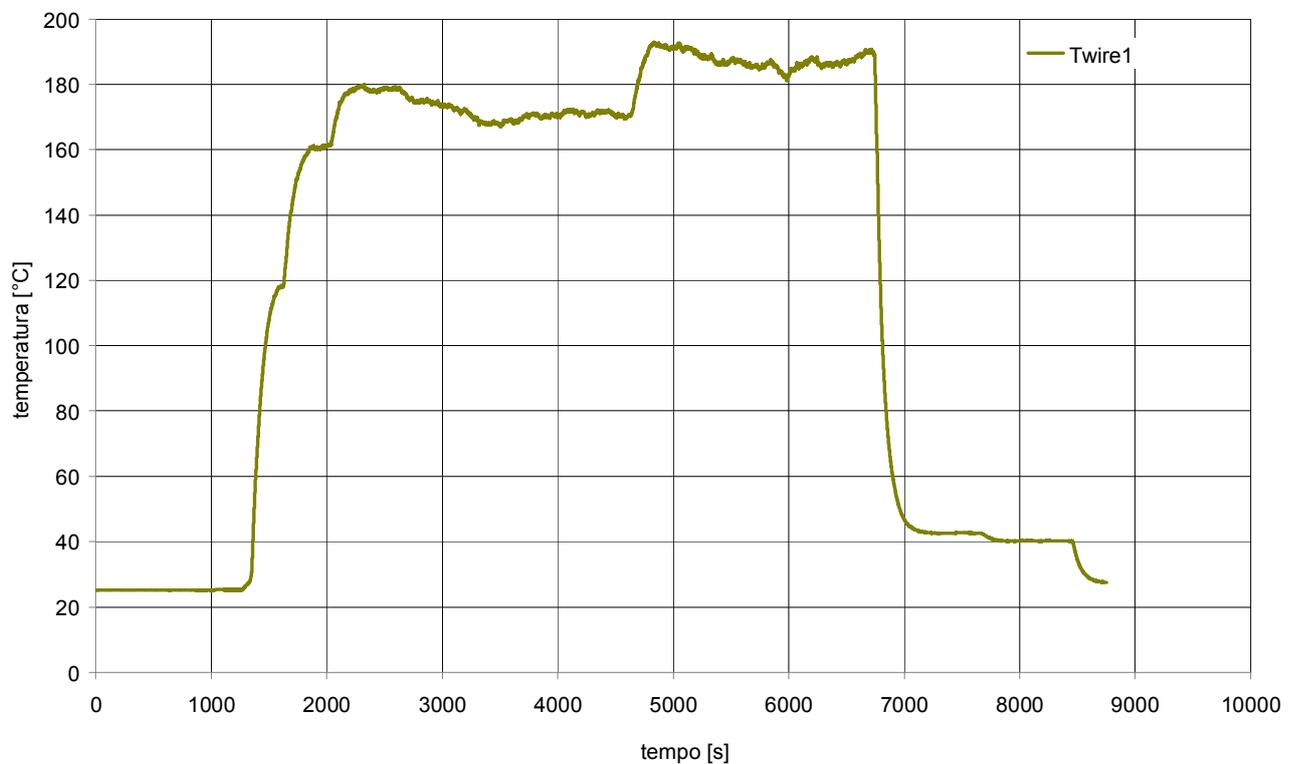
**Fig. 8. 155 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°25**



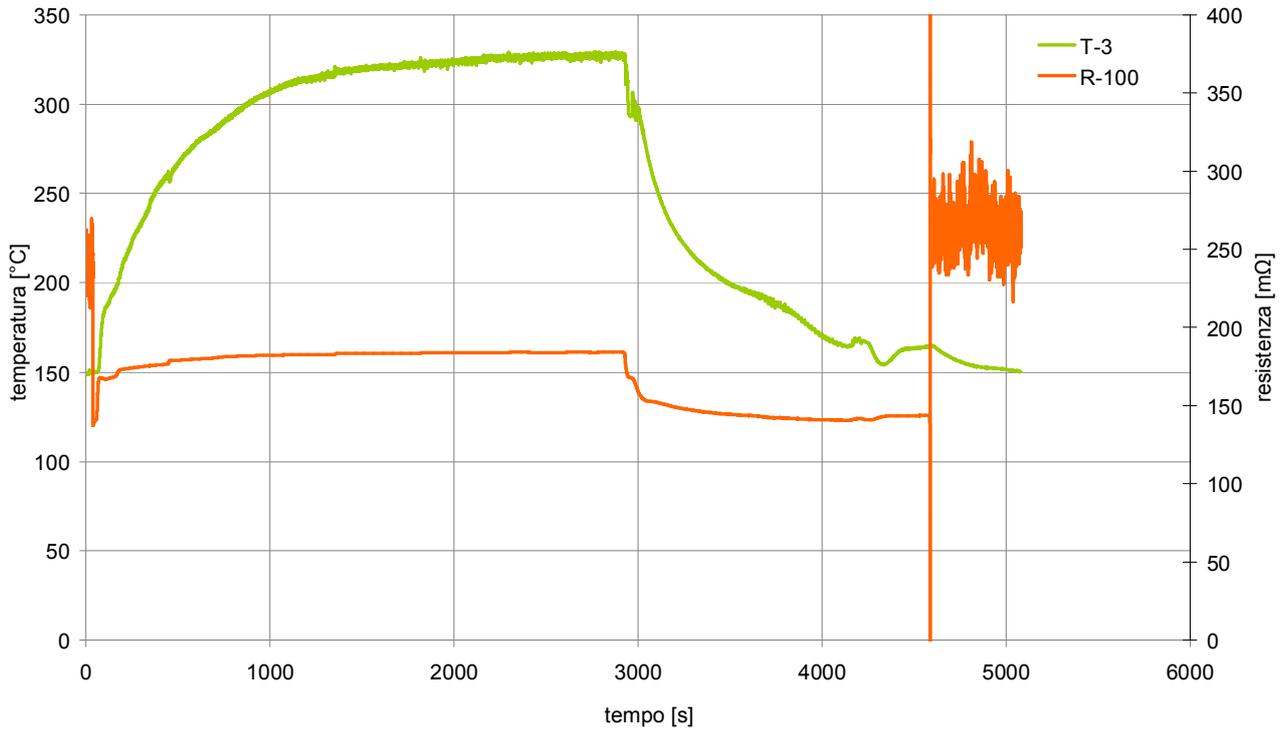
**Fig. 8. 156 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°25**



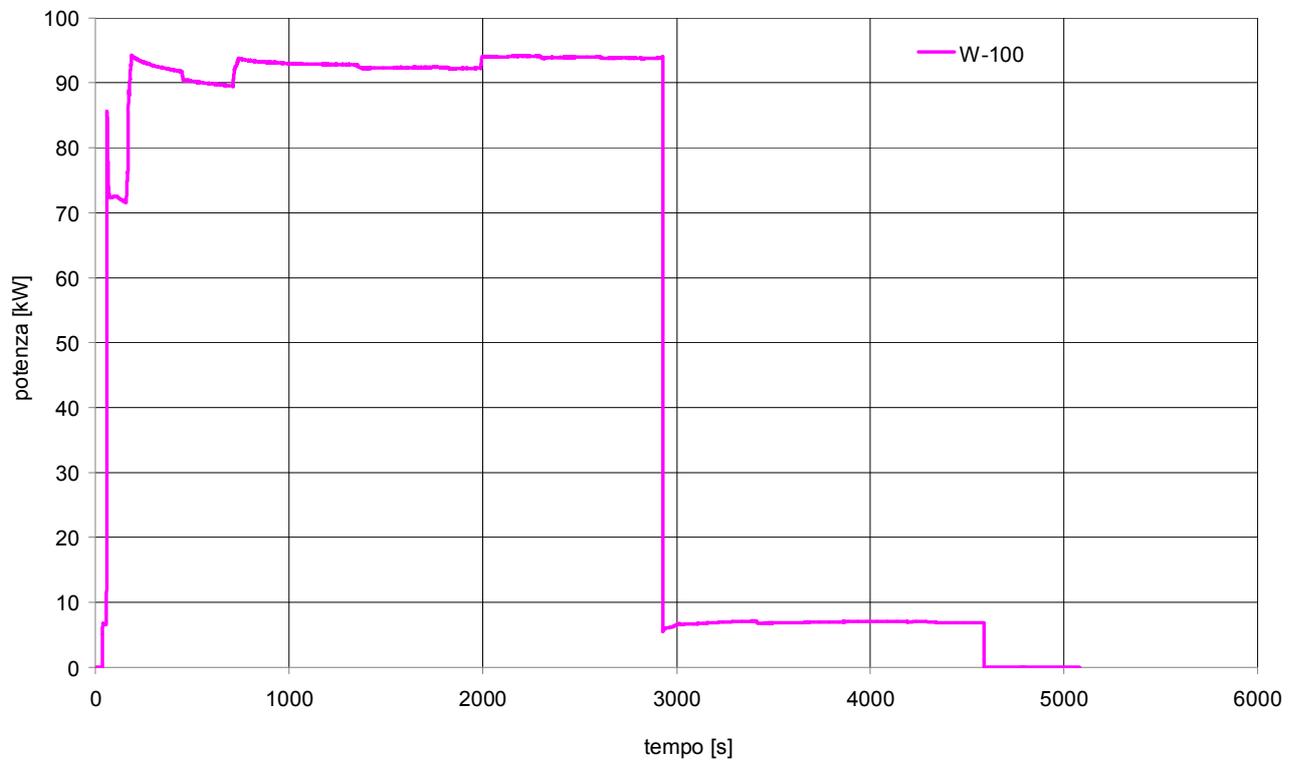
**Fig. 8. 157 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°25**



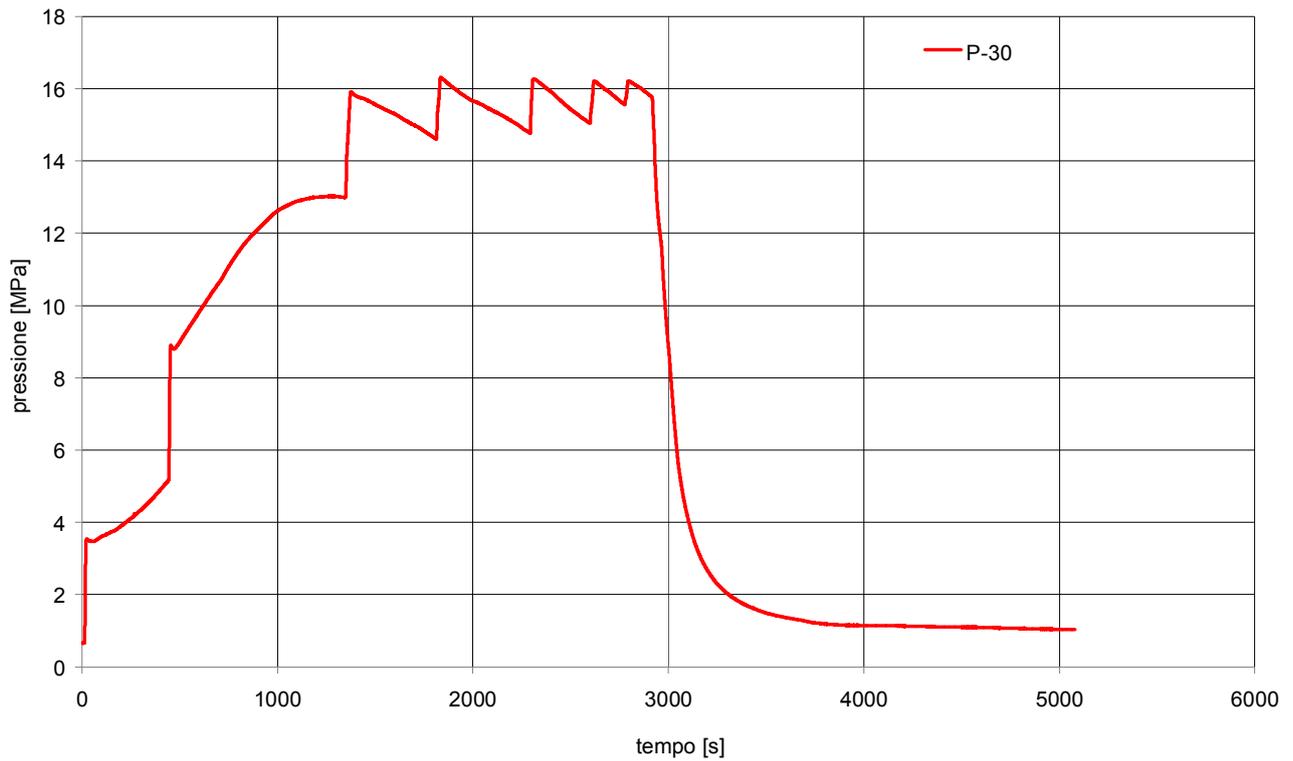
**Fig. 8. 158 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°25**



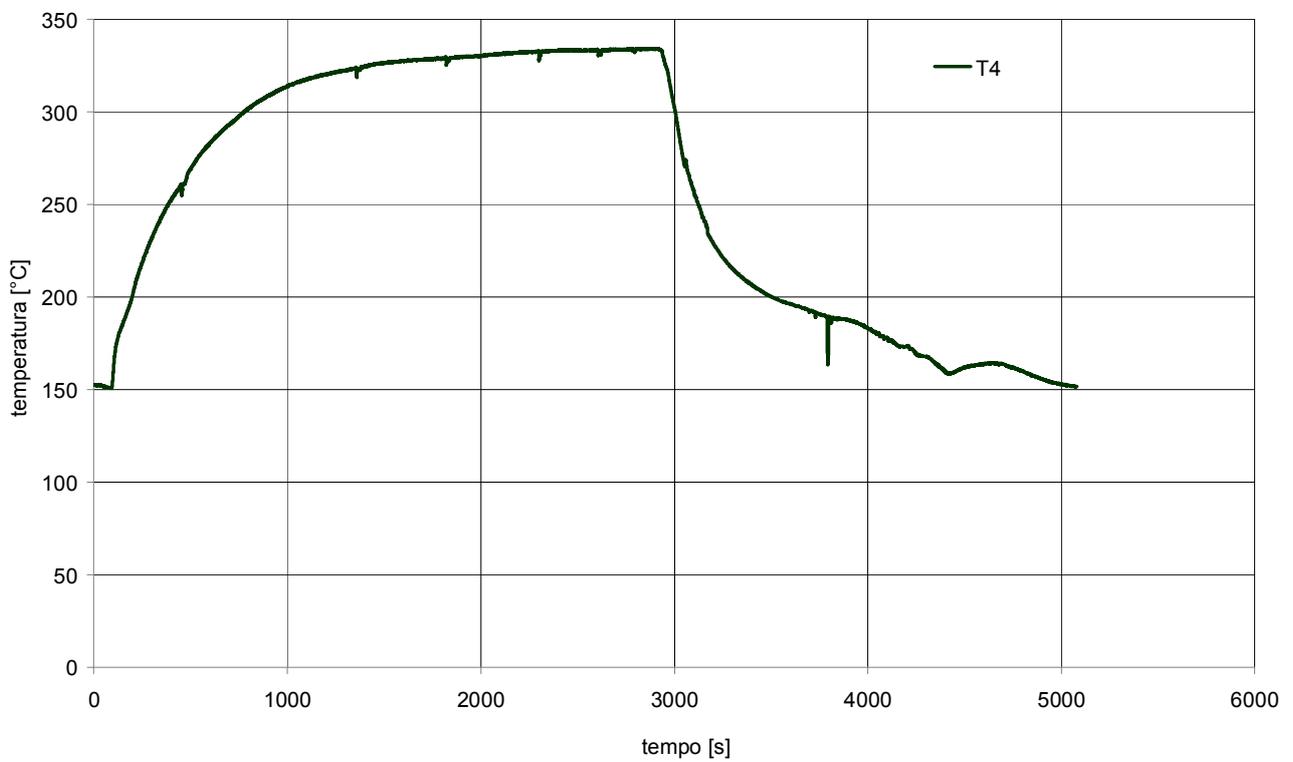
**Fig. 8. 159 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°26**



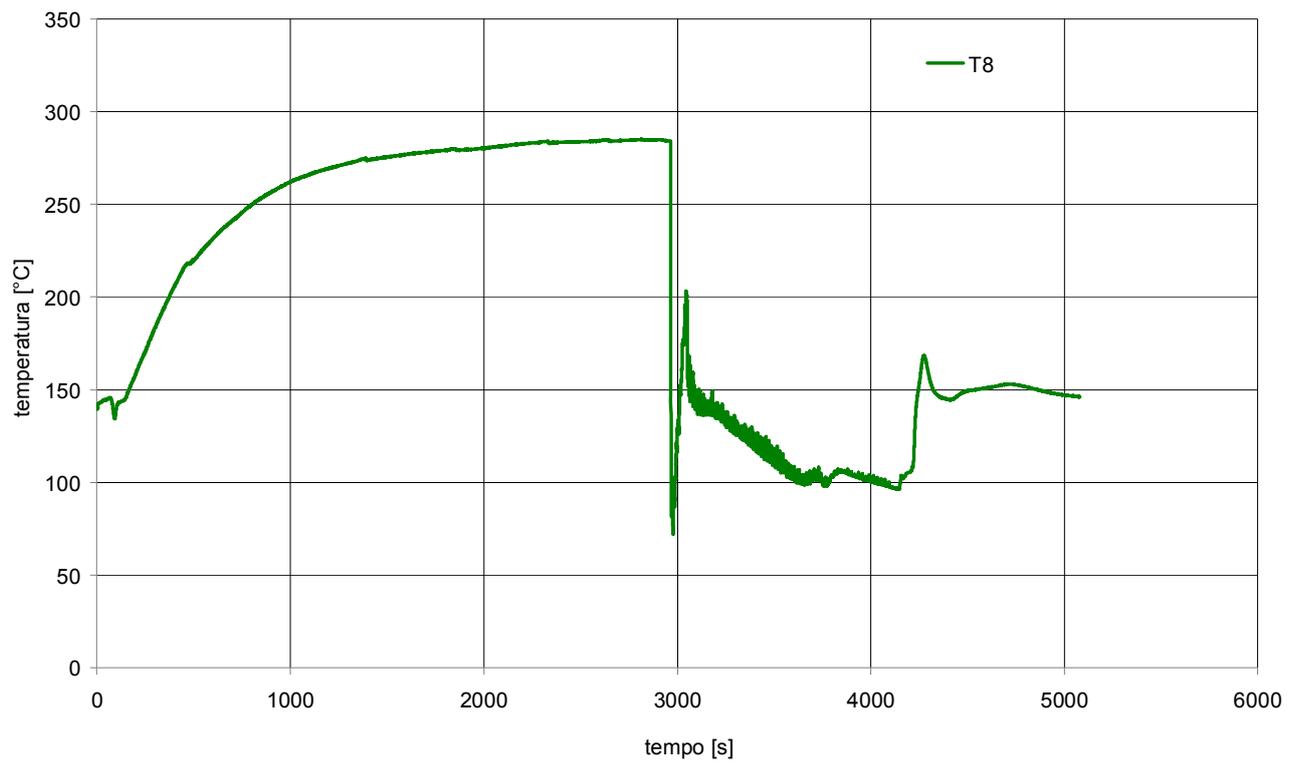
**Fig. 8. 160 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°26**



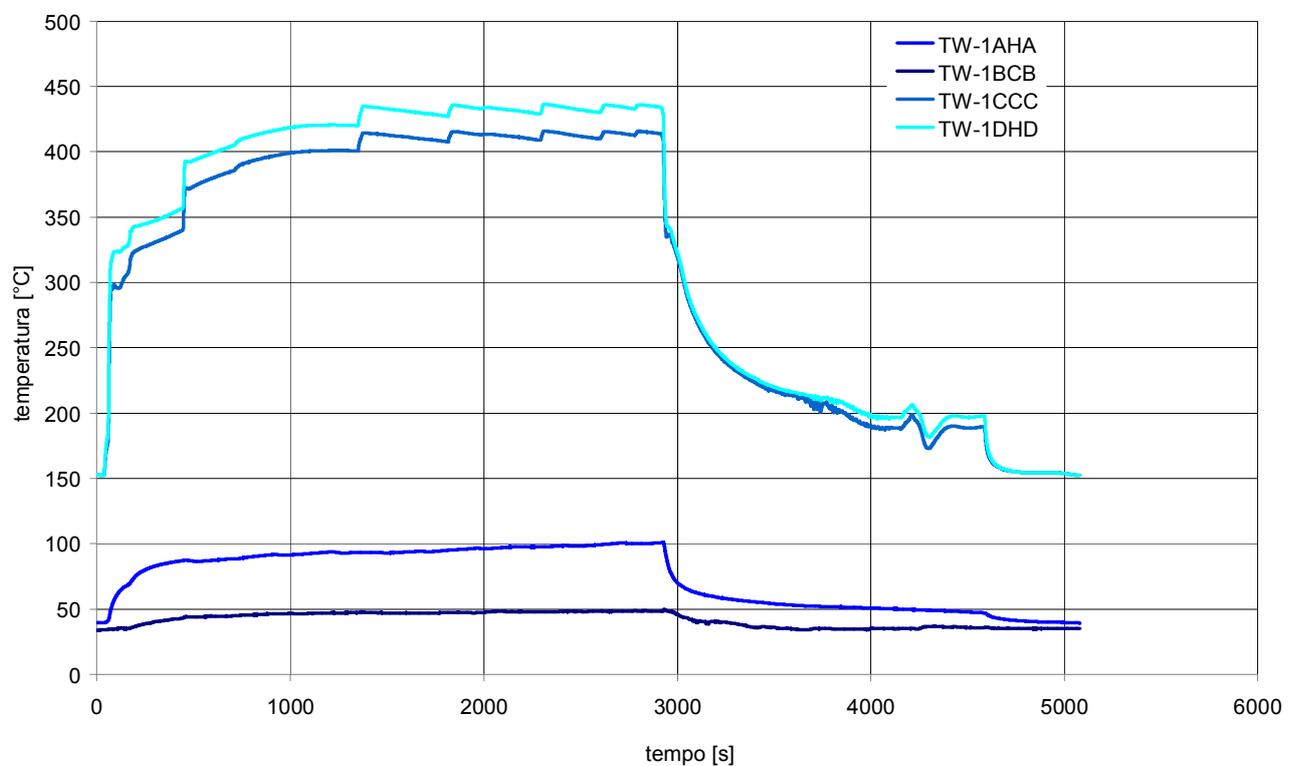
**Fig. 8. 161 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°26**



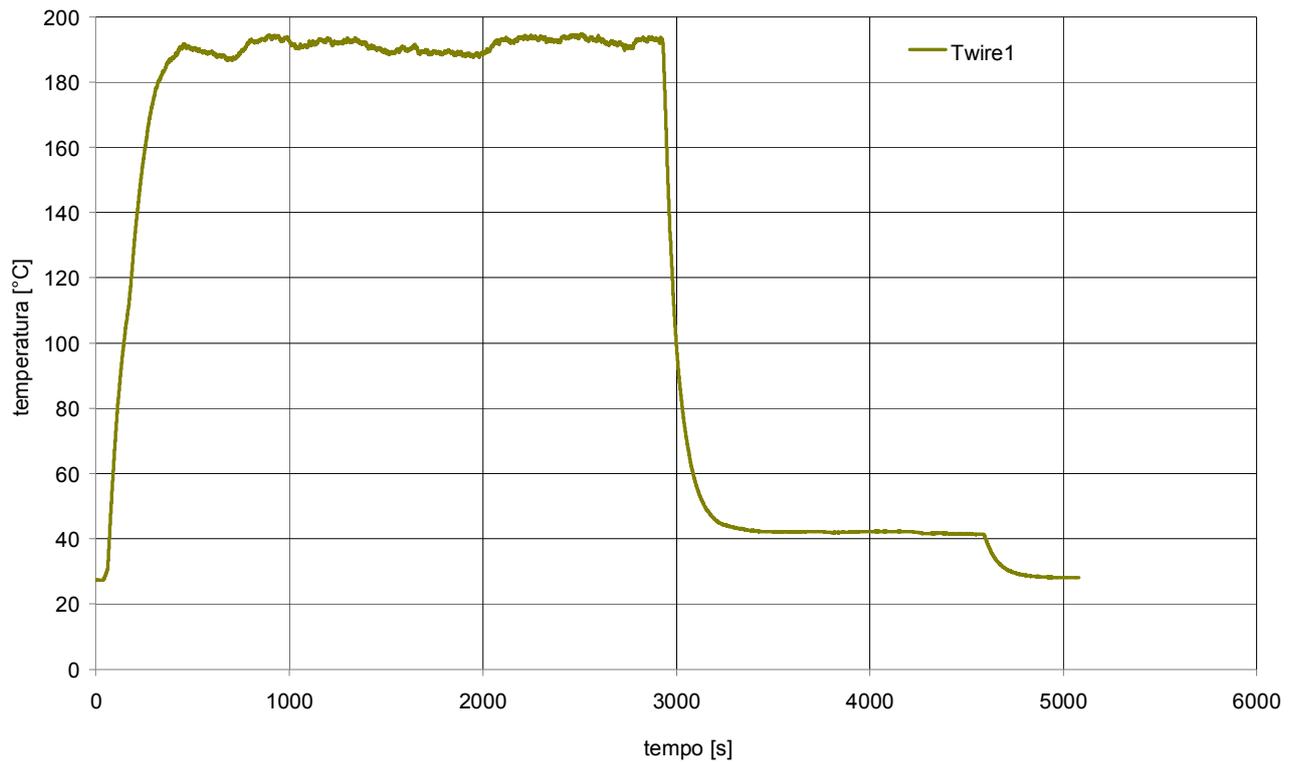
**Fig. 8. 162 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°26**



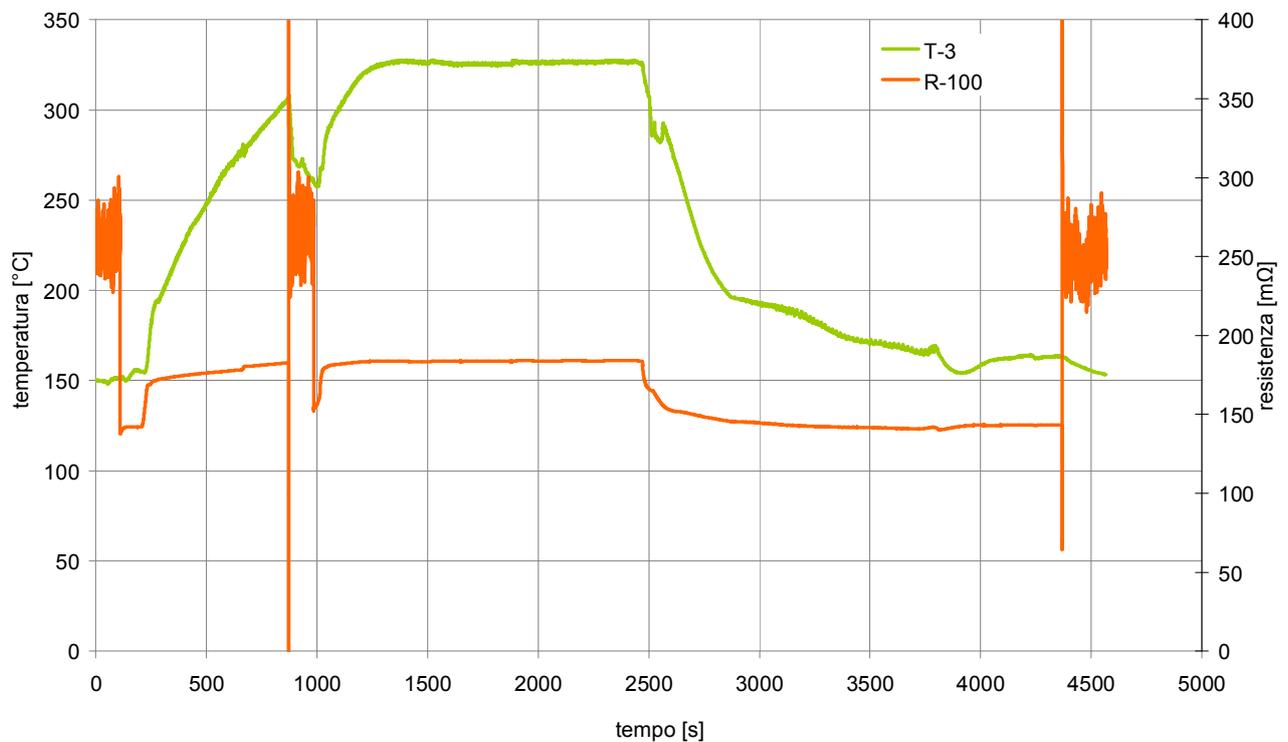
**Fig. 8. 163 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°26**



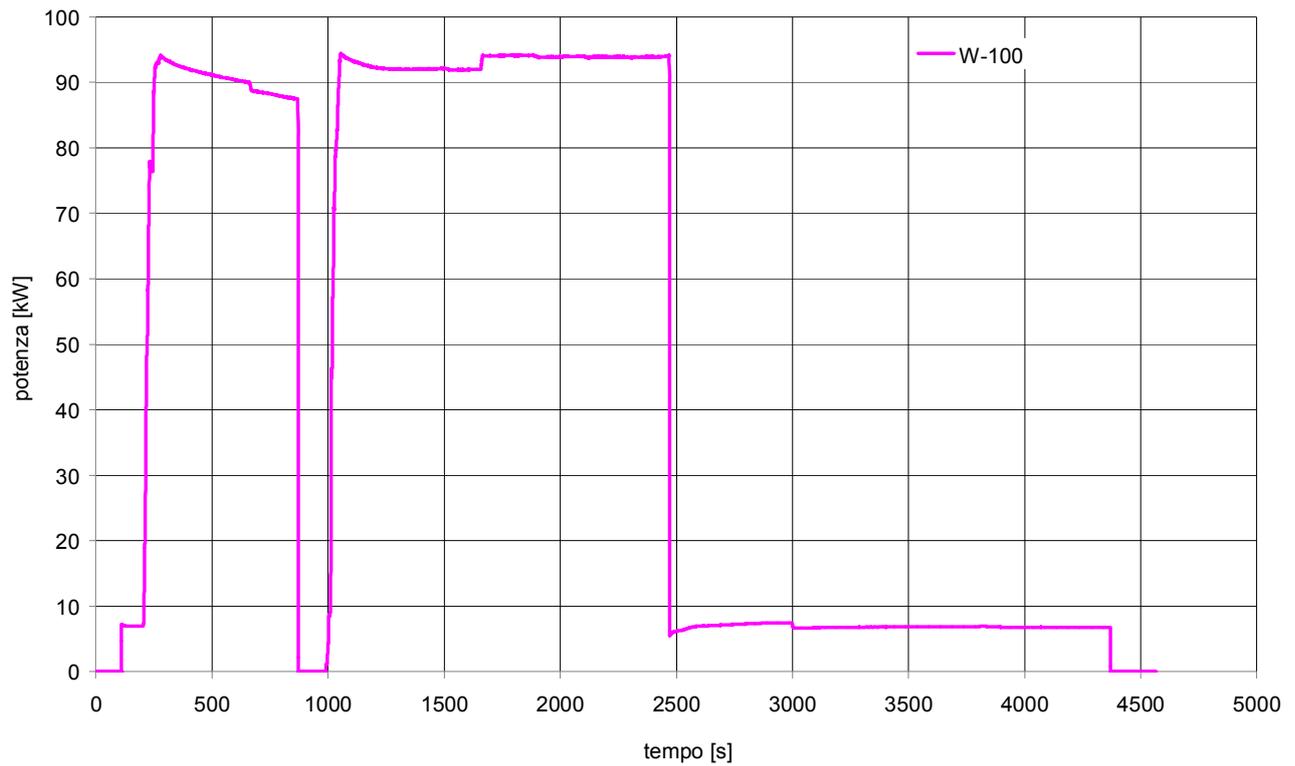
**Fig. 8. 164 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°26**



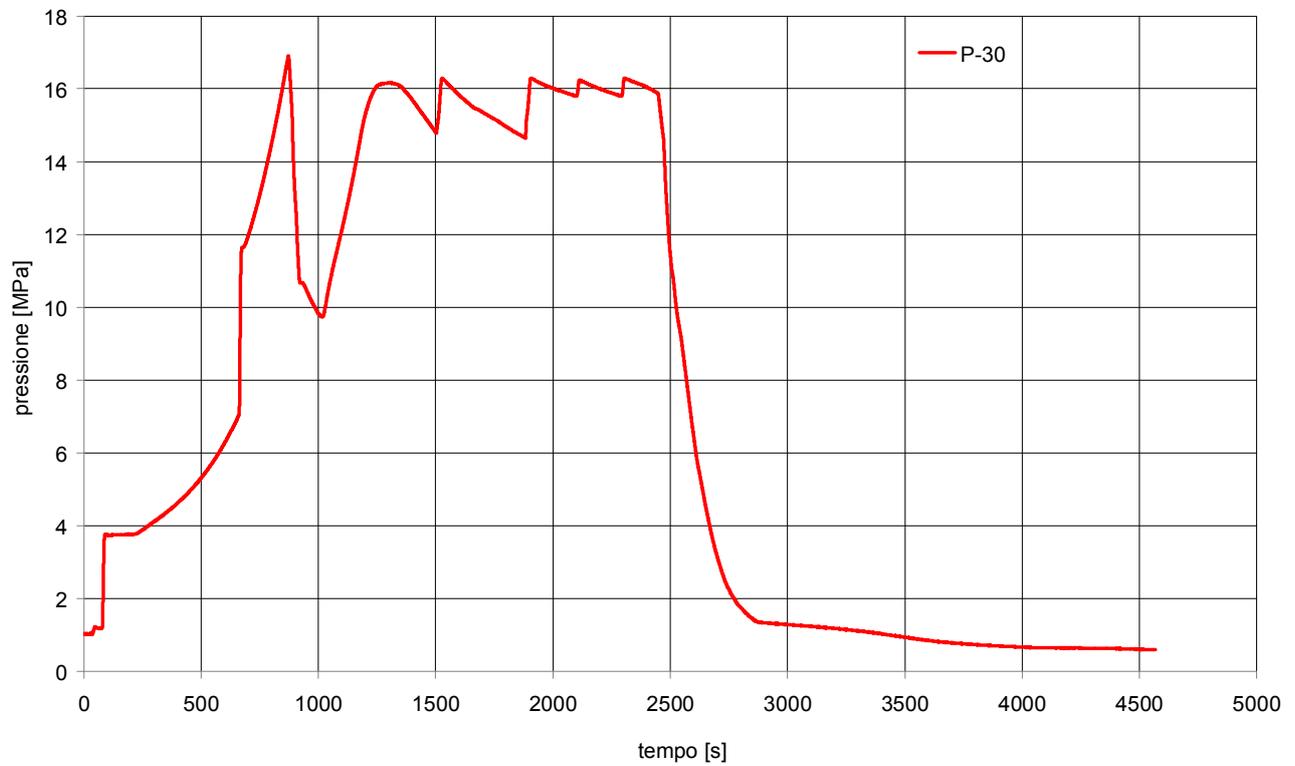
**Fig. 8. 165 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°26**



**Fig. 8. 166 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°27**



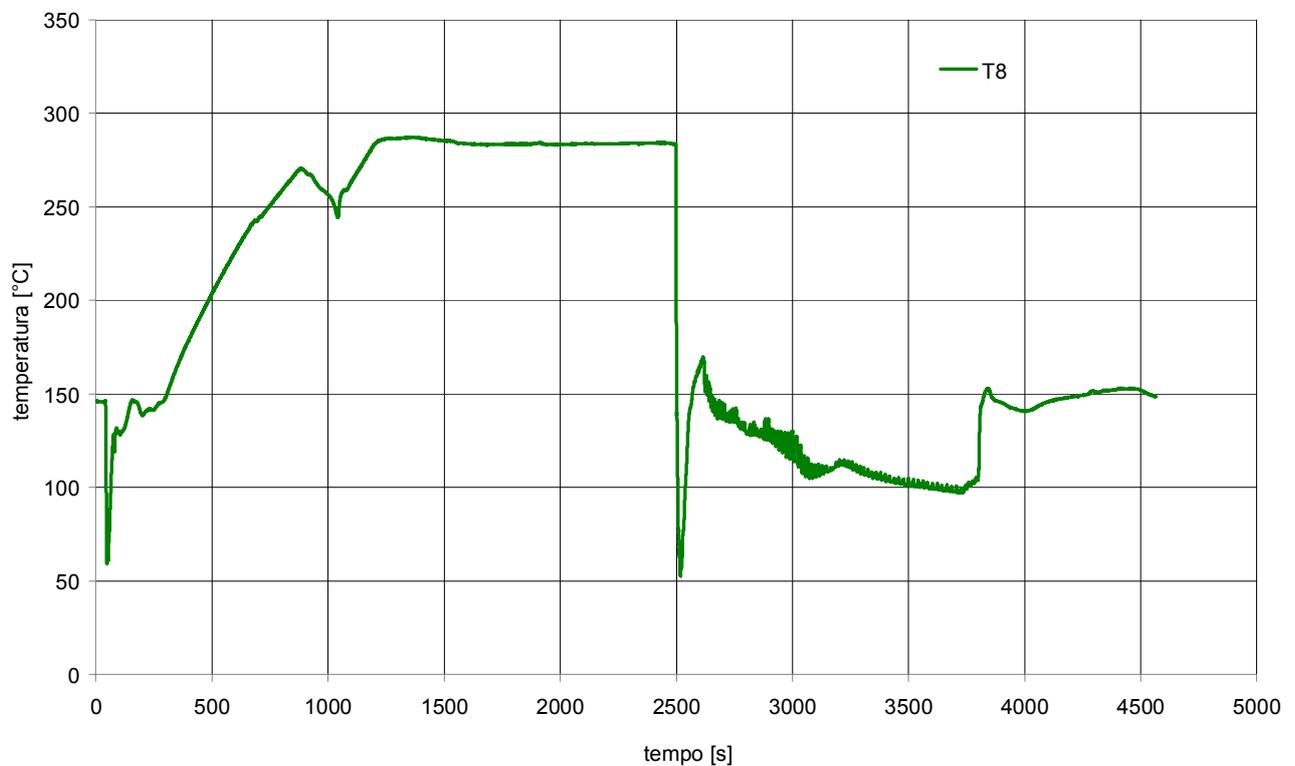
**Fig. 8. 167 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°27**



**Fig. 8. 168 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°27**



**Fig. 8. 169 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°27**



**Fig. 8. 170 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°27**

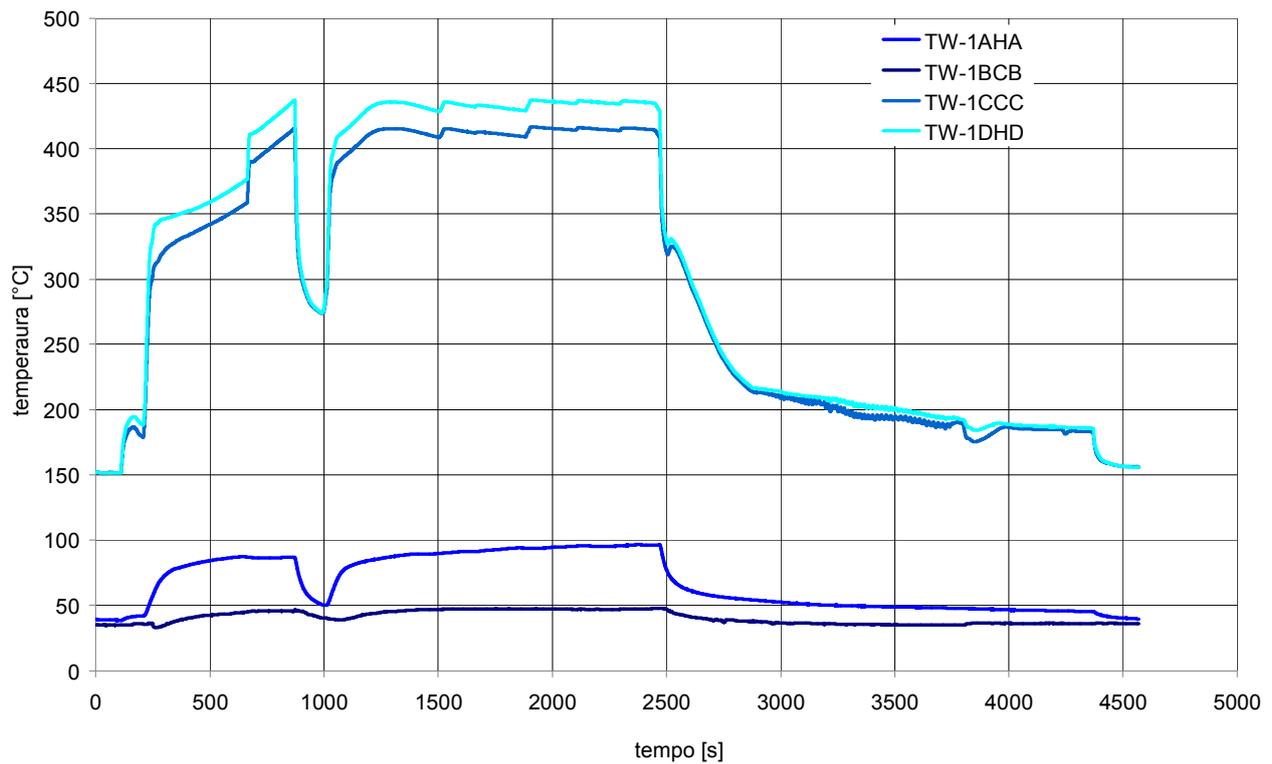


Fig. 8. 171 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°27

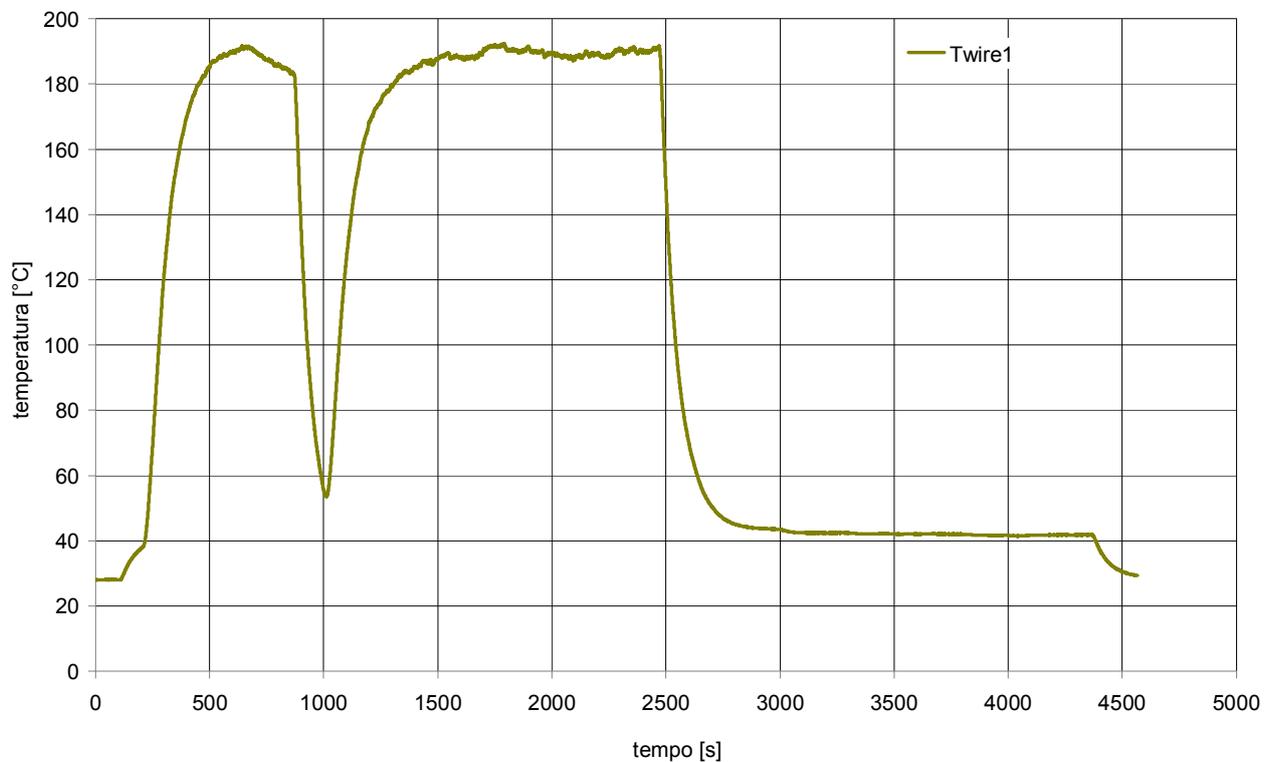
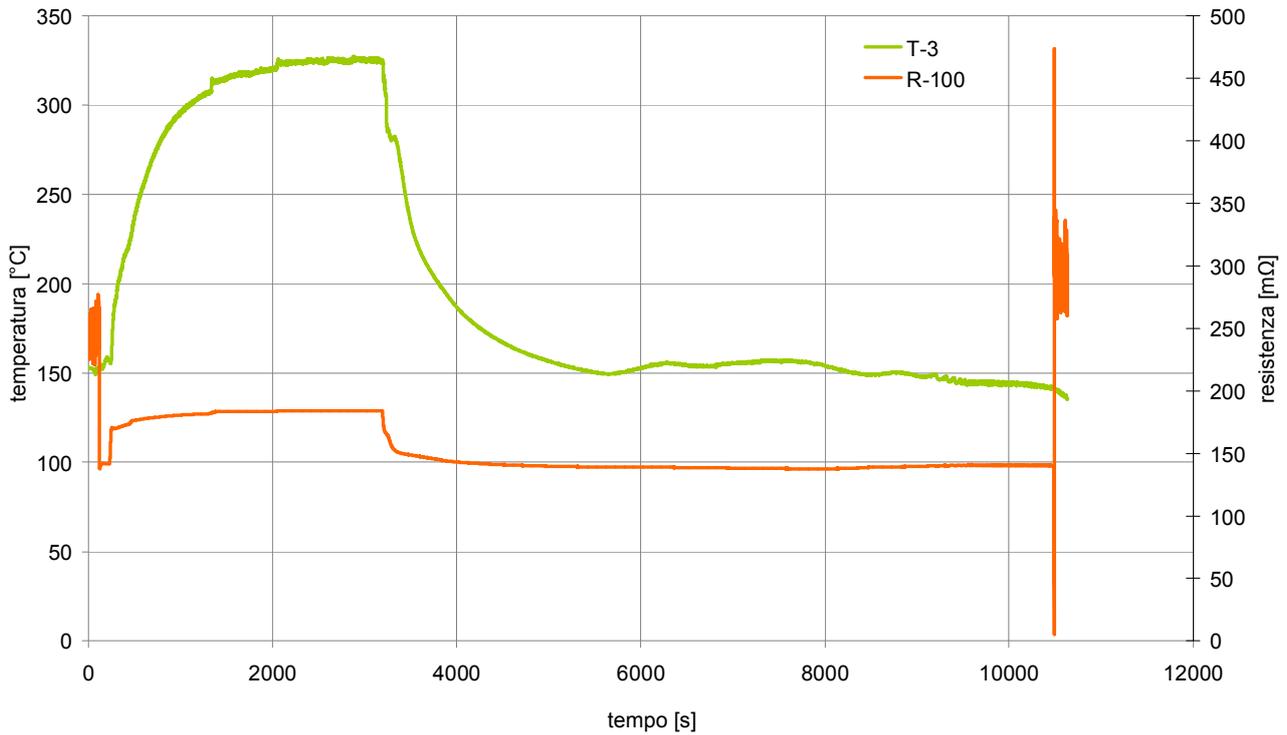
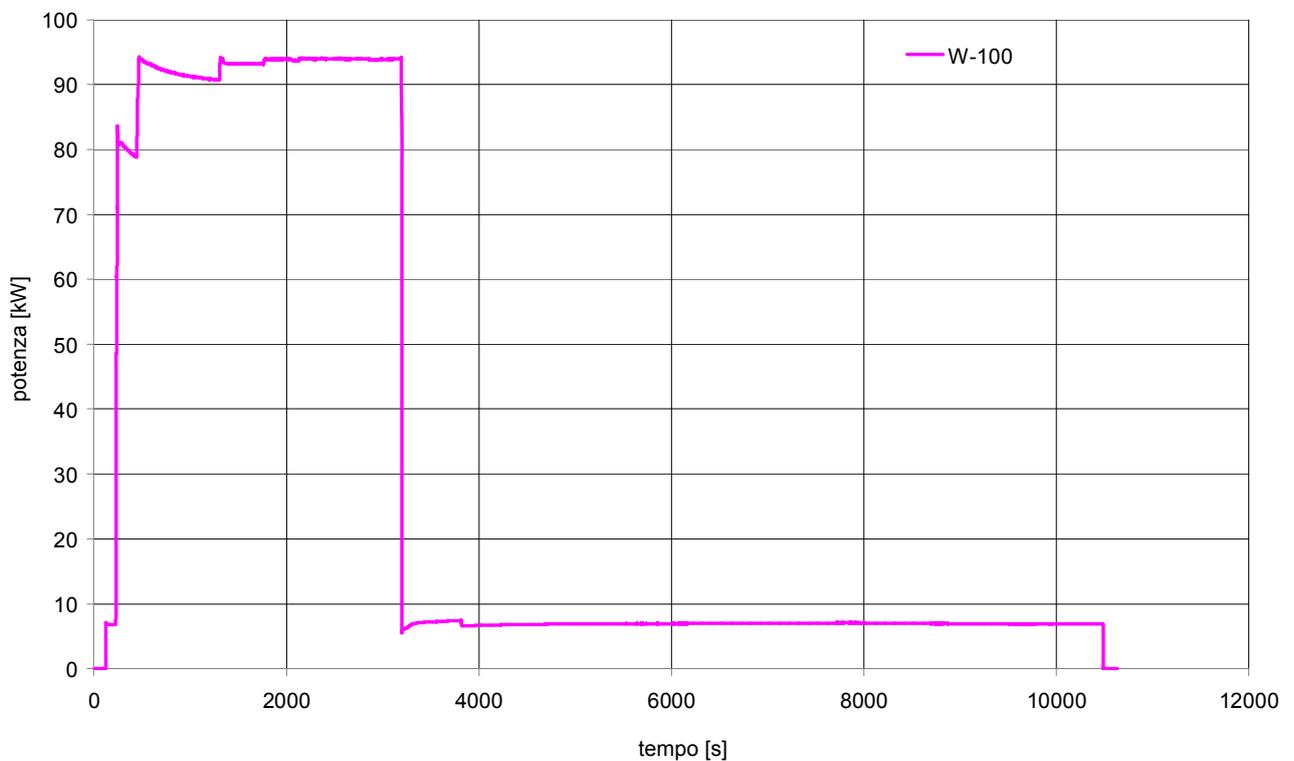


Fig. 8. 172 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°27



**Fig. 8. 173 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°28**



**Fig. 8. 174 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°28**

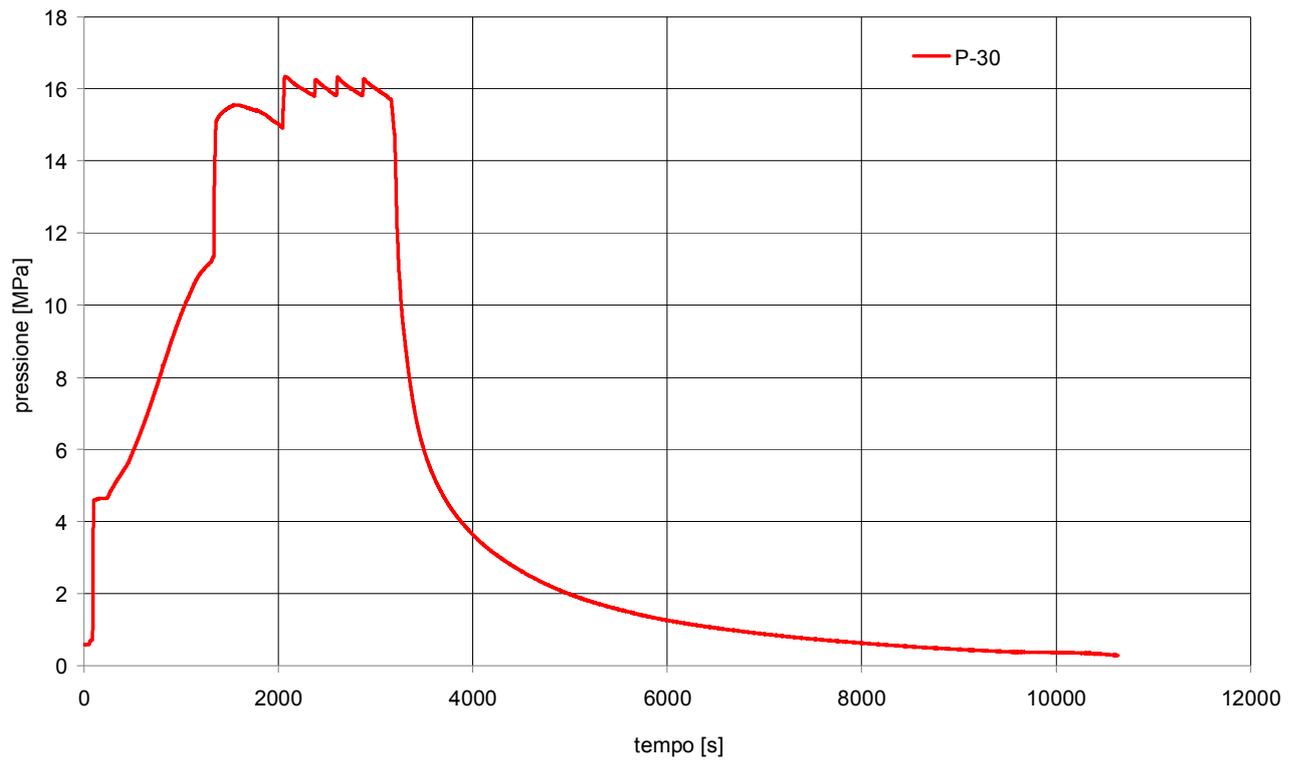


Fig. 8. 175 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°28

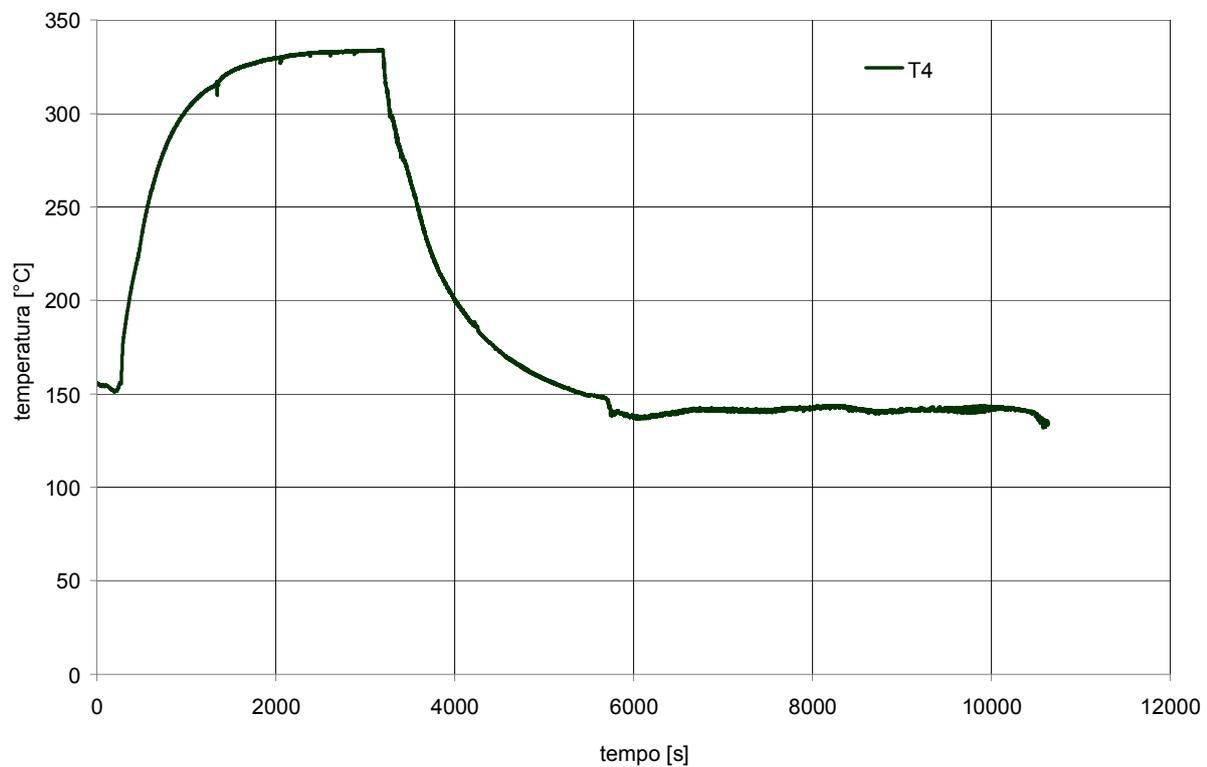
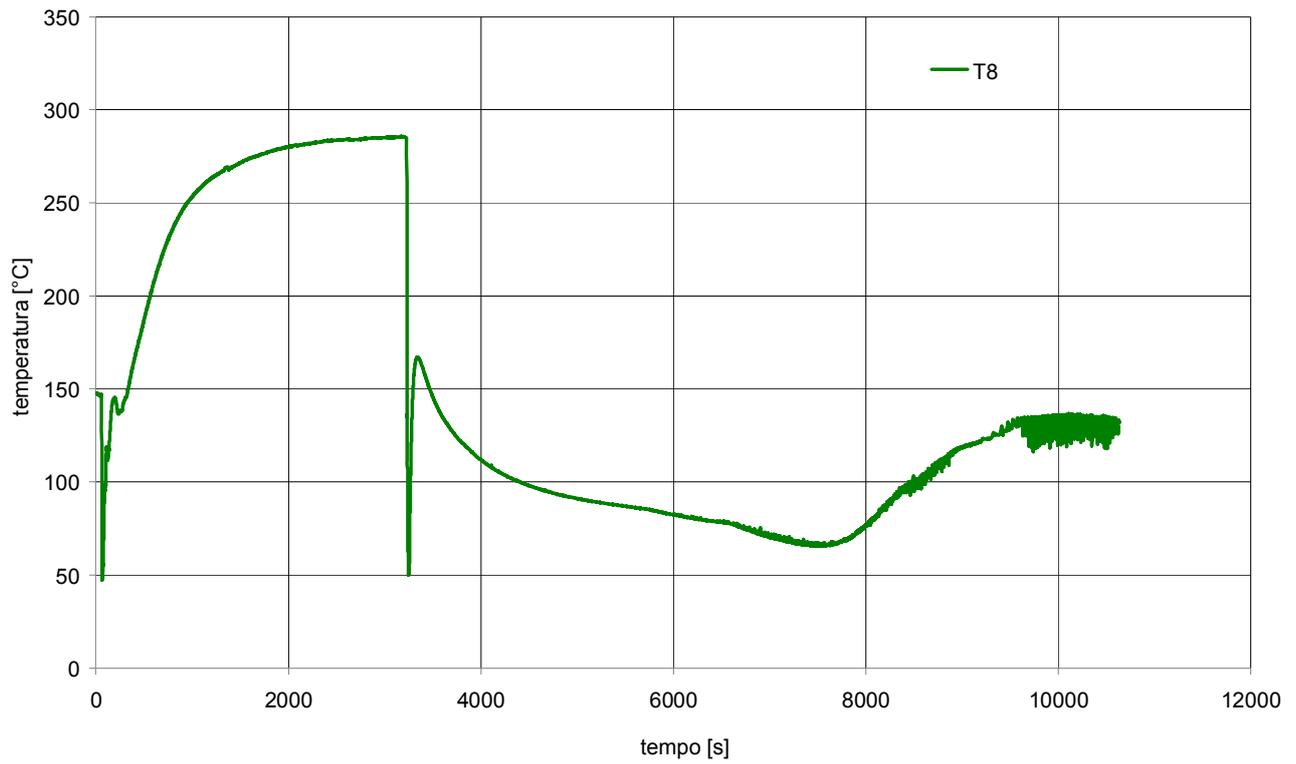
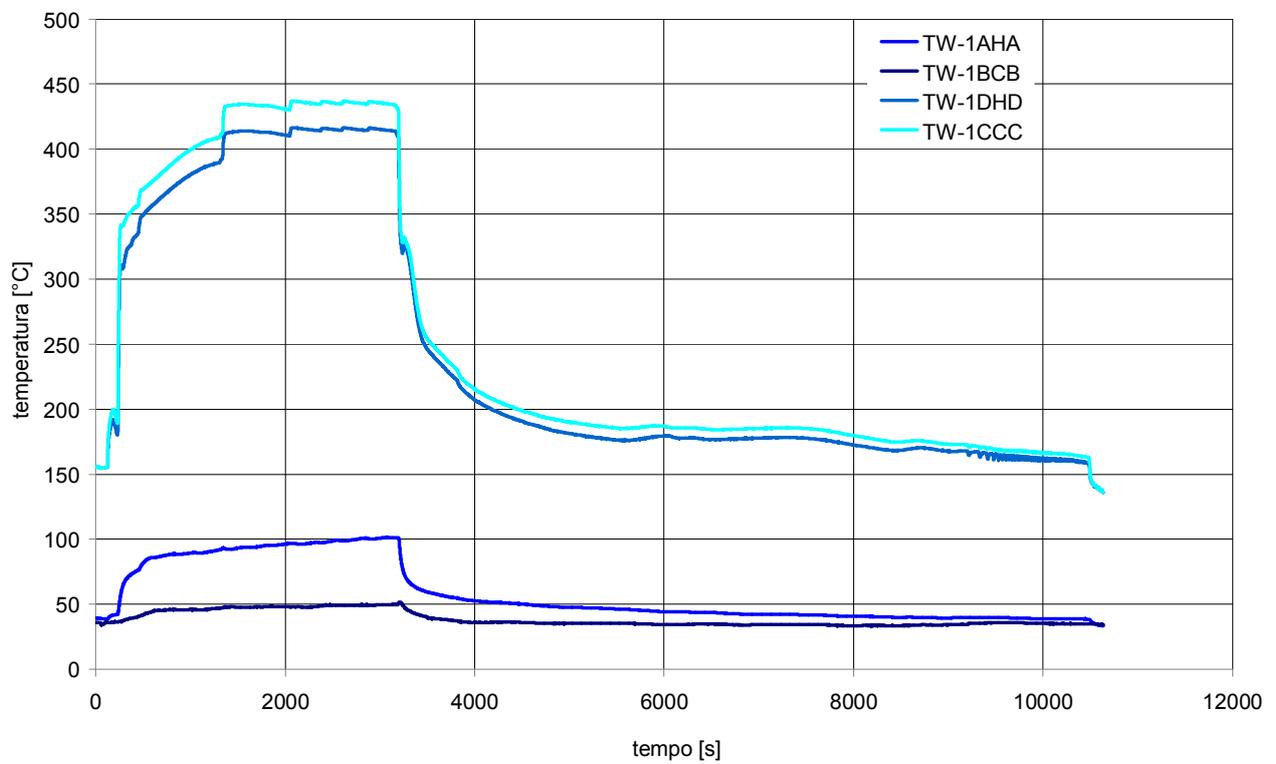


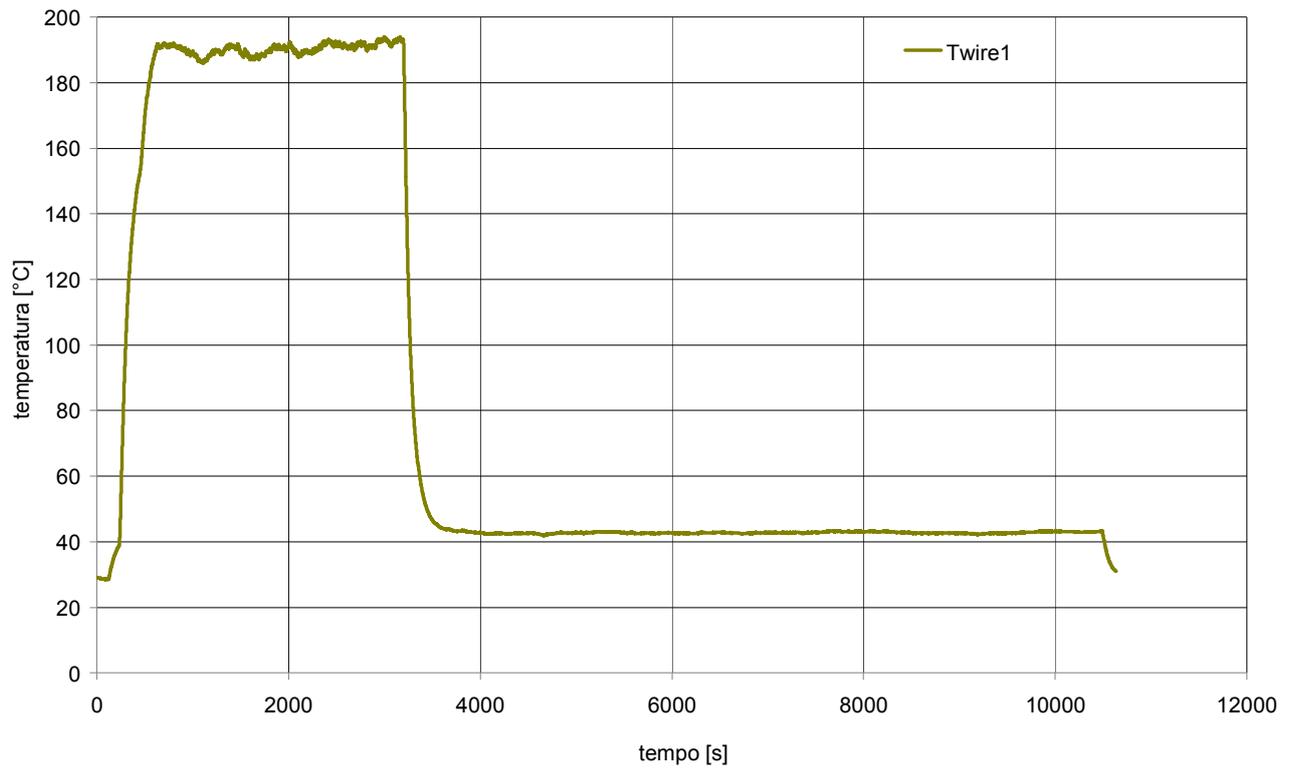
Fig. 8. 176 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°28



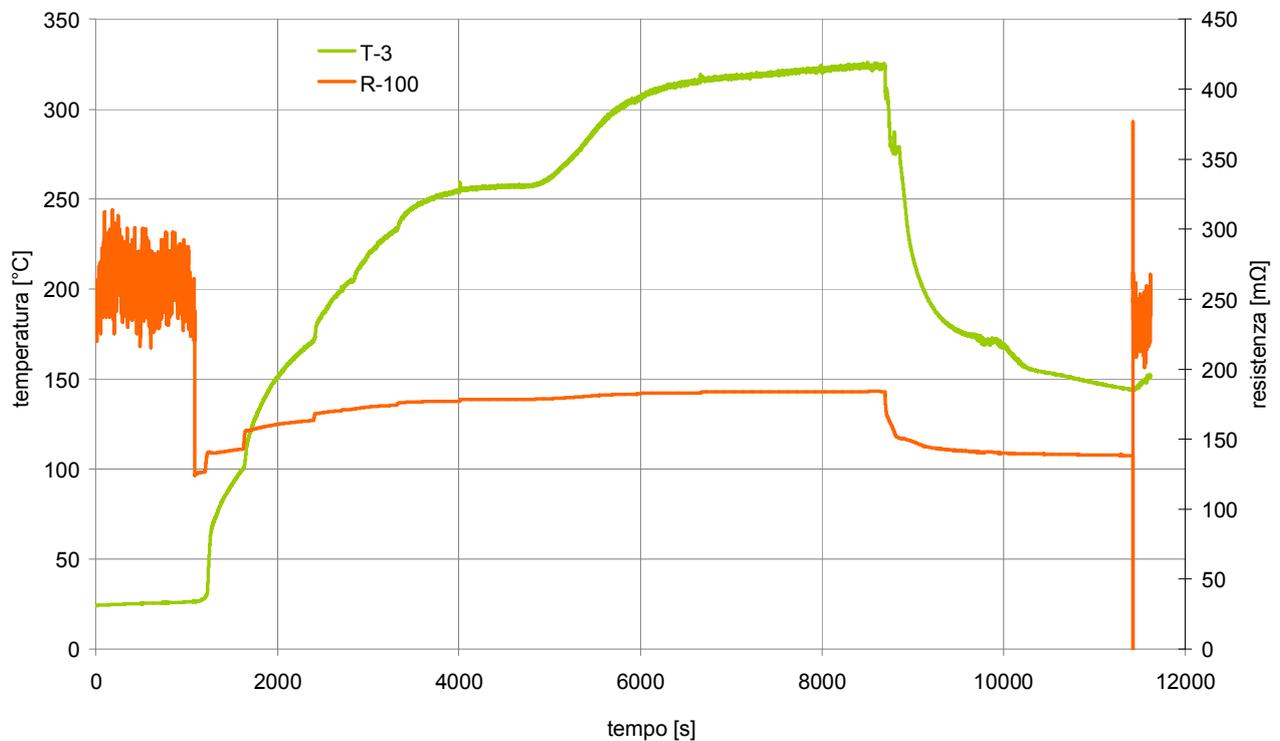
**Fig. 8. 177 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°28**



**Fig. 8. 178 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°28**



**Fig. 8. 179 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°28**



**Fig. 8. 180 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°29**

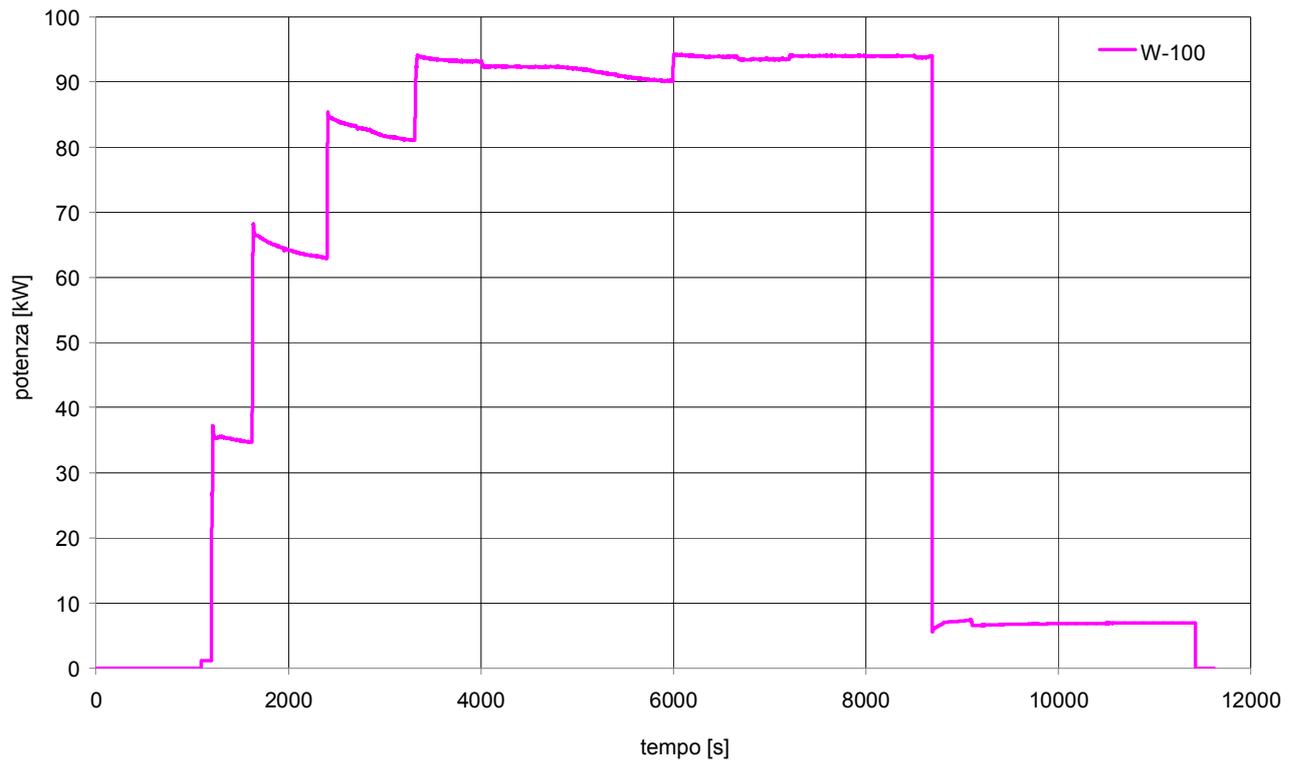


Fig. 8. 181 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°29

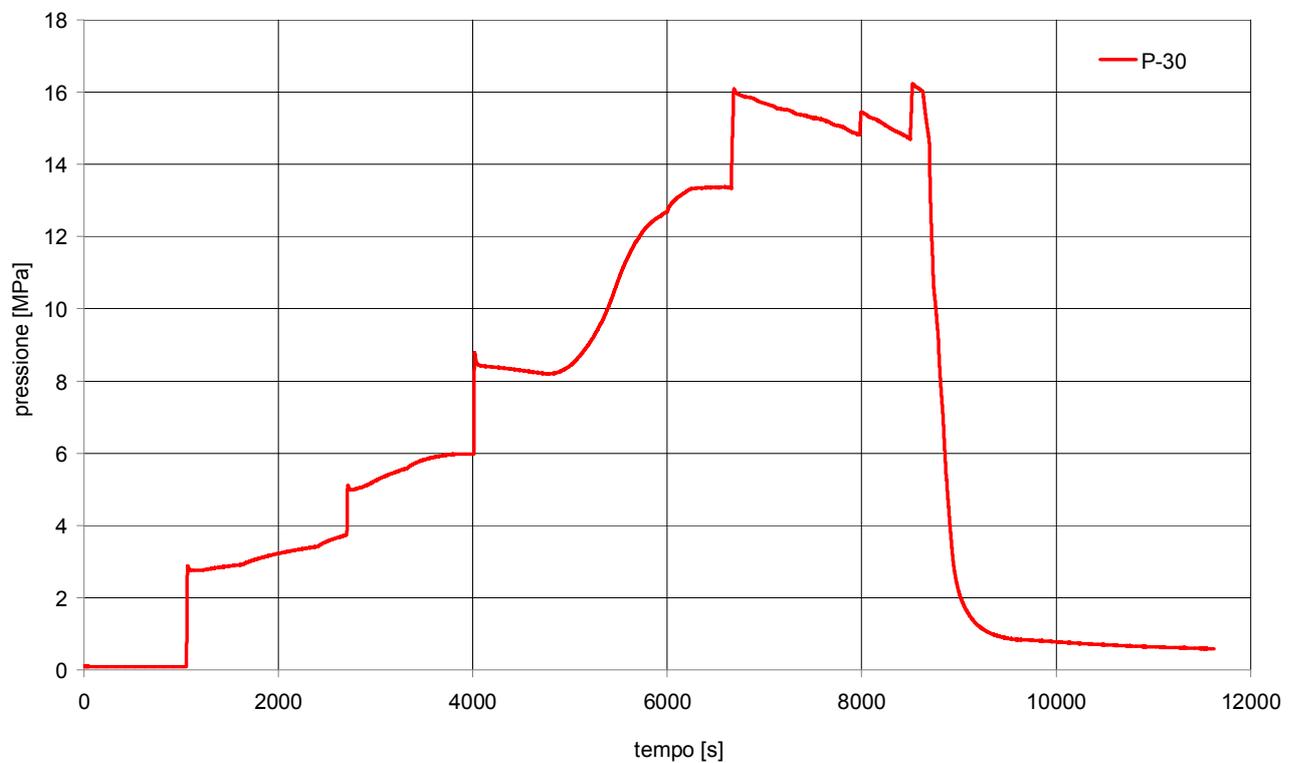
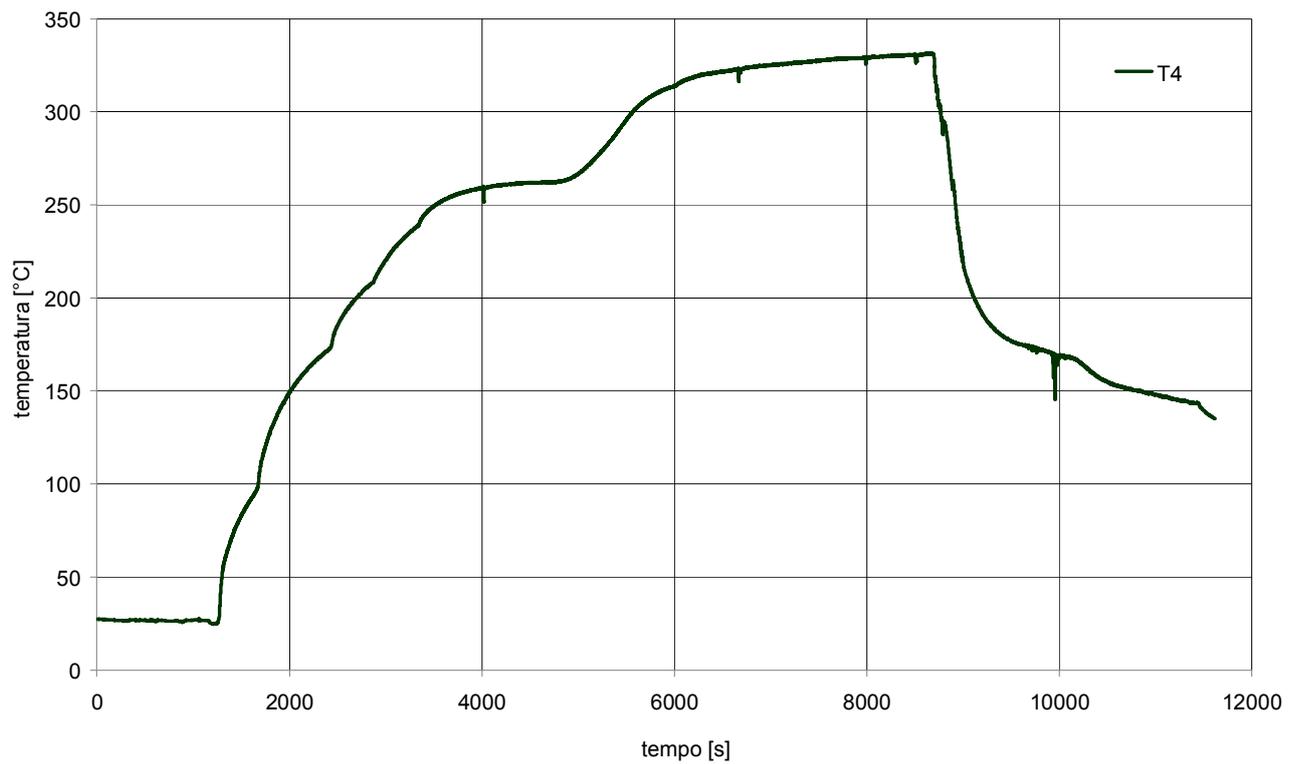
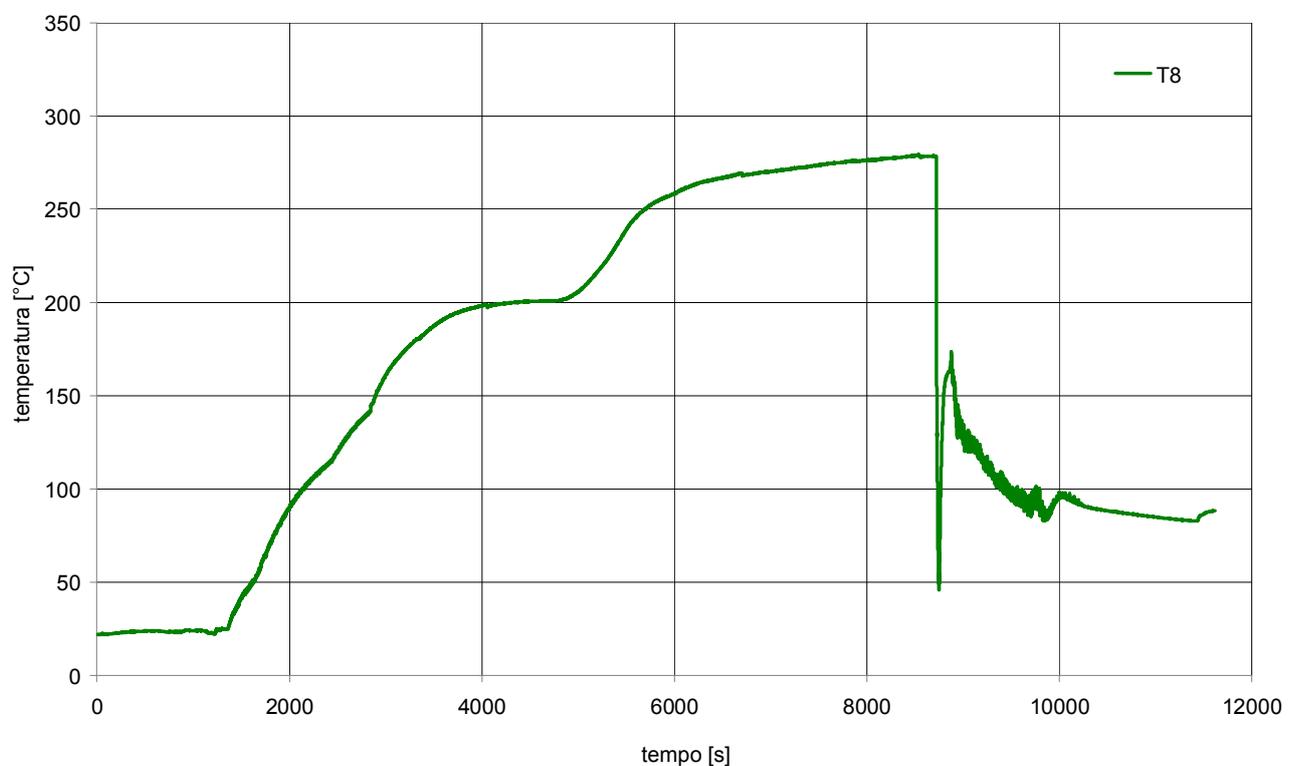


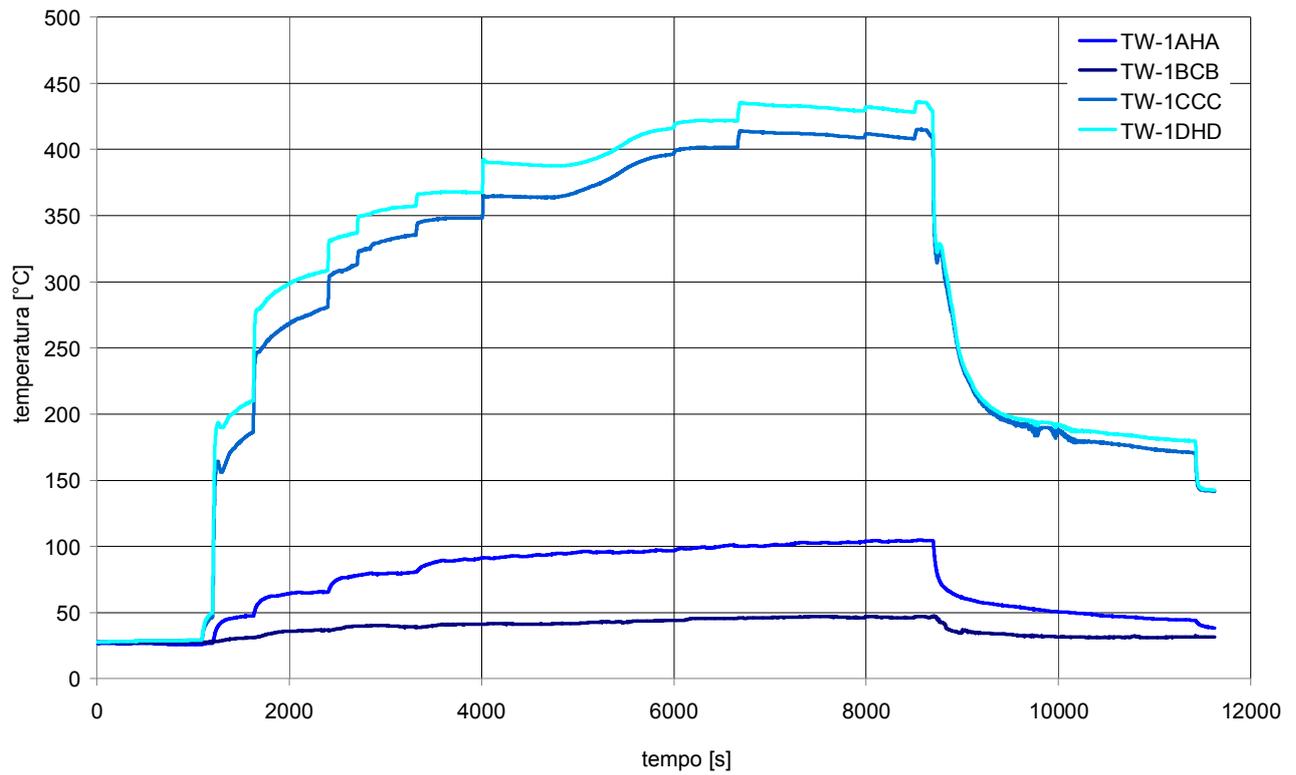
Fig. 8. 182 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°29



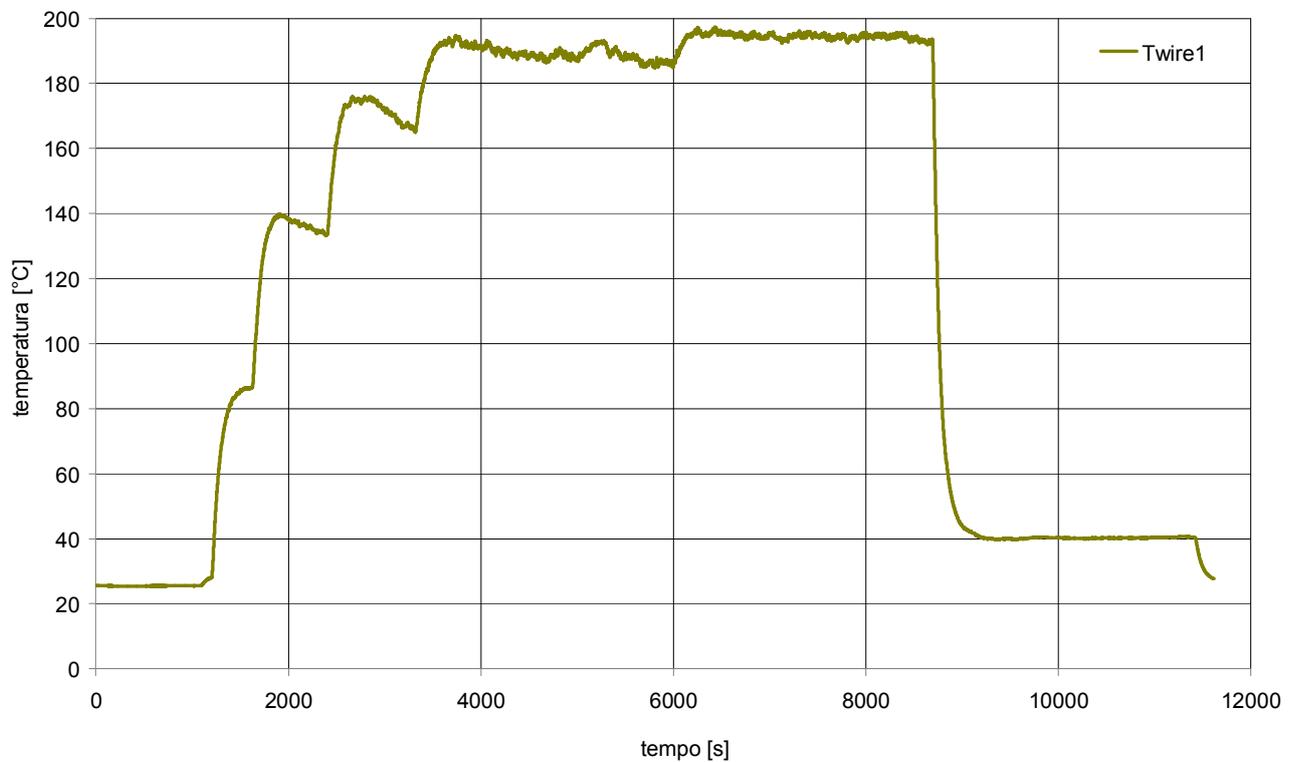
**Fig. 8. 183 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°29**



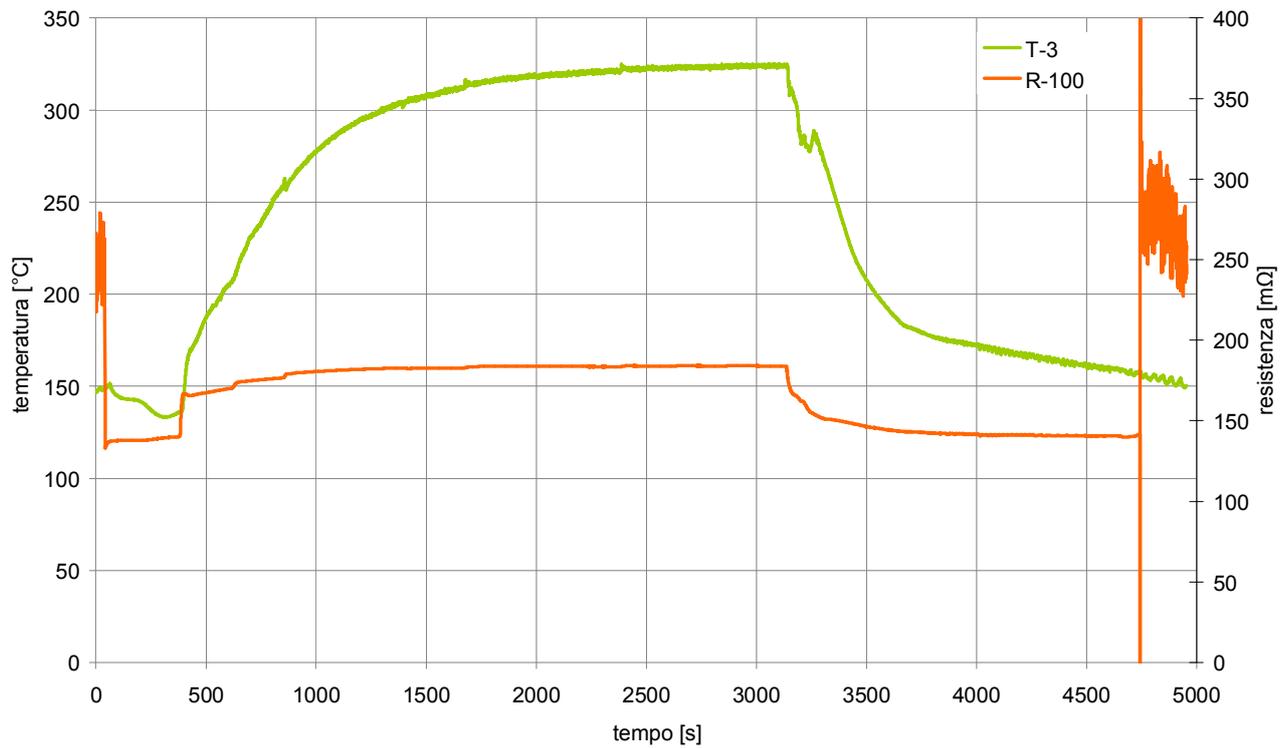
**Fig. 8. 184 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°29**



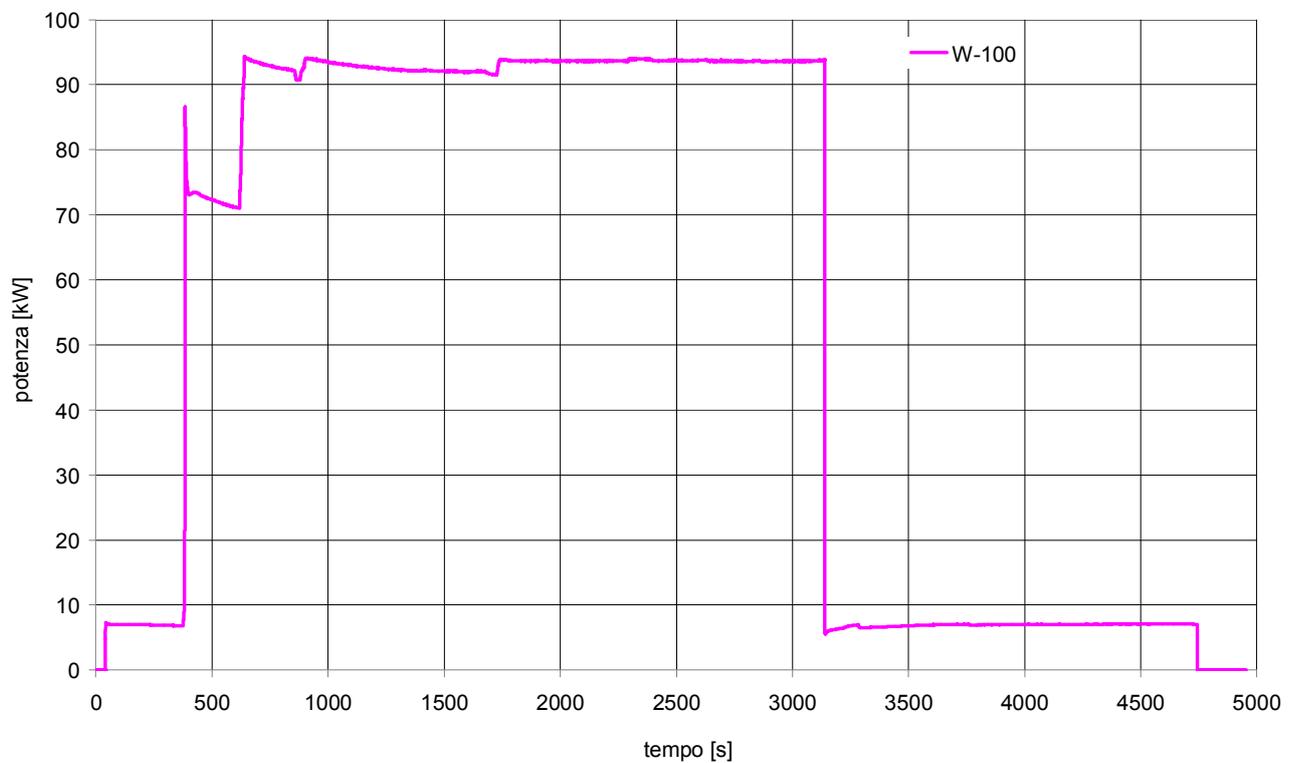
**Fig. 8. 185 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°29**



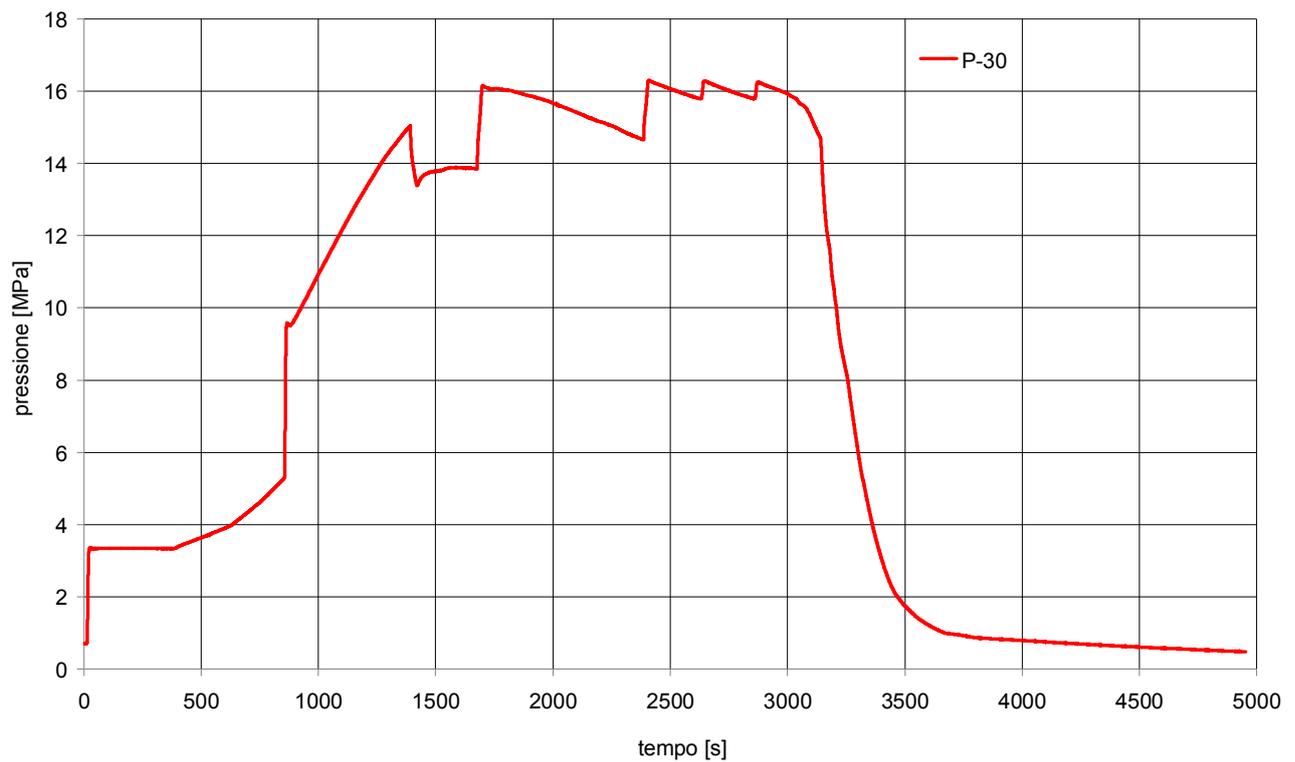
**Fig. 8. 186 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°29**



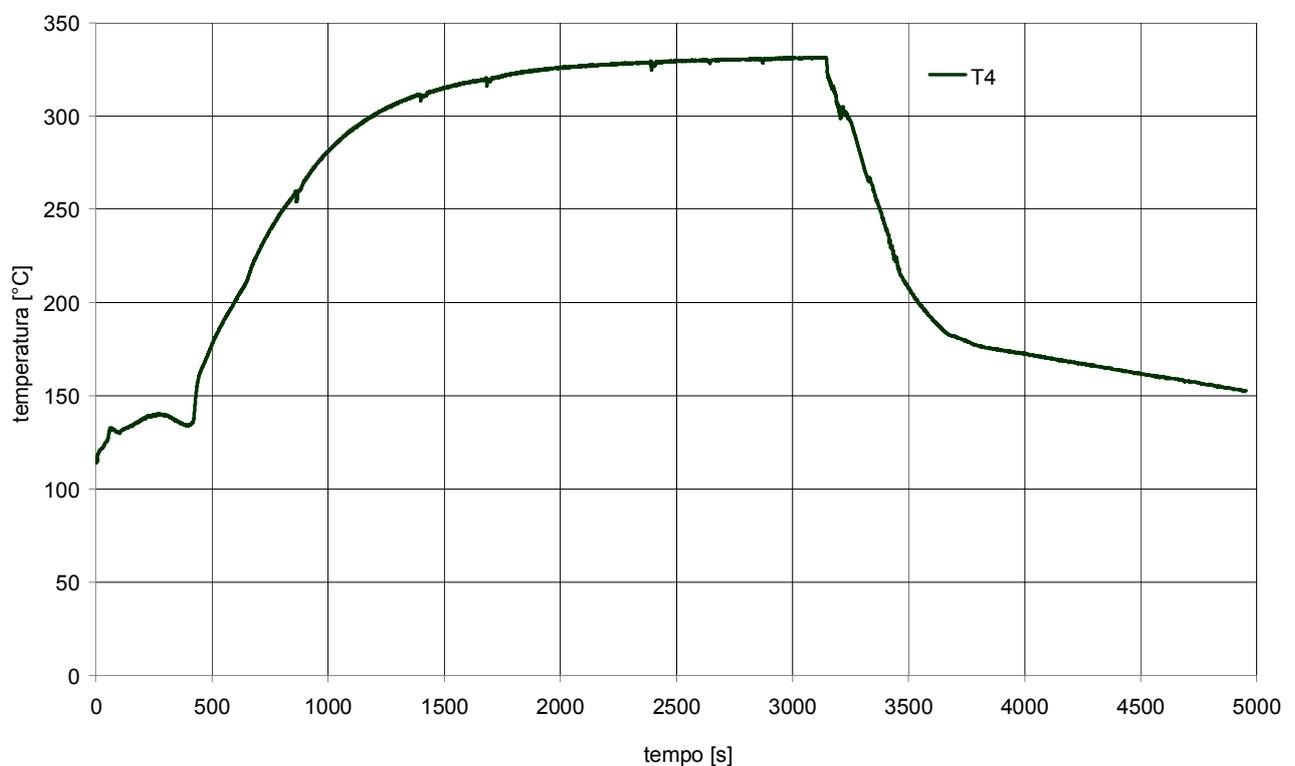
**Fig. 8. 187 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°30**



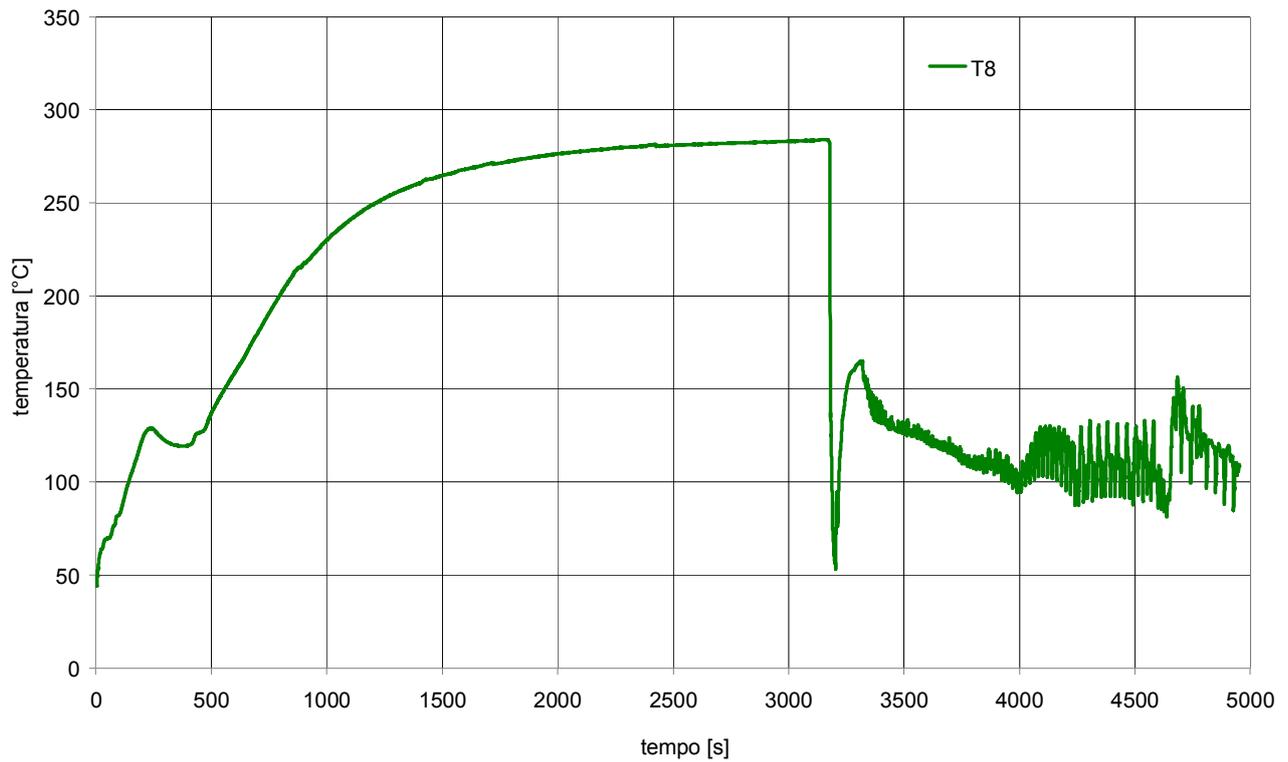
**Fig. 8. 188 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°30**



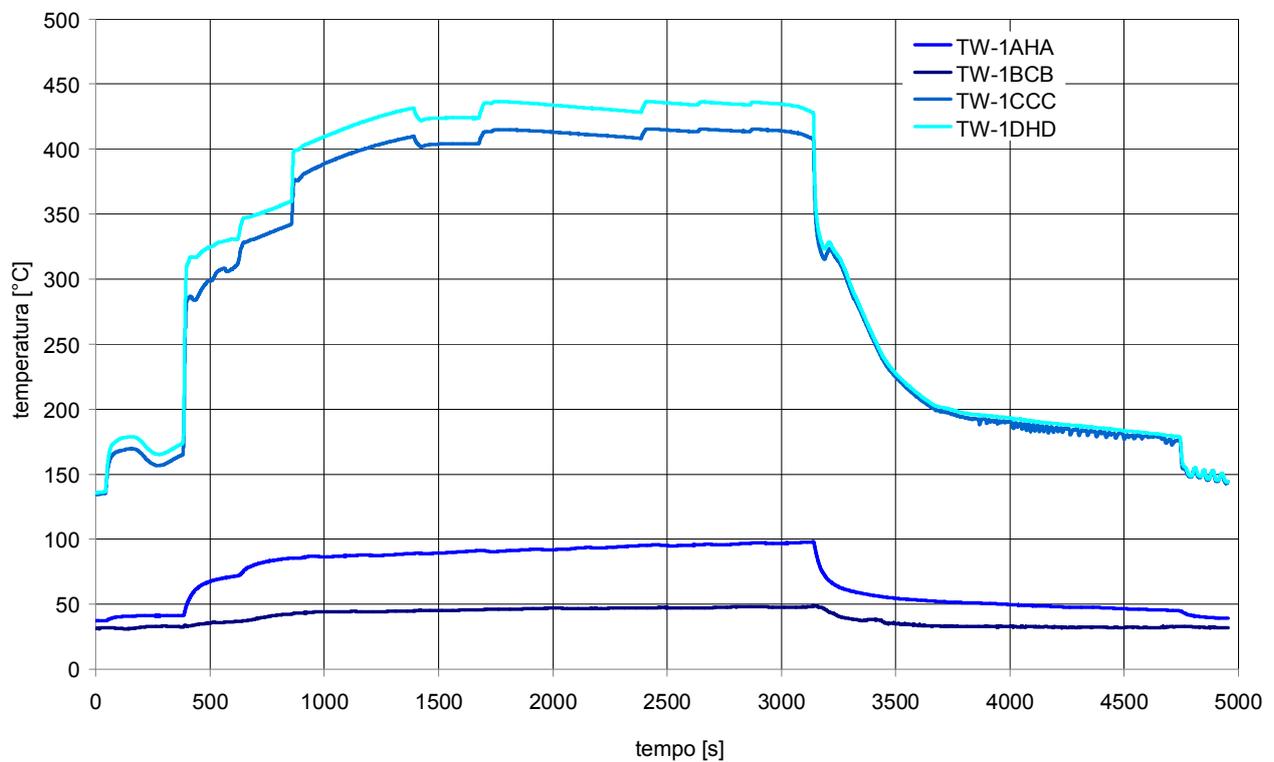
**Fig. 8. 189 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°30**



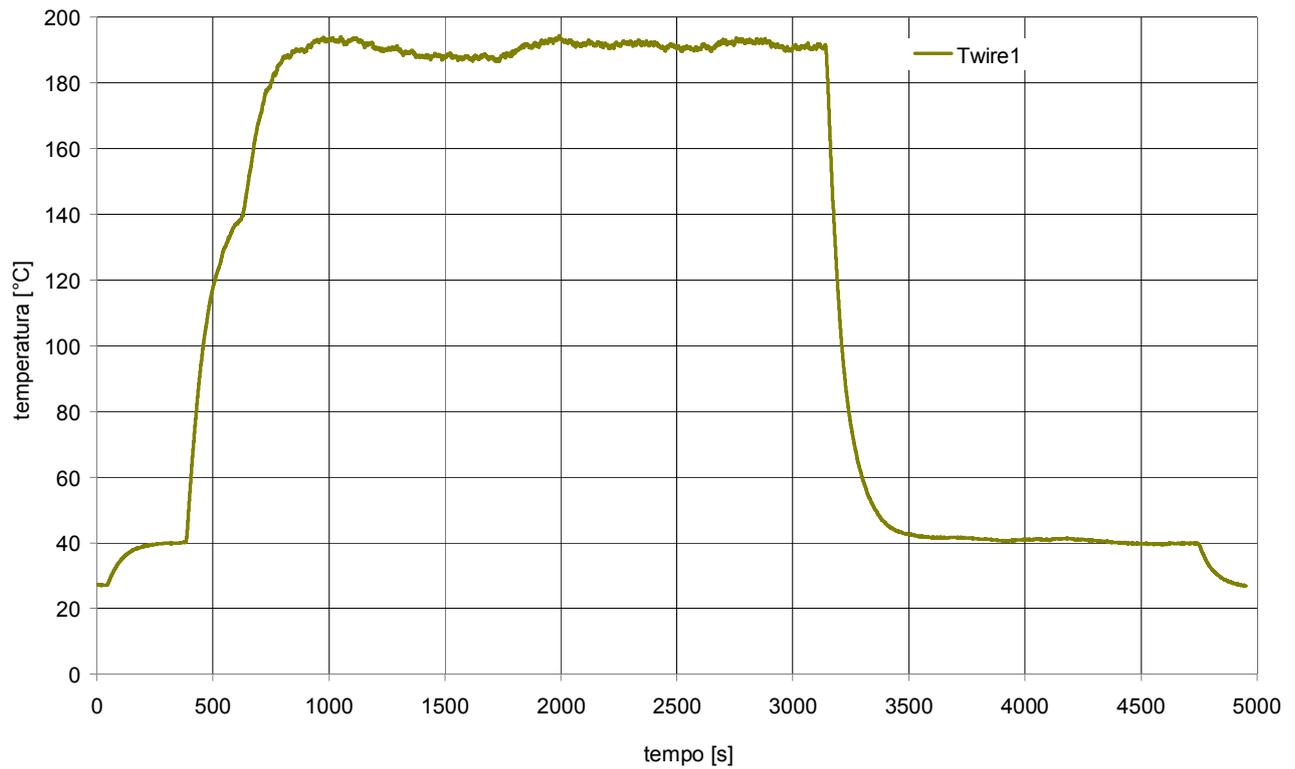
**Fig. 8. 190 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°30**



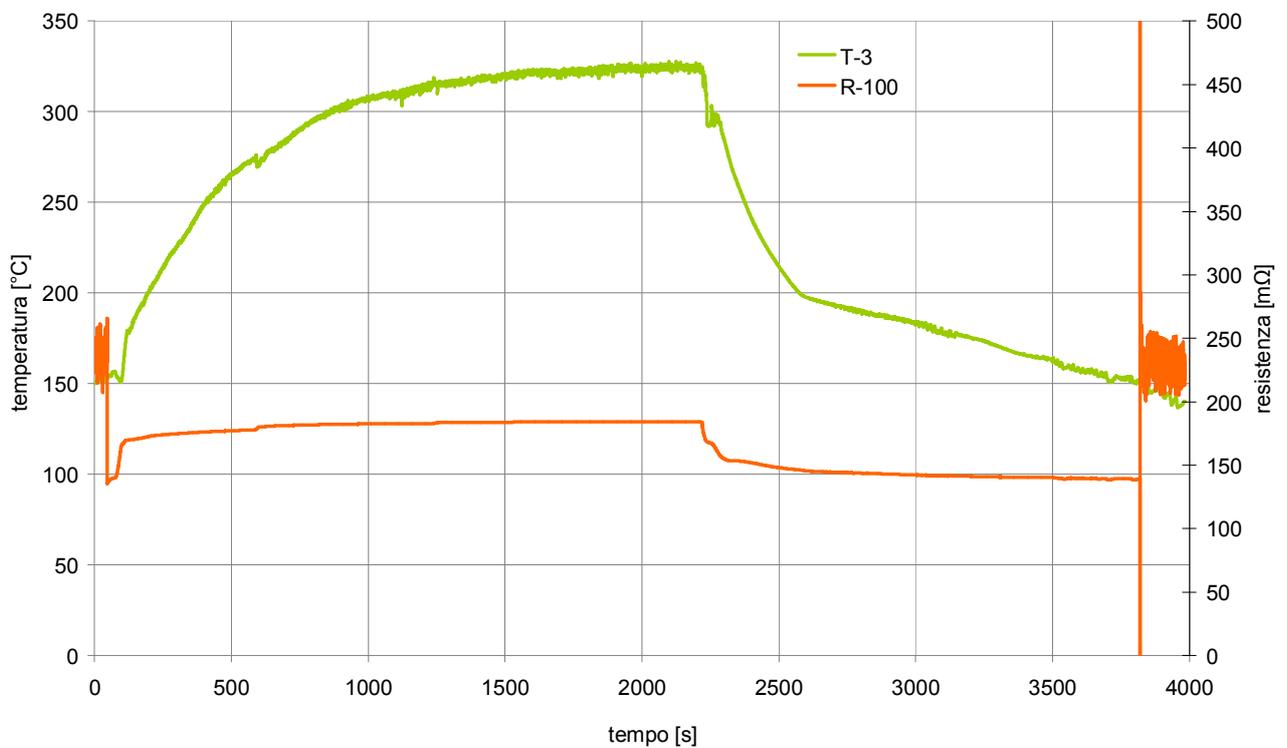
**Fig. 8. 191 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°30**



**Fig. 8. 192 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°30**



**Fig. 8. 193 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°30**



**Fig. 8. 194 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°31**

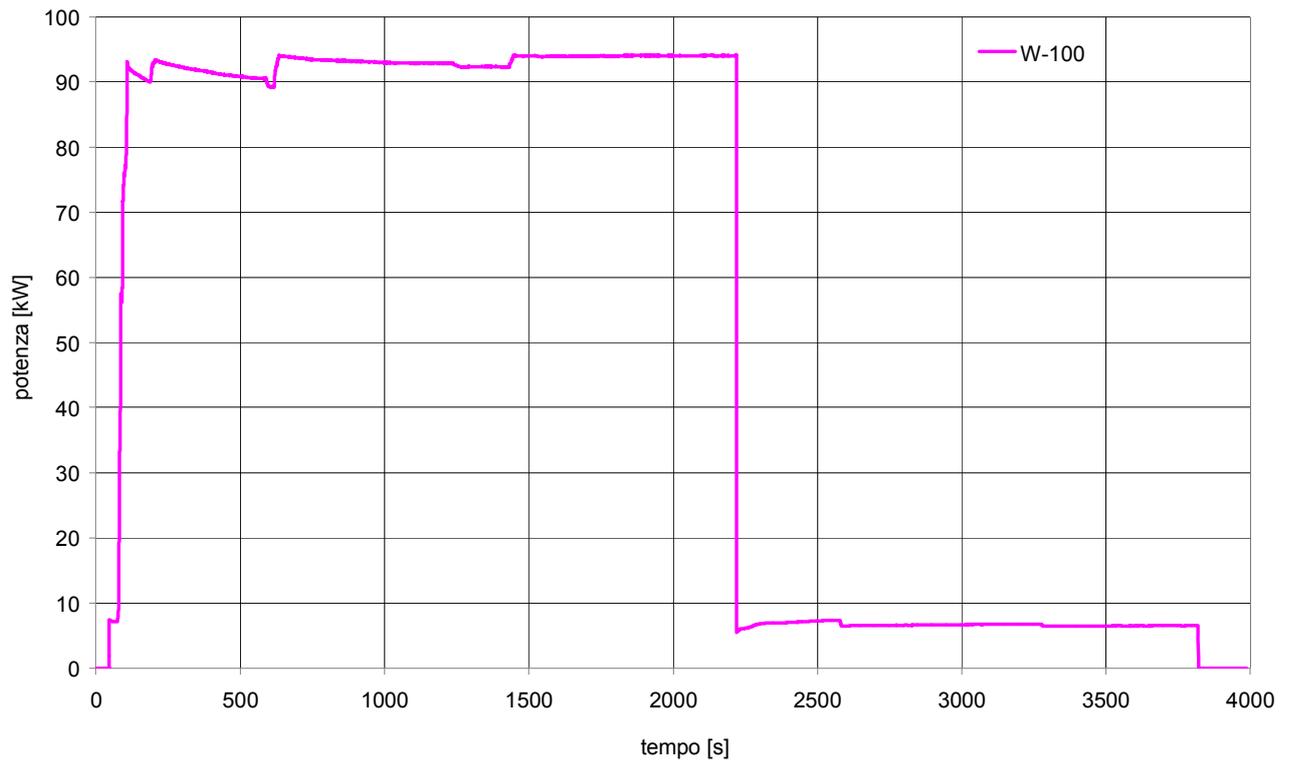


Fig. 8. 195 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°31

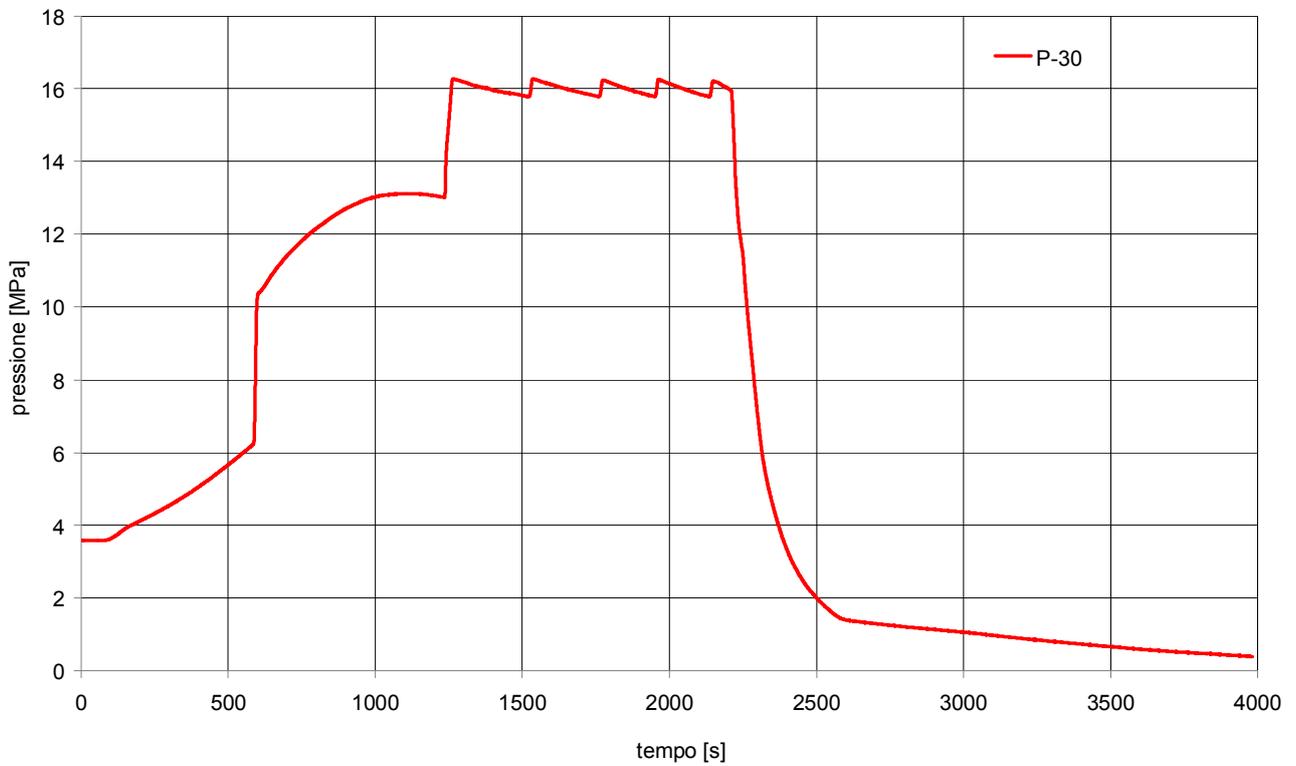
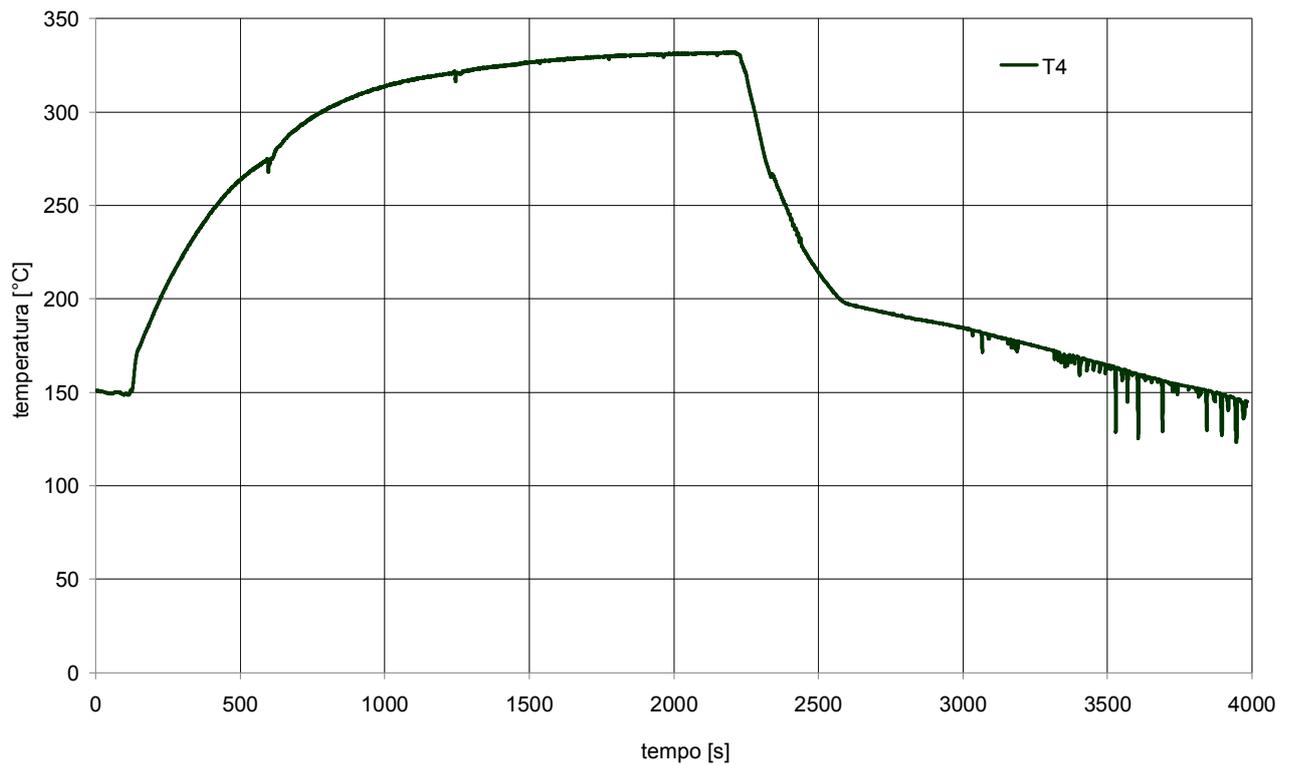
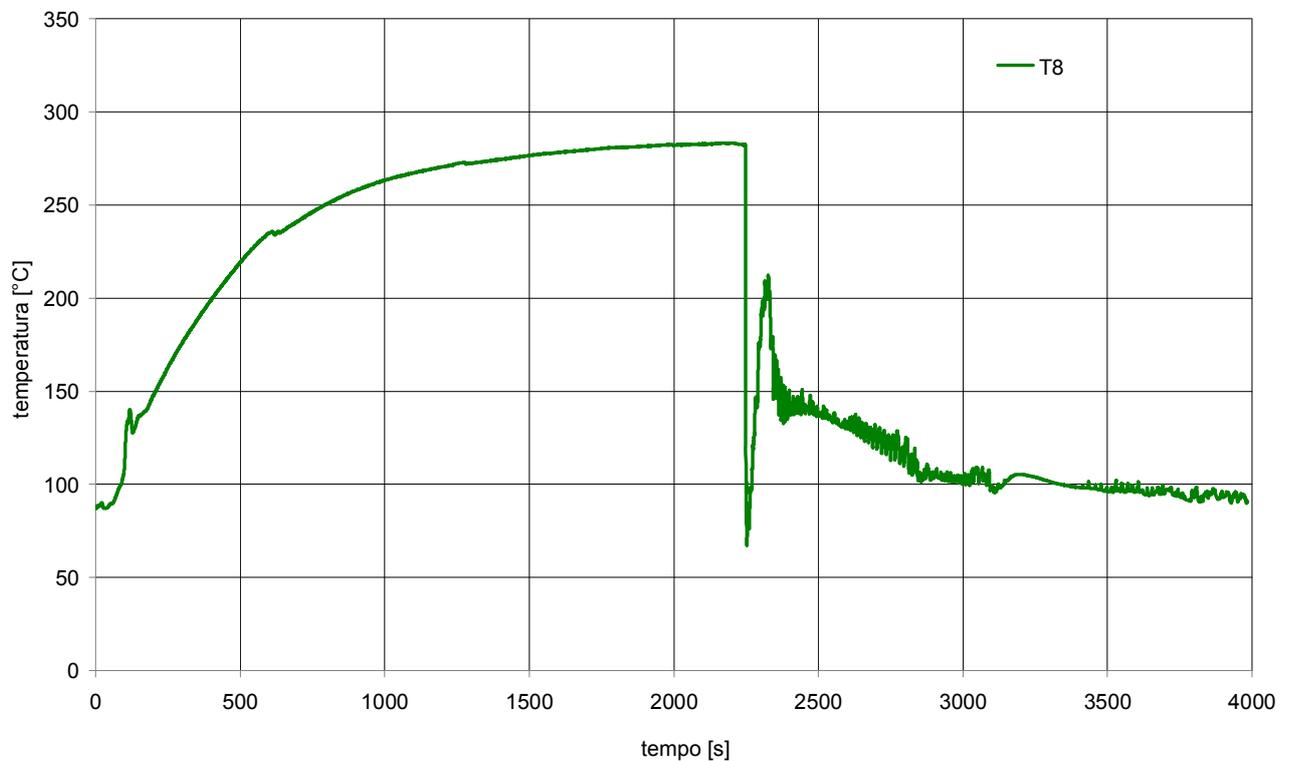


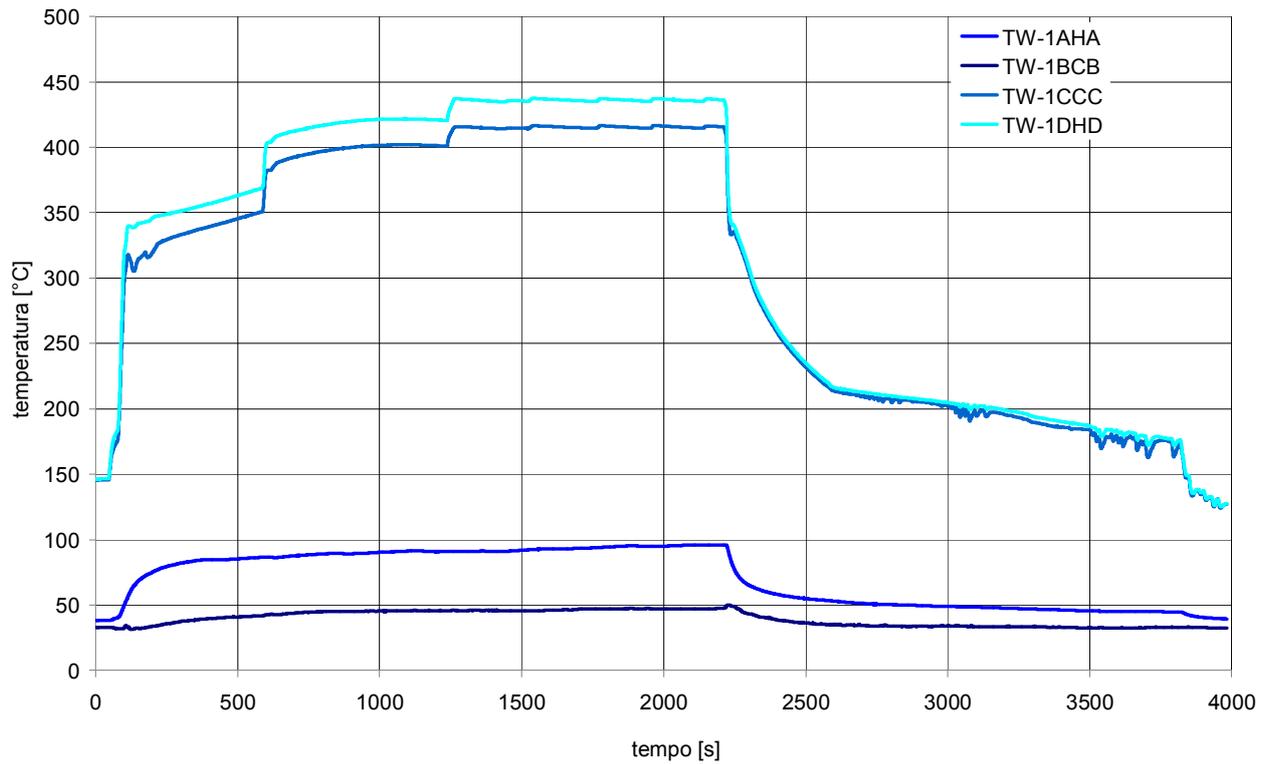
Fig. 8. 196 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°31



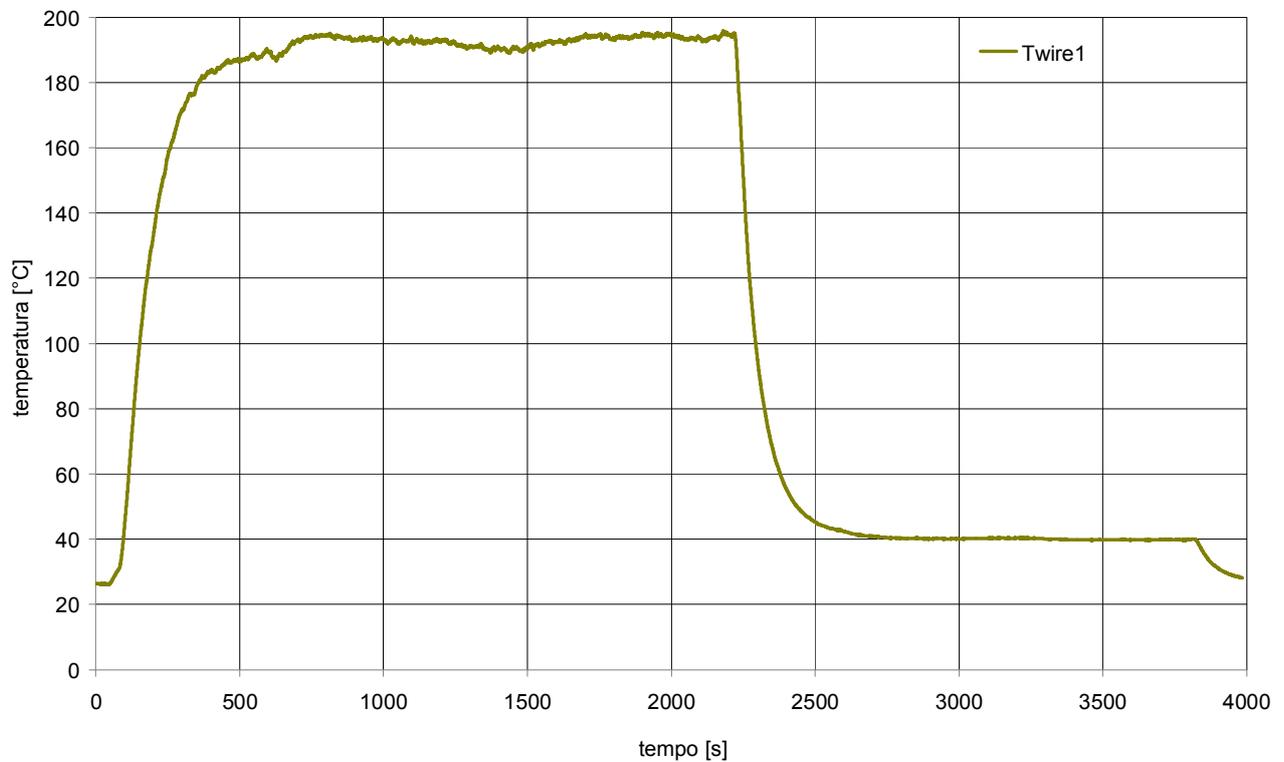
**Fig. 8. 197 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°31**



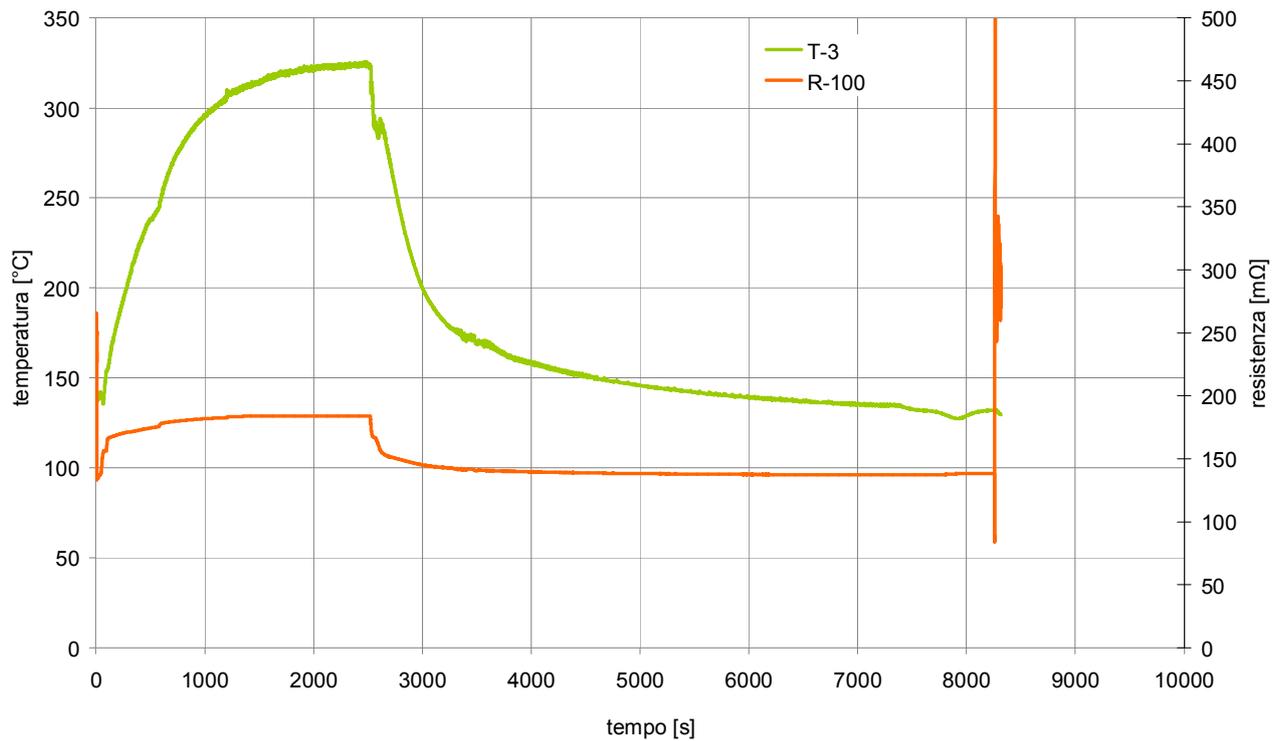
**Fig. 8. 198 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°31**



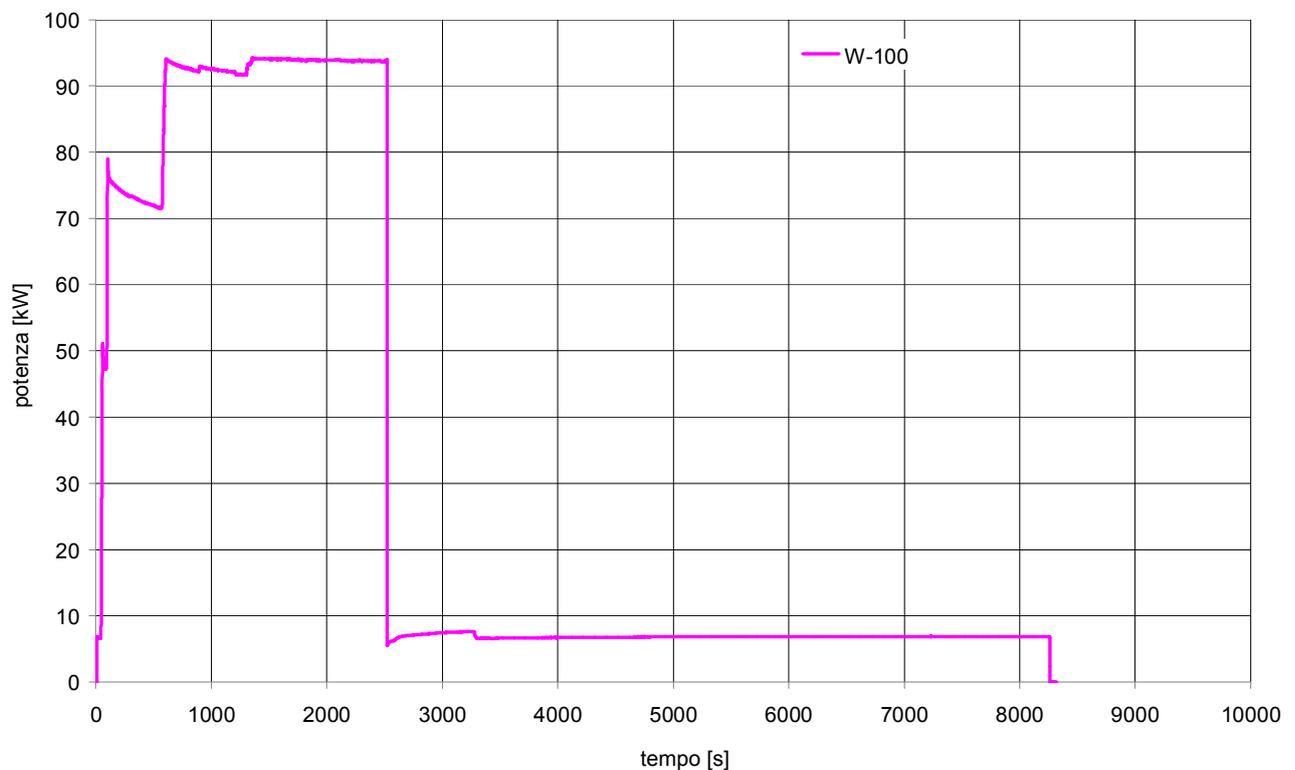
**Fig. 8. 199 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°31**



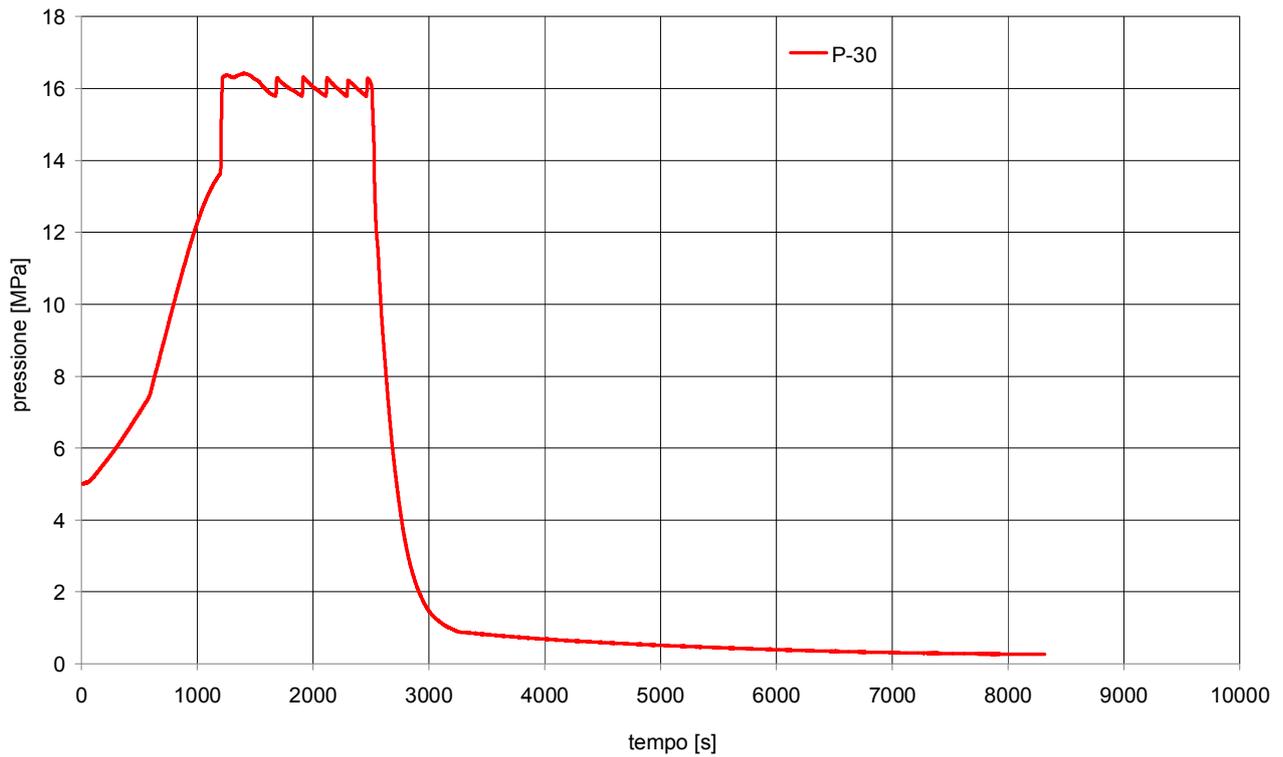
**Fig. 8. 200 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°31**



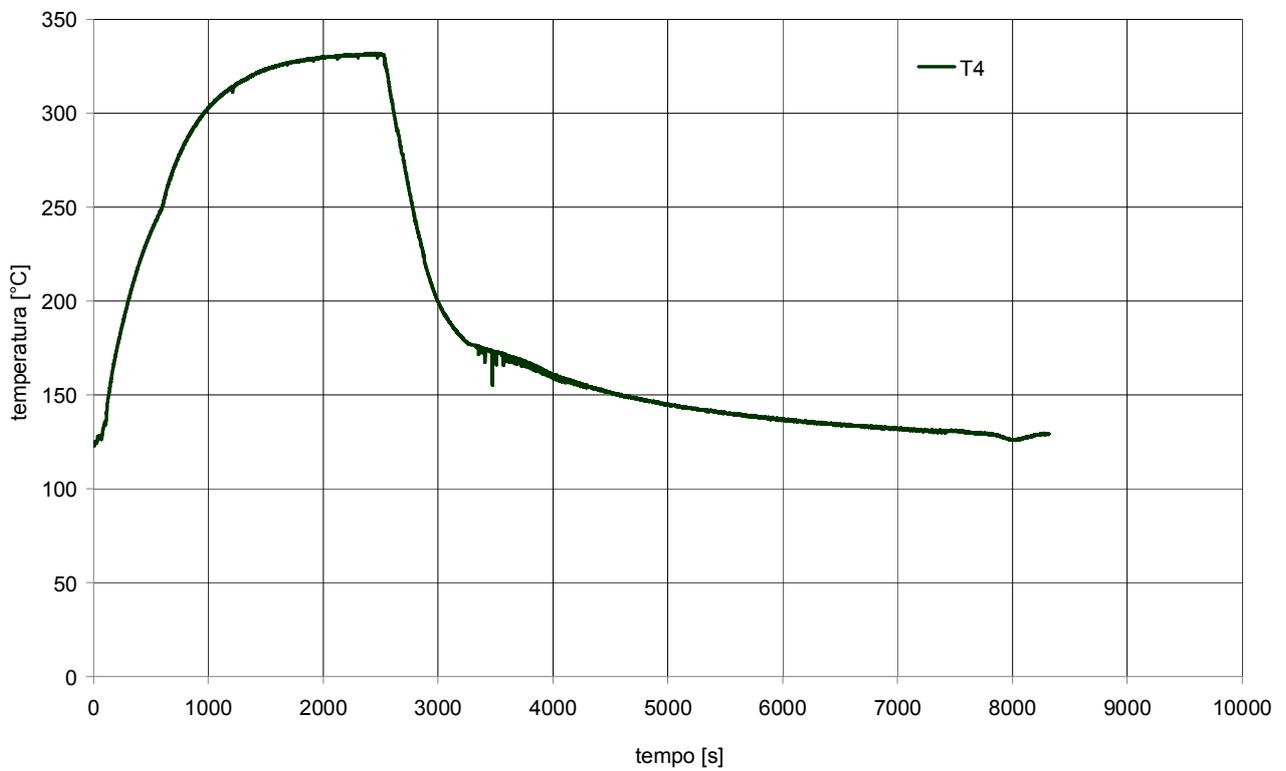
**Fig. 8. 201 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°32**



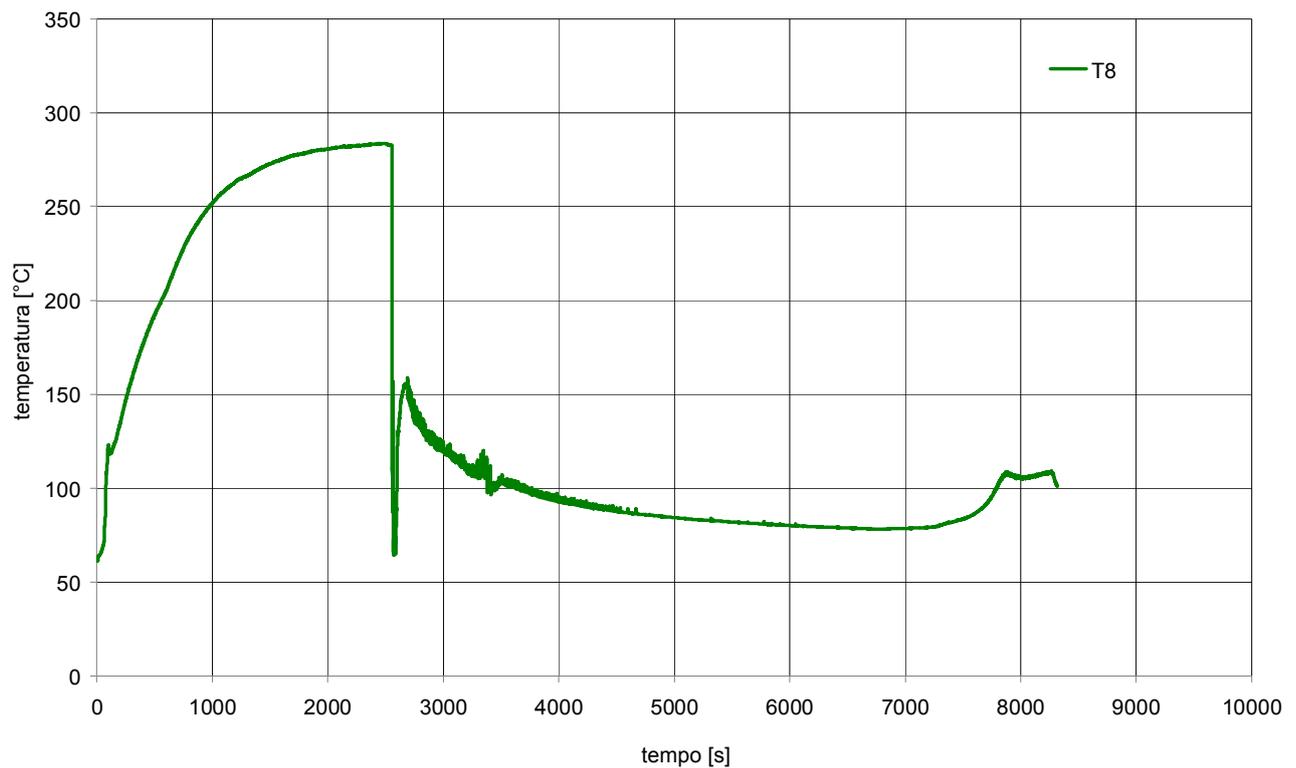
**Fig. 8. 202 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°32**



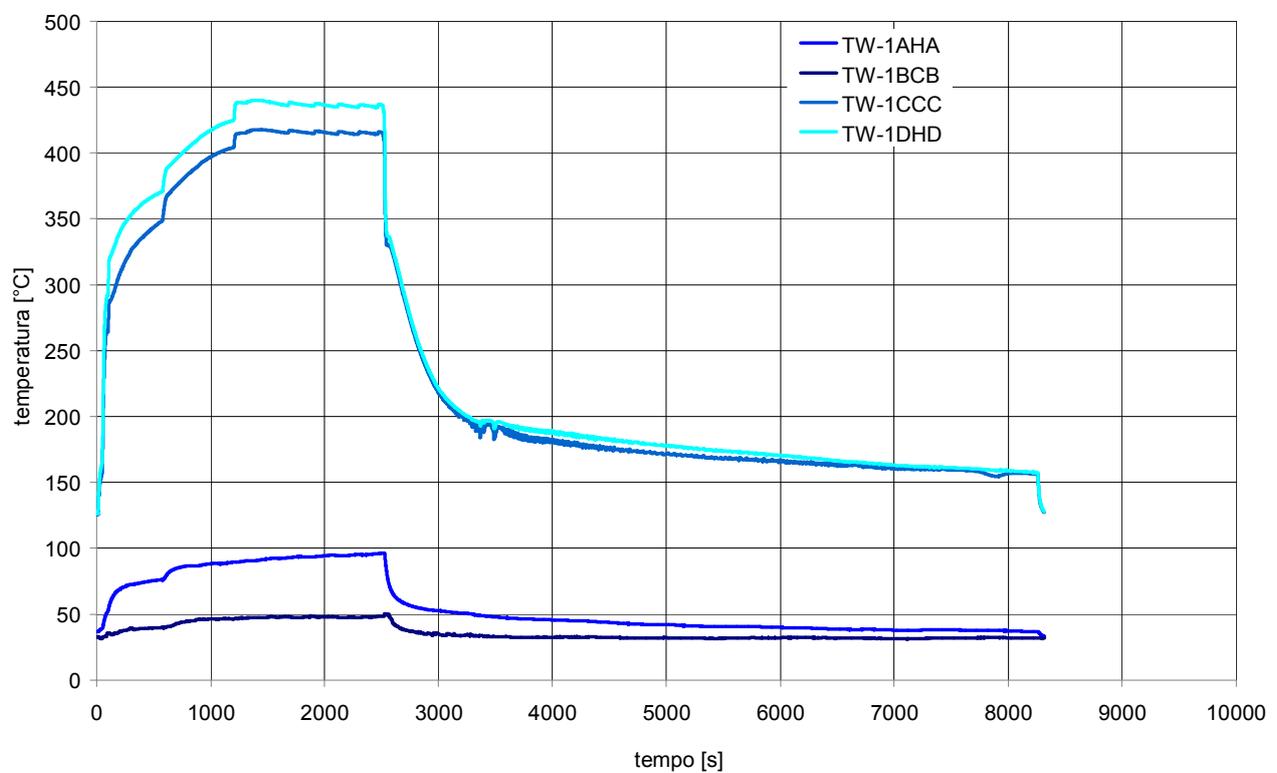
**Fig. 8. 203 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°32**



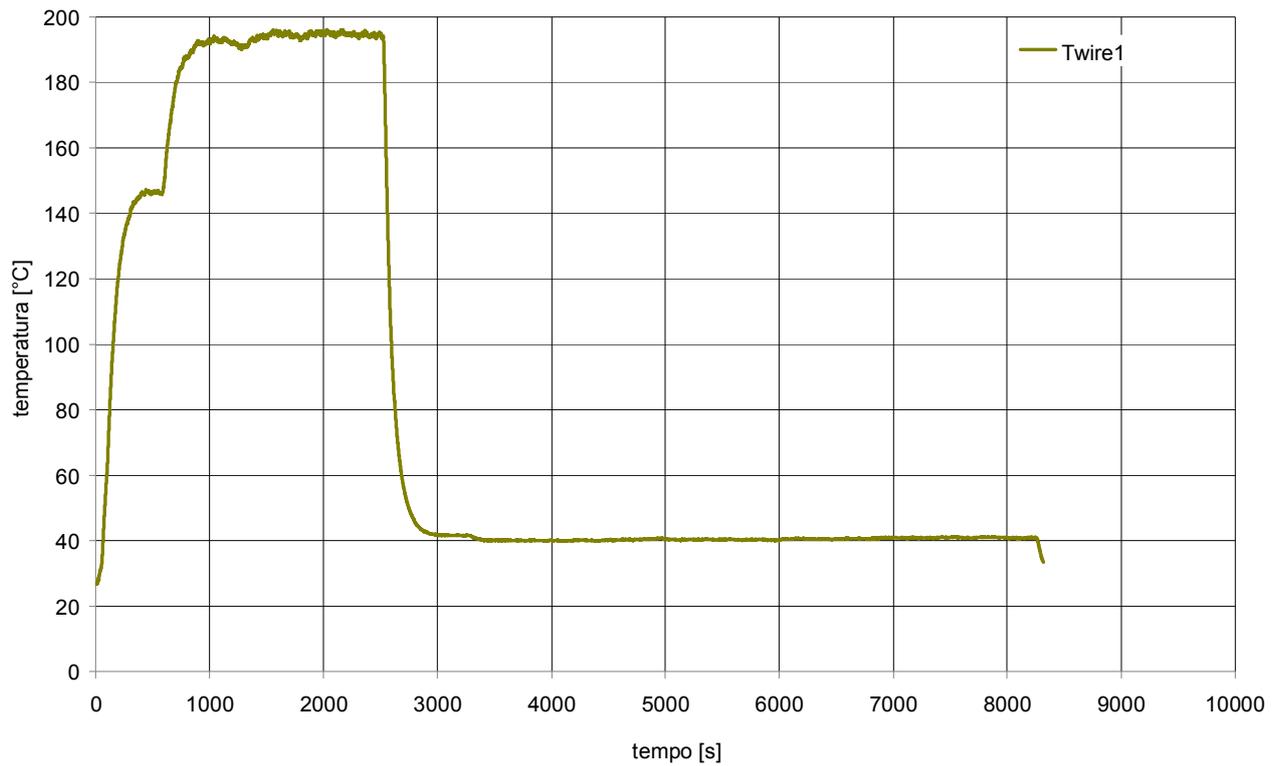
**Fig. 8. 204 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°32**



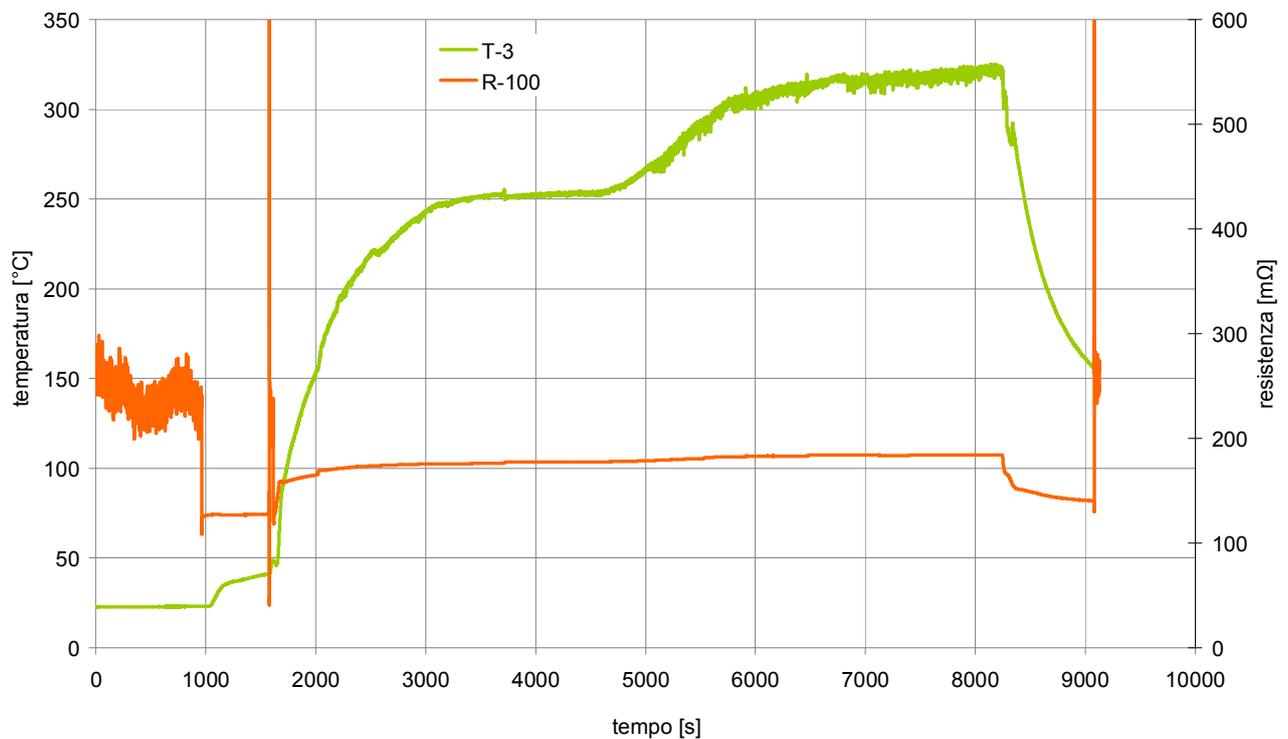
**Fig. 8. 205 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°32**



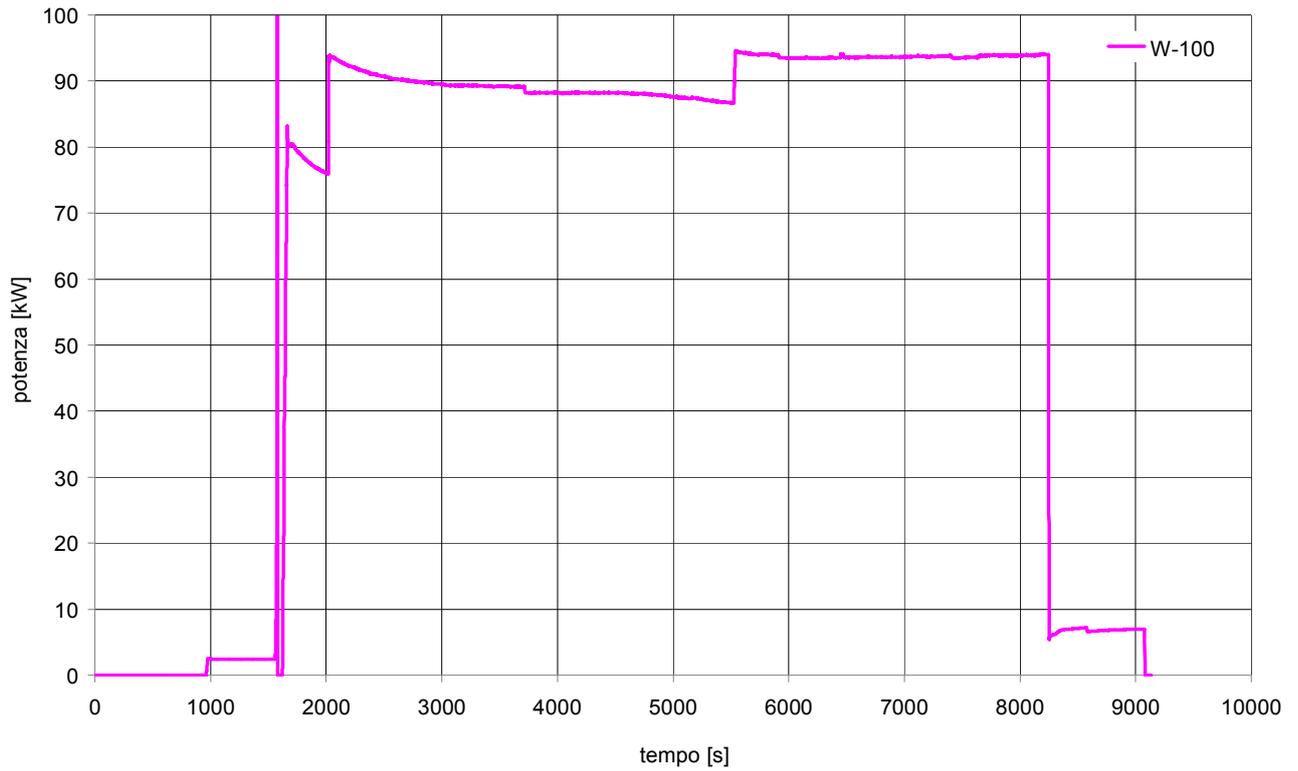
**Fig. 8. 206 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°32**



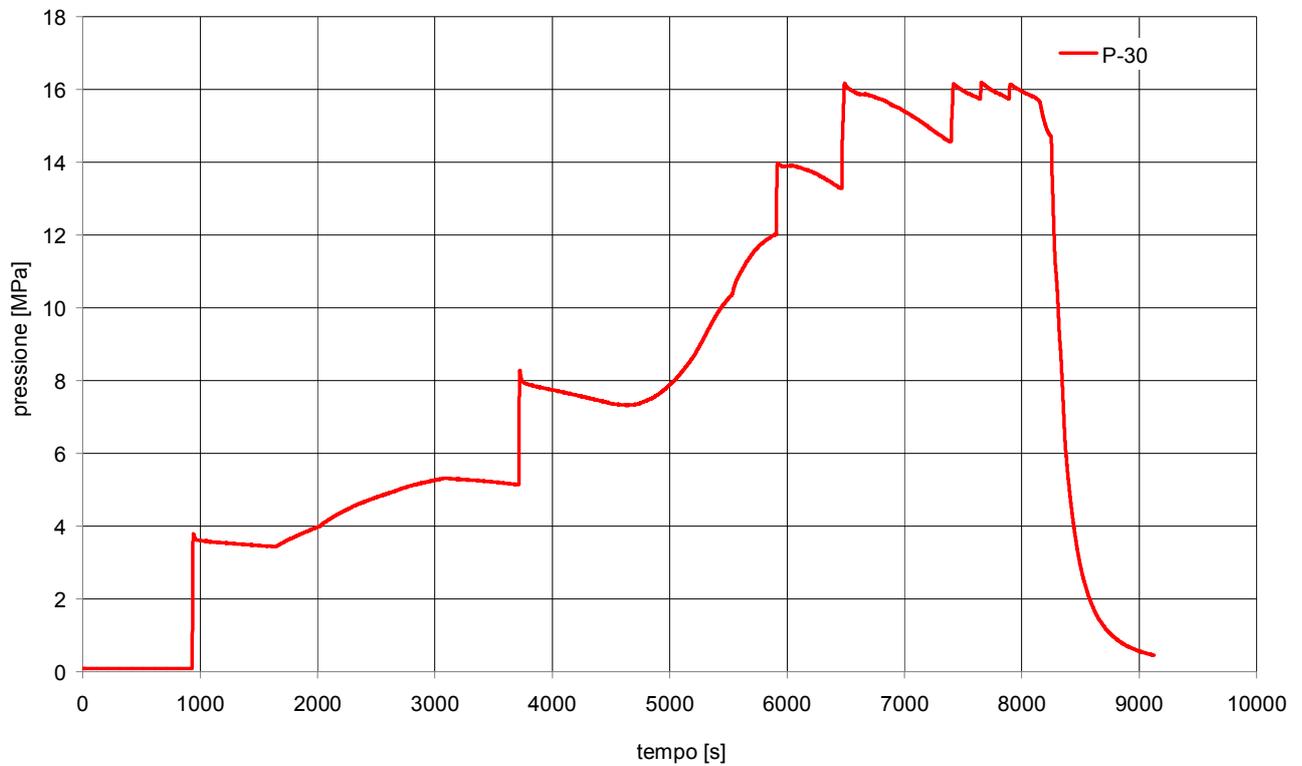
**Fig. 8. 207 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°32**



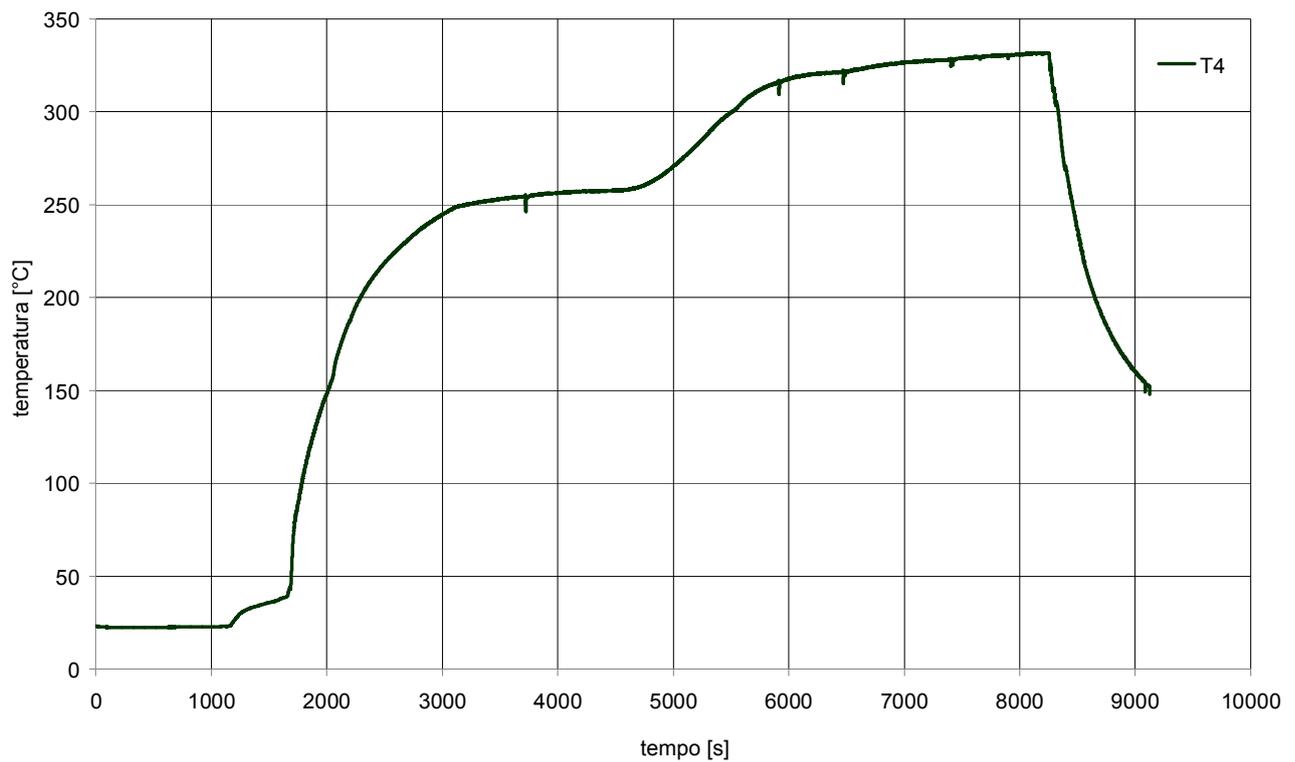
**Fig. 8. 208 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°33**



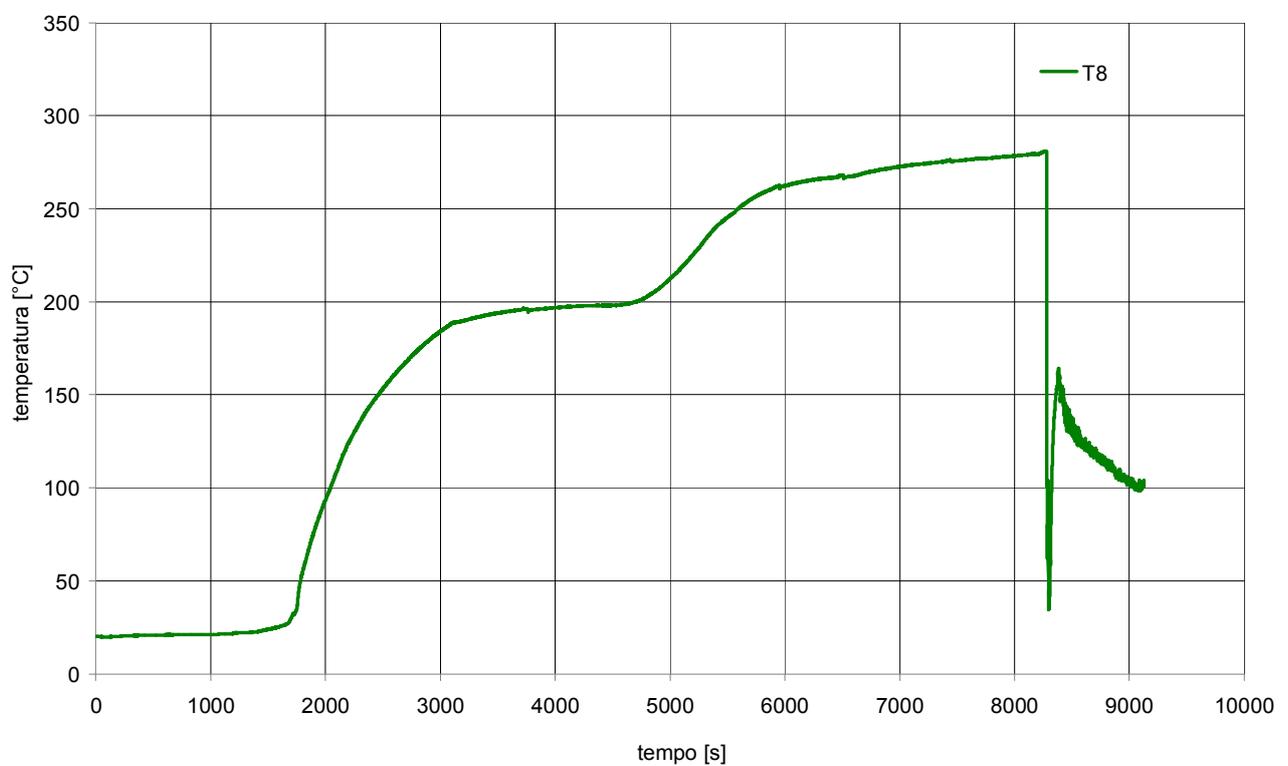
**Fig. 8. 209 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°33**



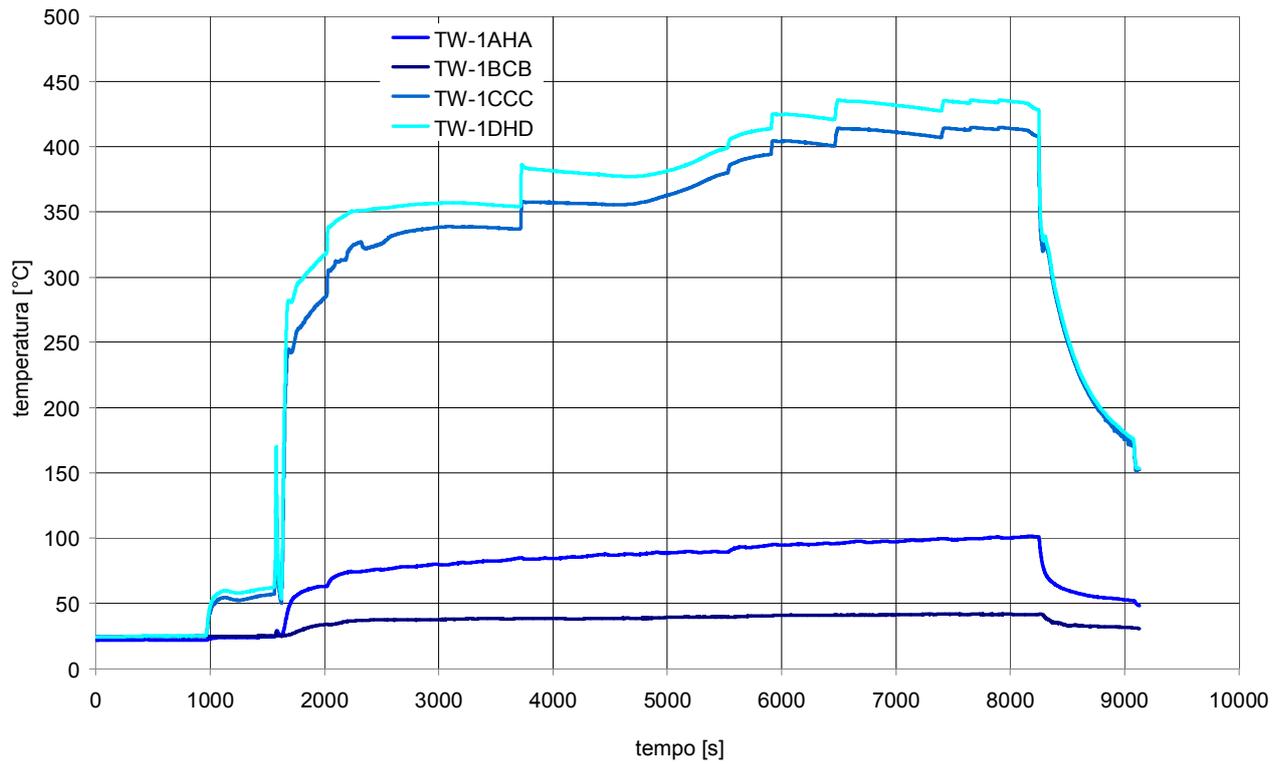
**Fig. 8. 210 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°33**



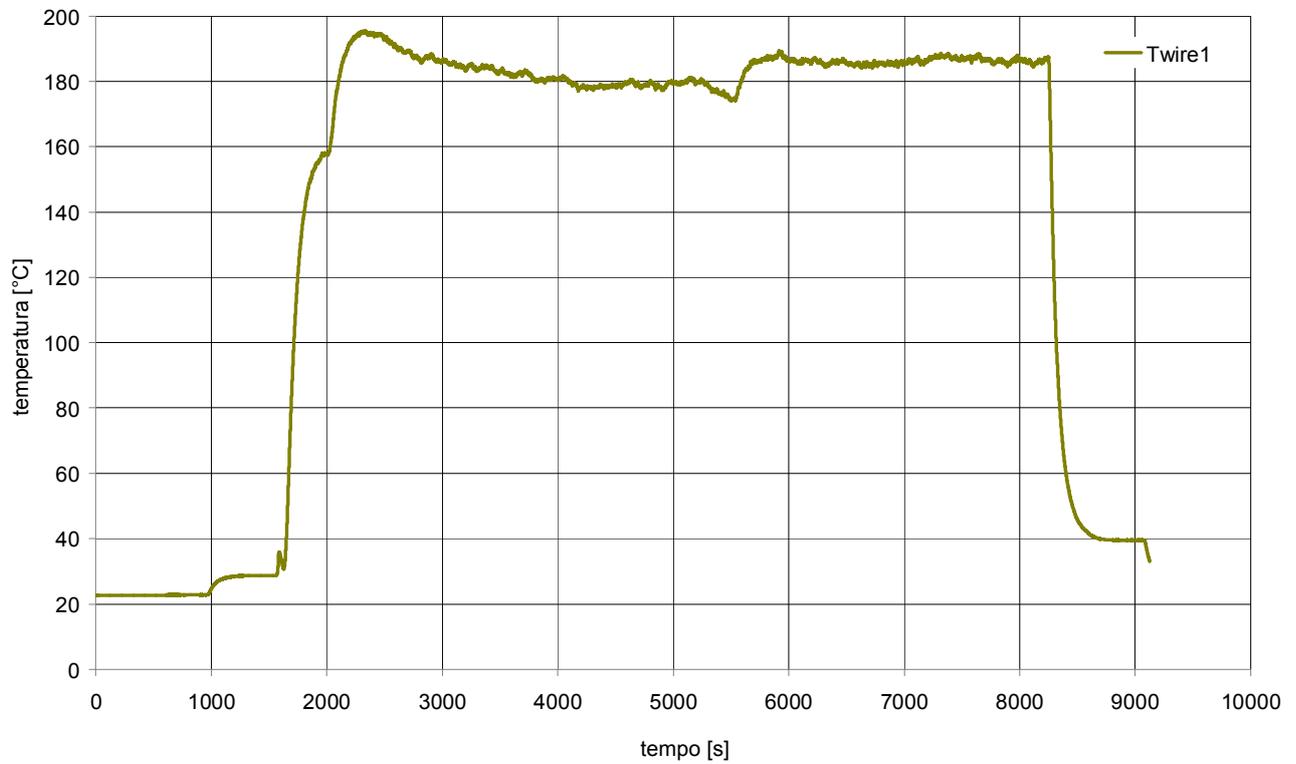
**Fig. 8. 211 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°33**



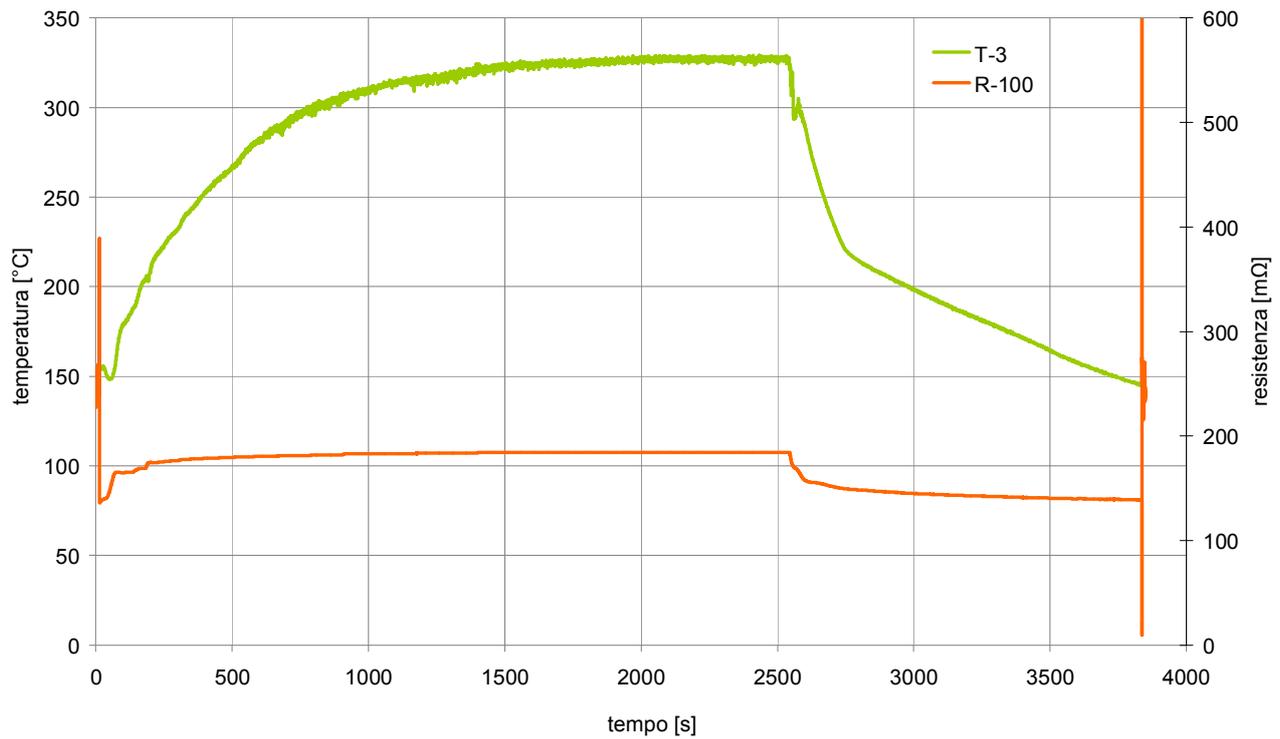
**Fig. 8. 212 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°33**



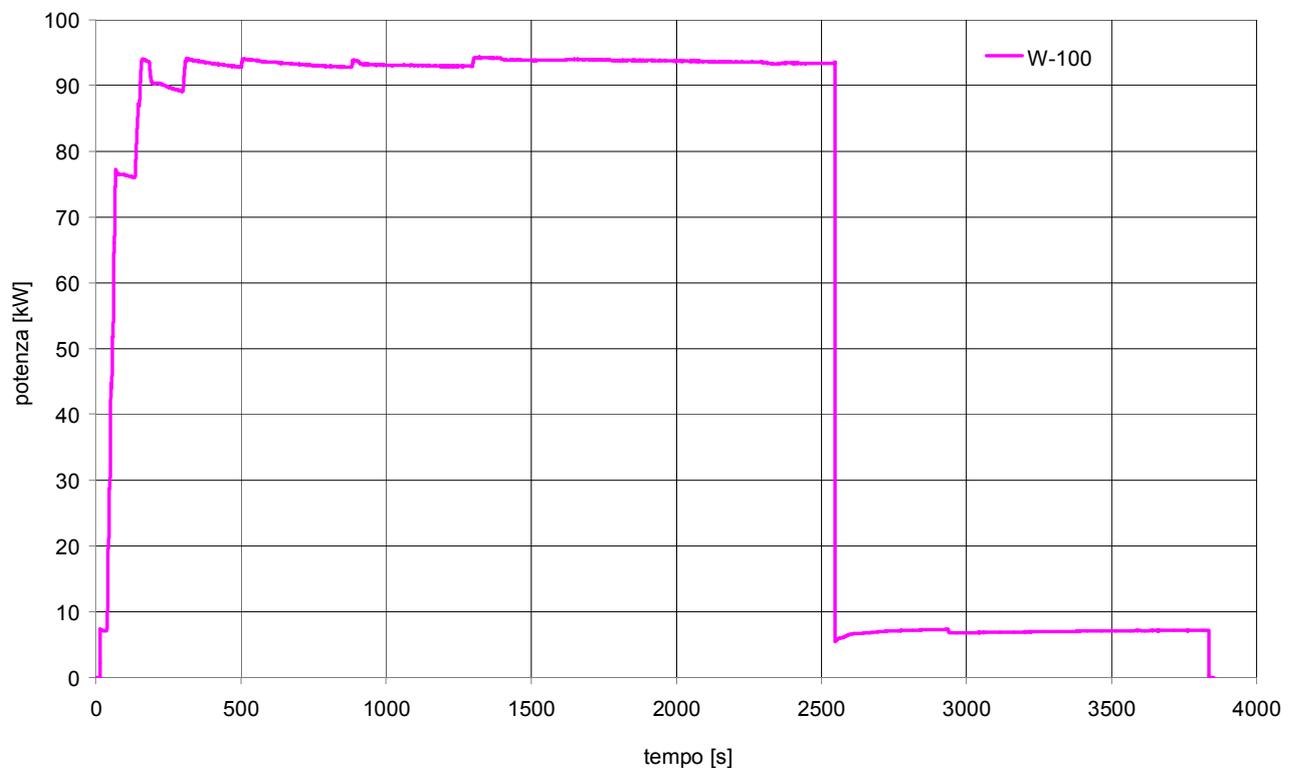
**Fig. 8. 213 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°33**



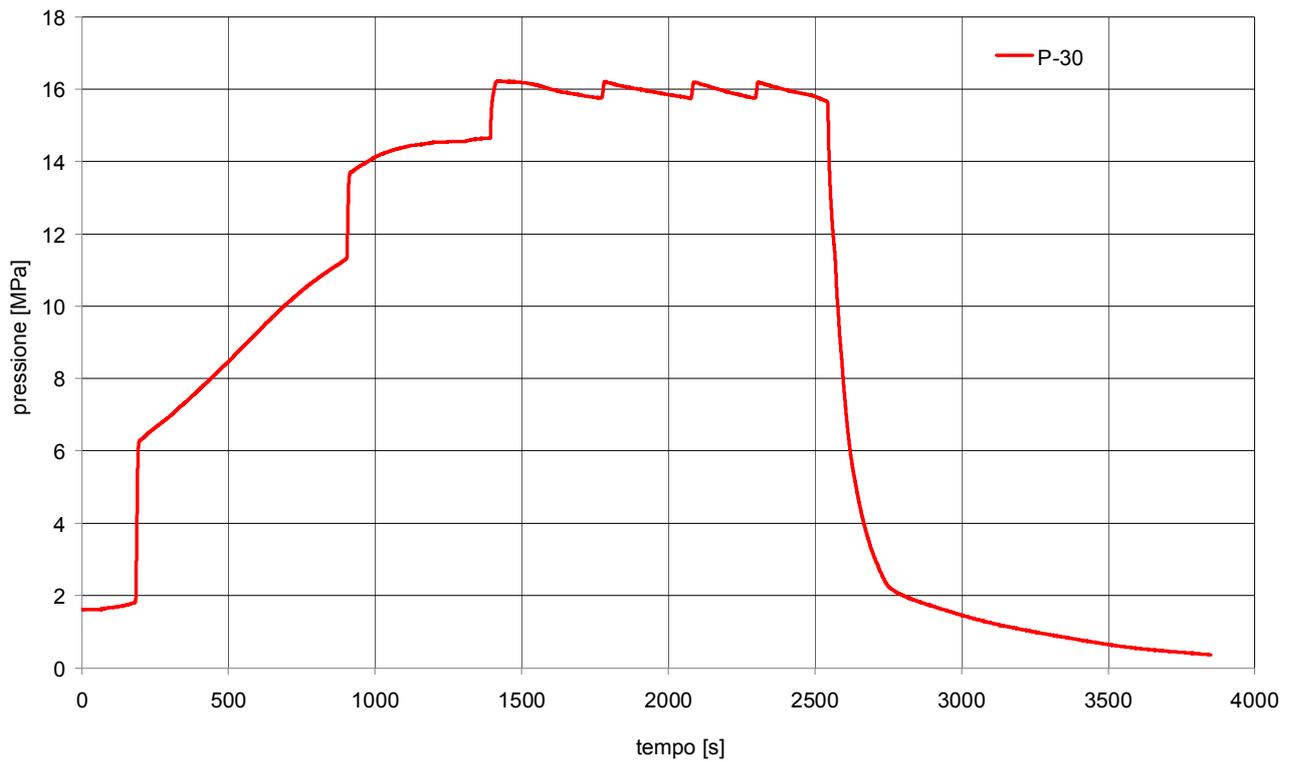
**Fig. 8. 214 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°33**



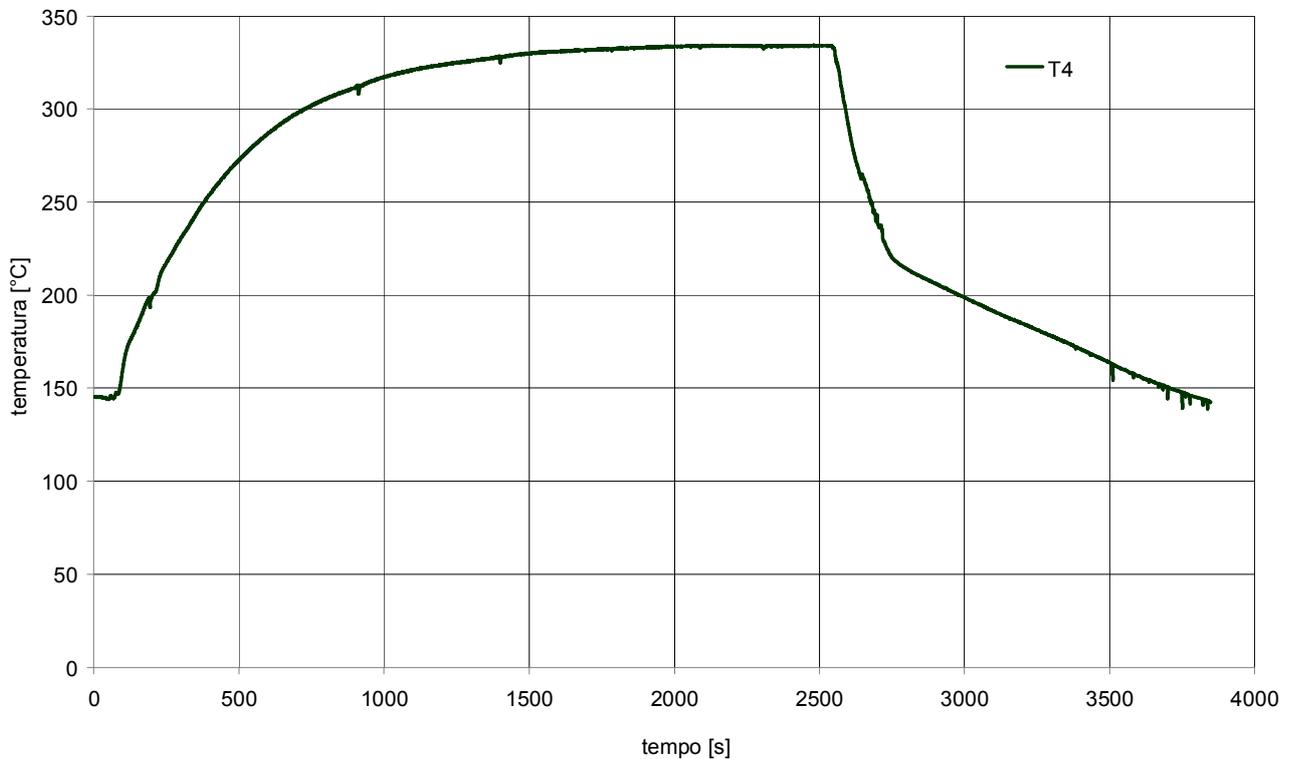
**Fig. 8. 215 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°34**



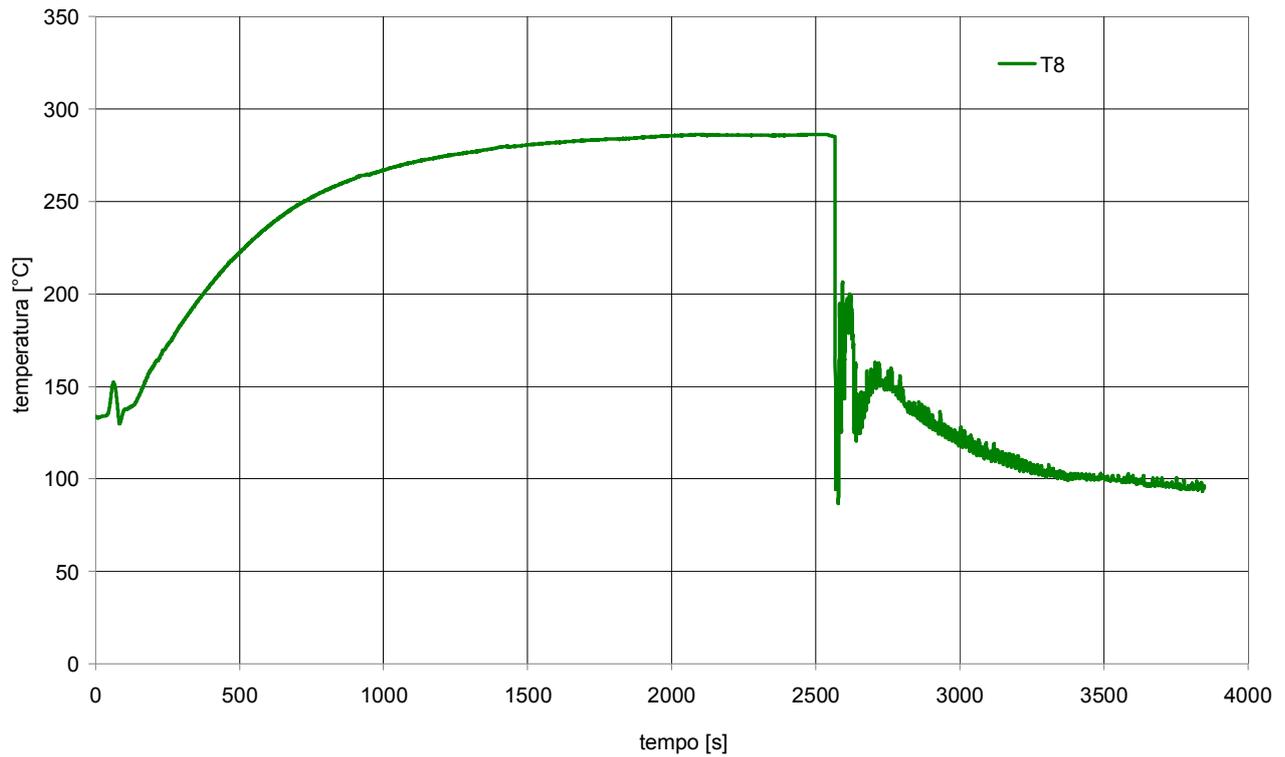
**Fig. 8. 216 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°34**



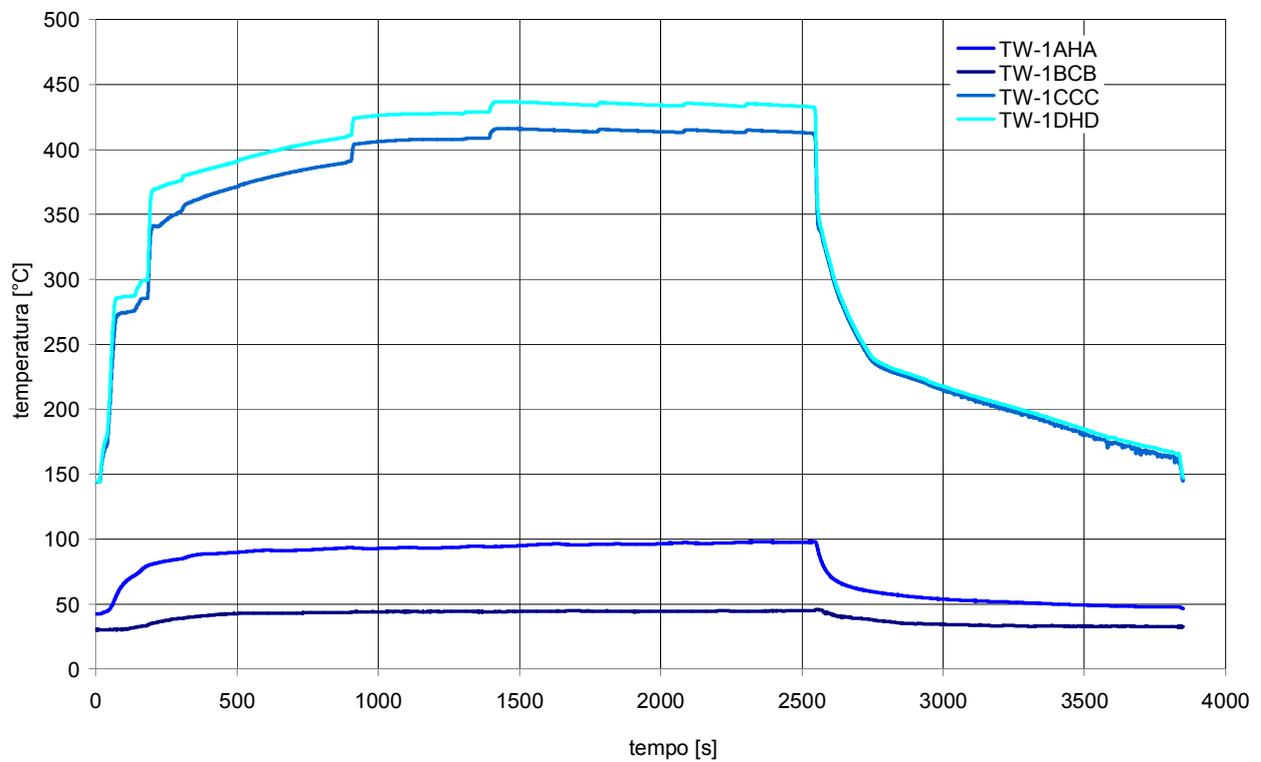
**Fig. 8.217 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°34**



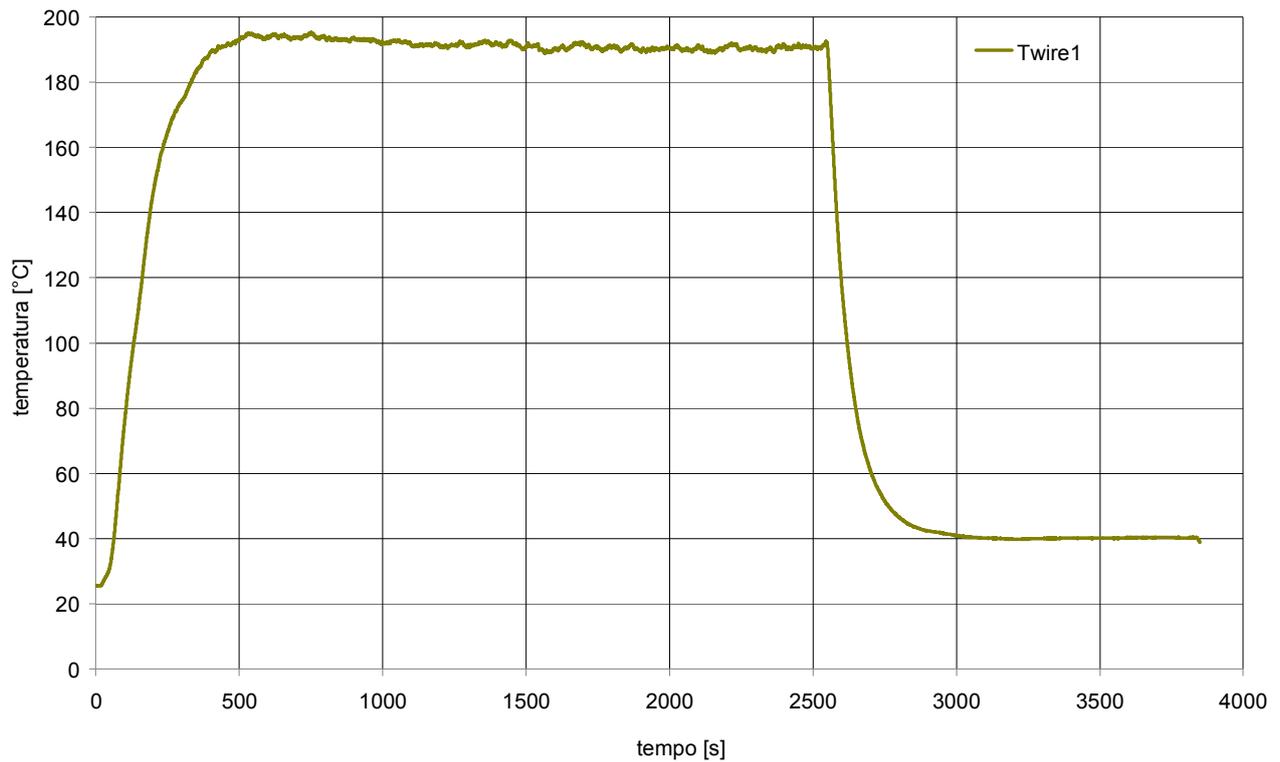
**Fig. 8.218 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°34**



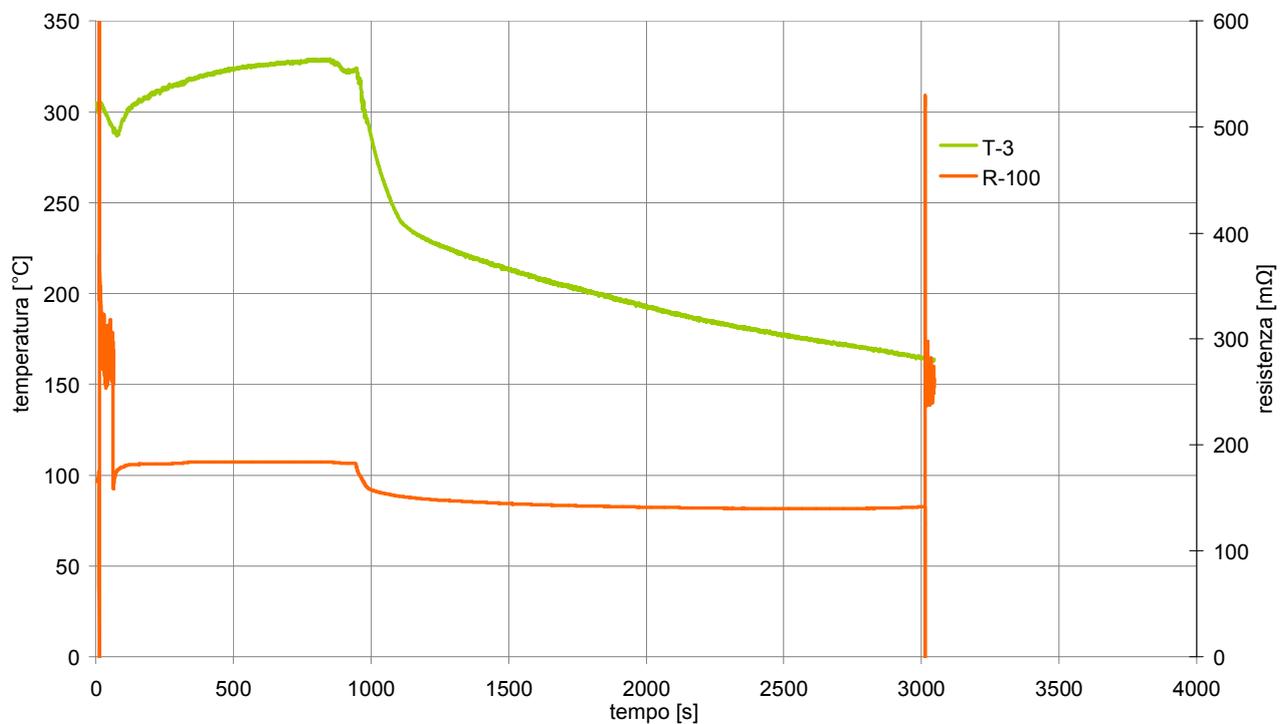
**Fig. 8. 219 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°34**



**Fig. 8. 220 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°34**



**Fig. 8. 221 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°34**



**Fig. 8. 222 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°35**

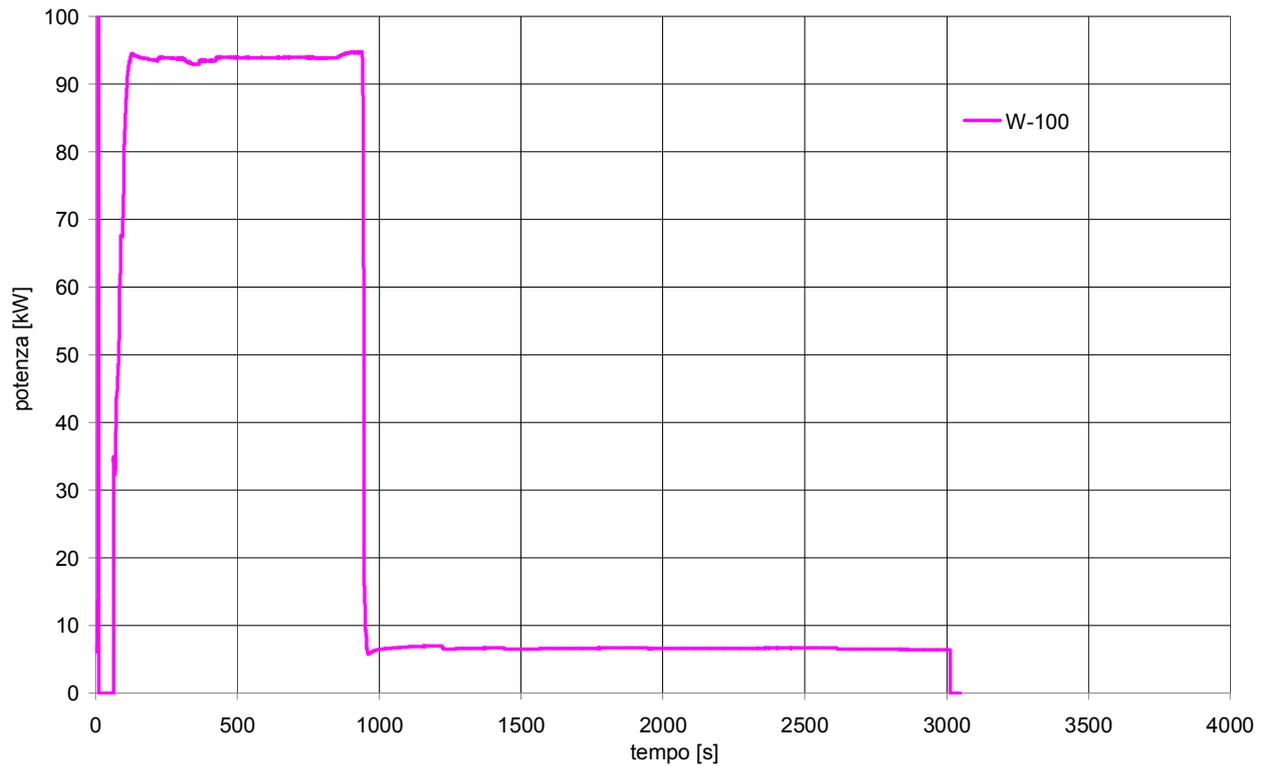


Fig. 8. 223 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°35

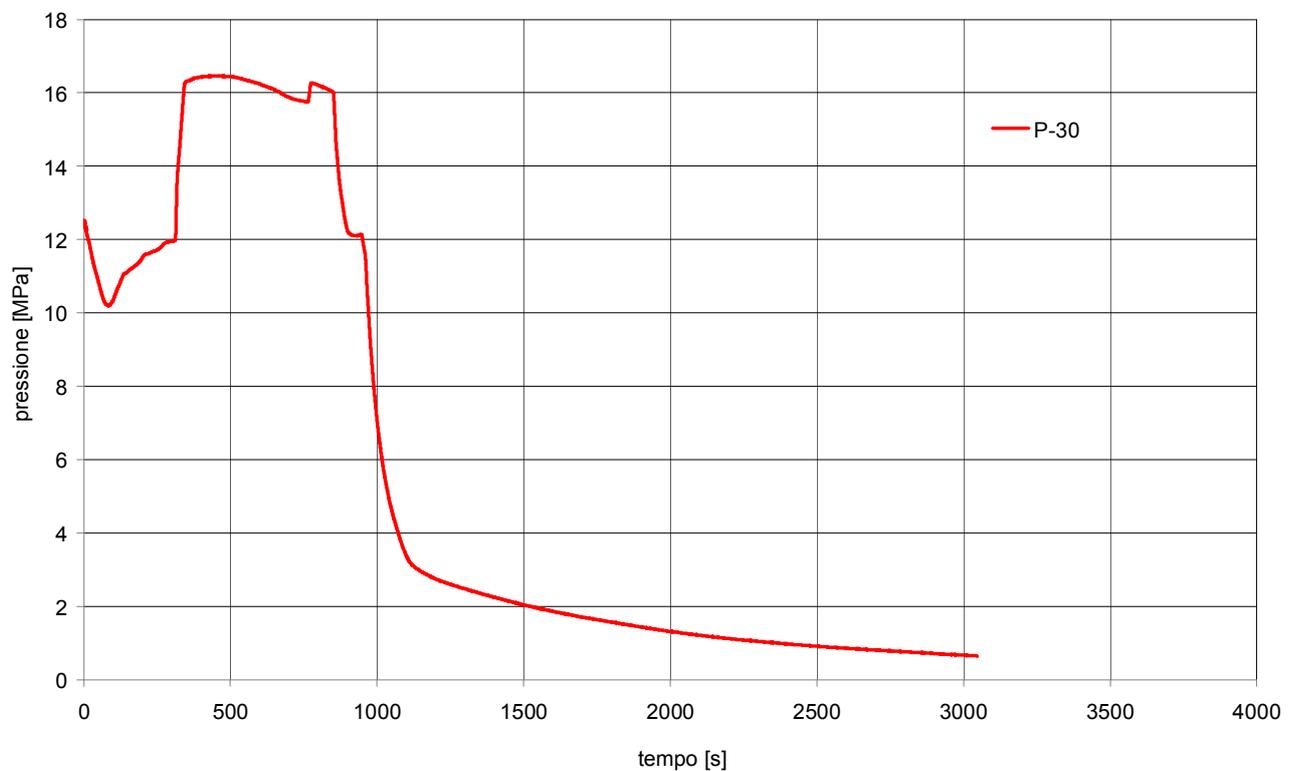
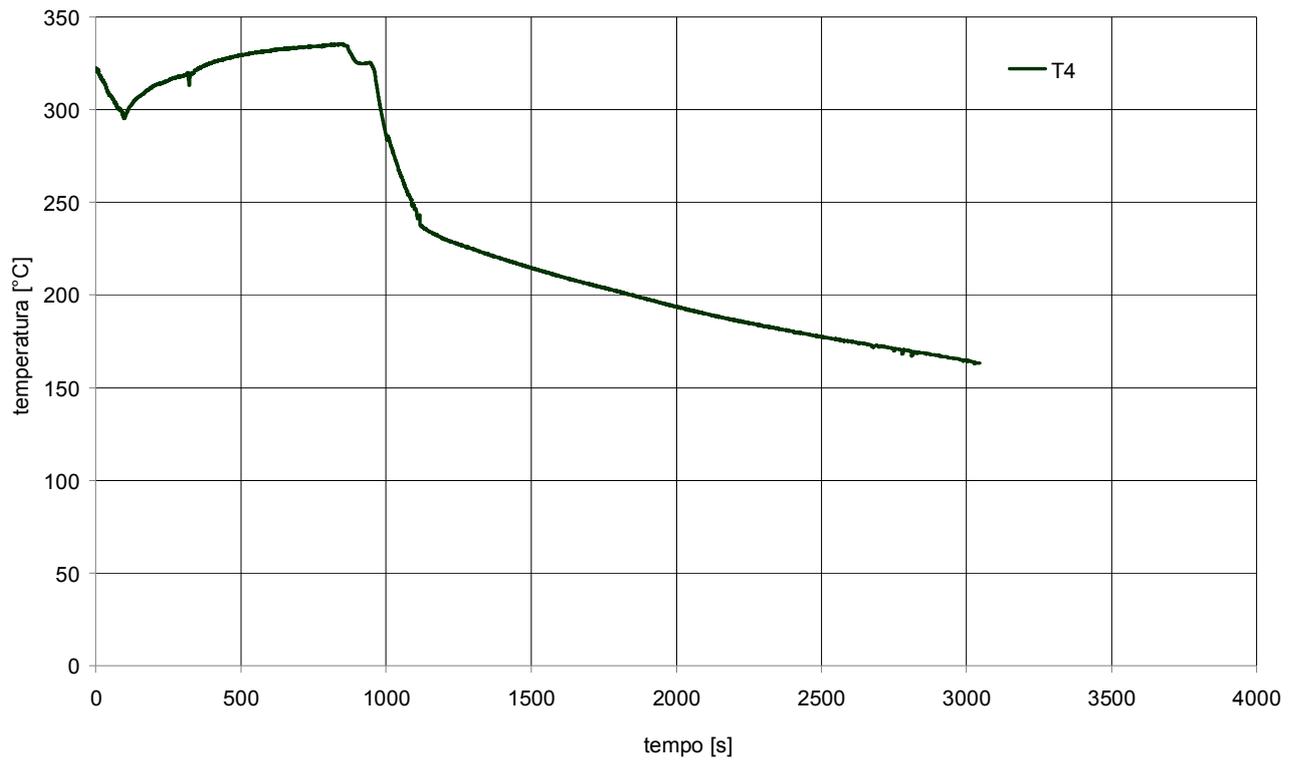
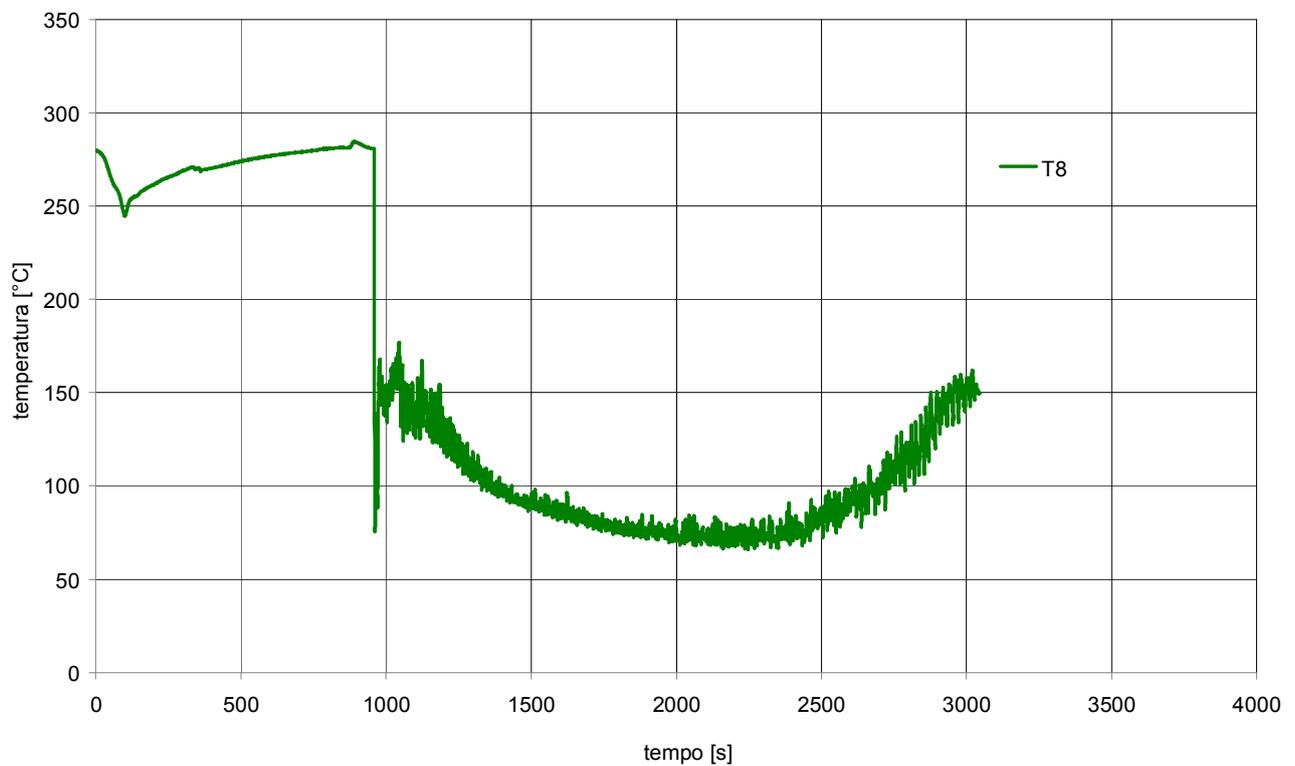


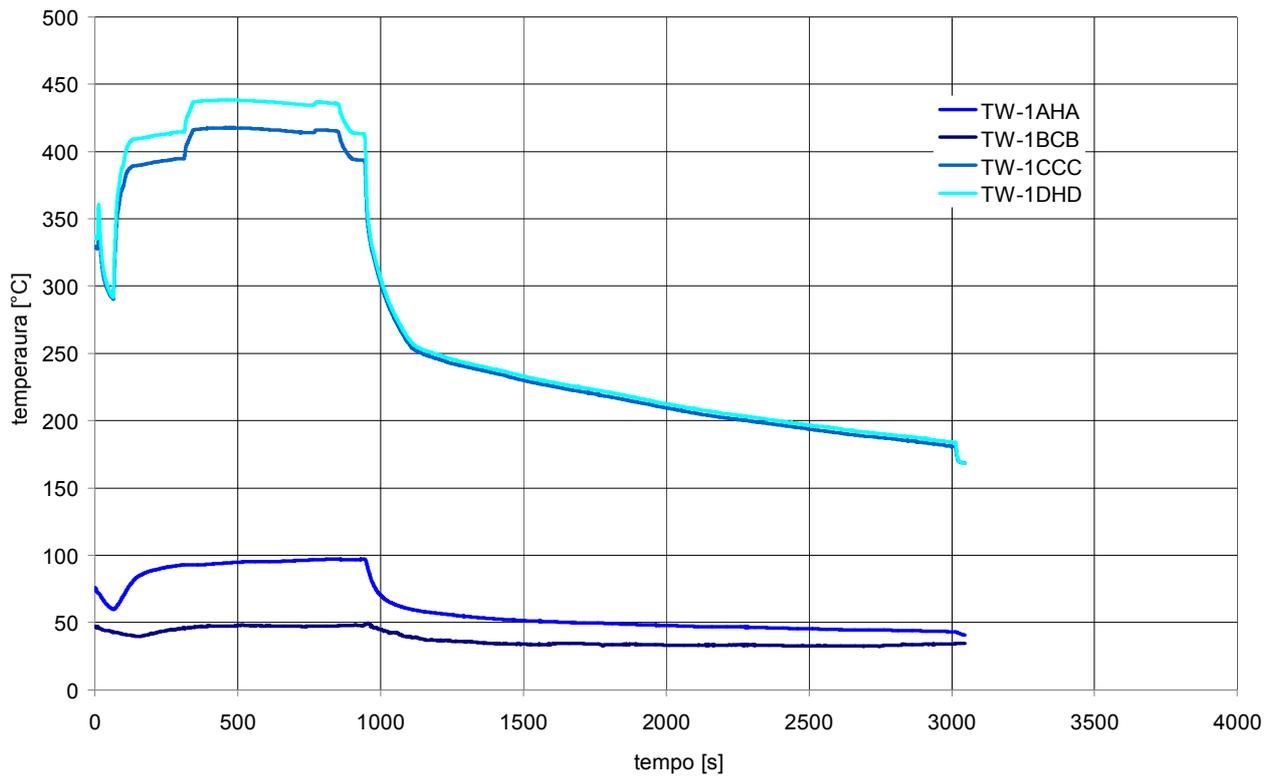
Fig. 8. 224 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°35



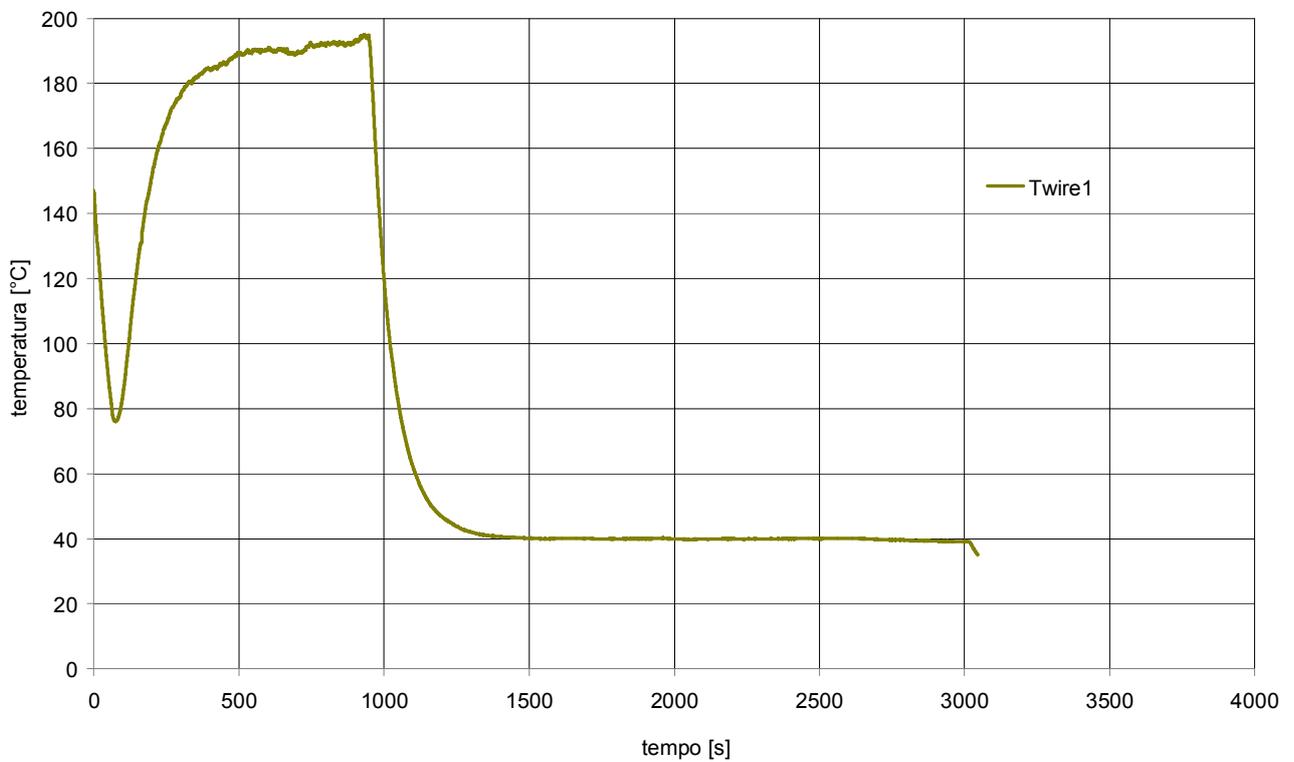
**Fig. 8. 225 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°35**



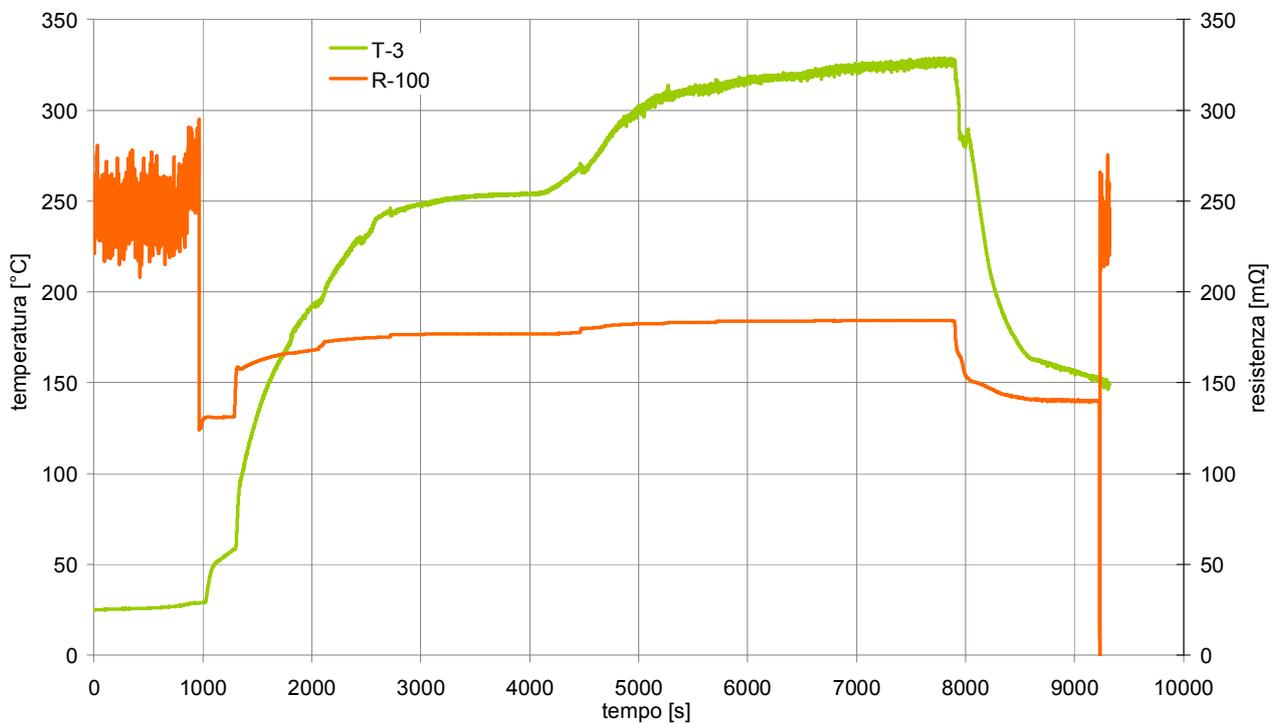
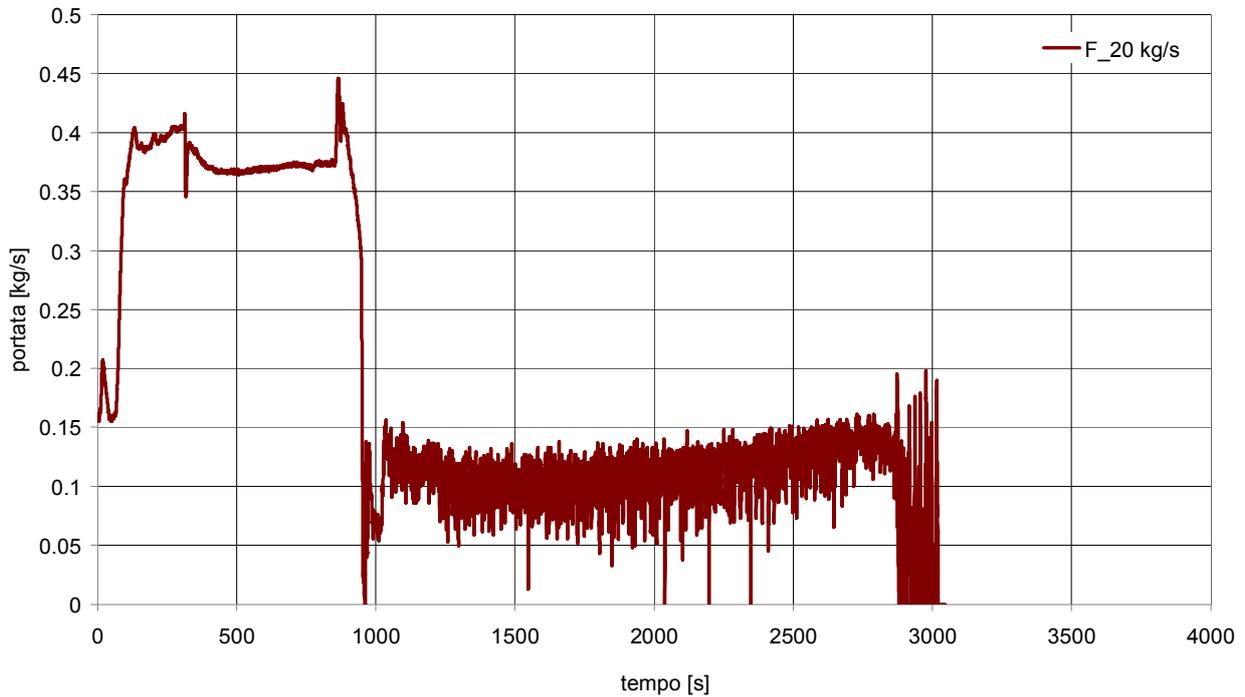
**Fig. 8. 226 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°35**



**Fig. 8. 227 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°35**



**Fig. 8. 228 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia "terminazioni elettriche barre scaldanti" per il Test n°35**



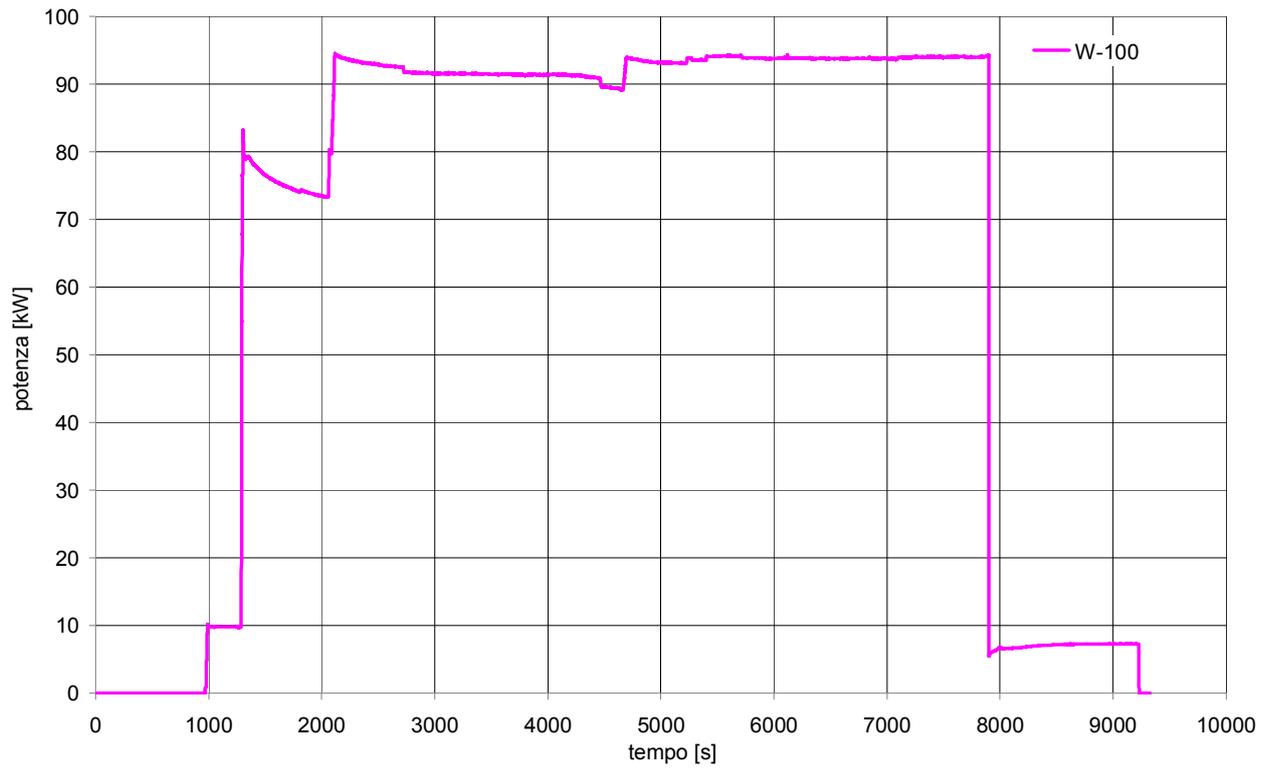


Fig. 8. 231 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°36

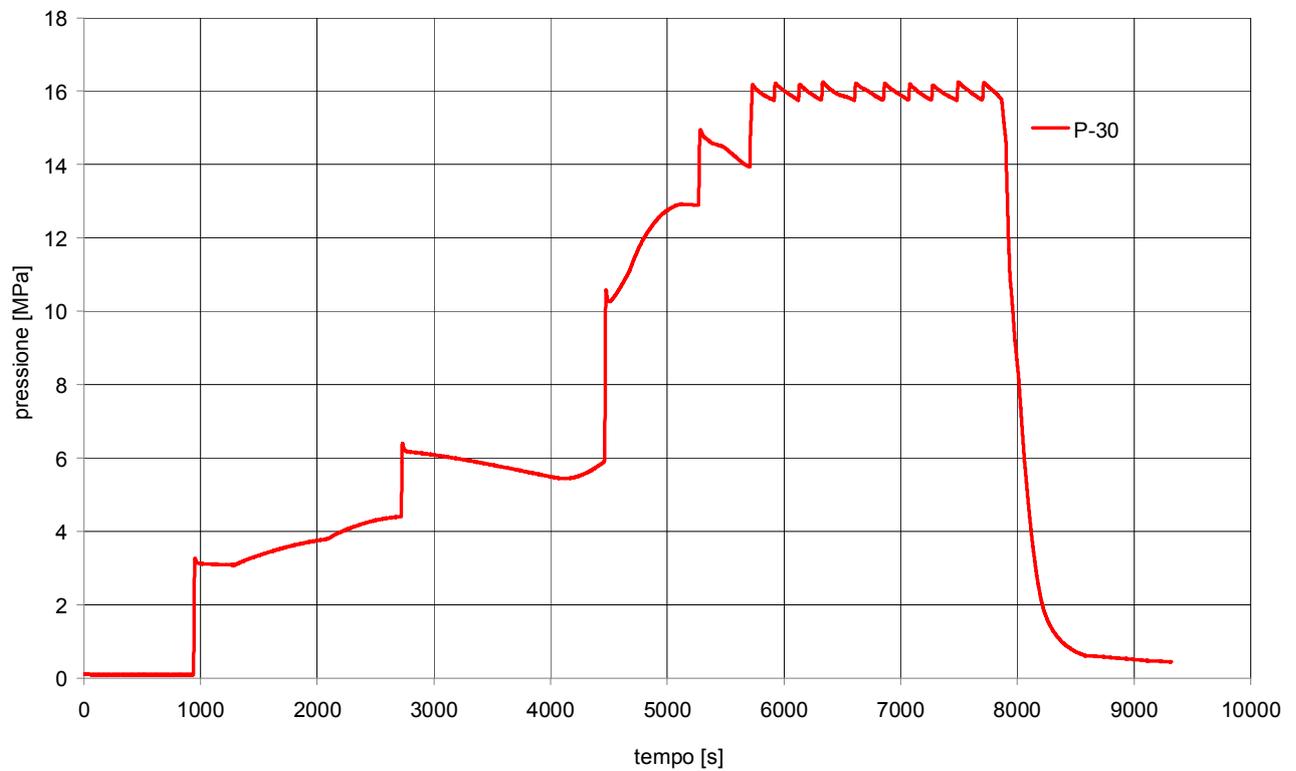
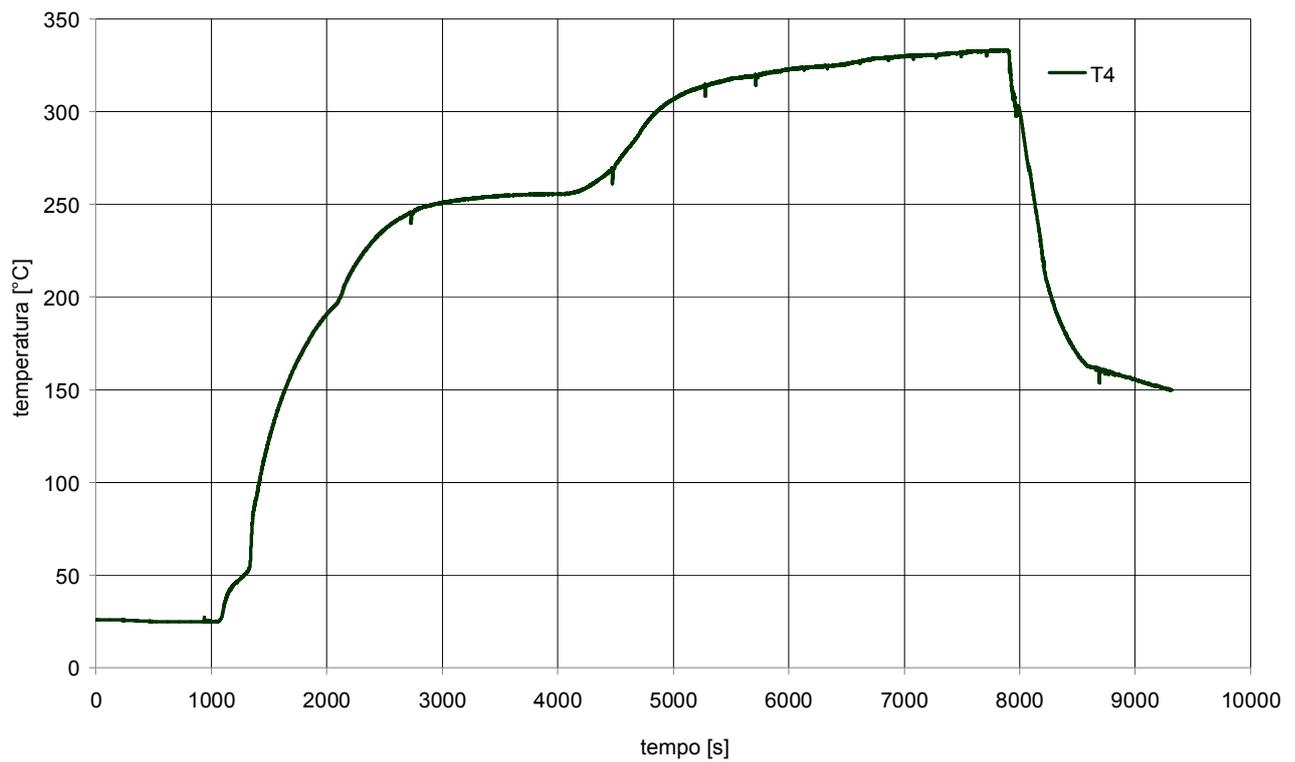
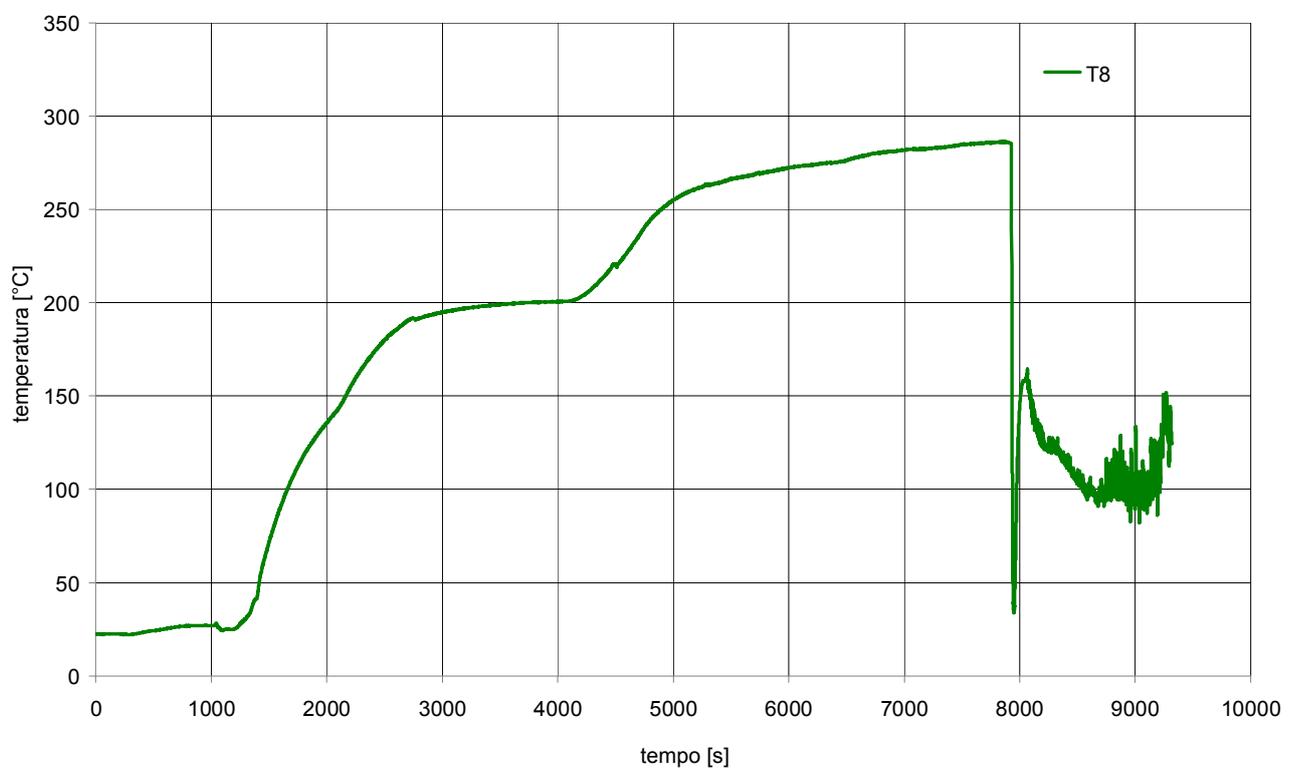


Fig. 8. 232 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°36



**Fig. 8. 233 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°36**



**Fig. 8. 234 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°36**

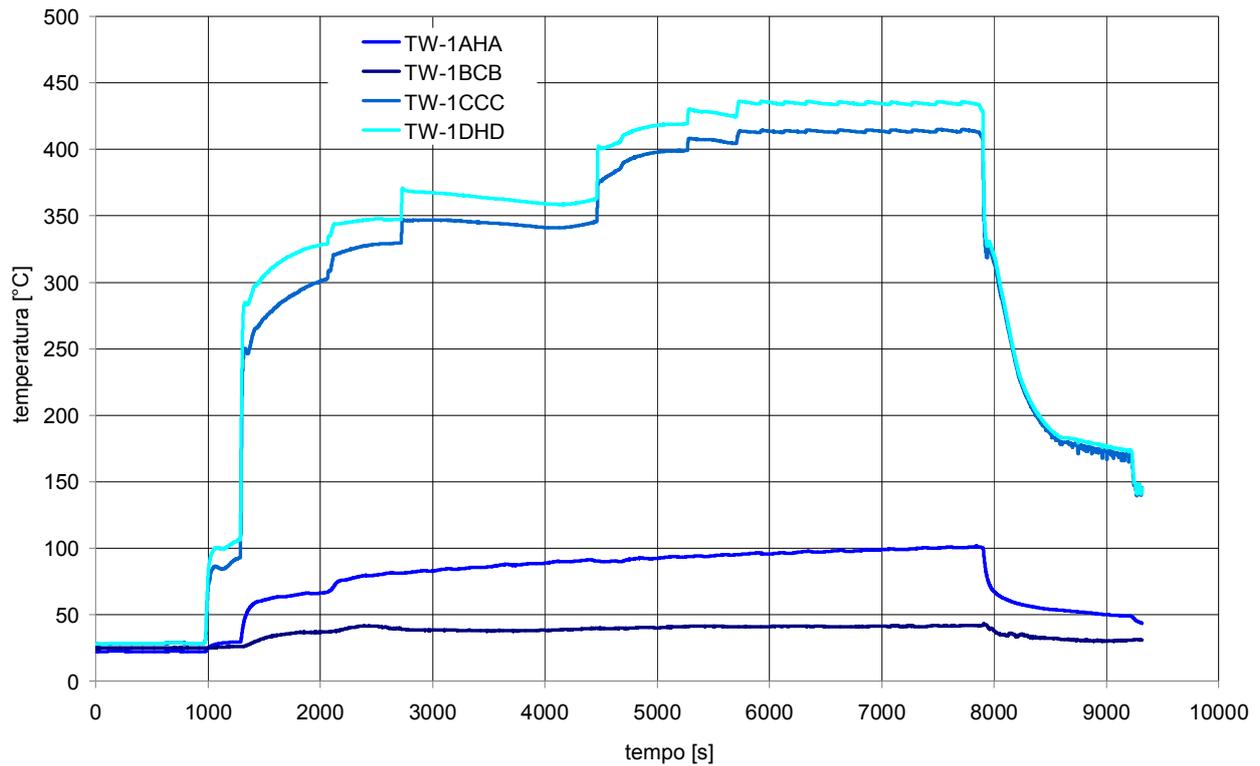


Fig. 8. 235 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°36

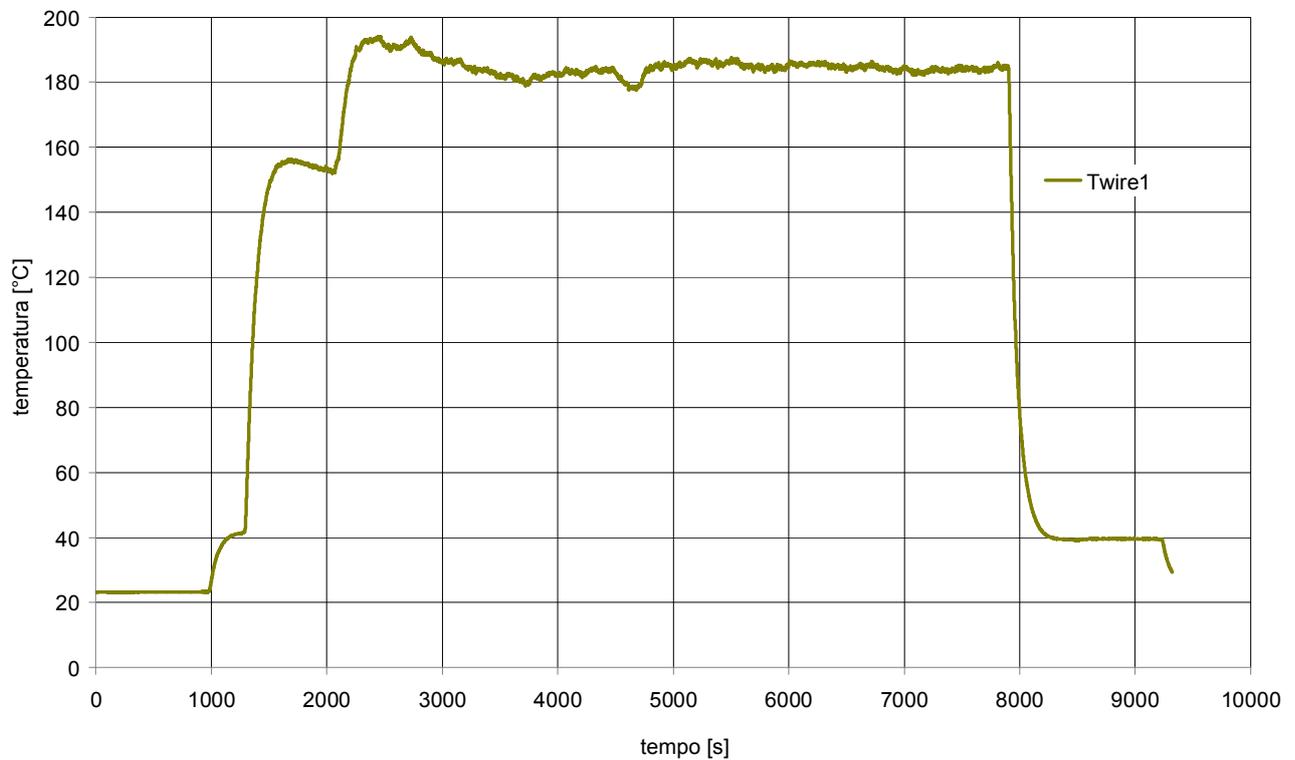
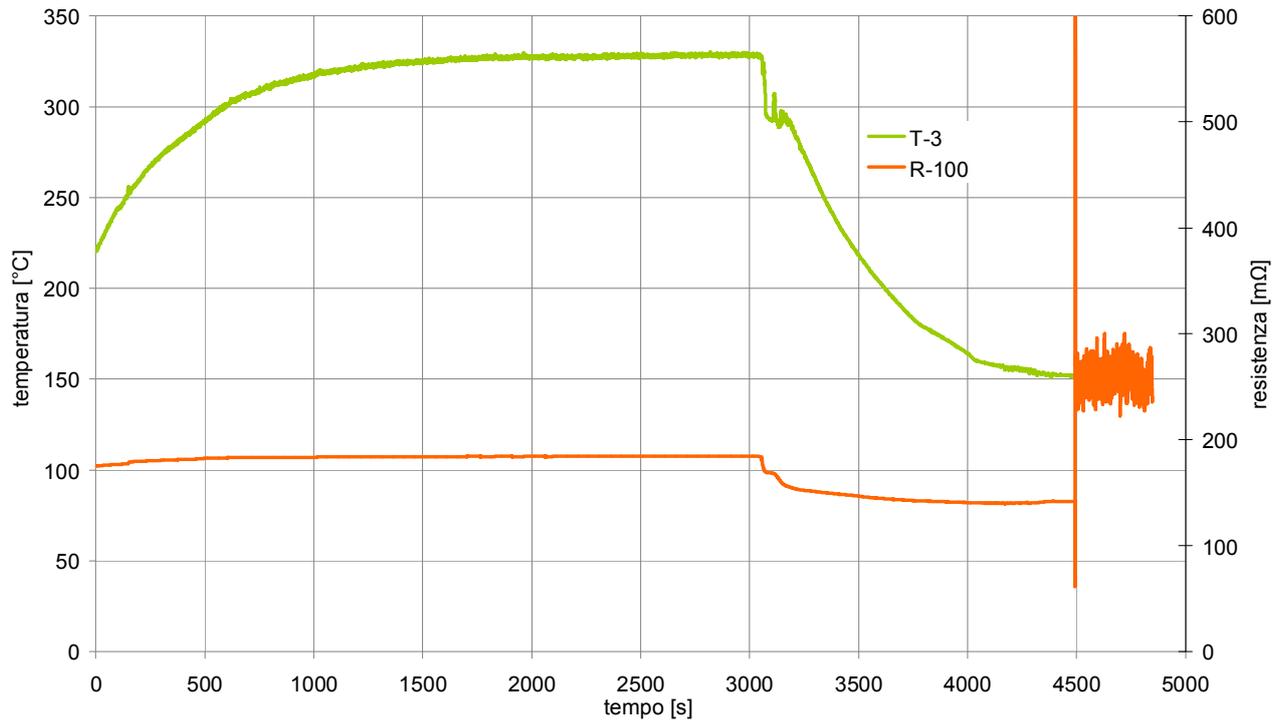
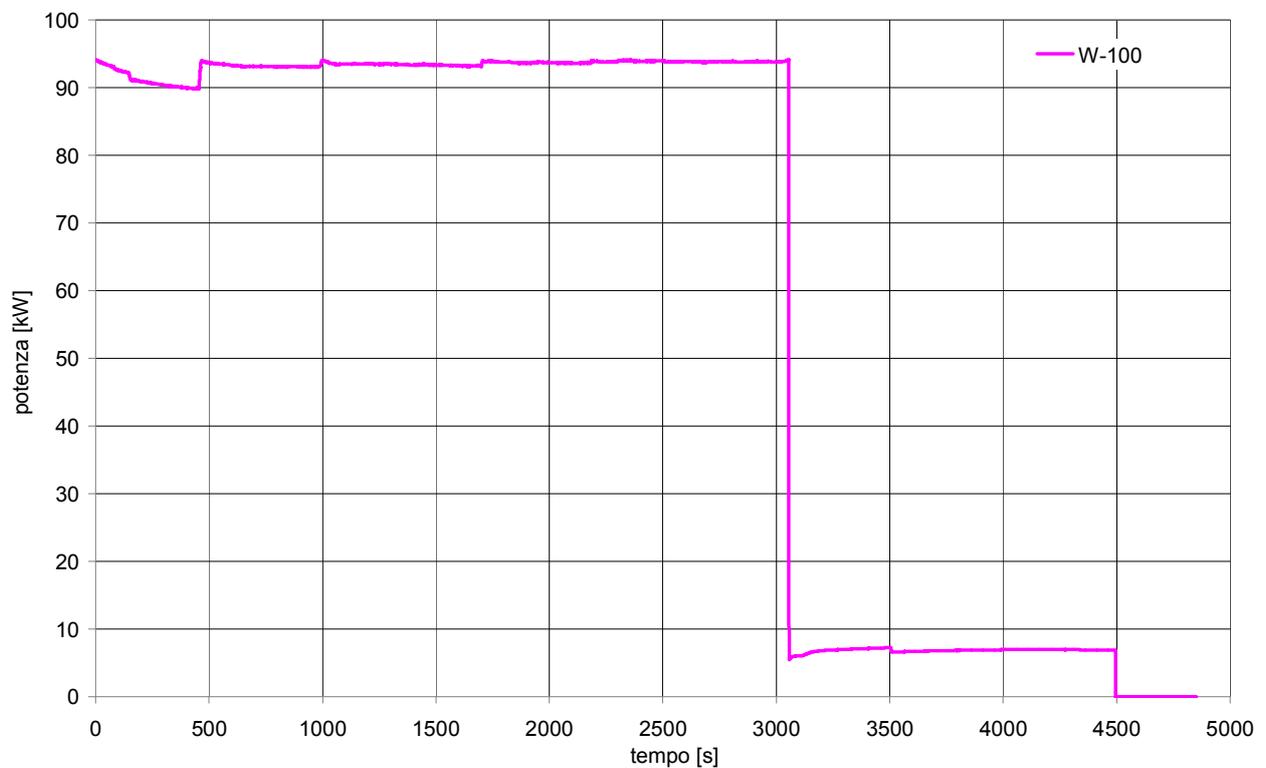


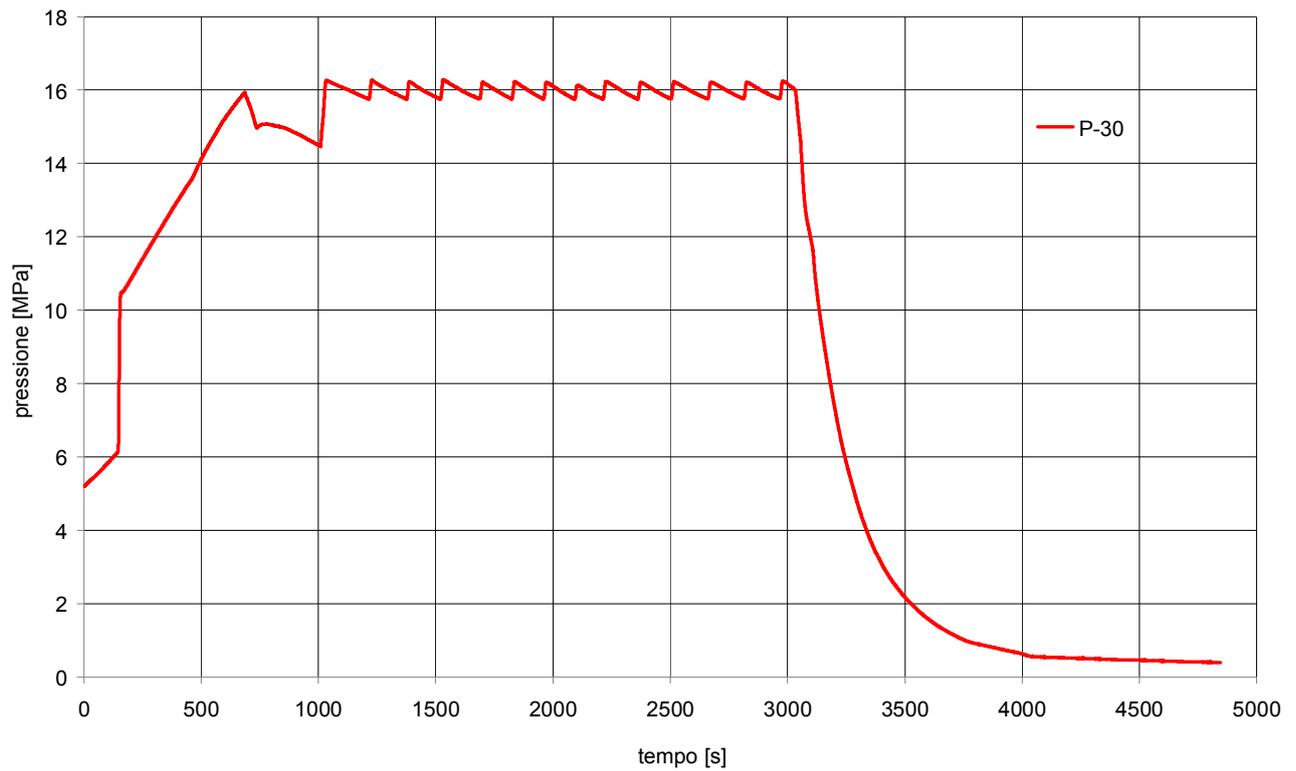
Fig. 8. 236 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°36



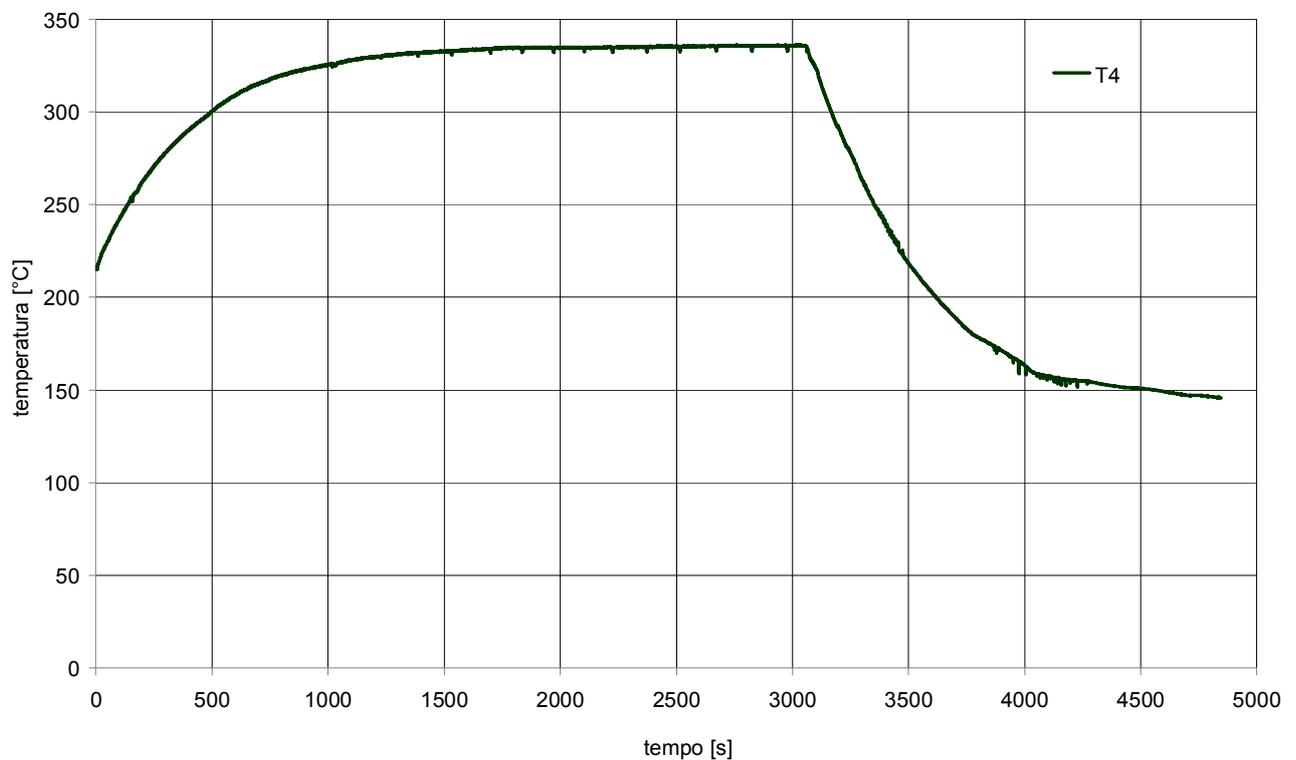
**Fig. 8. 237 - Andamento della temperatura “circuito primario quota superiore barre” (verde) e della resistenza elettrica barre (arancio) per il Test n°37**



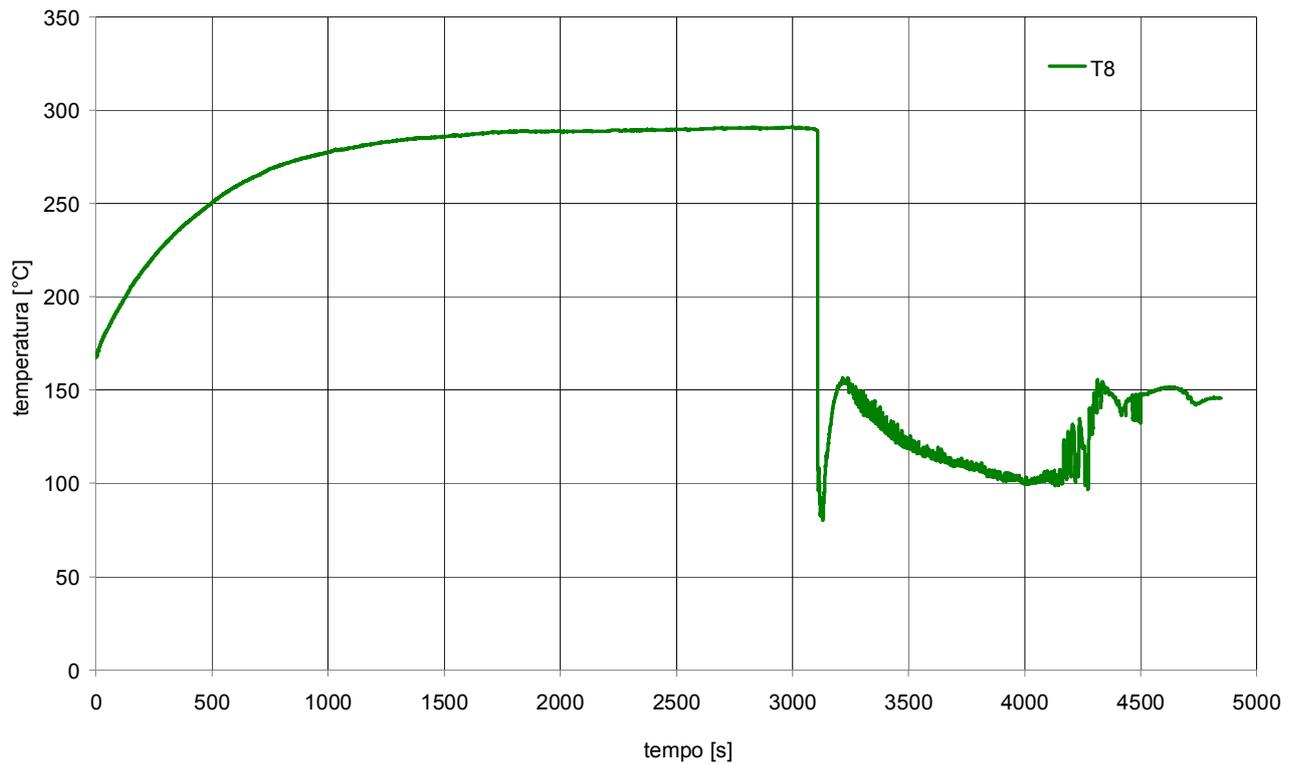
**Fig. 8. 238 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°37**



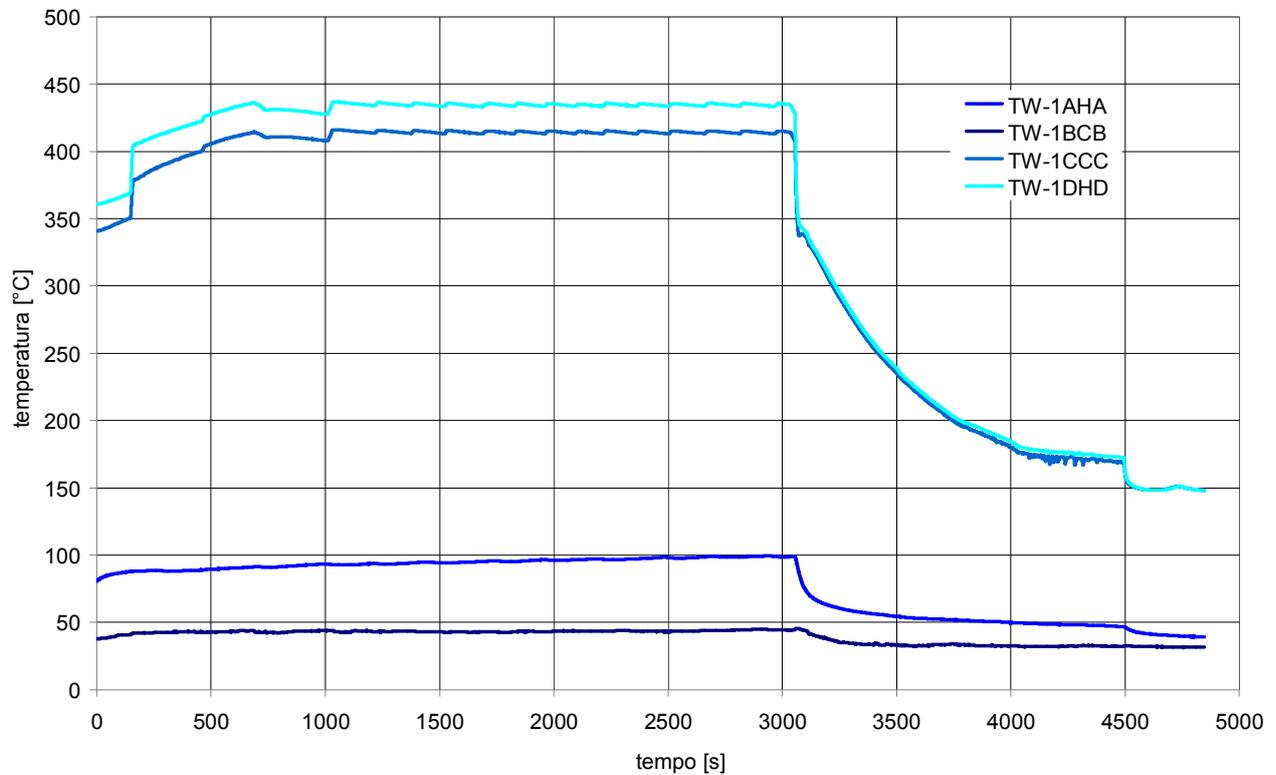
**Fig. 8. 239 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°37**



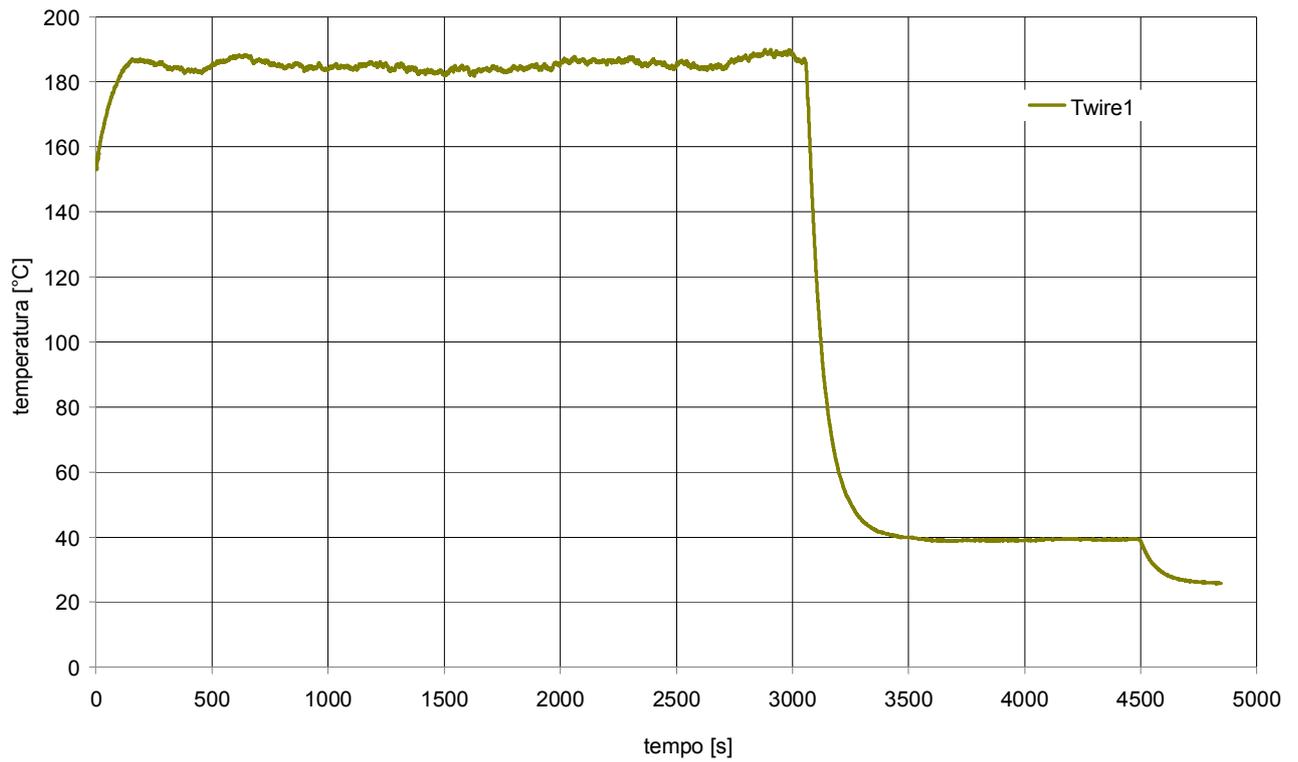
**Fig. 8. 240 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°37**



**Fig. 8. 241 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°37**



**Fig. 8. 242 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°37**



**Fig. 8. 243 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°37**

## 8.3 Stress Test

Le prove di ciclaggio termico hanno lo scopo di simulare il comportamento delle barre scaldanti durante un transitorio incidentale. Le barre scaldanti, infatti, sono sollecitate termicamente e meccanicamente durante il transitorio dagli shock termici conseguenti dalla riduzione di potenza e dall'intervento dell'EBT.

SIET ha deciso di eseguire delle prove aggiuntive per condurre degli studi più approfonditi sul set di barre proveniente dalla ditta Rotfil in modo da verificare il comportamento degli elementi scaldanti in condizioni limite.

Si è deciso quindi di condurre delle prove di crisi termica.

Successivamente si sono condotte delle prove di verifica di funzionalità, mantenendo l'impianto nelle condizioni operative, per analizzare il comportamento delle barre scaldanti a seguito delle sollecitazioni create dalla prove di crisi.

### 8.3.1 Test di crisi termica

Le prove di crisi sono state eseguite in condizioni di bassa pressione, dato che, secondo la specifica [1], il raggiungimento di elevate temperature è consentito a basse pressioni.

Durante i test l'operatore ha proceduto nel seguente modo:

- aumento graduale della potenza delle barre scaldanti fino a valori di circa 20 kW;
- mantenimento della potenza fino al raggiungimento dell'evento di crisi termica.

Al raggiungimento del picco della temperatura di barra, si supera la soglia di allarme per elevata temperatura delle barre scaldanti ( $T=750\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) con sgancio di potenza automatico e conseguente estinzione del fenomeno di crisi. Per ridondanza sulle sicurezze si è proceduto ad abbassare, da  $195\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la soglia di allarme per elevata temperatura "terminazioni elettriche barre scaldanti" onde evitare surriscaldamenti eccessivi delle guaine.

Si è inoltre ritenuto opportuno eseguire dei cicli di crisi, nell'arco di un breve periodo temporale, in ogni test eseguito con lo scopo di:

- verificare la ripetibilità delle prestazioni delle barre in condizioni gravose;
- eseguire più test in modo da velocizzare l'invecchiamento degli elementi scaldanti così da simulare il loro comportamento durante la vita utile.

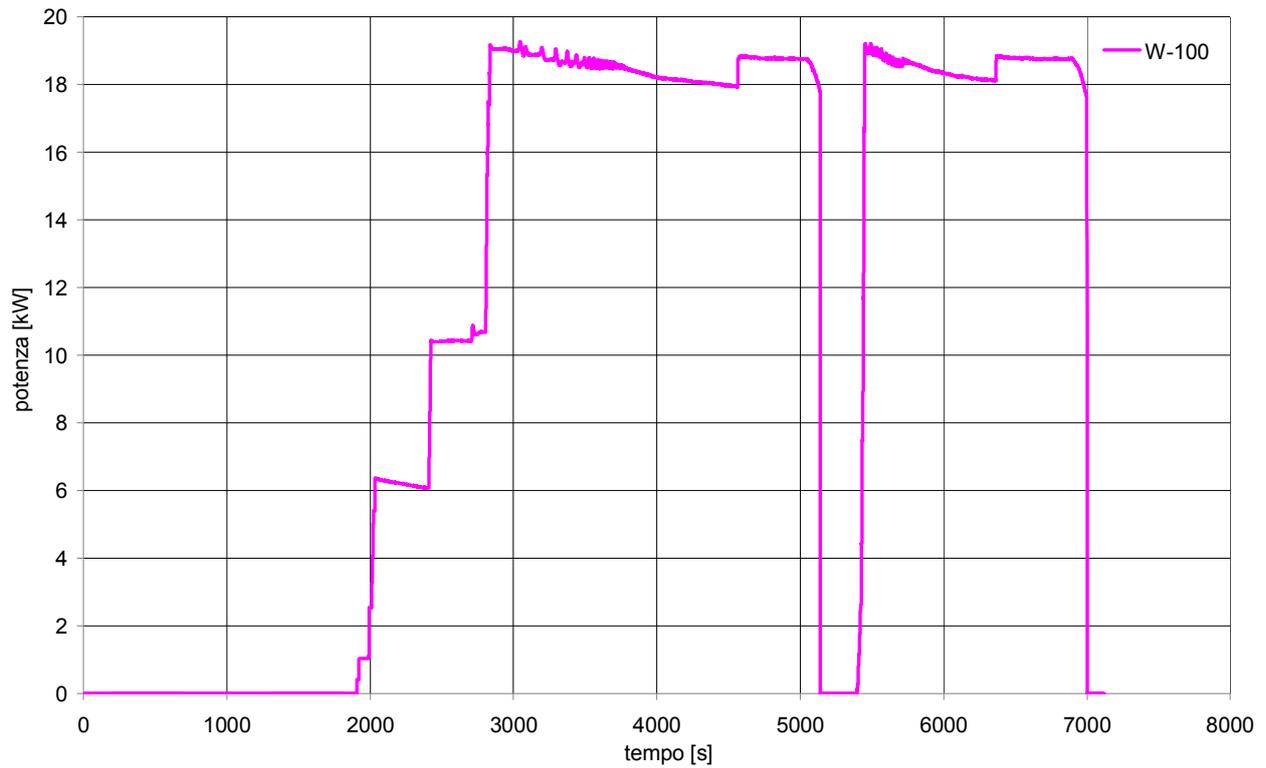
In Tab.8. 7 sono elencate le prove di crisi termica eseguite ed identificate col nome del file di acquisizione. Dettagli e commenti relativi a tali prove sono riportati in Tab.8. 8 ed illustrati nelle figure da Fig. 8.244 a Fig. 8.255.

**Tab.8. 7 - Elenco dei Test di Crisi Termica effettuati**

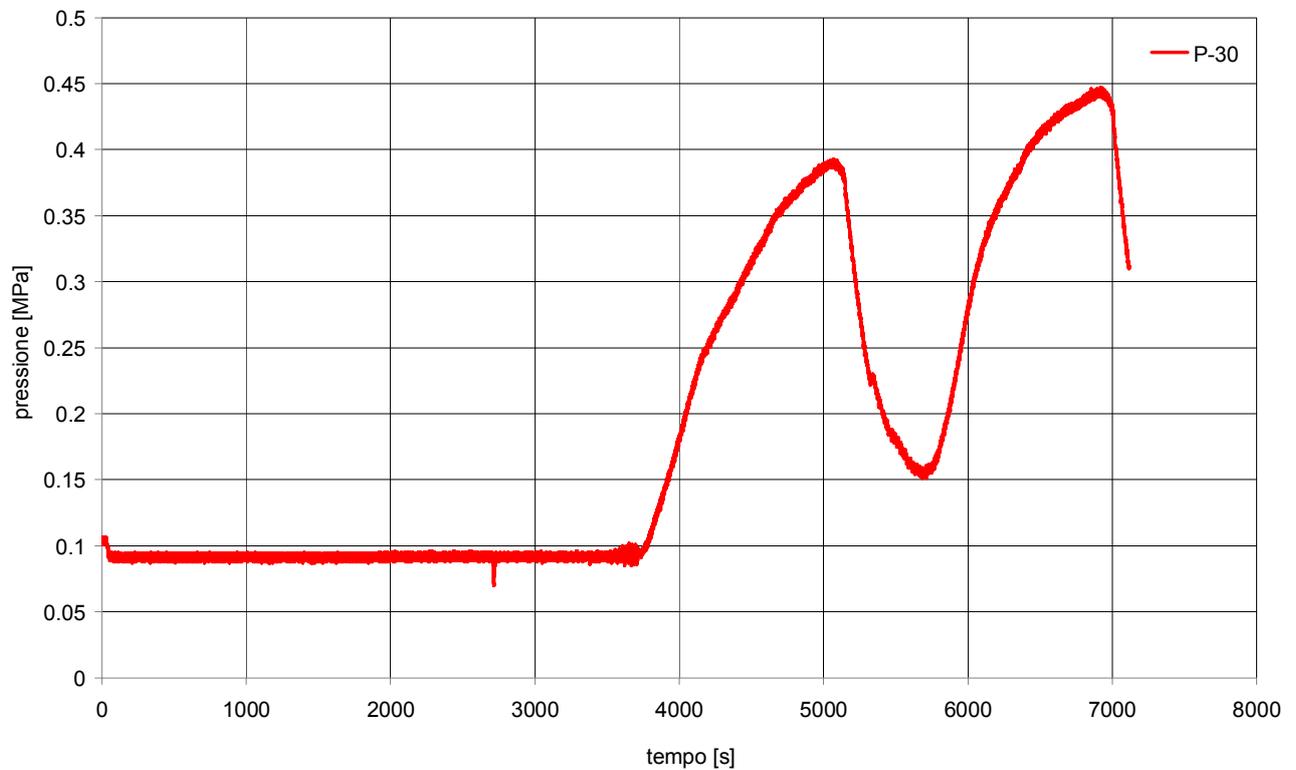
#	nome_file_acquisizione	descrizione prova
<b>38</b>	2011-06-01_9:30.xls	CRISI TERMICA - BASSA PRESSIONE
<b>39</b>	2011-06-01_11:31.xls	CRISI TERMICA - BASSA PRESSIONE
<b>40</b>	2011-06-01_13:54.xls	CRISI TERMICA - BASSA PRESSIONE
<b>41</b>	2011-06-01_14:55.xls	CRISI TERMICA - BASSA PRESSIONE

**Tab.8. 8 - Dettaglio sui Test di Crisi Termica elencati in Tab.8. 7**

#	Figure di riferimento	Commenti
<b>38</b>	Fig. 8.244 Fig. 8.245 Fig. 8.246	Test eseguito secondo procedura.
<b>39</b>	Fig. 8.247 Fig. 8.248 Fig. 8.249	Test eseguito secondo procedura.
<b>40</b>	Fig. 8.250 Fig. 8.251 Fig. 8.252	Test eseguito secondo procedura. Si segnala un tentativo da parte dell'operatore di condurre un test a potenze maggiori; la rampa di salita della pressione del sistema ha però indotto l'operatore stesso a ristabilizzare il sistema a potenze più basse.
<b>41</b>	Fig. 8.253 Fig. 8.254 Fig. 8.255	Test eseguito secondo procedura.



**Fig. 8. 244 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°38**



**Fig. 8. 245 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°38**

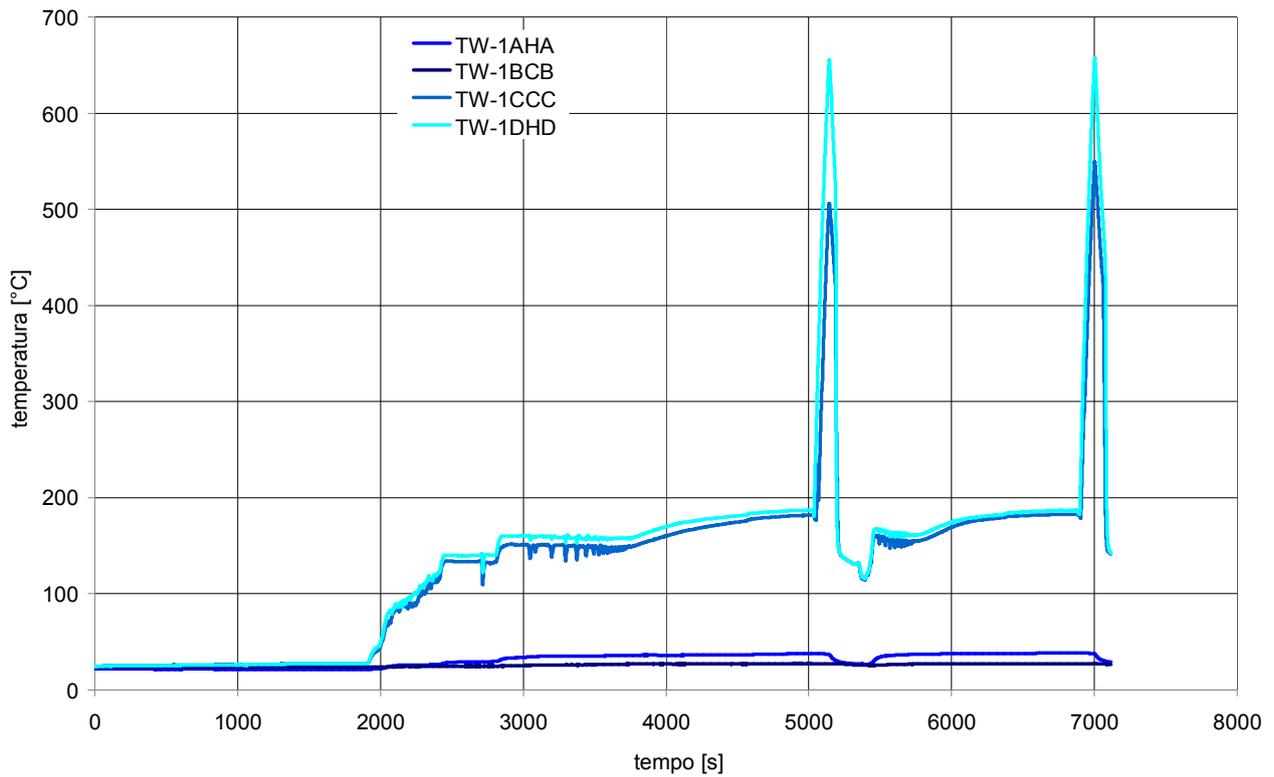


Fig. 8. 246 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°38

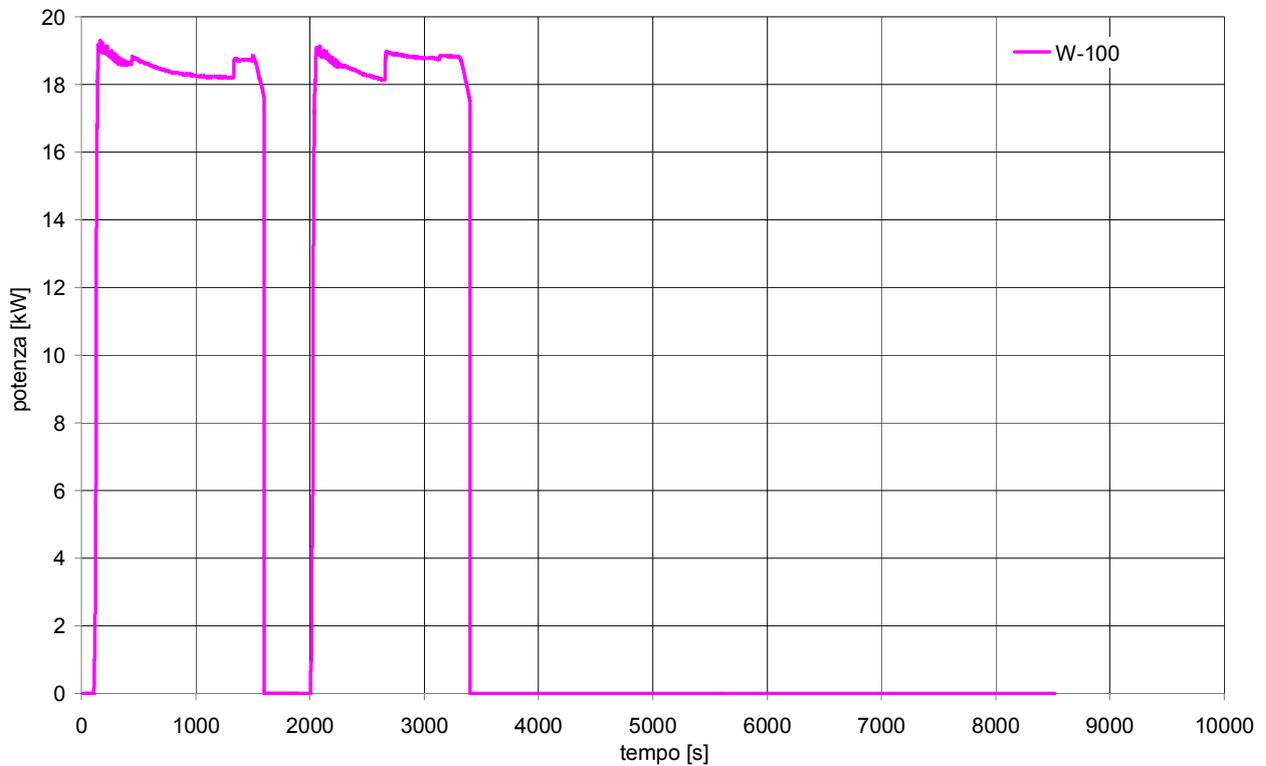
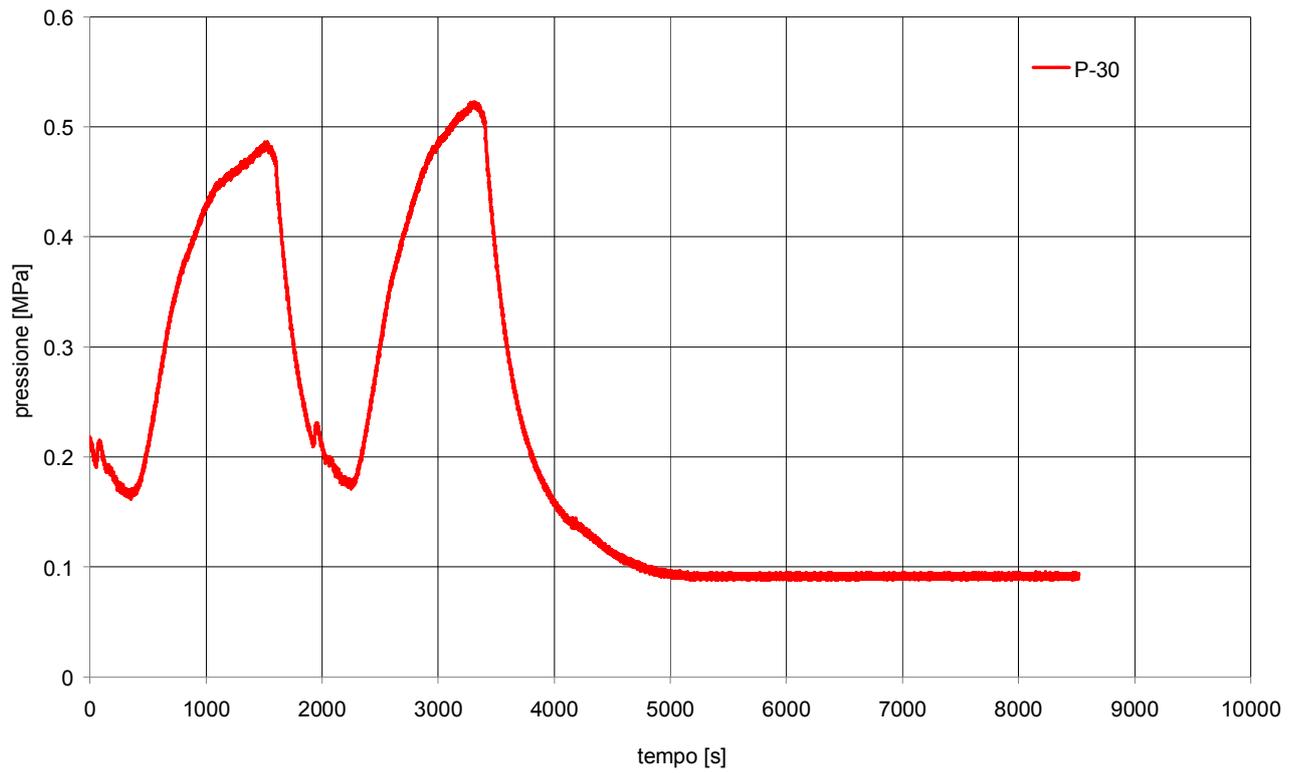
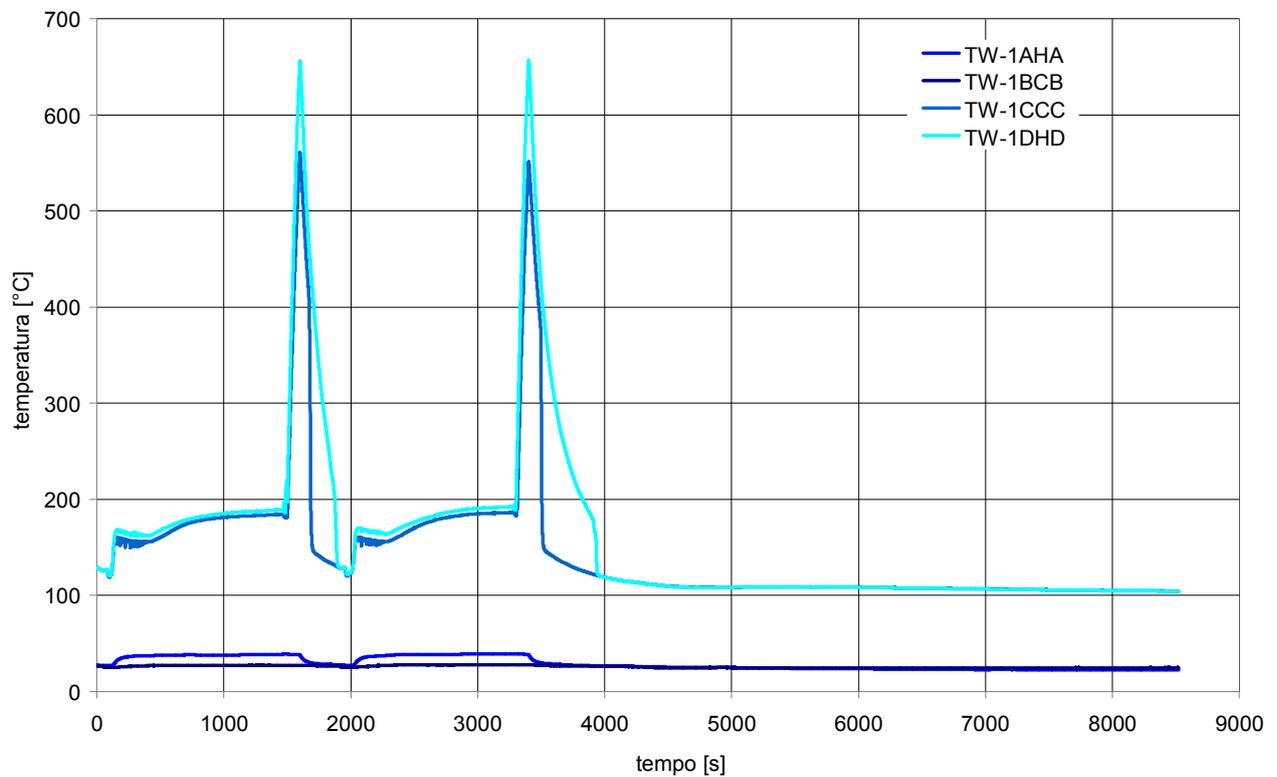


Fig. 8. 247 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°39



**Fig. 8. 248 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°39**



**Fig. 8. 249 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°39**

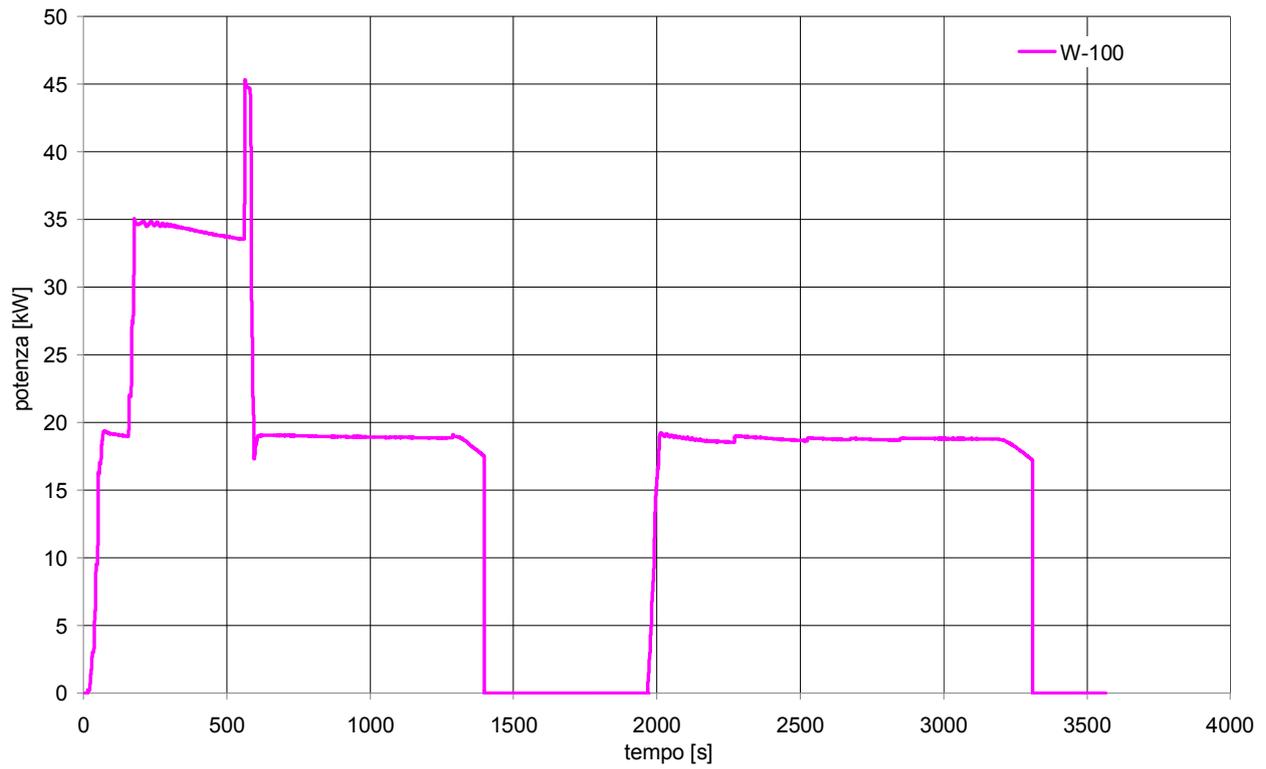


Fig. 8. 250 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°40

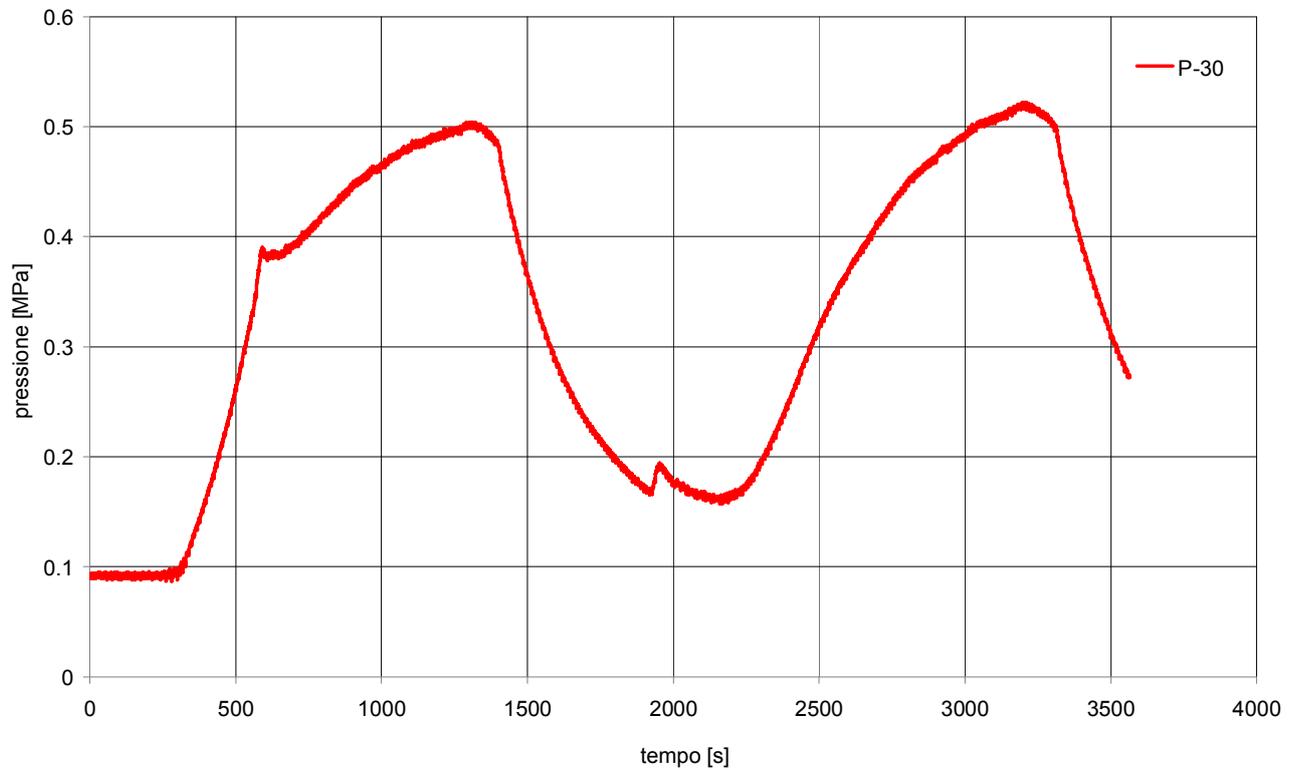
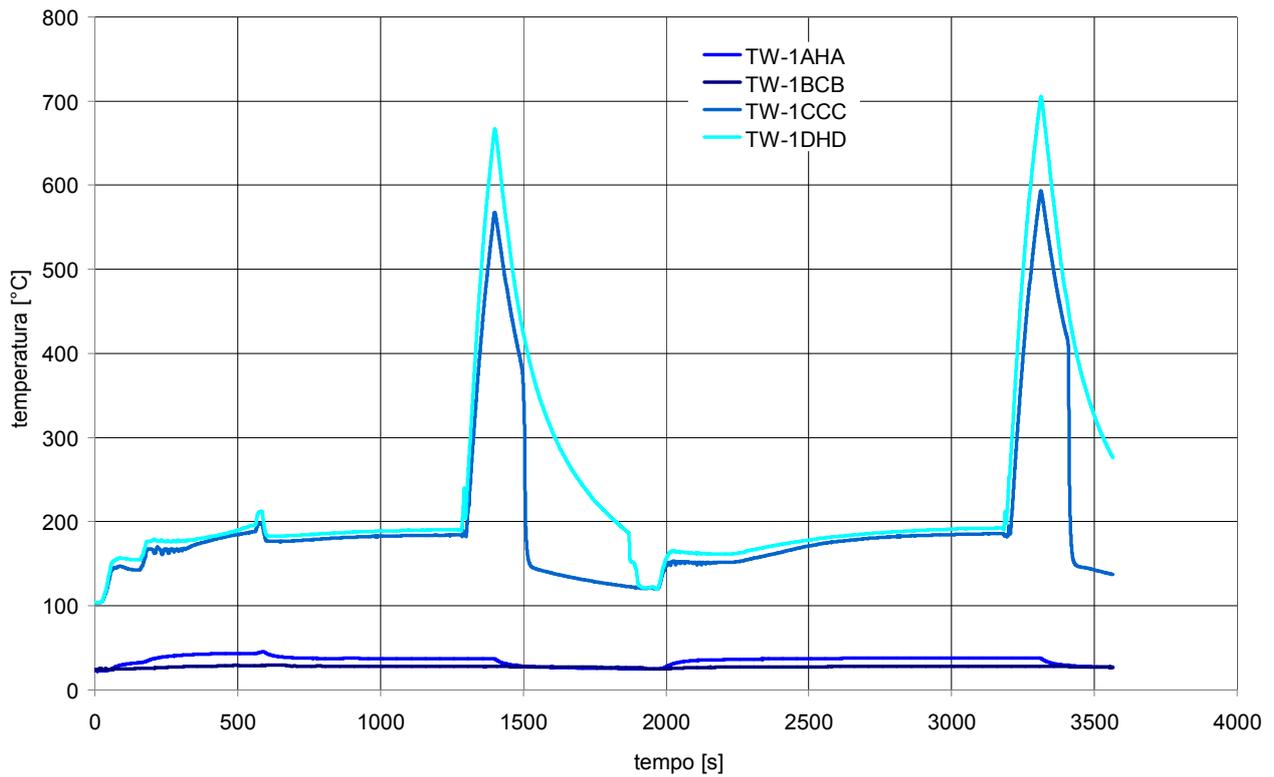
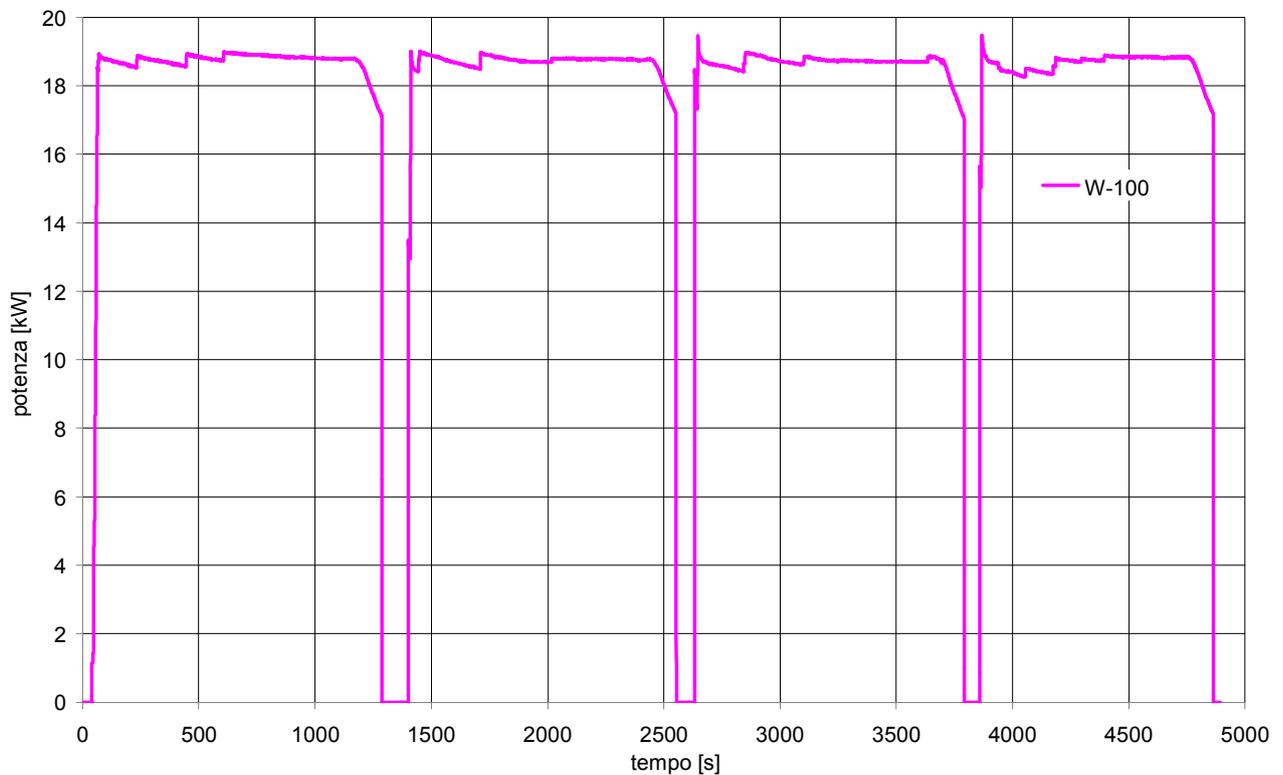


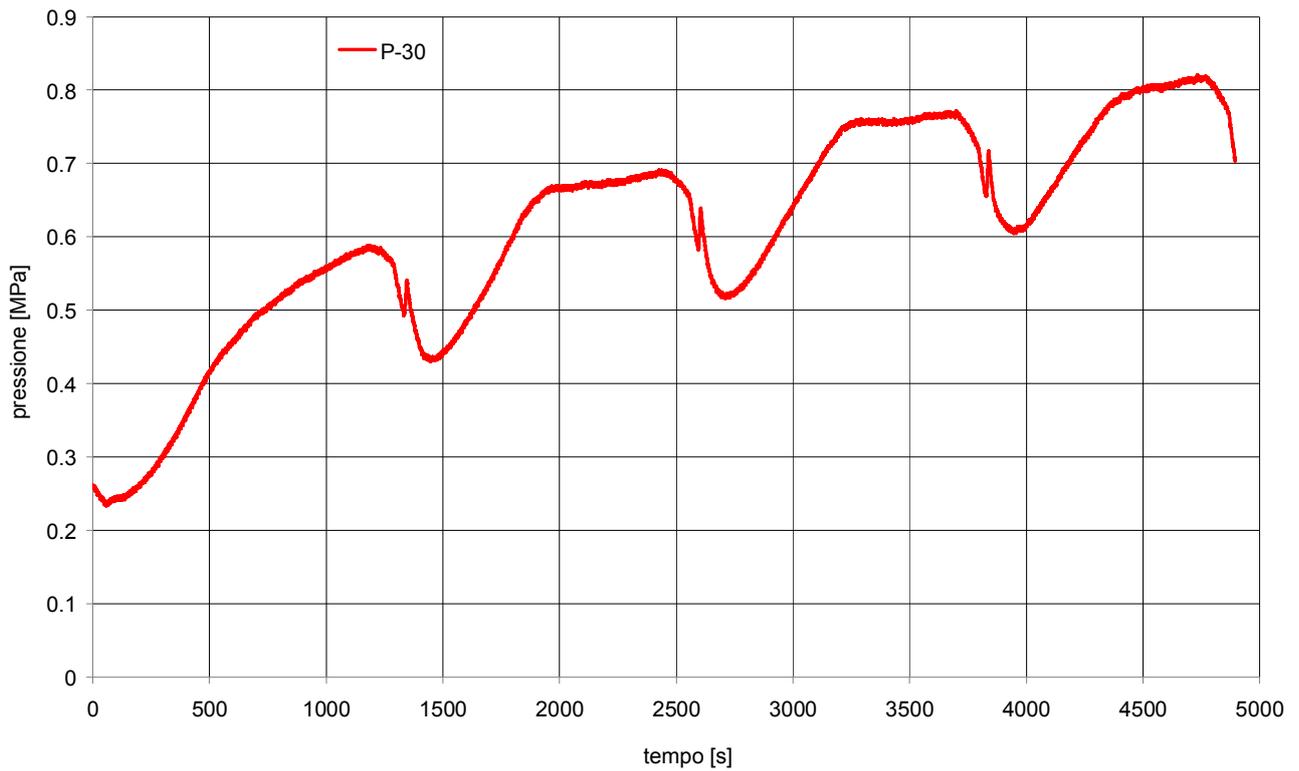
Fig. 8. 251 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°40



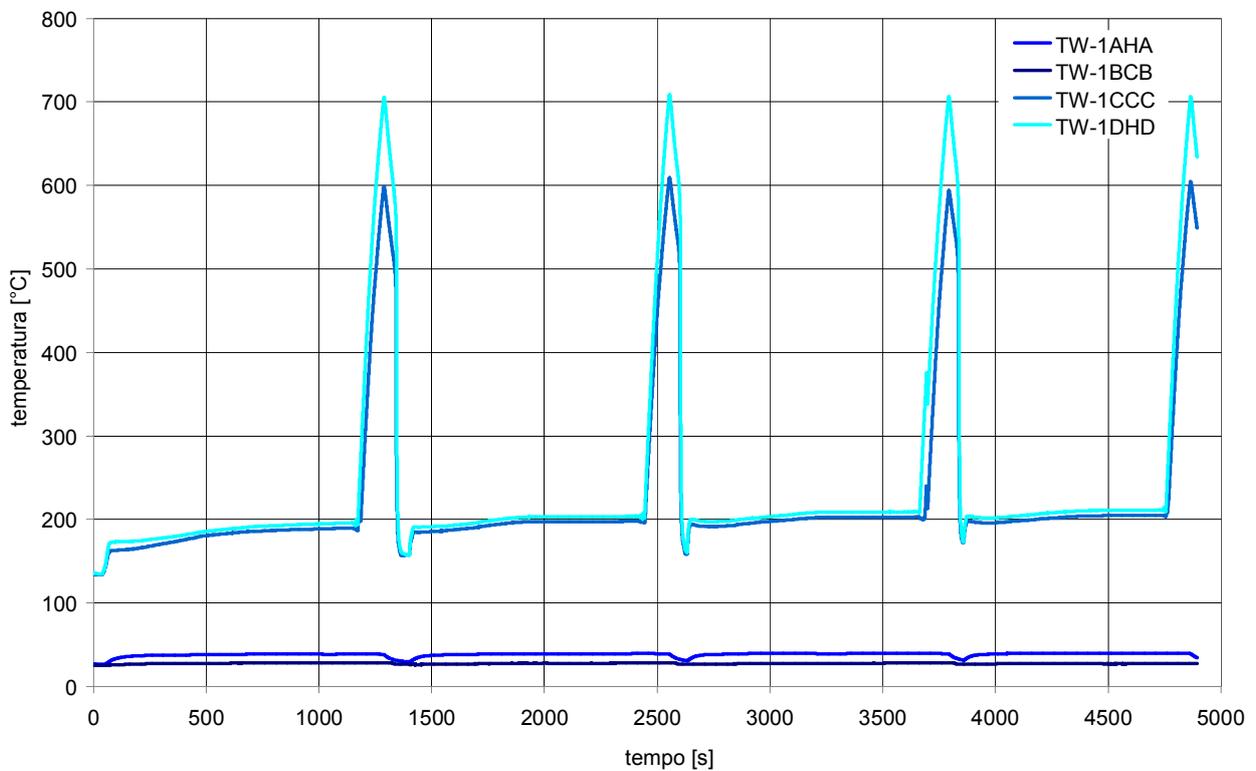
**Fig. 8. 252 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°40**



**Fig. 8. 253 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°41**



**Fig. 8.254 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°41**



**Fig. 8.255 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°41**

### 8.3.2 Endurance test

In seguito ai test di crisi termica condotti sulle barre scaldanti si è deciso di eseguire ulteriori test. Questi test sono da considerarsi come prove di verifica della funzionalità delle barre scaldanti essendo le condizioni, a cui vengono sottoposte queste ultime, quelle di esercizio.

La procedura adottata per l'esecuzione di queste prove è del tutto simile a quella adottata per le prove di ciclaggio termico. È prevista la depressurizzazione del sistema aprendo la valvola di sfiato VV1 (vedi disegno 074.02.00.dwg rev4 [4]) collegata, tramite una linea di scarico, alla sommità del pressurizzatore. Non è previsto l'intervento dell'EBT, si lascia quindi raffreddare il sistema liberamente senza interventi da parte dell'operatore, a meno di eventuali anomalie.

In Tab.8. 9 sono elencate le prove di verifica della funzionalità delle barre scaldanti ed identificate col nome del file di acquisizione. Commenti e dettagli a tali prove sono riportati in Tab.8. 10 e mostrati nelle figure da Fig. 8.256 a Fig. 8.276.

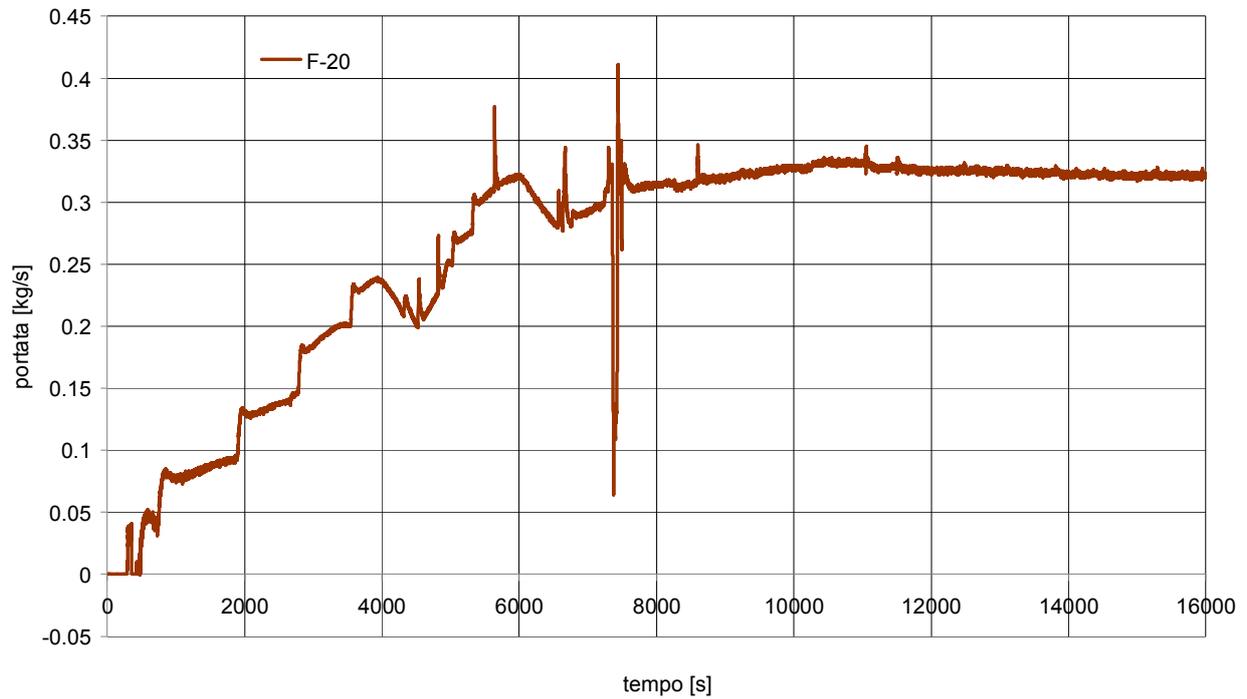
**Tab.8. 9 - Elenco degli Endurance Test effettuati**

#	nome_file_acquisizione	descrizione prova
42	2011-07-15_9:42.xls	VERIFICA FUNZIONALITA'
43	2011-07-19_9:35.xls	VERIFICA FUNZIONALITA'
44	2011-07-20_9:38.xls	STRESS - ALTA PRESSIONE

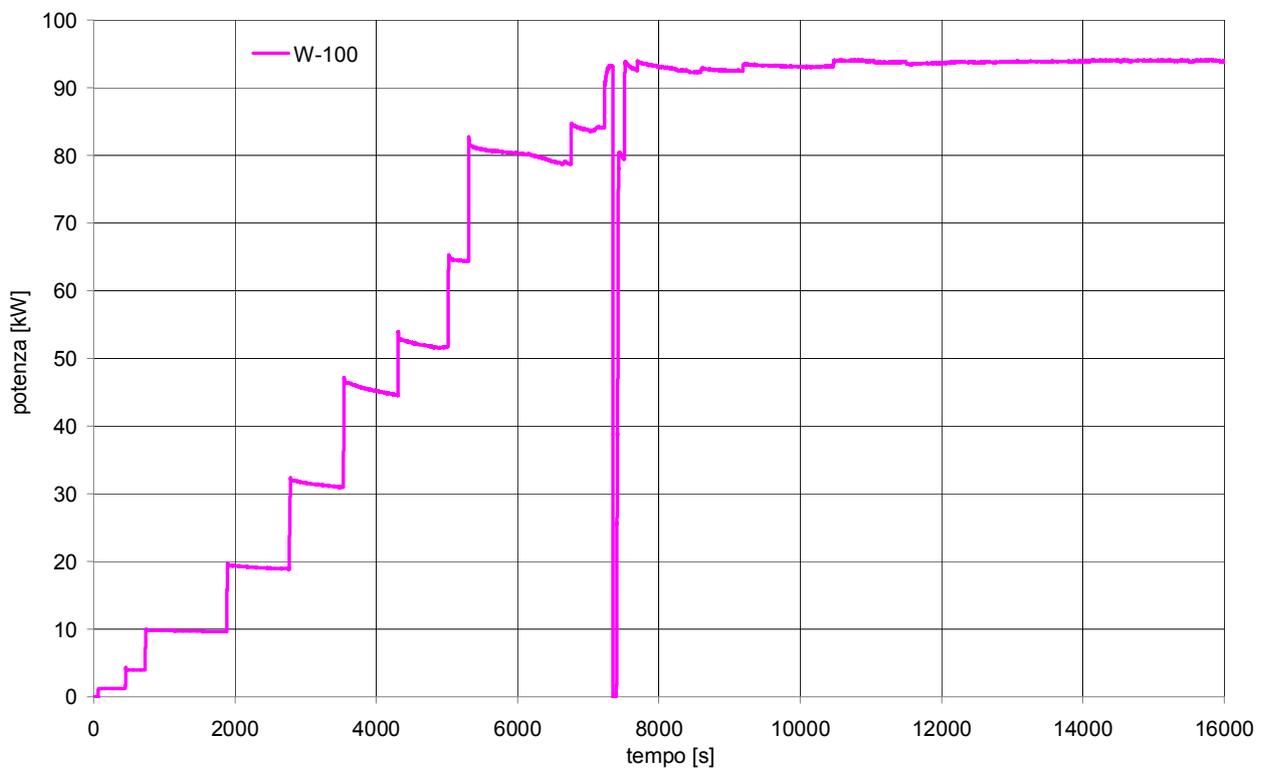
**Tab.8. 10 – Dettaglio sugli Endurance Test elencati in Tab.8. 9**

#	Figure di riferimento	Commenti
42	Fig. 8.256 Fig. 8.257 Fig. 8.258 Fig. 8.259 Fig. 8.260 Fig. 8.261 Fig. 8.262	Prova eseguita secondo procedura. Si segnala uno sgancio di potenza al tempo $t \approx 8000$ s per superamento della soglia di allarme della temperatura “termina nazioni elettriche barre scaldanti” (vedi Fig. 8.262), ridotta da 195°C a 180 °C durante le prove di crisi termica.
43	Fig. 8.263 Fig. 8.264 Fig. 8.265 Fig. 8.266 Fig. 8.267 Fig. 8.268 Fig. 8.269	Prova eseguita secondo procedura. Si segnala uno sgancio di potenza al tempo $t \approx 6500$ s per superamento della soglia di allarme della pressione del sistema (vedi Fig. 8.265).
44	Fig. 8.270 Fig. 8.271 Fig. 8.272 Fig. 8.273 Fig. 8.274 Fig. 8.275 Fig. 8.276	Prova di stress ad alta pressione. Il sistema è stato sottoposto a una salita rapida in potenza con conseguente aumento di pressione che ha causato lo sgancio di potenza al tempo $t \approx 3500$ s e $t \approx 3700$ s (vedi Fig. 8.272). L'escursione di pressione è stata limitata aprendo la valvola di drenaggio DV1 (vedi disegno 074.02.00.dwg rev4 [2]). La valvola DV1 è stata erroneamente lasciata aperta causando al tempo $t \approx 4100$ s l'annullamento della portata in circolazione naturale (vedi Fig. 8.270) e la formazione di sacche di vapore nella zona intermedia del circuito primario. Si segnala al tempo $t \approx 4100$ s uno sgancio di potenza per superamento della soglia di allarme “temperatura massima canale”, la temperatura raggiunta è stata di 450 °C. L'impianto è stato poi ciclicamente portato in condizioni prossime alla saturazione a potenze ridotte.

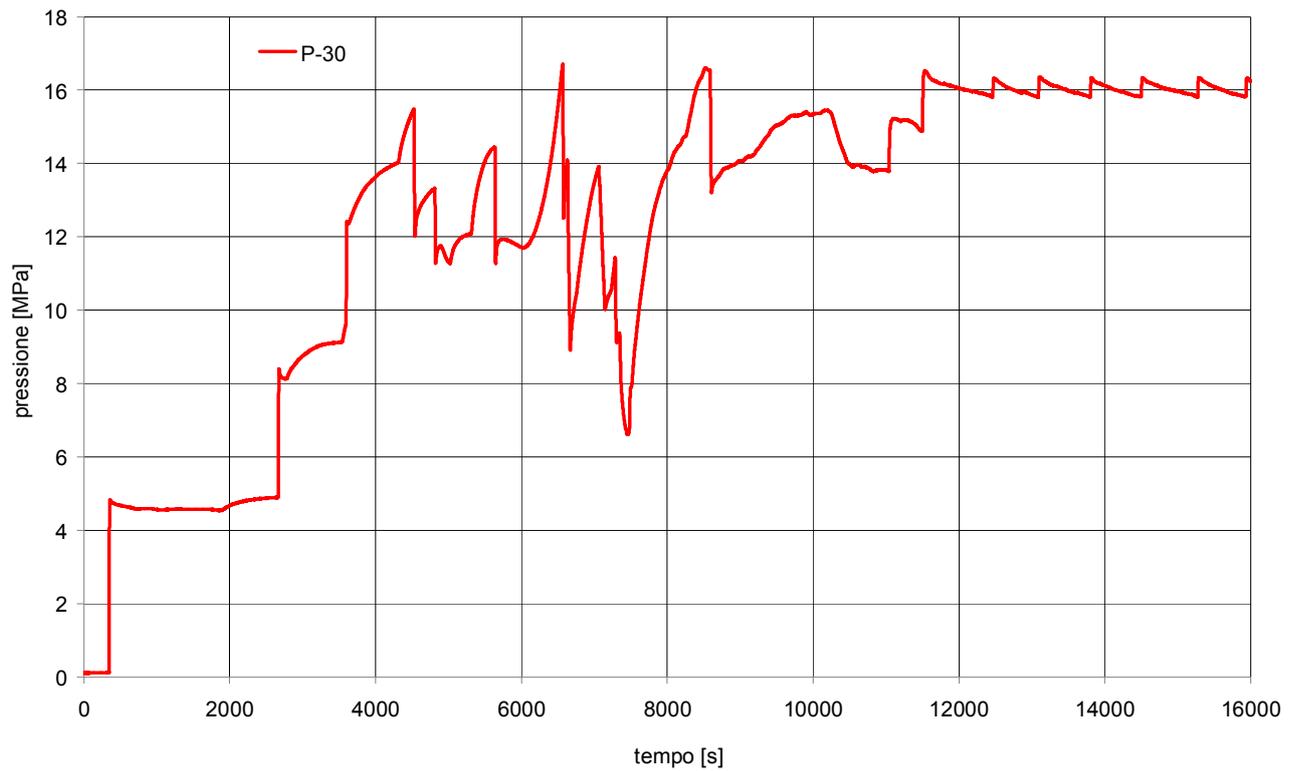
Il test finale condotto sul circuito prova barre è stata la simulazione di un Loss Of Coolant Accident (LOCA) con parziale svuotamento dell'impianto a causa della valvola DV1 [4] lasciata erroneamente aperta dall'operatore. Questa è la condizione più gravosa in cui si è trovato il set di barre scaldanti durante la campagna di test eseguita, dato che si è raggiunta una temperatura di barra molto elevata, oltre le condizioni di specifica [1], e a condizioni più gravose: circa 800 °C ad alta pressione. Da sottolineare che la temperatura di barretta, per la configurazione geometrica delle barre Rotfil, Fig.9. 2, non è rappresentava della temperatura superficiale della camicia esterna, in quanto le termocoppia è collocata all'interno del materiale isolante, tra resistenza e guaina esterna, dove la temperatura è decisamente superiore.



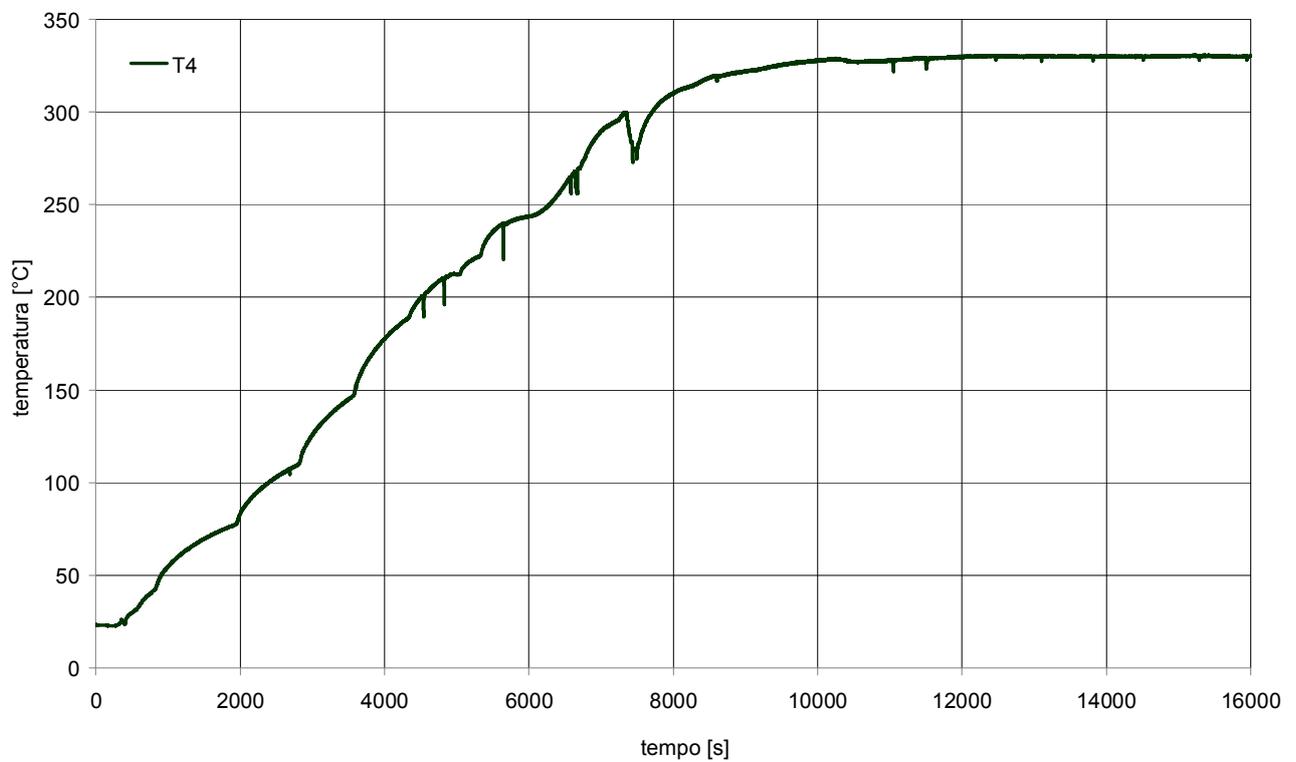
**Fig. 8. 256 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°42**



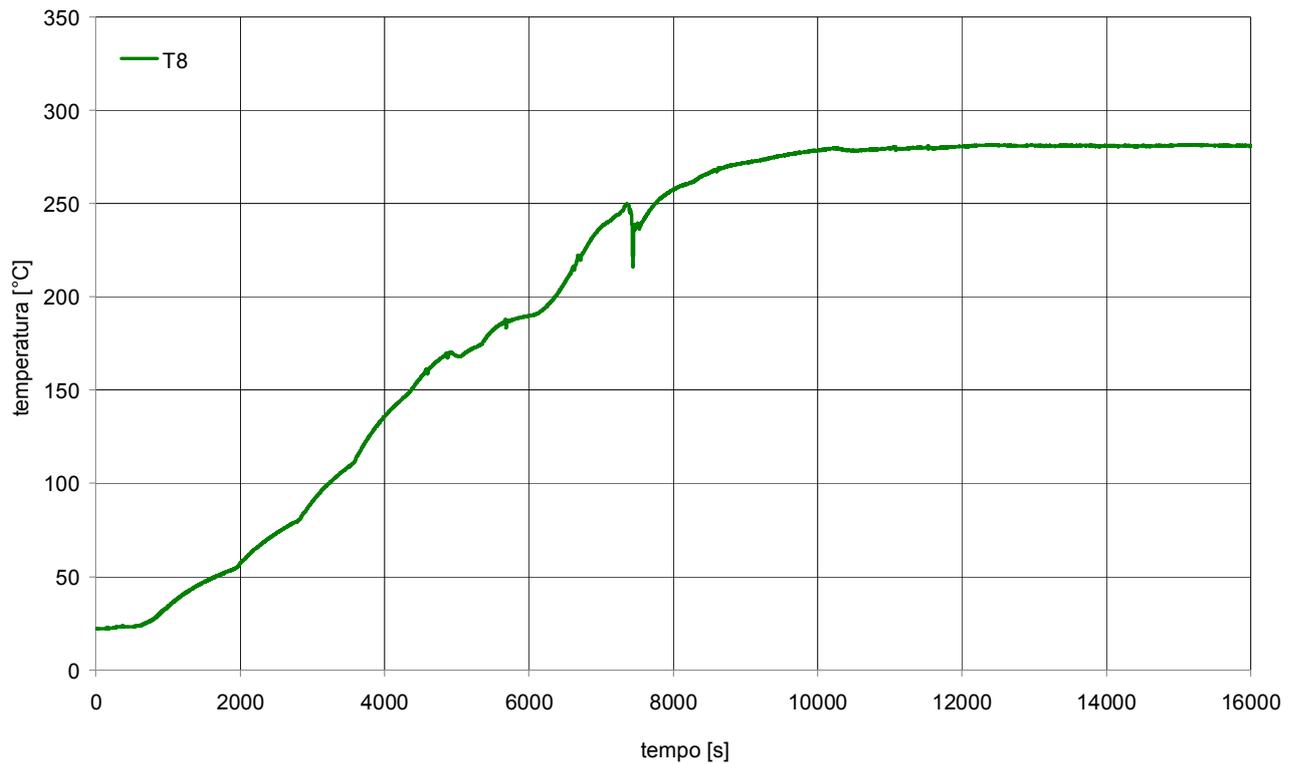
**Fig. 8. 257 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°42**



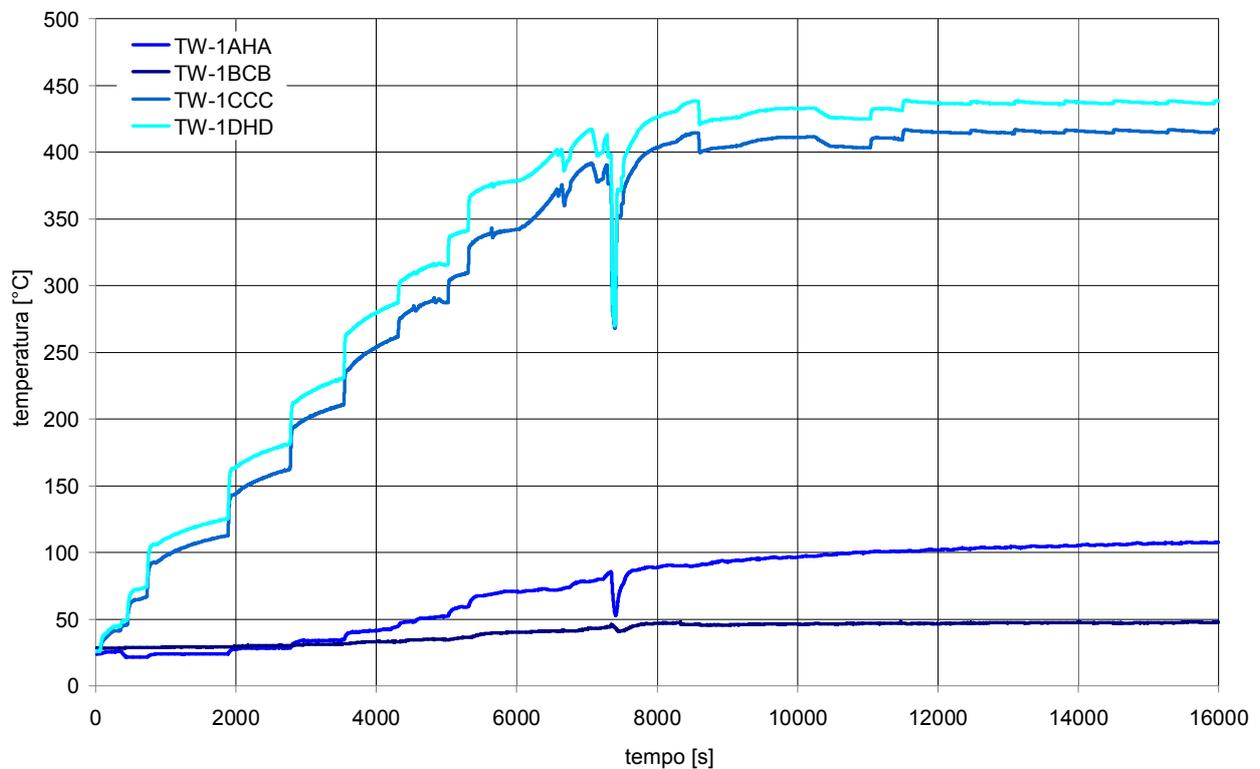
**Fig. 8. 258 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°42**



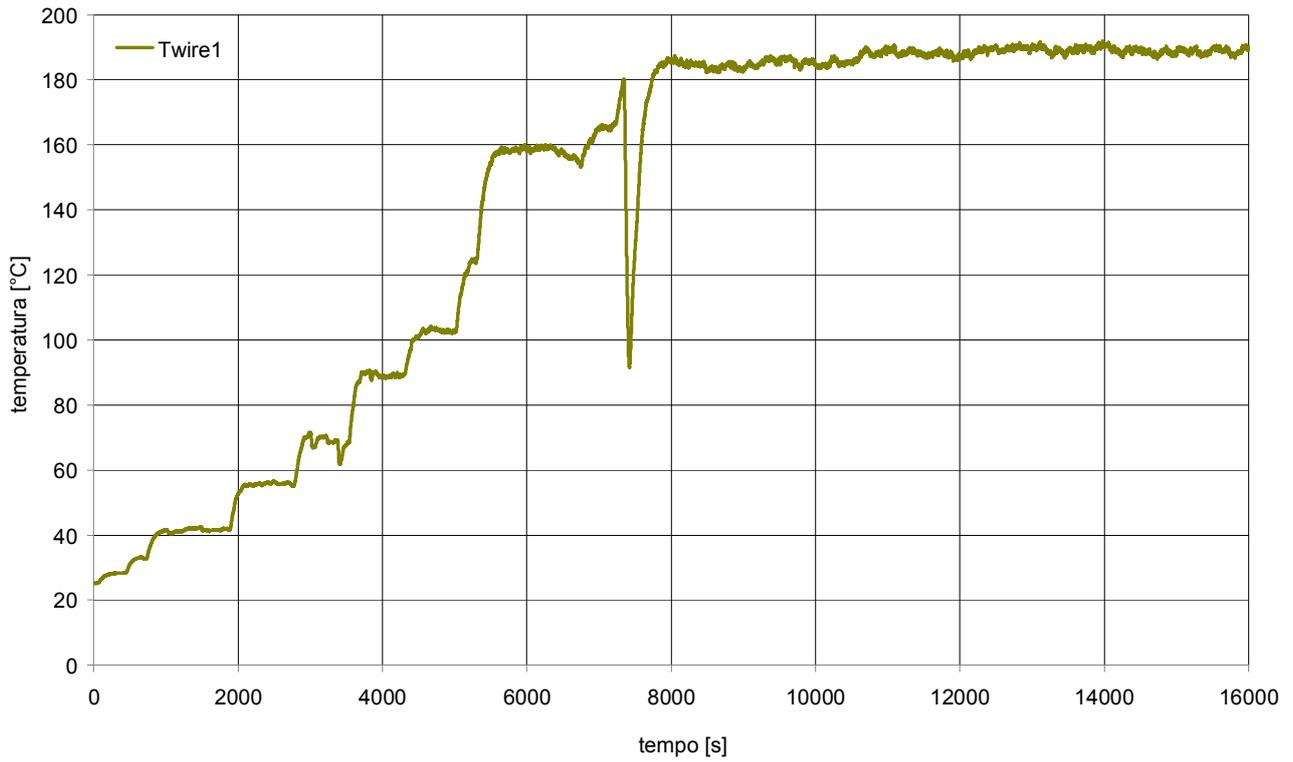
**Fig. 8. 259 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°42**



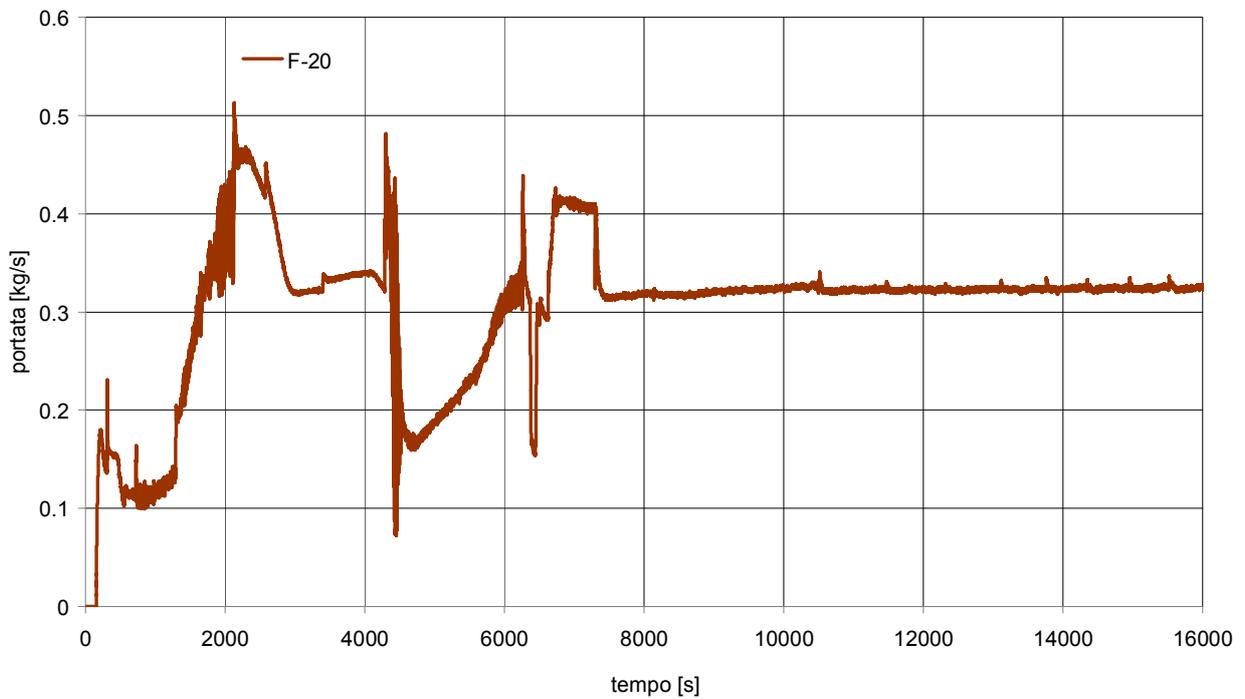
**Fig. 8. 260 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°42**



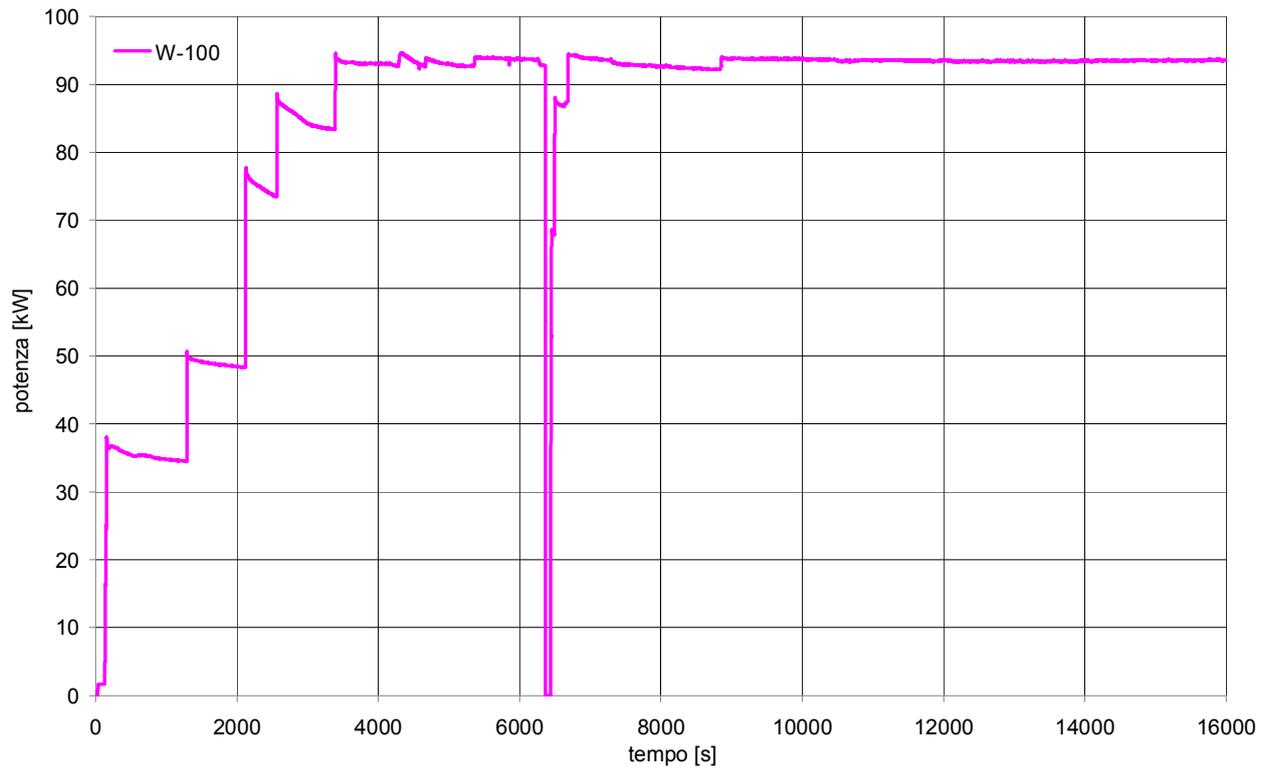
**Fig. 8. 261 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°42**



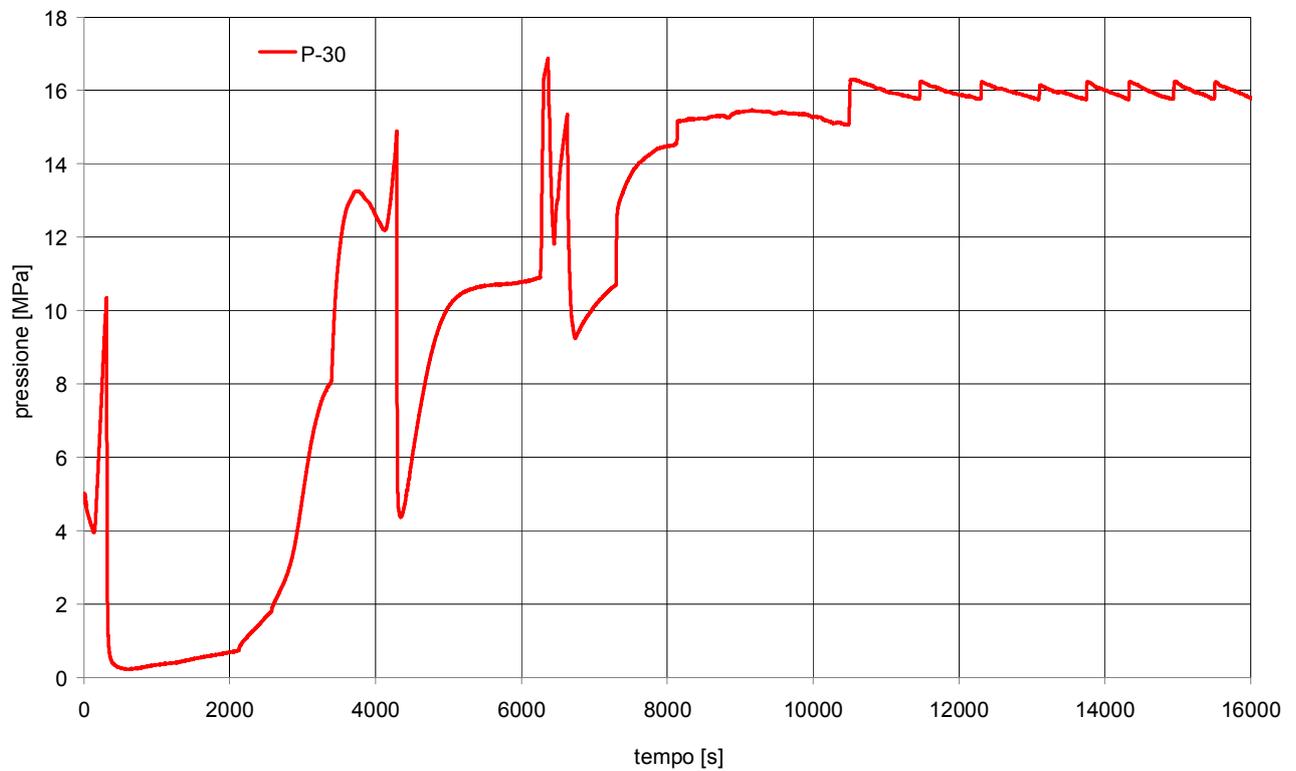
**Fig. 8. 262 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°42**



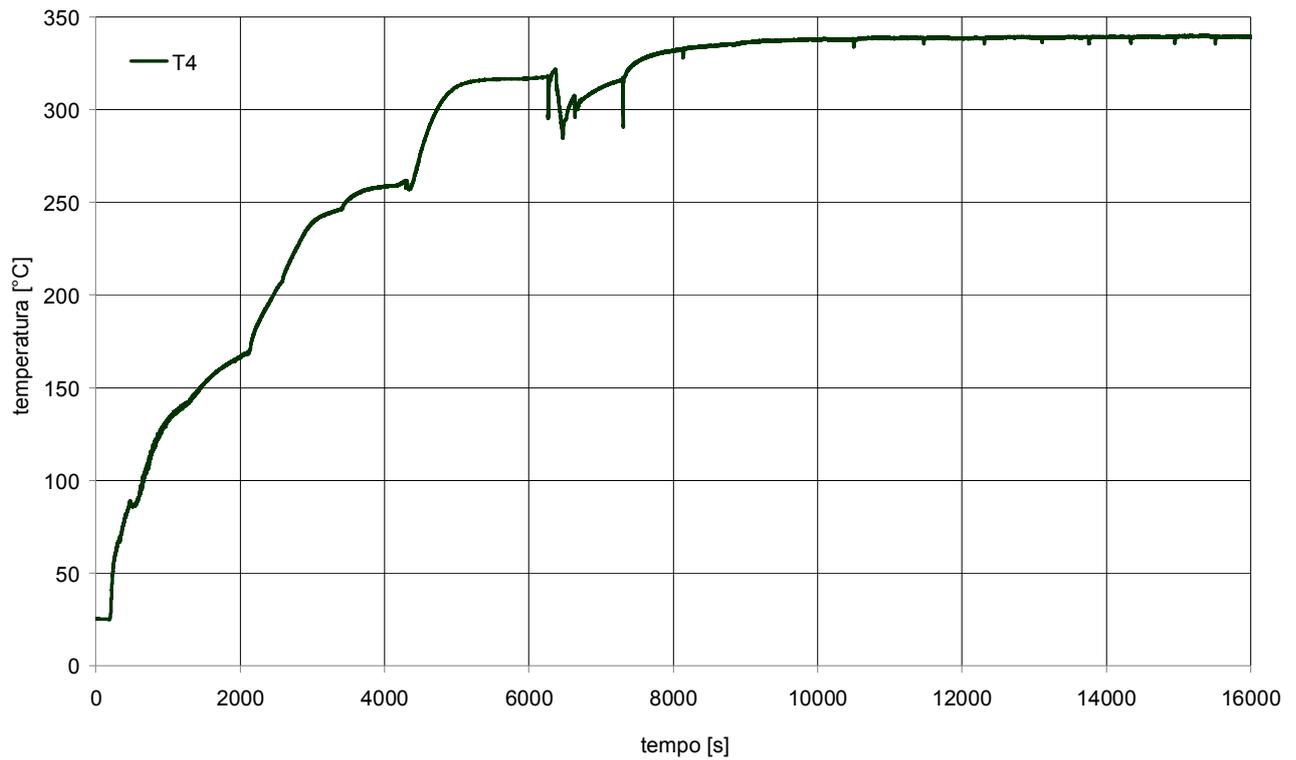
**Fig. 8. 263 - Andamento della portata del circuito prova barre per il Test n°43**



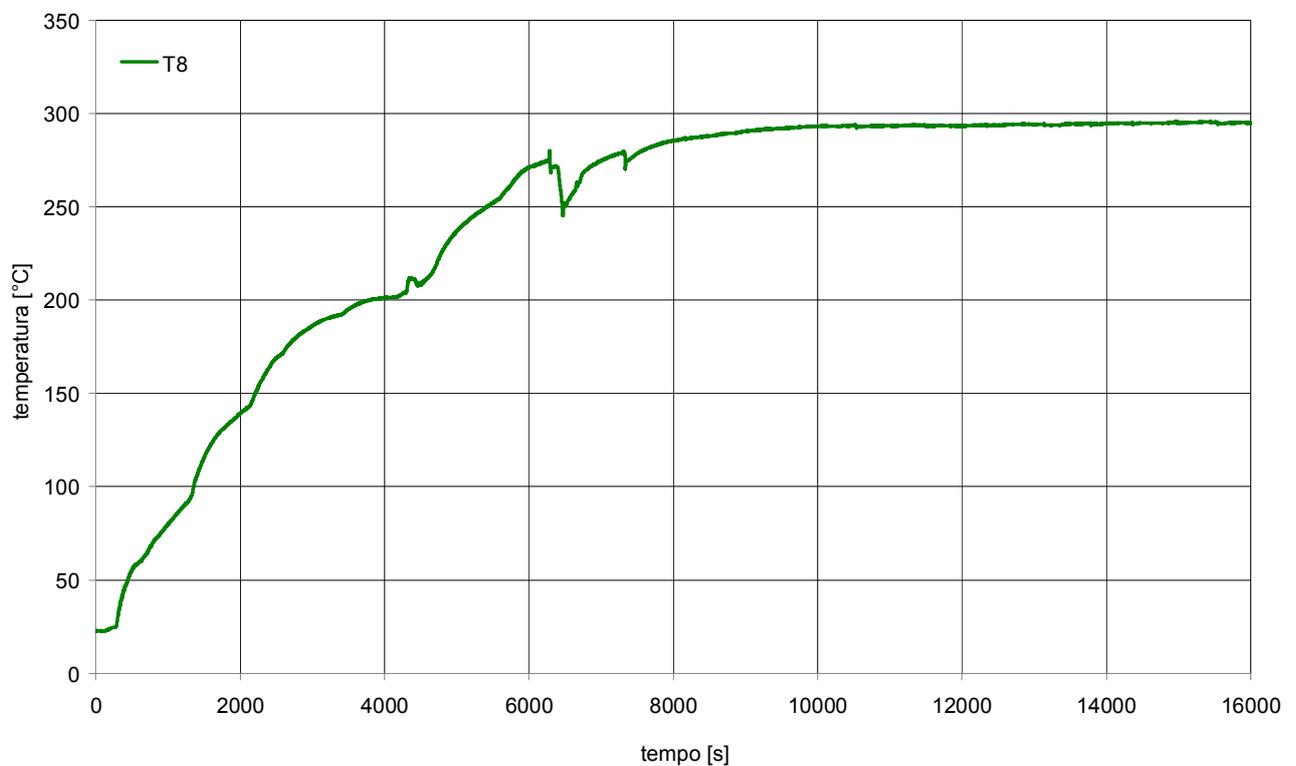
**Fig. 8. 264 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°43**



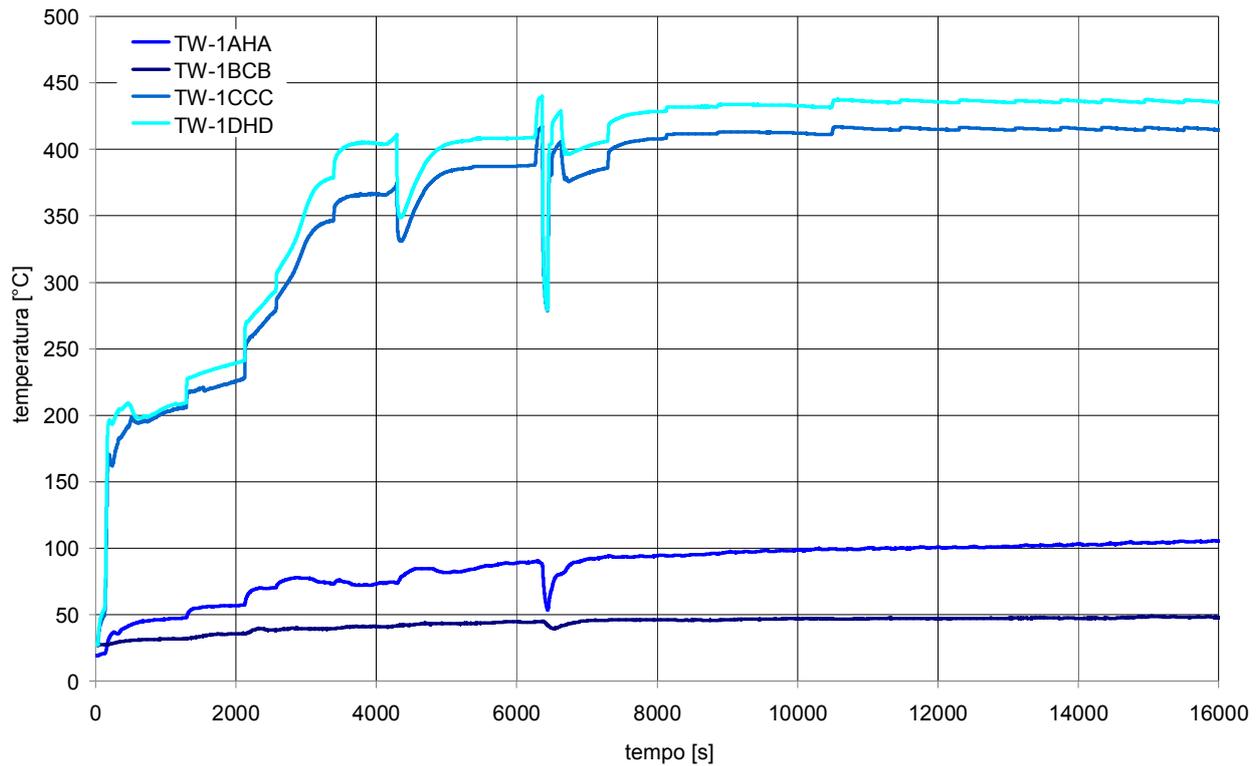
**Fig. 8. 265 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°43**



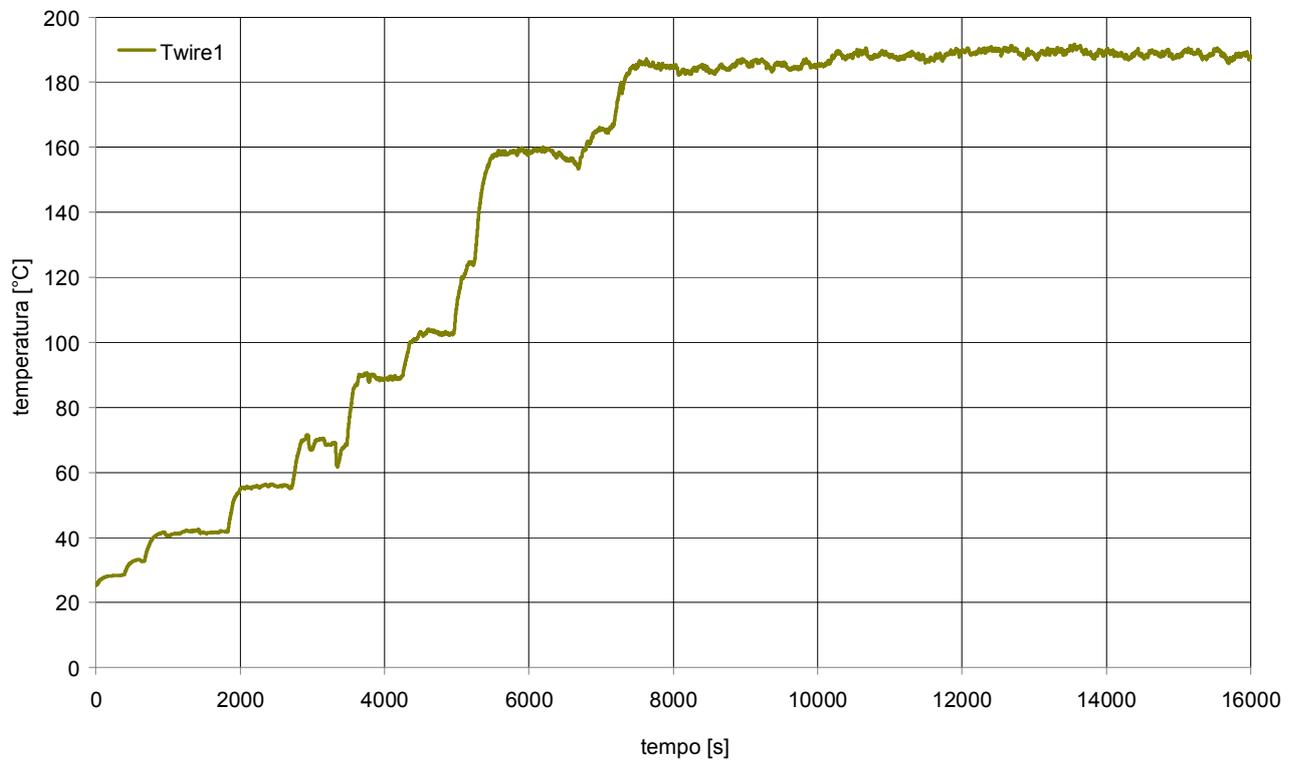
**Fig. 8. 266 - Andamento della temperatura “circuito primario tratto discendente quota superiore” per il Test n°43**



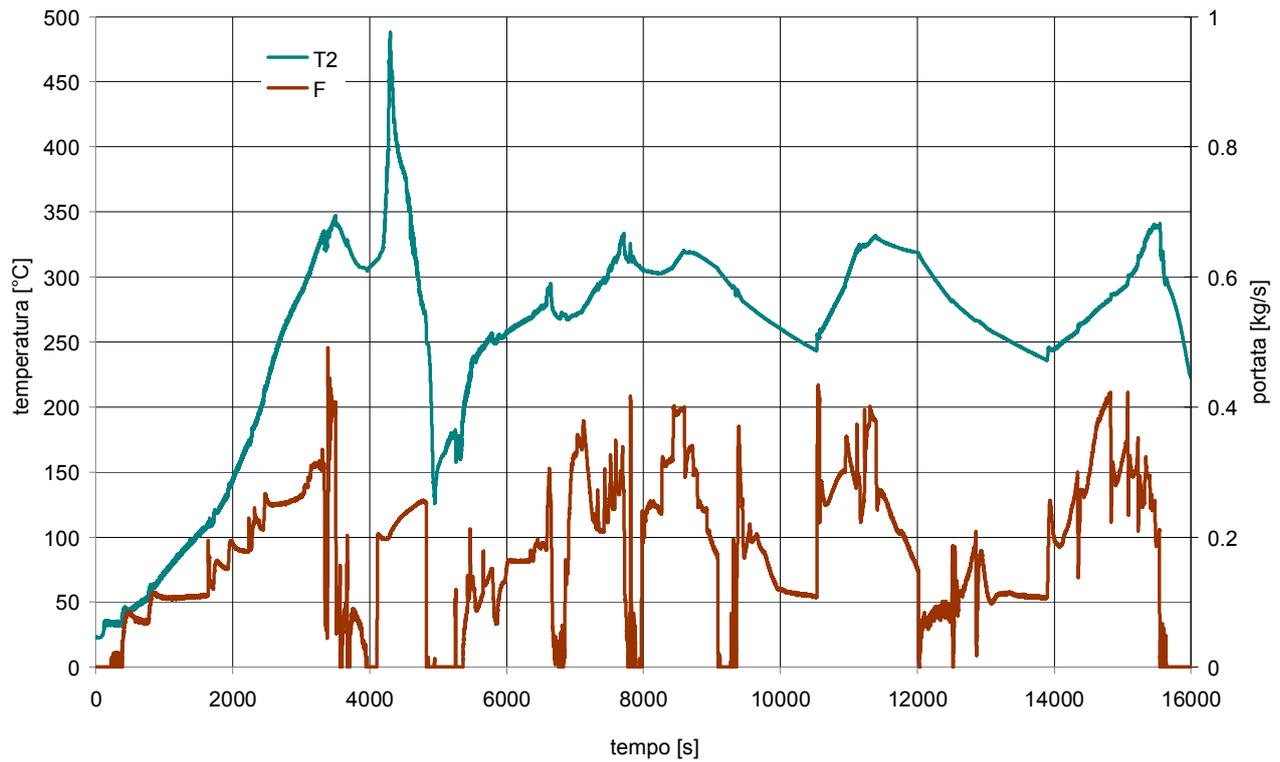
**Fig. 8. 267 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°43**



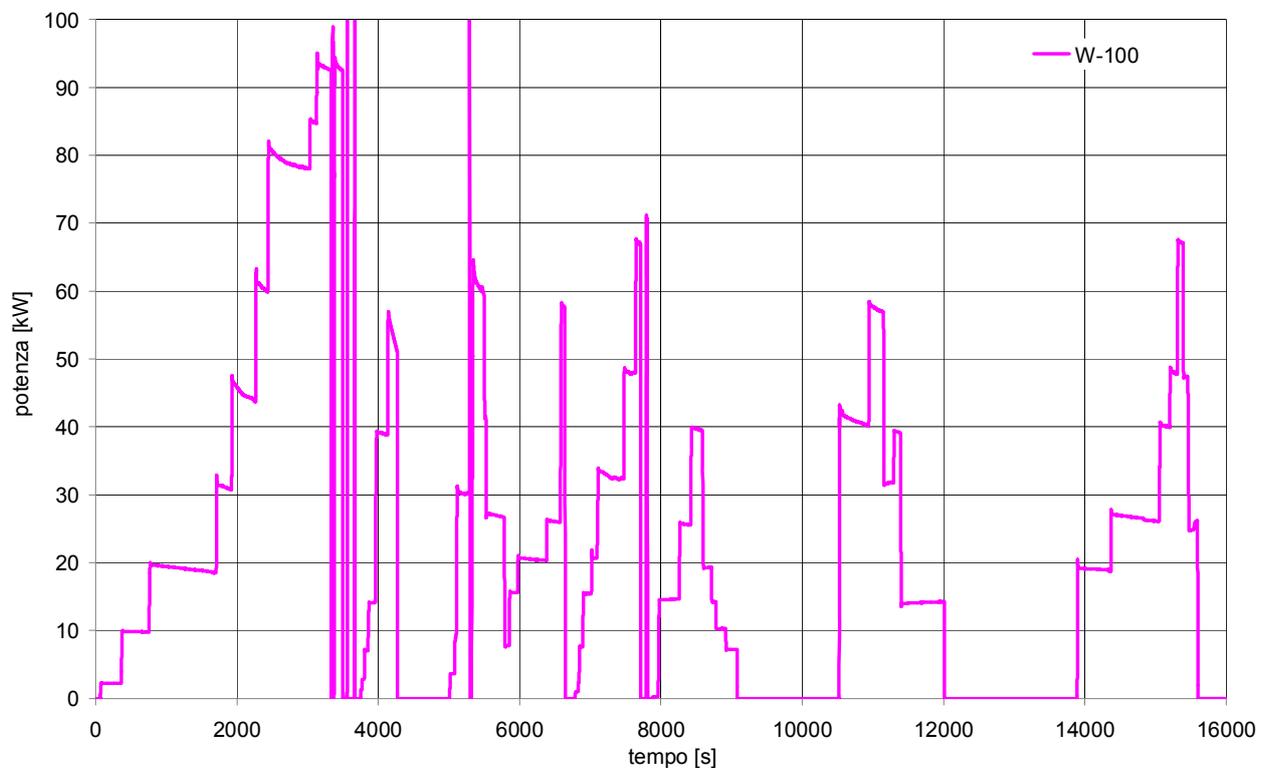
**Fig. 8. 268 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°43**



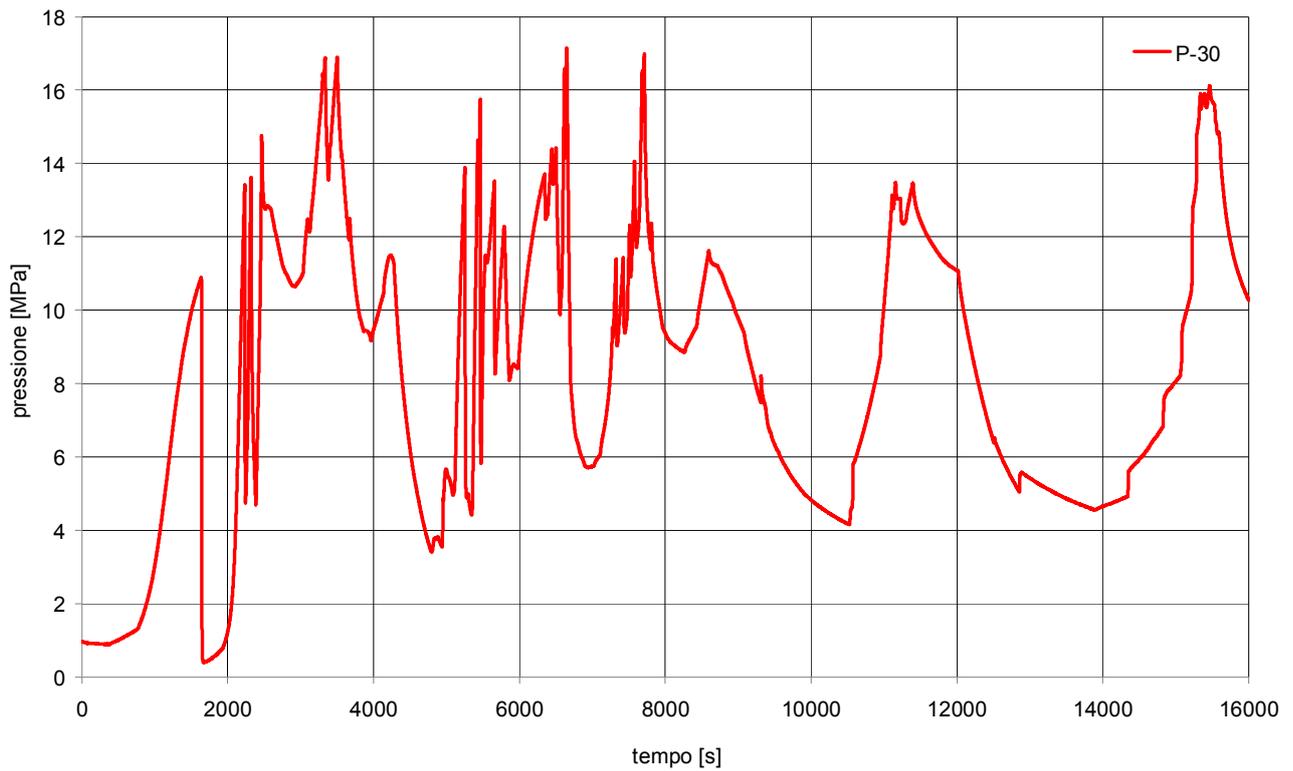
**Fig. 8. 269 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°43**



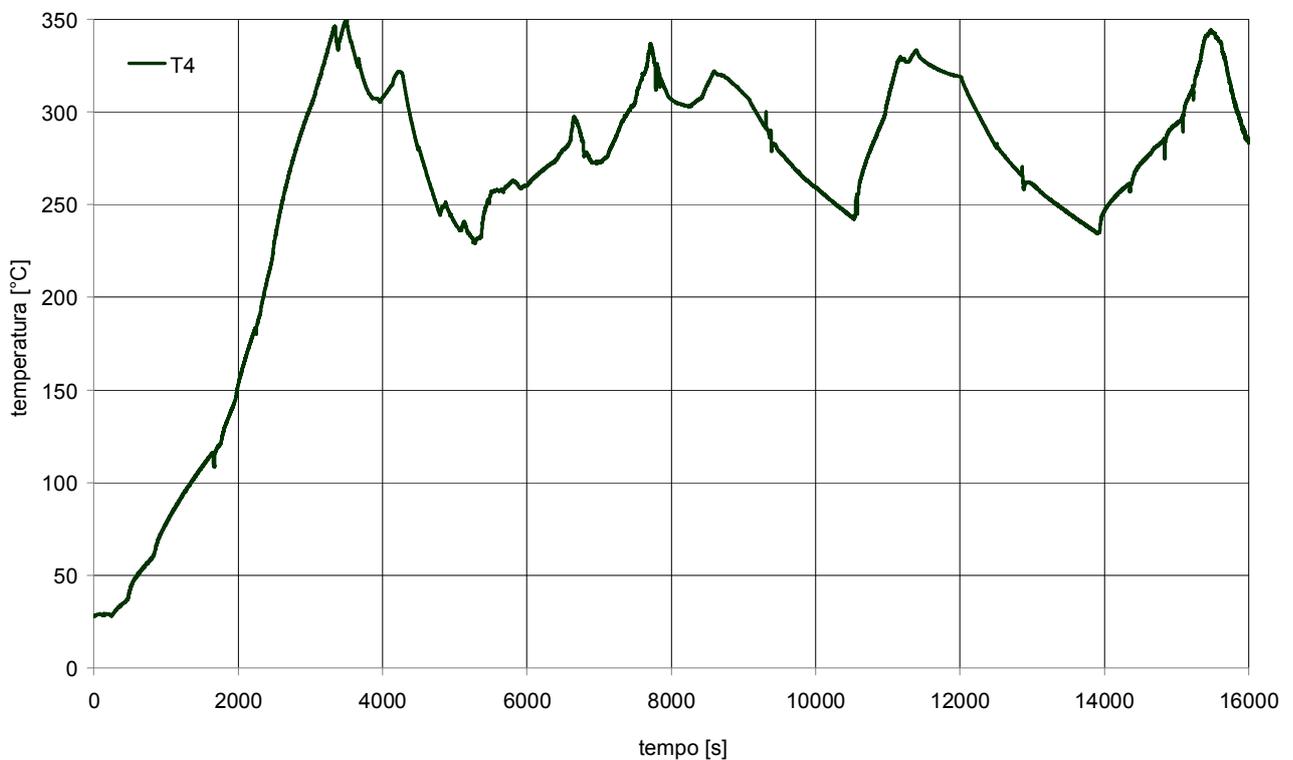
**Fig. 8. 270 - Andamento della temperatura “circuito primario quota mediana barre” (turchese) e della portata del circuito (marrone) per il Test n°44**



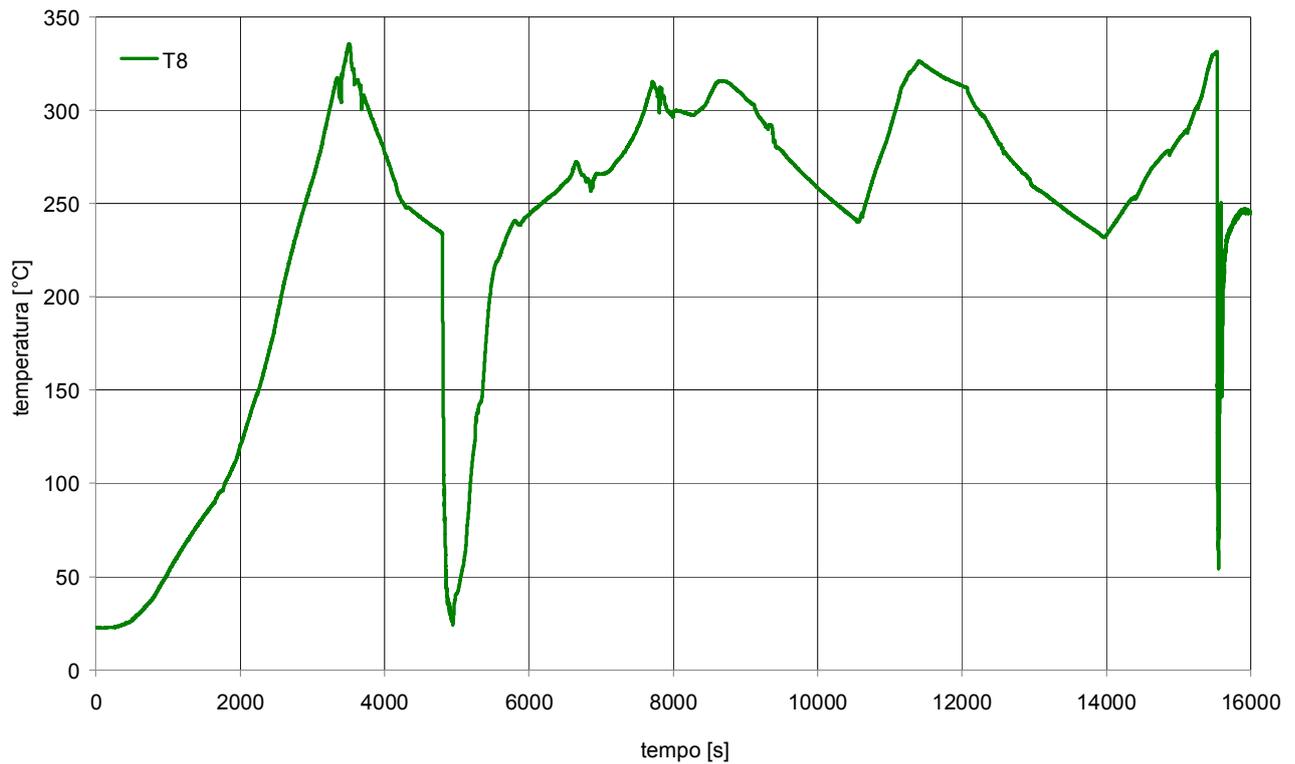
**Fig. 8. 271 - Andamento della potenza delle barre scaldanti per il Test n°44**



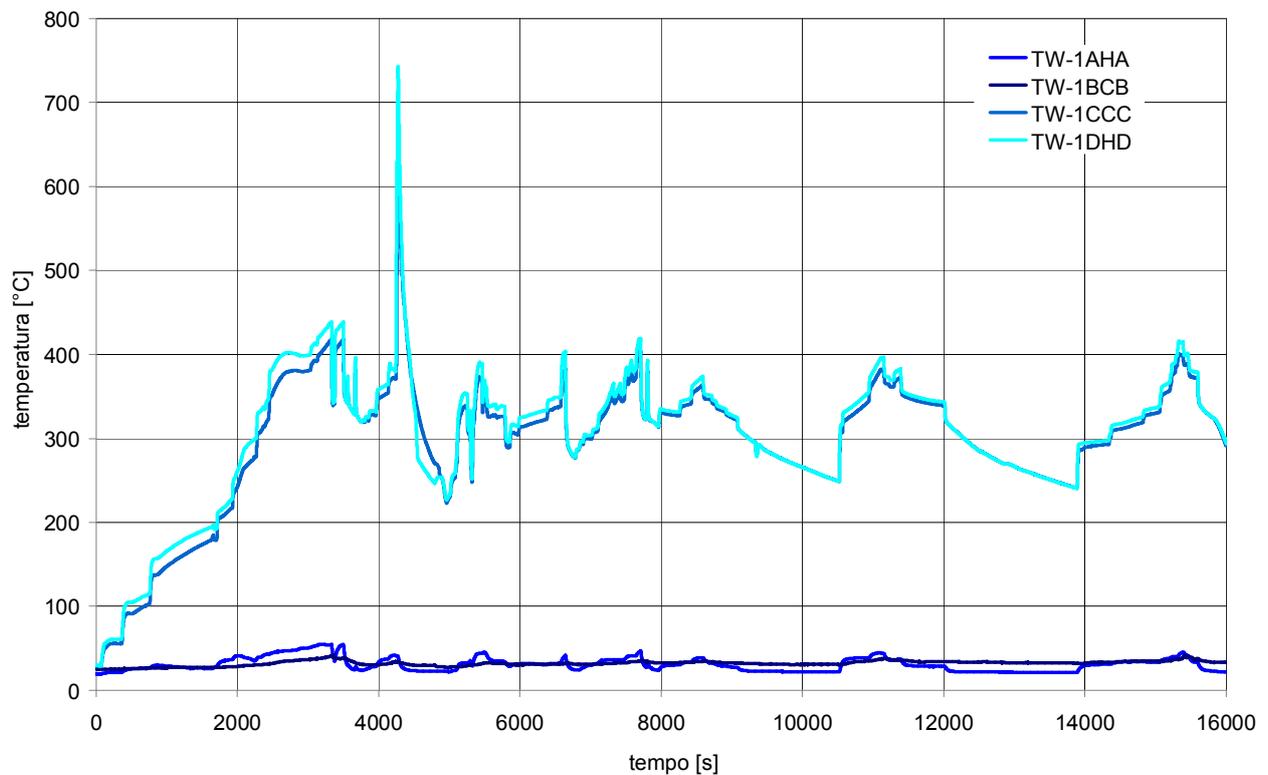
**Fig. 8. 272 - Andamento della pressione del circuito prova barre per il Test n°44**



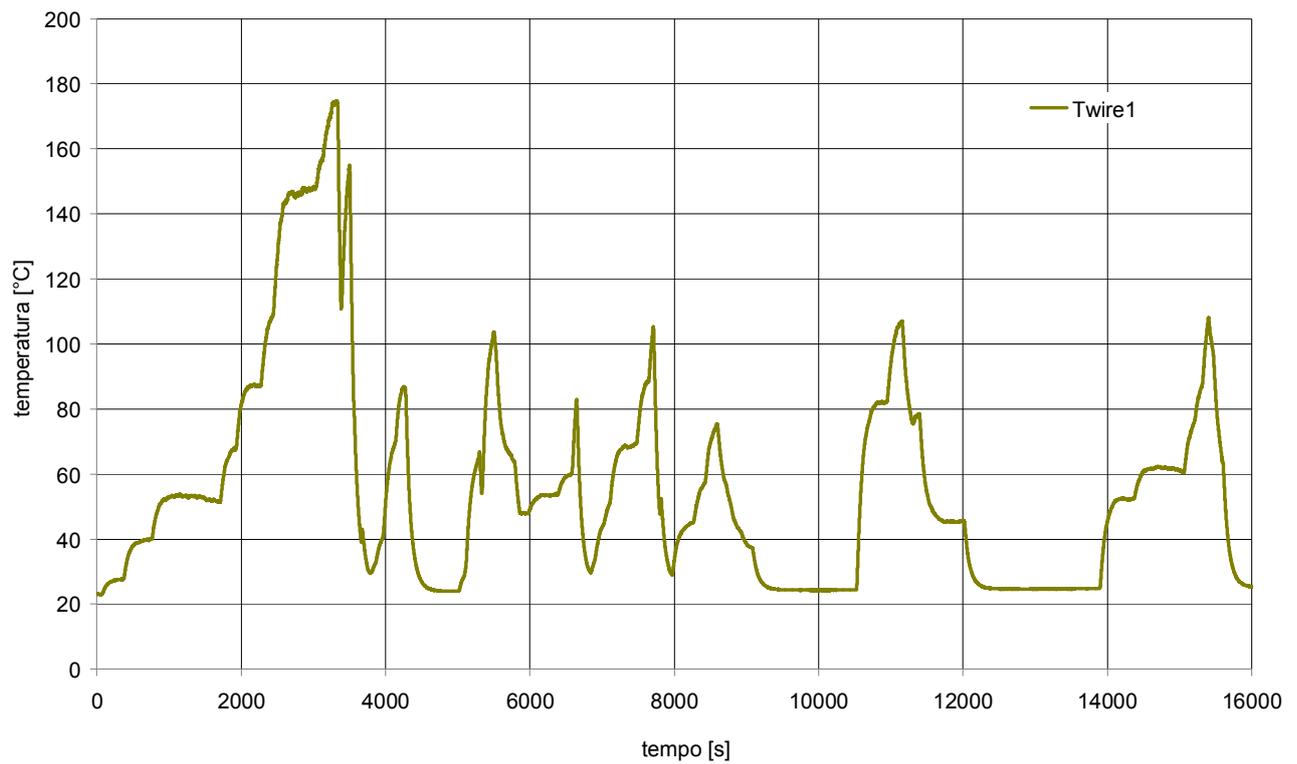
**Fig. 8. 273 - Andamento della temperatura "circuito primario tratto discendente quota superiore" per il Test n°44**



**Fig. 8. 274 - Andamento della temperatura “circuito primario iniezione linea di ritorno” per il Test n°44**



**Fig. 8. 275 - Andamento delle temperature rilevate dalle termocoppie di barra per il Test n°44**

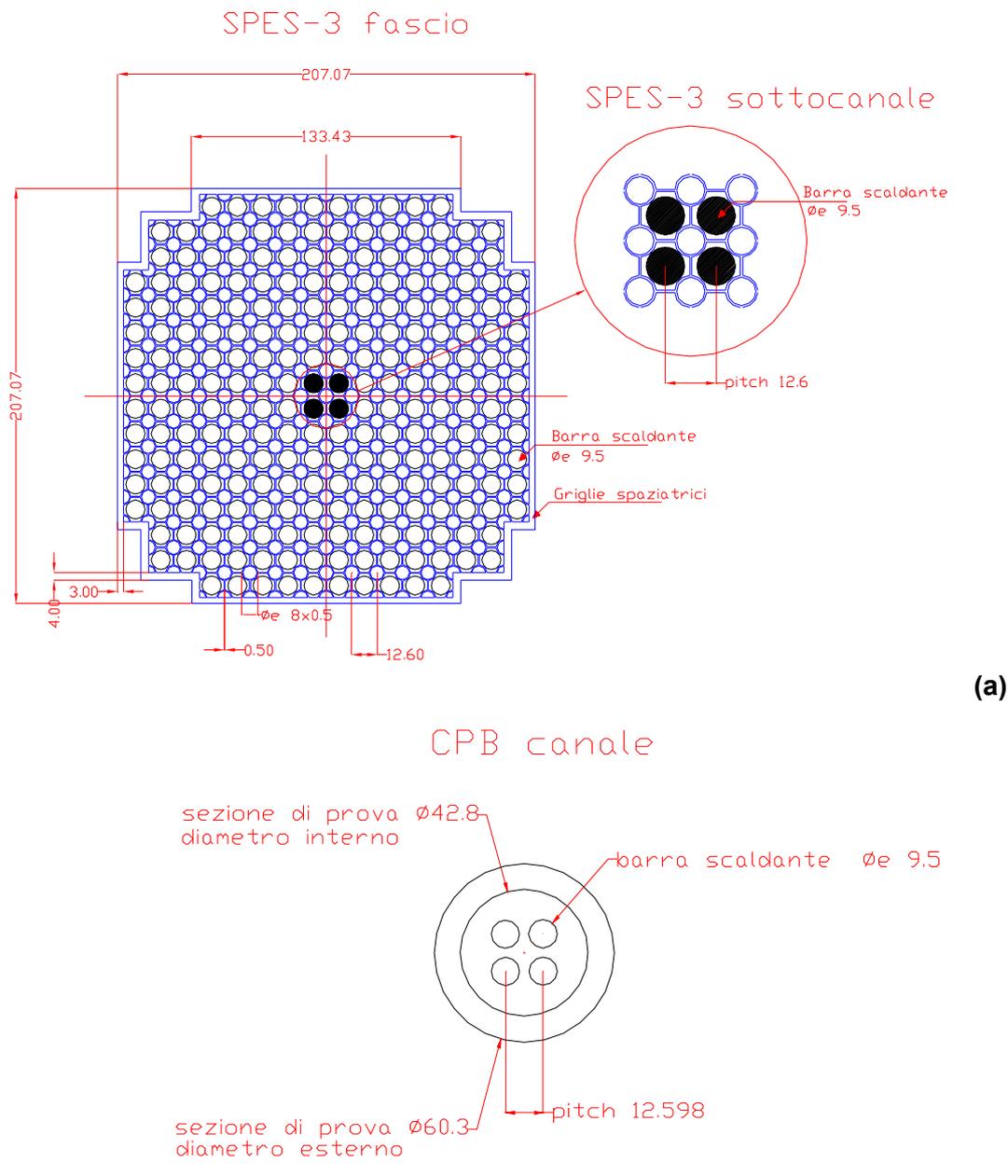


**Fig. 8. 276 - Andamento della temperatura rilevata dalla termocoppia “terminazioni elettriche barre scaldanti” per il Test n°44**

## 9 CALCOLO DEL $\Delta T$ DI BARRETTA

Il circuito prova barre è stato progettato e realizzato da SIET con l'obiettivo di verificare la funzionalità sia dal punto di vista meccanico che elettrico di prototipi di barre scaldanti, in condizioni stazionarie e transitorie, al fine di installarli nell'impianto sperimentale SPES-3, simulatore integrale di un reattore SMR.

Il circuito prova barre ospita quattro prototipi di barre scaldanti, contro i 235 previsti in SPES-3. In Fig.9. 1 sono rappresentate le sezioni dei canali scaldanti del circuito prova barre e di SPES-3. Confrontando le due geometrie, si vede che la sezione di passaggio del fluido nel sotto-canale di SPES-3 risulta minore rispetto a quella nel canale del circuito prova barre. Pertanto, a pari portata, la velocità nel circuito prova barre è inferiore a quella di SPES-3.



**Fig.9. 1 – Configurazione del fascio di barre scaldanti: (a) nel core di SPES-3, (b) nel Circuito Prova Barre**

La più bassa velocità del fluido nel Circuito Prova Barre comporta un coefficiente di scambio termico convettivo più basso.

Pertanto, per scambiare la stessa potenza  $W$ , a parità di superficie delle barrette, con un coefficiente  $h$  inferiore, è necessario che aumenti il salto termico tra la superficie della guaina ed il fluido:

$$W = h \cdot S \cdot \Delta T$$

Non essendo disponibile nei prototipi Rotfil una misura della temperatura superficiale della barretta, si sono stimati il coefficiente di scambio ed il salto termico camicia-fluido tramite correlazioni teoriche.

Il diametro idraulico calcolato per ciascuna configurazione risulta:

$$D_{h-SPES-3} = \frac{4 \cdot S}{Z} = \frac{4 \cdot \left( P^2 - \frac{\pi d^2}{4} \right)}{\pi \cdot d} = 11.17 \text{ mm} \quad (7.1)$$

$$D_{h-CPB} = \frac{4 \cdot S}{Z} = \frac{(D^2 - 4 \cdot d^2)}{(D + 4 \cdot d)} = 18.203 \text{ mm} \quad (7.2)$$

In Tab.9. 1 sono indicate le condizioni operative di SPES-3 (stazionario calcolato tramite simulazioni RELAP5) e del Circuito Prova Barre (condizioni stazionarie durante le prove di ciclaggio termico). Le proprietà termofisiche dell'acqua, corrispondenti alle condizioni di Tab.9. 1, sono riportate in Tab.9. 2.

**Tab.9. 1 - Condizioni operative per SPES-3 e Circuito Prova Barre**

		T3 [°C]	T8 [°C]	p [bar]	F [kg/s]
<b>CONDIZIONI OPERATIVE</b>	<b>CPB</b>	334	295	155	0.34
	<b>SPES-3</b>	330	293	155	29.57

**Tab.9. 2 – Proprietà termofisiche dell'acqua alle condizioni operative indicate in Tab. 9.1**

		$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$\mu$ [Pa*s]	$k$ [W/m*K]	$c_p$ [J/kg*K]
<b>PROPRIETA' TERMOFISICHE</b>	<b>CPB</b>	640	7.45E-05	0.484	7076
	<b>SPES-3</b>	652	7.6E-05	0.494	6751

La correlazione di Dittus-Boelter (7.6) ha consentito di stimare il coefficiente di scambio convettivo tra la parete della barra ed il fluido e conseguentemente il relativo salto termico.

Alle condizioni di Tab.9. 1, con le proprietà del fluido di Tab.9. 2, con i diametri idraulici calcolati con le formule (7.1) e (7.2) e con la velocità del fluido data dalla (7.3), sono stati calcolati i numeri adimensionali dello scambio termico, Reynolds (7.4) e Prandtl (7.5), e quindi il numero di Nusselt (7.6) che ha fornito il coefficiente di scambio. I risultati sono riassunti in Tab.9. 3.

$$v = \frac{F}{\rho \cdot S} \quad (7.3)$$

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D_h}{\mu} \quad (7.4)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot c_p}{k} \quad (7.5)$$

$$Nu = \frac{h \cdot D_h}{k} = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^n \quad (7.6)$$

$$\Delta T_{barra / fluido} = \frac{Q}{A_{lat\_barra} \cdot N_{barre} \cdot h} \quad (7.7)$$

**Tab.9. 3 – Riepilogo delle grandezze calcolate tramite le formule da (7.3) a (7.7)**

		Acanale [m <sup>2</sup> ]	V [m/s]	Re	Pr	Nu	h [W/m <sup>2</sup> *K]	Q [W]	Alat [m <sup>2</sup> ]	ΔT [°C]
<b>CPB</b>	REALE	1.16E-03	0.47	72808	1.087	185	4910	9.38E+04	0.37524	50.9
	TEORICO	8.78E-05	6.12	619247	1.087	1023	42092	9.38E+04	0.37524	5.9
<b>SPES-3</b>		8.8E-05	2.20	221341	1.040	441	18533	6.50E+06	29.52	11.9

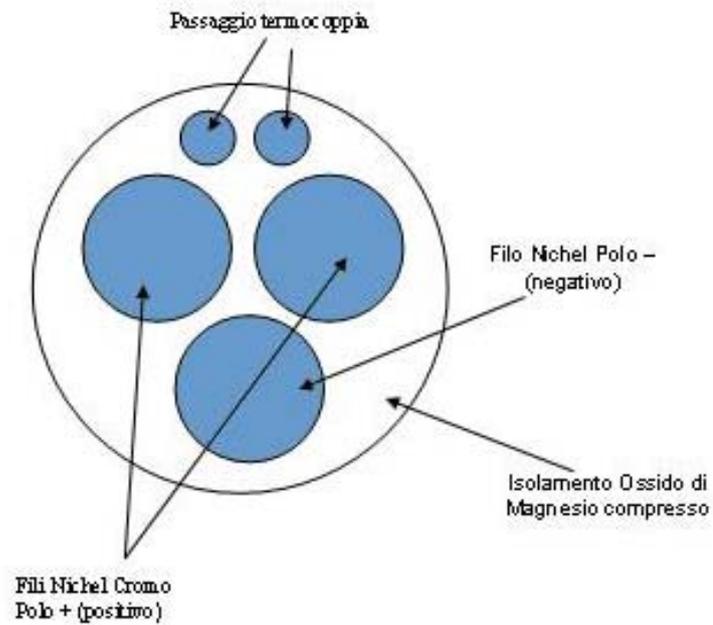
Dai risultati ottenuti si deduce che il salto termico tra la parete delle barre scaldanti (non si è fatta distinzione tra hot e normal rod) e il fluido nel circuito prova barre è pari a 50 °C, un valore ben superiore a quello che si avrebbe nello stesso impianto se la sezione di passaggio fosse uguale al sottocanale di riferimento di SPES-3. Il valore stimato è congruente con la temperatura di barra misurata nel CPB. Infatti, la temperatura di barretta all'uscita del canale, in condizioni stazionarie a piena potenza, con il salto termico stimato, risulta 384 °C, non così distante dal valore di 440 °C, misurato dalla termocoppia TW-1DHD inclusa nell'ossido. In ogni caso la temperatura di parete calcolata per il circuito prova barre ci pone in condizioni conservative nel caso di installazione nell'impianto SPES-3.

La configurazione geometrica delle barre Rotfil è mostrata in Fig.9. 2.

Le termocoppie di barra si trovano all'interno delle barrette, nell'ossido isolante, e pertanto non forniscono le temperatura della guaina metallica. Anche la disposizione dei conduttori che portano corrente alle barre non permette di ricavare la temperatura della guaina, in quanto il flusso termico è asimmetrico e anisotropo. Pertanto è impossibile confrontare i valori reali del salto termico parete-fluido con quelli stimati dalle correlazioni.

La configurazione interna dei conduttori nei prototipi delle barre che saranno forniti dalla ditta Thermocoax, è simmetrica, pertanto più idonea ad una facile trattazione teorica della conduzione del calore. Inoltre, il numero di quattro termocoppie per ciascuna barra e la loro posizione (brasate sulla guaina metallica) sono più adeguati per caratterizzare termicamente l'elemento scaldante. Il valore del salto termico parete-fluido è direttamente misurato, senza la necessità di stimarlo

teoricamente. Purtroppo, il ritardo sulla consegna dei prototipi da parte di Thermocoax non ha consentito l'esecuzione delle prove che è stata posticipata.



**Fig.9. 2 – Configurazione interna dei conduttori nella barra scaldante fornita da Rotfil**

## 10 CONCLUSIONI

Lo scopo principale della campagna sperimentale condotta sul Circuito Prova Barre è quello di verificare le caratteristiche tecniche, fisiche ed elettriche di alcuni prototipi di barre scaldanti per individuare la soluzione tecnica più adatta per l'impianto SPES3. SIET ha commissionato a due diverse aziende, Rotfil (Italia) e Thermocoax (Francia), la fornitura di quattro prototipi, ma solo l'azienda Rotfil è stata in grado di consegnare le barre entro i tempi previsti. SIET ha completato i test di collaudo delle sole barre Rotfil, mentre le prove da condurre sulle barre Thermocoax saranno oggetto di una successiva campagna sperimentale. Il budget, resosi disponibile per il mancato collaudo dei prototipi Thermocoax, è stato utilizzato per effettuare una campagna sperimentale aggiuntiva sui prototipi Rotfil. Tale campagna, costituita da test di crisi termica e di fatica, rende ancora più significativo il collaudo eseguito sulle barre Rotfil.

La ditta Rotfil è stata inoltre incaricata di fornire un prototipo della candela del pressurizzatore di SPES3, che è stato sottoposto a test di qualifica durante le fasi preliminari di questa campagna sperimentale.

Le prove condotte per valutare le caratteristiche delle barre scaldanti sono servite anche a verificare il sistema di tenuta idraulica inferiore del canale centrale che sarà replicato, opportunamente scalato e dimensionato, sull'impianto SPES3.

Questa attività è stata inoltre il banco di prova per la strumentazione di misura e di processo e per il nuovo sistema di controllo a PLC di recente installazione presso i laboratori e gli impianti SIET.

### 10.1 Barre scaldanti

Sono state provate solo le barre di fornitura Rotfil.

Le barre di potenza sono state testate durante una campagna di prova che è consistita nell'effettuazione di prove di ciclaggio termico e prove di stress. Quelle di ciclaggio termico simulano le condizioni a cui sono sottoposte le barre scaldanti di SPES3 in fase stazionaria e transitoria (simulazione, tramite la depressurizzazione del circuito, di un evento incidentale causato dalla rottura a ghigliottina di una tubazione in un reattore SMR). Quelle di stress hanno avuto lo scopo di approfondire il comportamento delle barre scaldanti in condizioni gravose (raggiungimento della temperatura di camicia massima ammissibile, 750 °C, a basse pressioni).

Precedentemente alle prove di ciclaggio e di stress, erano state eseguite prove preliminari, aventi lo scopo di settare i principali parametri dell'impianto (set-point di pressione, livelli, valori delle soglie di allarme, ecc.). Durante le prove preliminari, a causa dell'applicazione di una sovratensione nelle terminazioni elettriche (170 Vdc contro i 127 Vdc specificati per le condizioni operative) si è verificato un incendio a causa del quale la normal rod B è stata esclusa dalle prove per problemi alle connessioni elettriche, pur restando installata all'interno del circuito. A causa del riscaldamento indiretto da parte delle altre barre, tale barra ha successivamente perso isolamento e non è più stato possibile renderla operativa. I test sono stati focalizzati sia sulle connessioni elettriche terminali, sia sugli elementi attivi.

Le connessioni terminali delle barre non permettevano il passaggio di corrente necessario ad alimentare a piena potenza il componente. E' stato necessario modificarne le dimensioni fisiche ed applicare un sistema di ventilazione forzata per poterle esercire a piena potenza. Gli elementi attivi delle tre barre sottoposte a test hanno completato positivamente tutte le prove senza evidenziare difetti elettrici. La resistenza di isolamento tra la parte attiva e la struttura dell'impianto è sempre stata a circa 5 k $\Omega$  durante tutta la campagna sperimentale. La parte attiva delle barre non ha manifestato modifiche delle sue caratteristiche fisiche, mostrando un'ottima resistenza ai test di

'invecchiamento'.

I test di ciclaggio termico sono stati eseguiti secondo la procedura descritta nel paragrafo 7.3 e non hanno evidenziato anomalie nel comportamento delle barre scaldanti. I test di crisi termica sono stati eseguiti a bassa pressione, in modo da evitare di raggiungere elevate temperature delle barre scaldanti in condizioni fuori specifica [1], e hanno dimostrato l'integrità delle barre scaldanti a fronte di condizioni gravose (durante le prove di crisi termica la temperatura di barra ha raggiunto il valore di circa 730 °C, prossimo al limite dettato dalle condizioni di progetto secondo specifica). In seguito alle prove di crisi termica, SIET, ha ulteriormente verificato l'integrità delle barre conducendo test mantenendo il circuito prova barre in condizioni di esercizio per un tempo prolungato. Durante questi test si è potuto confermare il corretto funzionamento delle barre scaldanti.

Il test finale condotto sul circuito prova barre è stata la simulazione di un Loss Of Coolant Accident (LOCA) considerato che l'impianto è stato parzialmente svuotato a causa di una valvola di drenaggio lasciata erroneamente aperta dall'operatore. Questa perdita di fluido refrigerante ha causato la formazione di una sacca di vapore nella zona intermedia del circuito principale con il conseguente surriscaldamento del fluido ed il raggiungimento di una temperatura di barra molto elevata, circa 800 °C ad alta pressione. Per le barre Rotfil, la temperatura misurata non è rappresentativa della temperatura di camicia, ma sicuramente superiore, in quanto la termocoppia è posizionata nella matrice di ossido isolante e non sulla guaina metallica. La misura di temperatura registrata dà pertanto solo un' indicazione della temperatura.

Durante la prova di LOCA, successivamente all'evento di perdita di fluido refrigerante, l'operatore ha ulteriormente stressato le barre scaldanti sottoponendole a ciclaggi in condizioni di potenza ridotta (dal 50% all'80% della massima potenza erogabile) e di alta temperatura e pressione (il fluido era quasi in condizioni di saturazione). Anche a seguito di questi ciclaggi le barre scaldanti non hanno evidenziato anomalie nel funzionamento.

La parte attiva della resistenza elettrica ha mostrato una variazione delle proprie caratteristiche fisiche in funzione della temperatura come mostrato in Tab.10. 1.

**Tab.10. 1 – Variazione della resistenza elettrica delle barre scaldanti in funzione della temperatura**

T <sub>out canale</sub> (°C)	R <sub>bundle</sub> (mΩ)	Δ (%)
27	124.4	0
212	172.1	38
309	182.1	46
327	183.7	48

Nella ipotesi di utilizzo delle barre Rotfil nell'impianto SPES-3, questa caratteristica rappresenta una complicazione nella gestione del transitorio di decadimento di potenza, perché il sistema di controllo del generatore di corrente dovrà eseguire una continua funzione di feedback per mantenere il profilo teorico. Inoltre, con temperature di uscita canale superiori a 212°C, il generatore elettrico di corrente è stato fatto lavorare ad una tensione superiore a quella nominale (127 V) con conseguente degrado delle prestazioni in termini di rendimento e di regolazione.

## 10.2 Candela del pressurizzatore

E' stata provata esclusivamente una candela del pressurizzatore di fornitura Rotfil.

Questo componente ha soddisfatto tutte le verifiche geometriche e fisiche eseguite in laboratorio e ha funzionato durante tutte le prove di shake down dell'impianto CPB, in cui il livello di liquido all'interno del pressurizzatore è stato mantenuto almeno un metro più alto della quota superiore della parte attiva della candela.

Durante la fase di riscaldamento per i test di variazione di livello all'interno del pressurizzatore, la camicia esterna della candela è collassata pregiudicandone il successivo utilizzo.

In previsione dell'utilizzo di riscaldatori elettrici nel pressurizzatore dell'impianto SPES3 sono necessarie le seguenti azioni:

- ricerca di un fornitore alternativo e prova di altri prototipi;
- valutazione, da effettuare con Rotfil, di modifiche da apportare sia all'isolante interno per evitare disomogeneità, sia alla camicia esterna per irrobustirla, in particolare nella sezione attiva e nelle immediate vicinanze.

### 10.3 Tenuta idraulica inferiore

Il gruppo tenuta delle barre scaldanti è stato testato sia per quanto riguarda la caratterizzazione del materiale scelto per garantire la tenuta del sistema, sia per ciò che concerne il raffreddamento del sistema. Le barre scaldanti, infatti, nella zona della tenuta disperdono calore che è necessario asportare per evitare macchie calde nell'impianto e conseguenti bruciamenti delle superfici.

Il materiale usato per garantire la tenuta del sistema, Kalrez®, ha dimostrato di resistere alle alte temperature senza modificare le sue proprietà meccaniche (elasticità, granulometria e flessibilità), assicurando una tenuta perfetta a pressioni ben oltre il valore operativo di 155 bar.

Tuttavia risulta necessario limitare il numero di inserimenti ed estrazioni del gruppo tenuta dall'impianto, poiché la facilità di estrusione del Kalrez® negli spazi vuoti potrebbe causare delle perdite legate all'asportazione del materiale estruso durante lo smontaggio e rimontaggio di alcune barre durante le prove.

### 10.4 Strumentazione e dispositivi di regolazione e controllo

La realizzazione e l'esercizio dell'impianto CPB sono stati il banco di prova per la strumentazione di misura e di processo e per il sistema di controllo delle macchine. La realizzazione di questo impianto ha permesso la qualifica dei costruttori e fornitori degli strumenti utilizzati. In Tab.10. 2 sono riportati il tipo di dispositivo, il costruttore, l'indicazione della qualifica del costruttore per il tipo di dispositivo/strumento, e il giudizio sul dispositivo.

La strumentazione di misura nel complesso è risultata affidabile e non ci sono stati problemi per l'utilizzo di strumenti di diversi fornitori.

Durante le prove di shakedown vi sono stati alcuni momenti di incertezza per nell'utilizzo dei manifold di misuratori di pressione differenziale di due fornitori diversi. Gli strumenti, mostravano esteriormente la stessa forma, ma avevano le valvole di intercetto linea e di drenaggio invertite, causando difficoltà nel riempimento delle linee manometriche. Una volta individuato il problema, entrambe le forniture hanno dato misura affidabili durante l'esercizio dell'impianto.

Sono stati utilizzati due tipi di regolatori di processo di due diversi costruttori: Tecnologic ed Ero Electronic. Entrambi sono risultati affidabili, ma mentre gli strumenti Tecnologic sono risultati relativamente semplici da impostare e da gestire con un programma software, quelli della ditta Ero Electronic hanno causato confusione a causa della complessità del menù operativo e per questi non è stato realizzato un programma software di interfaccia con il sistema di acquisizione dati.

Con l'esercizio dell'impianto CPB sono state usate per la prima volta le macchine gestite dal nuovo sistema di controllo a PLC. Questo sistema si è dimostrato affidabile, nonostante le difficoltà iniziali di messa a punto e programmazione. In particolare è stata implementata la possibilità di scambio dati tra sistema PLC e sistema di acquisizione dati su bus PROFIBUS, realizzata mediante interfaccia hardware di produzione COMSOFT.

**Tab.10. 2 Elenco della strumentazione utilizzata per la campagna sperimentale**

<b>Strumento / Dispositivo</b>	<b>Costruttore</b>	<b>Qualifica</b>	<b>Giudizio</b>
Termocoppie di fluido	Termotech	nuovo	strumento affidabile
Termocoppie di parete	Termotech	nuovo	strumento affidabile
Trasmittitori di pressione relativa e differenziale	Honeywell	consolidato	strumento affidabile
Trasmittitori di pressione relativa e differenziale	E+H	nuovo	strumento affidabile
Manifold	SAMI	nuovo	strumento affidabile
Manifold	BULK	nuovo	strumento affidabile
Regolatori di processo	Tecnologic	nuovo	dispositivo relativamente semplice, necessita di personale esperto, affidabile
Regolatori di processo	EroElectronic	nuovo	dispositivo complesso, di difficile utilizzo, necessita di personale esperto e qualificato, affidabile
Controllore Logico Programmabile	SIEMENS	nuovo	dispositivo complesso, necessita di personale esperto e qualificato, affidabile
Interfaccia PROFIBUS PLC/Labview	COMSOFT	nuovo	dispositivo affidabile

## 11 RIFERIMENTI

- [1] A. Achilli, S. Gandolfi, R. Ferri - Rod characteristics rev.7 – SIET, Piacenza 6-11-2009.
  
- [2] M. Greco – Elemento scaldante del pressurizzatore. file “HeaterPRZ\_SpecificaTecnica” SIET Febbraio 2010.
  
- [3] C. Congiu, M. Greco: Impianto prova barre – Progetto esecutivo: caratteristiche e dimensionamento. SIET 01 510 ST 09 rev0, Piacenza 18-12-2009.
  
- [4] C. Congiu, M. Greco: Realizzazione circuito prova barre. SIET 01 619 RT 10 rev0, Piacenza 17-09-2010.
  
- [5] Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross section conduits running full – Part 4: Venturi tubes (ISO 5167-4:2003).

**Allegato 1: Relazione tecnica di Start Power S.r.l. sull'incidente avvenuto il 12 Aprile  
2011**



13876 Sandigliano (BI) - Via A. Gramsci 23 - Tel. 015 691188 Fax 015 691605  
REA BI-186686 Codice Fiscale e Partita IVA 02333870026  
Ufficio Regionale Piemonte: Via Fea 19 - 10148 Torino - 0112295445

## RELAZIONE

### Intervento Tamini del 12 aprile 2011

L'intervento in oggetto è stato effettuato per verificare il motivo per cui non ci fosse controllo nella corrente applicata al carico.

Il problema è dovuto al fatto che non è più presente il segnale di ritorno della tensione applicata al carico (segnale RV – reazione di tensione). Tale segnale, che deve entrare nel quadro elettrico di controllo (primo quadro IRCI) è originariamente in partenza direttamente dal carico (elemento resistivo collegato in uscita dell'alimentatore – armadio 1) posto al piano superiore rispetto all'alimentatore.

La nuova linea in continua, che parte dall'armadio 1, che è stata stesa per alimentare i quattro elementi resistivi ha escluso di fatto la linea precedente e conseguentemente il segnale di ritorno della tensione.

A questo punto il segnale di ritorno della tensione è stato preso direttamente in uscita dell'alimentatore 1 e portato al trasduttore (DC/DC converter di isolamento) con un cavo che è collegato direttamente sulle bandelle di uscita. In questo modo ci sarà comunque una differenza tra la tensione di uscita dell'alimentatore rispetto alla tensione in arrivo al carico. Tale differenza sarà in funzione della corrente erogata e della sezione dei cavi (a 1000A la differenza dovrebbe essere di circa 3Vdc)

Durante la prima prova, non essendo chiara la posizione dei cavi (positivo e negativo) e quindi non essendo certi della polarità dei cavi di ritorno della reazione di tensione, si è pensato di diminuire il limite di corrente portando il relativo trimmer, posto sulla scheda 2 della regolazione, attorno al 20% della sua corsa. Teoricamente si è pensato di limitare la corrente attorno ai 200/300A. Tale manovra avrebbe dovuto consentire di non salire di corrente, e conseguentemente di tensione, anche se la polarità del ritorno di tensione non fosse stata corretta. In pratica si è invece verificato che all'inserzione dell'alimentatore la tensione di uscita è comunque salita al massimo (circa 170Vdc – la reazione di tensione aveva polarità contraria) con relativo valore di corrente passato da un valore nominale di circa 950A (carico da circa 120kW a 127Vdc) a circa 1270A.

Il presunto intervento del limite di corrente non c'è stato in quanto in realtà l'alimentatore è tarato per poter erogare una corrente massima di 8000A e quindi portando il trimmer al 20% in realtà il limite di corrente è stato portato a circa 1500A e quindi ancora superiore al valore di corrente che le resistenze possono prendere con la tensione al massimo.

Si è poi provveduto alla corretta inserzione della polarità della reazione di tensione (fili bianco/marrone sulla scheda trasduttore DC/DC interno quadro) e a modificare il limite massimo di corrente dell'alimentatore in modo tale da avere una regolazione più fine.

***Power Electronics Technologies Division***

**START POWER** s.r.l.

13876 Sandigliano (BI) - Via A. Gramsci 23 - Tel. 015 691188 Fax 015 691605  
REA BI-186686 Codice Fiscale e Partita IVA 02333870026  
Ufficio Regionale Piemonte: Via Fea 19 - 10148 Torino - 0112295445

Per fare ciò è stato sufficiente mettere in serie le due resistenze che attualmente determinano la massima corrente erogabile dall'alimentatore 1. Queste resistenze sono montate sulla seconda scheda e denominate R27 (sono da 47ohm 5W). Con le due resistenze in parallelo abbiamo il limite massimo a 8000A, con una sola resistenza montata avremo il limite a circa 4000A e con le due resistenze in serie avremo il limite a circa 2000A. A questo punto il controllo di corrente tramite il trimmer interno diventa molto più sensibile (con il trimmer al 20% non si dovrebbero superare i 400A) in funzione delle attuali esigenze. Tornare indietro e quindi rimettere valori intermedi o originali è molto semplice in quanto si tratta di lavorare sempre sulle due resistenze R27 da 47ohm. Questa maggiore sensibilità tornerà molto utile soprattutto nel caso si intenda montare sulla nuova consolle dei potenziometri da dove impostare il limite di corrente. Il sistema è già predisposto. I potenziometri saranno da 10K e preferibilmente dei multigiuro.

In relazione alle prove che vengono attualmente fatte si è inoltre deciso di tenere disalimentati i circuiti elettronici degli altri due alimentatori e ciò escludendoli lato quadro disarmando i due automatici di alimentazione dei cestelli e l'automatico dei servizi. Queste manovre sono interno quadro e portano ad avere tutte le segnalazioni spente sulla portina del quadro stesso.

Si tenga comunque presente che in ogni caso le parti di potenza degli alimentatori 2 e 3 ricevono ugualmente tensione in quanto l'interruttore principale di potenza è uno solo.

Doriano Perin

***Power Electronics Technologies Division***