



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



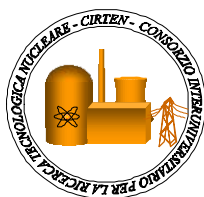
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

*CERSE-UNIFI RL 1204/2010*

Modifiche del codice RELAP5 per lo studio delle perdite di carico in  
Generatori di Vapori e tubi elicoidali interessati da tubi bifase

*F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di Liberto, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M.  
Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella*



MODIFICHE DEL CODICE RELAP5 PER LO STUDIO DELLE PERDITE DI CARICO IN GENERATORI  
DI VAPORI E TUBI ELICOIDALI INTERESSATI DA TUBI BIFASE

F. Castiglia, P. Chi ovaro, M. Ci ofalo, M. Di Liberto, P.A. D i Maio, I. Di Piazza, M. Gi ardina, F.  
Mascari, G. Morana, G. Vella

Settembre 2010

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA

**CIRTEN**

**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO  
PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

**UNIVERSITA' DI PALERMO  
DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA NUCLEARE**

**MODIFICHE DEL CODICE RELAP5 PER LO  
STUDIO DELLE PERDITE DI CARICO IN  
GENERATORI DI VAPORE A TUBI ELICOIDALI  
INTERESSATI DA FLUSSI BIFASE**

**F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, M. Di Liberto, P.A. Di Maio,  
I. Di Piazza, M. Giardina, F. Mascari, G. Morana, G. Vella**

**CIRTEN-UNIPA RL-1204/2010**

**Palermo, Maggio 2010**

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2.G  
dell'AdP ENEA MSE del 21/06/07, Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fusione”*

## *Indice*

<b><i>INTRODUZIONE</i></b>	<b><i>1</i></b>
<b><i>1. CADUTE DI PRESSIONE LUNGO I TUBI ELICOIDALI ATTRAVERSATI DA FLUSSO BIFASE</i></b>	<b><i>2</i></b>
<b><i>2. BREVE DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO SPERIMENTALE DI TORINO</i></b>	<b><i>7</i></b>
<b><i>3. ANALISI MEDIANTE IL CODICE RELAP5 MODIFICATO</i></b>	<b><i>8</i></b>
<b><i>4. RISULTATI OTTENUTI</i></b>	<b><i>10</i></b>
<b><i>CONCLUSIONI</i></b>	<b><i>11</i></b>
<b><i>SIMBOLOGIA</i></b>	<b><i>48</i></b>
<b><i>BIBLIOGRAFIA</i></b>	<b><i>49</i></b>

## INTRODUZIONE

Nell'ambito degli studi sui reattori innovativi di tipo compatto (IRIS, LFR, etc ..), che fanno uso dei Generatori di Vapore (GV) a tubi elicoidali posti all'interno del vessel primario, presso il Dipartimento di Ingegneria Nucleare dell'Università di Palermo sono state svolte varie attività di ricerca relative all'uso del codice di calcolo termoidraulico avanzato RELAP5/mod3.2.β opportunamente modificato per l'analisi di transitori operativi ed incidentali in questa tipologia di impianti.

Come è noto, la differenza chiave rispetto ai reattori convenzionali con circuito esterno è la capacità intrinseca del progetto integrato del reattore di eliminare le possibili situazioni incidentali legate alle grosse penetrazioni nel recipiente o le grosse tubazioni primarie che possono condurre a condizioni incidentali di tipo Large LOCA (Loss Of Coolant Accident).

Poiché, com'è noto, il codice RELAP5, di tipo monodimensionale, non include né la peculiare geometria né i modelli termofluidodinamici per trattare lo scambio termico e le perdite di carico in tubi elicoidali, al fine di rendere il codice capace di simulare le geometrie e le fenomenologie coinvolte, si è proceduto all'implementazione di nuove modelli e procedure adatti allo studio dei processi in questo tipo di sistemi.

Le procedure implementate hanno riguardato anche il pacchetto relativo alla lettura e memorizzazione dei dati geometrici e fisici dei tubi elicoidali che la precedente versione del codice non prevedeva. Ciò al fine di rendere disponibile all'utente una nuova opzione per l'applicazione dei modelli termofluidodinamici validi per questo tipo di geometria, qualora fosse necessario.

Nell'ambito delle attività di ricerca della linea progettuale 2 del tema di ricerca sul "Nuovo Nucleare da fissione" dell'accordo di programma ENEA-MSE, il lavoro ha riguardato in un primo momento la validazione del RELAP5 modificato per trattare le perdite di carico e lo scambio termico in tubi elicoidali interessati da deflussi monofase. I risultati ottenuti hanno consentito di simulare con un'ottima approssimazione i dati sperimentali presi in esame, condotti in vari laboratori nazionali ed internazionali.

Durante il secondo anno, l'attività di ricerca è stata indirizzata allo studio delle perdite di carico all'interno dei tubi elicoidali interessati da deflussi bifase.

In particolare le modifiche del codice RELAP5 hanno riguardato l'implementazione di opportune procedure atte alla valutazione delle perdite di carico attraverso l'uso dei moltiplicatori bifase di Lockhart-Martinelli validi per tubi elicoidali come modificati in [1-4]

Come è noto, nei deflussi bifase la fenomenologia termofluidodinamica presenta problemi non completamente risolti in termini di modalità di distribuzione delle fasi nella sezione e lungo il condotto. Ovviamente, questi aspetti influenzano in modo consistente lo scambio termico e, di conseguenza, l'efficienza dell'intero sistema.

In letteratura si trova molto poco sulla sperimentazione e modellazione teorica dei deflussi bifase, per cui questo argomento costituisce una tematica ancora aperta, su cui è necessario lo sviluppo di ulteriori conoscenze.

A questo proposito presso il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino è stata condotta una intensa campagna sperimentale riguardante le perdite di carico in tubi elicoidali nelle geometria e condizioni operative previste nei GV dei reattori nucleari del tipo sopra citato.

Nei paragrafi successivi, dopo una breve descrizione dell'impianto sperimentale utilizzato a Torino, verranno mostrati i risultati ottenuti nell'ambito del lavoro di validazione del codice modificato dal gruppo di ricerca dell'università di Palermo.

## **1. CADUTE DI PRESSIONE LUNGO I TUBI ELICOIDALI ATTRAVERSATI DA FLUSSO BIFASE**

Come è noto, nei condotti interessati dalle miscele bifase il gradiente di pressione risulta dalla somma di tre termini:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,f} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,g} + \left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,a} \quad (1)$$

dove  $\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP}$  indica il gradiente di pressione bifase totale nel tratto di condotto preso in considerazione,  $\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,f}$  è il gradiente di pressione dovuto all'attrito,  $\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,g}$  il gradiente di pressione gravitazionale e, infine,  $\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,a}$  il gradiente di pressione dovuto all'accelerazione. Nel nostro caso, quest'ultimo termine risulta essere trascurabile in quanto, lungo il condotto elicoidale, non vi sono variazioni di fase o di sezione.

Il pedice, TP, in tutti i termini della Eq. (1) si riferisce alle perdite di carico della miscela bifase

Il termine dovuto alla gravità può essere valutato utilizzando il grado di vuoto secondo la seguente espressione:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,g} \approx (1-\alpha)\rho_l g \sin\beta \quad (2)$$

dove  $\rho_l$  è la densità del liquido,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $\beta$  l'angolo di inclinazione dell'elica sull'orizzontale.

Per quanto riguarda il termine dovuto all'attrito, esso può essere valutato dalla differenza del gradiente di pressione totale, rilevato sperimentalmente, e il gradiente di pressione gravimetrico valutato tramite la relazione (2), come segue:

$$\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,f} = \left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP} - \left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,g} \quad (3)$$

Per la valutazione delle perdite di carico in deflusso bifase, il metodo di calcolo impiegato nella maggior parte delle procedure in uso è basato sulle correlazioni di Lockhart-Martinelli.

Tale procedura ricorre al parametro di similitudine  $\chi^2$  (parametro di Lockhart-Martinelli), definito come il rapporto tra i gradienti di pressione del liquido e del gas che si stabilirebbero se le due fasi fluissero separatamente da sole nel condotto, il quale consente di trovare la relazione tra le perdite di carico bifase e quelle monofase.

Le cadute di pressione dovute all'attrito possono essere così correlate ai moltiplicatori bifase  $\phi_L$  e  $\phi_G$  sulla base del modello Lockhart-Martinelli in funzione di  $\chi^2$  tramite le seguenti relazioni:

$$\phi_L^2 = \frac{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,f}}{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{L,f}}, \quad \phi_G^2 = \frac{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{TP,f}}{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{G,f}} \quad (4)$$

$$\chi^2 = \frac{\phi_G^2}{\phi_L^2} = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L,f}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G,f}} \quad (5)$$

Nel caso di tubi dritti, i moltiplicatori bifase possono essere valutati utilizzando le formulazioni:

$$\phi_L^2 = 1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2} \quad (7)$$

$$\phi_G^2 = 1 + C\chi + \chi^2 \quad (8)$$

In queste relazioni i pedici, L, e, G, si riferiscono alle perdite di carico per la fase liquida e per la fase gassosa, rispettivamente.

Il valore del parametro C varia da 5 a 20 a seconda che nel condotto prevalga il regime laminare o quello turbolento.

Per quanto riguarda il flusso bifase nei tubi elicoidali, i fattori che influenzano le perdite di carico possono essere raggruppati sulla base degli effetti dovuti a tre componenti: la forza di inerzia, la forza di gravità e la forza centrifuga.

La forza di inerzia agevola il miscelamento delle due fasi, mentre la forza di gravità e la forza centrifuga, se ciascuna di esse agisse sul flusso da sola, tenderebbero a separare le due fasi, a causa della grande differenza di densità.

Tuttavia, quando siamo in presenza di un cambiamento di direzione, come nel caso elicoidale, l'effetto netto può essere la separazione o il miscelamento delle fasi.

In termini di perdita di carico, gli effetti di queste forze possono essere correlati: al numero di Froude, Fr, essendo  $Fr = u^2/gd$ , con, u, velocità di fase, g, accelerazione gravitazionale e, d, diametro del tubo; al rapporto diametro del tubo/diametro dell'elica, d/D; e all'angolo dell'elica,  $\beta$  [2].

Alcuni lavori sul tema reperibili in letteratura [5, 6] hanno messo in evidenza che la maggior parte dei dati sperimentali riguardanti i tubi elicoidali possono essere interpretati in modo soddisfacente utilizzando le correlazioni Lockhart-Martinelli sopra descritte, modificando tuttavia il parametro  $\chi$  sulla base della valutazione dei coefficienti di attrito monofase caratteristici dei tubi elicoidali.

Successivamente Xin et al.[1, 2] ha individuato la seguente correlazione tra il moltiplicatore bifase della fase  $\phi_L$  e i parametri Fr, d/D e  $\beta$ :



$$\phi_L = [1 + K \chi F_d^n] \left(1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2}\right)^{1/2} \quad (9)$$

dove C risulta essere uguale a 20.

Nell'Eq. (9),  $F_d$  è definito come segue:

$$F_d = Fr_L \left(\frac{d}{D}\right)^{1/2} (1 + \tan \beta)^{0.2} \quad (10)$$

I valori consigliati per le costanti che compaiono nella Eq. (10) sono riportati in Tab. 1.

$F_d$	$\leq 1$	$\geq 1$
K	0.01528	0.0023
n	-0.6	-1.7

**Tabella 1** - Valori dei parametri costanti in Eq. (9)

E' da notare che le relazioni sopra riportate sono valide per valori di  $D/d$  nell'intervallo  $26 \div 50$ . L'errore massimo valutato da Xin nel confronto dell' Eq. (9) con i dati sperimentali è risultato pari a circa il  $\pm 35\%$ .

Sulla base della campagna sperimentale condotta presso il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, per ottenere un buon accordo con i propri dati sperimentali, è stato stimato per il parametro C IN Eq. (9) un valore pari a 36,85. In questo caso i dati sperimentali hanno riguardato per il parametro  $D/d$  i valori di 53 e 83, che sono superiori ai dati geometri utilizzati da Xin.

Le modifiche del RELAP5 hanno riguardato l'introduzione di un pacchetto di nuove procedure adatte alla valutazione delle perdite di carico in tubi elicoidali interessati da deflusso bifase sulla base delle correlazioni di Lockhart-Martinelli, modificate secondo le Eq.s (9) e (10) e utilizzando le costanti riportate nella Tab. 1.

Il codice, rincorrendo alla *subroutine* FWDRAG, valuta i coefficienti di perdita per le due fasi (vapore e liquido) concentrate e/o distribuite sulla base di correlazioni valide per flussi in regime laminare o turbolento in tubi dritti.

Ciò viene fatto utilizzando alcune procedure contenute nel pacchetto denominato HTFS (Heat Transfer and Fluid Flow Service) in cui vengono impiegate le correlazioni riportate in [7]. I coefficienti così valutati vengono poi impiegati nel pacchetto relativo alla soluzione della equazione della quantità di moto.

Nella nuova versione del codice, nella *subroutine* FWDRAG, quando si richiede l'applicazione del pacchetto relativo alla geometria elicoidale in deflusso bifase si procede con l'utilizzazione del modello di Lockhart-Martinelli tramite la valutazione della caduta di pressione bifase in termini di caduta di pressione relativa all'attrito di parete della sola fase liquida e della sola fase vapore, utilizzando le Eq.s (4), dove i parametri  $\phi_L$  e  $\phi_G$  vengono valutati, per il caso di tubo dritto, tramite i moltiplicatori di attrito Darcy-Weisbach, nel caso di tubi elicoidali tramite le correlazioni Eq.s (9) e (10) per la fase liquida.

Il gradiente di pressione dovuto all'attrito per ogni singola fase vengono calcolati utilizzando le seguenti espressioni:

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{L,f} = \frac{\lambda_L Re_L M_L^2}{2d\rho_L A^2} \quad (11)$$

$$\left(\frac{dP}{dx}\right)_{G,f} = \frac{\lambda_G Re_G M_G^2}{2d\rho_G A^2} \quad (12)$$

dove  $d$  e  $A$  sono il diametro e la sezione del condotto, mentre  $Re_L$  e  $Re_G$ ,  $\lambda_L$  e  $\lambda_G$  sono, rispettivamente, il numero di Reynold e il coefficiente di attrito, rispettivamente, per la fase liquida e quella gassosa, infine  $M_L$  e  $M_G$  sono la portata di liquido e di gas valutati secondo le seguenti relazioni:

$$M_L = \alpha_L v_L \rho_L A \quad (13)$$

$$M_G = \alpha_G v_G \rho_G A \quad (14)$$

essendo  $\alpha_L$ ,  $v_L$ , e  $\rho_L$  il grado di pieno, la velocità e la densità della fase liquida, mentre  $\alpha_G$ ,  $v_G$ , e  $\rho_G$  il grado di vuoto, la velocità e la densità della fase gassosa.

La valutazione dei coefficienti di attrito per ogni singola fase si basa sulle correlazioni di Ito [8] riportate nella Tab. 2.

$f_c = \frac{16}{Re}$	$Re < 13.5(D/d)^{-0.5}$
$f_c = \frac{344(D/d)^{-0.5}}{\left\{1.56 + \log_{10}\left[Re(D/d)^{-0.5}\right]\right\}^{5.73}}$	$13.5(D/d)^{0.5} < Re < 13.5(D/d)^{-0.5}$
$f_c = 0.076 Re^{-0.25} + 0.0075 \cdot \left(\frac{D}{d}\right)^{-0.5}$	$Re > 1500$

**Tabella 2**– Fattore d’attrito – Correlazione di Ito

E’ da notare che, per la fase liquida, come evidenziato in [9] queste correlazioni approssimano molto bene i dati sperimentali anche per numeri di Reynolds al di fuori del campo di validità dichiarate da Ito. Tuttavia, nella regione di transizione dal regime laminare a quello turbolento, la discontinuità del modello può portare a errori di valutazione non trascurabili.

Per tenere in considerazione questo aspetto, nella *subroutine* FWDRAG, quando si procede con l’applicazione delle correlazioni di Ito, si fa ricorso ad una procedura di interpolazione che in prima approssimazione consente di eliminare la discontinuità nella regione di transizione.

Una volta valutati i gradienti di pressione per ognuna delle due fasi si procede con il calcolo del parametro di martinelli  $\chi$ .

A differenza dei tubi dritti, per i quali è possibile utilizzare la relazione Eq. (5) per il calcolo di  $\chi$ , nel caso dei tubi elicoidali si applica la seguente espressione:

$$\frac{\phi_G^2}{\phi_L^2} = \frac{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{G,f}}{\left(\frac{dp}{dz}\right)_{L,f}} = \frac{1 + C\chi + \chi^2}{[1 + K \chi Fd^n]^2 \left(1 + \frac{C}{\chi} + \frac{1}{\chi^2}\right)} = \frac{\chi^2}{[1 + K \chi Fd^n]^2} \quad (15)$$

Per la risoluzione dell’espressione riportata in (15) è stata implementata una procedura iterativa e ricorsiva che, per ciascun sottovolume con cui è stato discretizzato il condotto elicoidale, consente di ricavare il parametro di martinelli e quindi il gradiente di pressione bifase.

## 2. BREVE DESCRIZIONE DELL’IMPIANTO SPERIMENTALE DI TORINO

L’apparecchiatura sperimentale, realizzata presso il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino [3, 4], è costituita da tre sezioni di prova in plexiglass, di diametro

interno di 12 mm ed esterno di 18 mm, avvolti su tre differenti eliche cilindriche di diametro 1.39, 1, e 0.79 m e passo 0.954, 0.64, e 0.485 m, rispettivamente.

Le caratteristiche geometriche delle tre eliche sono riportate in Tab. 3.

Per l'alimentazione della linea dell'acqua sono state utilizzate due differenti pompe, una per le prove con portate comprese tra 200 e 400 l/h e una per le prove con portate comprese tra 400 e 800 l/h. Per ogni portata d'acqua, la portata d'aria è stata variata nell'intervallo  $0.043 \text{ g/s} \div 0.26 \text{ g/s}$ .

Le sezioni di prova sono dotate di prese per la misura della pressione poste lungo lo sviluppo delle eliche. L'elica di diametro pari ad 1 e 1.39 m dispongono di nove prese, mentre l'altra di undici. Tuttavia in questa campagna di prove si sono utilizzate solamente nove prese per tutte le eliche. Le differenze di pressione misurate si riferiscono alla caduta di pressione tra la prima presa (indicata con 1) e le successive (indicate con 2 ÷ 9).

La distanza verticale e la lunghezza di tubazione tra le prese è riportata in Tab. 4.

	nome	unità di misura	elica 1	elica 2	elica 2
D	diametro elica	m	0,64	1	1,39
d	diametro tubo	m	0,012	0,012	0,012
p	passo	m	0,485	0,79	0,954
n	numero di spire		5	3	3
L	lunghezza complessiva	m	10,85	10,3	13,9
$\beta$	angolo dell'elica	°	13,56	14,12	12,32

**Tabella 3** – Dati geometrici delle sezioni di prova

Prese	Elica D = 0,64 m		Elica D = 1 m		Elica D = 1,39 m	
	$\Delta z$ [m]	$\Delta L$ [m]	$\Delta z$ [m]	$\Delta L$ [m]	$\Delta z$ [m]	$\Delta L$ [m]
1-2	0,98	4,72	0,22	1,183	0,48	0,55
1-3	1,096	5,2	1,003	4,39	0,95	4,68
1-4	1,225	5,75	1,192	5,17	1,19	5,81
1-5	1,342	6,24	1,395	6	1,43	6,93
1-6	1,462	6,744	1,594	6,82	1,66	8
1-7	1,946	8,78	1,789	7,62	1,9	9,13
1-8	2,19	9,88	2,185	9,25	2,38	11,4
1-9	2,44	10,858	2,385	10,07	2,8	13,9

**Tabella 4** – Distanza e lunghezza della tubazione tra le prese

Per la misura delle cadute di pressione differenziali si sono utilizzati otto trasduttori di pressione differenziale a membrana.

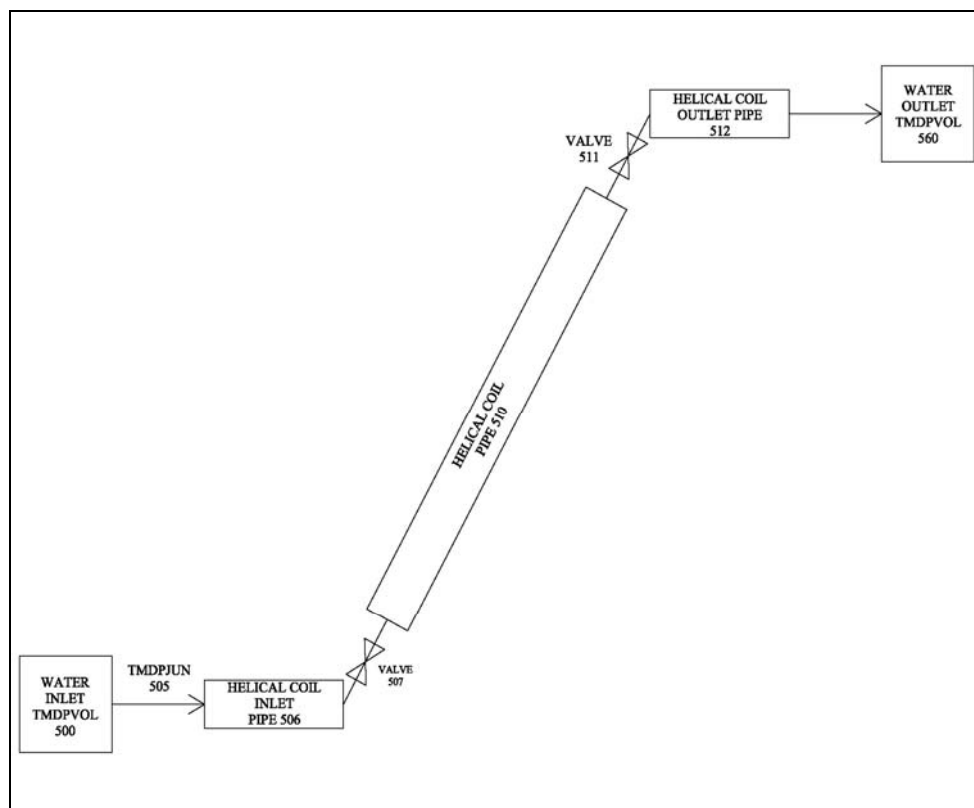
Per maggiori dettagli sull'impianto si rinvia agli articoli [3, 4].

### 3. ANALISI MEDIANTE IL CODICE RELAP5

Per le simulazioni mediante il codice Relap5 è stata utilizzata la nodalizzazione rappresentata in Fig.1.

I volumi tempo dipendenti, 500 e 560, rappresentano le condizioni di ingresso ed uscita dell'impianto. Attraverso la giunzione tempo dipendente, (TMPJUN505), la miscela aria/acqua viene inviata al PIPE 506 che schematizza le condizioni d'ingresso del tratto elicoidale. In accordo con i dati sperimentali, mediante questa giunzione vengono variati i parametri in ingresso della miscela in termini di portata.

Il tratto elicoidale è rappresentato dal volume PIPE 510, il quale è suddiviso in 50 sttovolumi, per una migliore approssimazione della posizione delle prese di pressione distribuite per tutta la lunghezza del tubo. In ogni giunzioni interna di questo pipe, è stata attivata la flag che consente l'applicazione dei modelli elicoidali.



**Figura 1 – Nodalizzazione Relap**

Per quanto riguarda le varie analisi, al fine di effettuare un confronto, è stato utilizzato il codice modificato impiegando per la costante C dell'Eq. (9) il valore di 20, come dedotto da Xin, e di 36.86 sulla base dei risultati ottenuti da Torino.

Per la simulazione dei dati sperimentali presi in esame, sono state utilizzate le condizioni iniziali riportate in Tab. 5.

<b>Dhelix = 0,64 m</b>						
<b>Wwater [l/h]</b>	<b>Wair [l/h]</b>					
300	50	100	150	200	250	300
400	50	100	150	200	250	300
600	50	100	150	200	250	300
800	50	100	150	200	250	300
<b>Dhelix = 1 m</b>						
<b>Wwater [l/h]</b>	<b>Wair [l/h]</b>					
200	50	100	150	200	250	300
300	50	100	150	200	250	300
350	50	100	150	200	250	300
400	50	100	150	200	250	300
600	50	100	150	200	250	300
800	50	100	150	200	250	300
<b>Dhelix = 1,39 m</b>						
<b>Wwater [l/h]</b>	<b>Wair [l/h]</b>					
200	50	100	150	200	250	300
300	50	100	150	200	250	300

**Tabella 5** – Condizioni iniziali per le simulazioni

#### 4. RISULTATI OTTENUTI

I risultati ottenuti per la sezione sperimentale con diametro dell'elica di 0.64, 1.0 e 1.39 m sono riportati, rispettivamente, nelle Figure 2÷25; 26÷60; 61÷71.

In questi grafici i dati sperimentali sono stati descritti utilizzando i quadratini rossi. I risultati simulati, utilizzando il codice RELAP5 modificato per mezzo delle procedure descritte nel paragrafo 1, sono invece rappresentati con la curva verde se si utilizza per la costante C il valore 20, con la curva blu se si utilizza per la costante C il valore 36.85.

L'uso della costante suggerita da Torino consente di rappresentare globalmente con un buon accordo tutti i dati sperimentali presi in esame. Se si effettua un confronto con i risultati ottenuti utilizzando la costante suggerita da Xin, si hanno errori che possono raggiungere anche il 35%.

Tuttavia, questo confronto sembra suggerire che, probabilmente, all'aumentare della portata di acqua e di aria, il valore della costante C diminuisce e tende al valore 20, come si può

notare nei grafici delle Figure in cui sono riportati i risultati ottenuti utilizzando i dati sperimentali caratterizzati da alti valori di portata di acqua e di aria. In questi casi molto buono sembra l'accordo tra i dati simulati con  $C = 20$  e i corrispettivi sperimentali.

Questa condizione risulta essere più marcata a valori più elevati del diametro dell'elica ( $D = 1.0$  e  $1.39$  m).

Bisogna comunque osservare che nell'uso del modello di Lockhart-Martinelli si è tenuto conto dell'influenza del numero di Froude solo sulla fase liquida e non sulla fase gassosa, della quale tuttavia si tiene parzialmente conto tramite il parametro  $\chi^2$ .

Ulteriori indagini sia di natura teorica che sperimentale sono necessarie per precisare alcuni degli aspetti sopra citati.

Si noti che in tutti i grafici sono stati riportati i risultati che si otterrebbero se si adoperasse il codice non modificato. Tali risultati, come era da attendersi, significativamente sottostimano i dati sperimentali presi in esame.

## **CONCLUSIONI**

Il lavoro di ricerca ha riguardato lo studio termoidraulico mediante il codice di calcolo avanzato RELAP5-MOD3.2.2 $\beta$  dei Generatori di Vapore a tubi elicoidali di tipo integrato previsti negli impianti IRIS e LFR.

La prima fase delle attività ha comportato una attenta ricerca bibliografica delle correlazioni e dei modelli atti a simulare le fenomenologie termofluidodinamiche coinvolte nei flussi del tratto monofase e bifase dei tubi elicoidali nel secondario dei generatori di vapore, previsti negli impianti presi in esame.

I modelli individuati sono stati successivamente implementati nel codice RELAP5 e validati mediante l'uso di un copioso numero di test sperimentali reperiti in letteratura e realizzati in diversi laboratori nazionali ed internazionali.

Durante il primo anno di lavoro nell'ambito della linea progettuale 2 del tema di ricerca sul "Nuovo Nucleare da fissione" dell'accordo di programma ENEA-MSE, per i deflussi monofase, fra le correlazioni disponibili in letteratura si è pensato di utilizzare per lo scambio termico quella di Gnielinski, valida per tubi dritti, opportunamente riadattata dall'Autore per la geometria elicoidale, mentre per le perdite di carico sono state impiegate le correlazioni di Ito per la valutazione del coefficiente di attrito [10].

L'analisi critica dei risultati ha messo in evidenza le buone prestazioni consentite dalle modifiche incorporate nel codice nel predire i dati sperimentali per tutte le geometrie trattate.

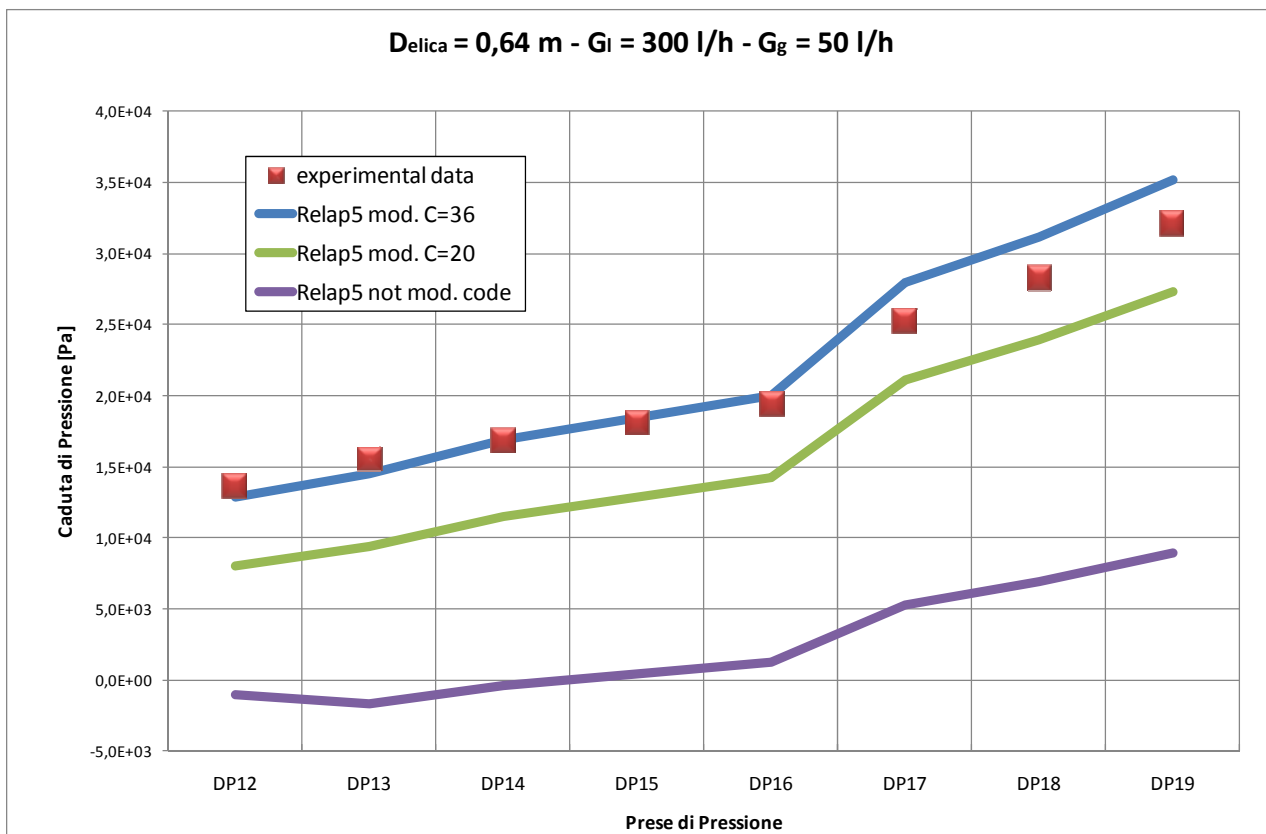
Durante il secondo Piano annuale di realizzazione, l'attività di ricerca è stata indirizzata allo studio delle perdite di carico all'interno dei tubi elicoidali interessati da deflussi bifase.

In particolare le modifiche del codice RELAP5 hanno riguardato l'implementazione di opportune procedure atte alla valutazione delle perdite di carico attraverso l'uso dei moltiplicatori bifase di Lockhart-Martinelli validi per tubi elicoidali come modificati in [1-4]

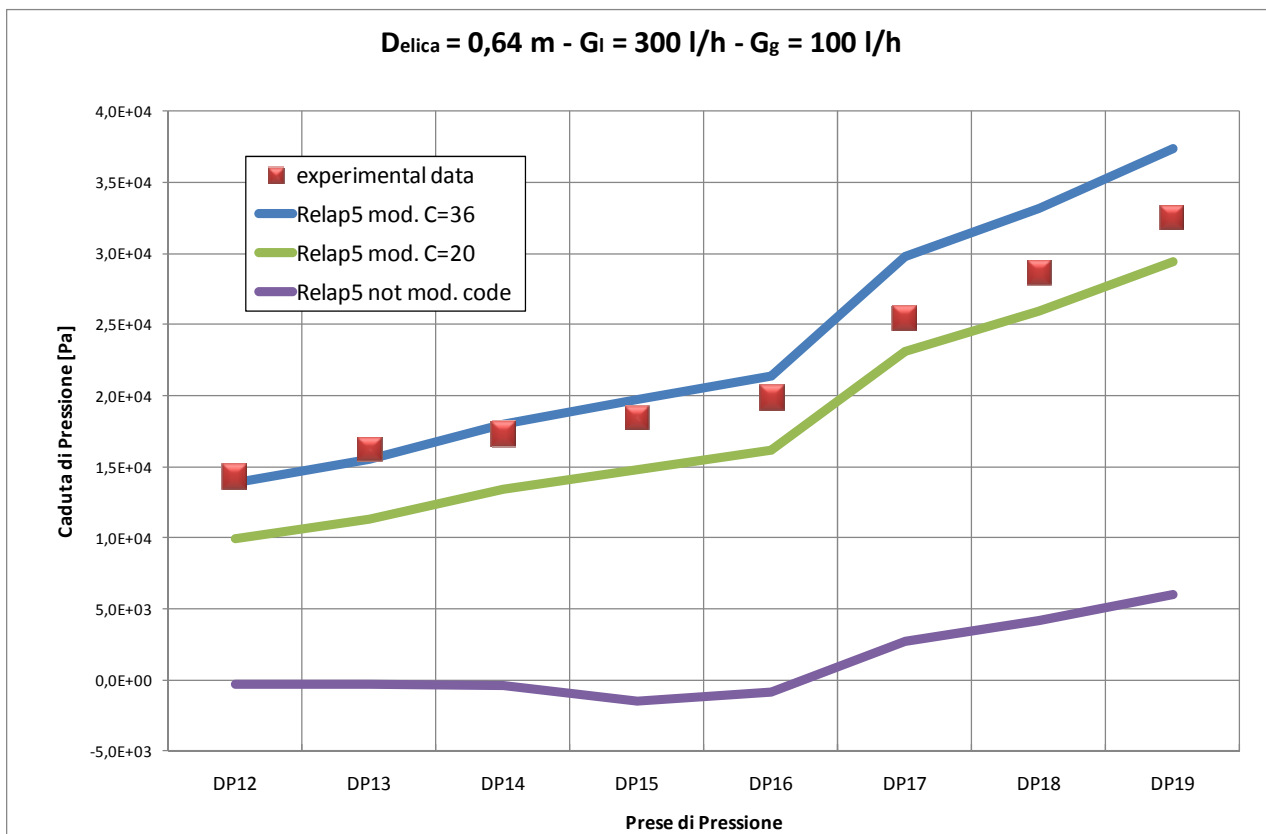
La successiva attività di validazione è stata intesa a mostrare le prestazioni della nuova versione del codice nella simulazione di test sperimentali, condotti presso il Dipartimento di Energetica del Politecnico di Torino, relativi alle perdite di carico di deflussi bifase in condotti elicoidali, caratterizzati da differenti valori del diametro dell'elica, percorsi da acqua come fluido di lavoro, a diversi valori della portata dell'aria a temperatura ambiente.

I risultati ottenuti hanno consentito anche in questo caso di mostrare le buone capacità del codice modificato nella simulazione delle fenomenologie termofluidodinamiche coinvolte nelle geometrie trattate.

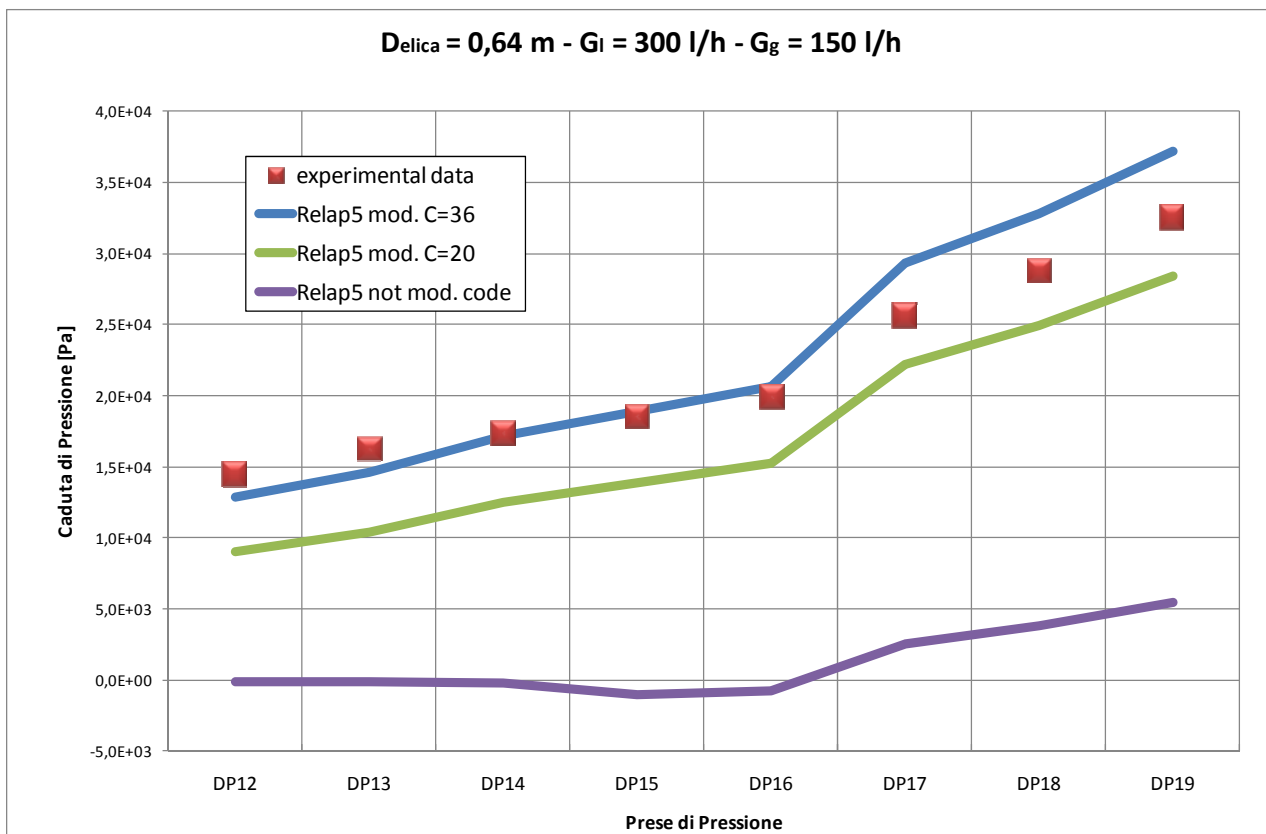




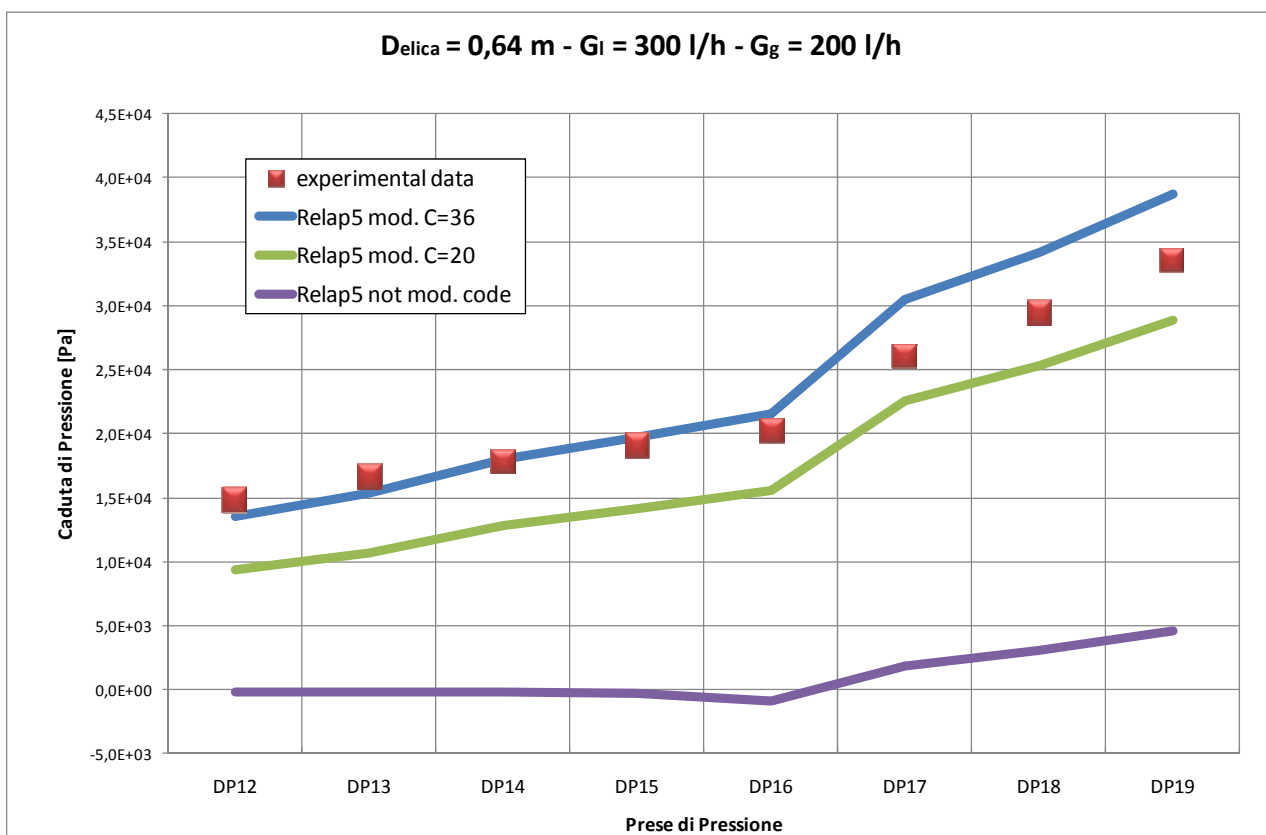
**Figura 2** – Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 300$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.



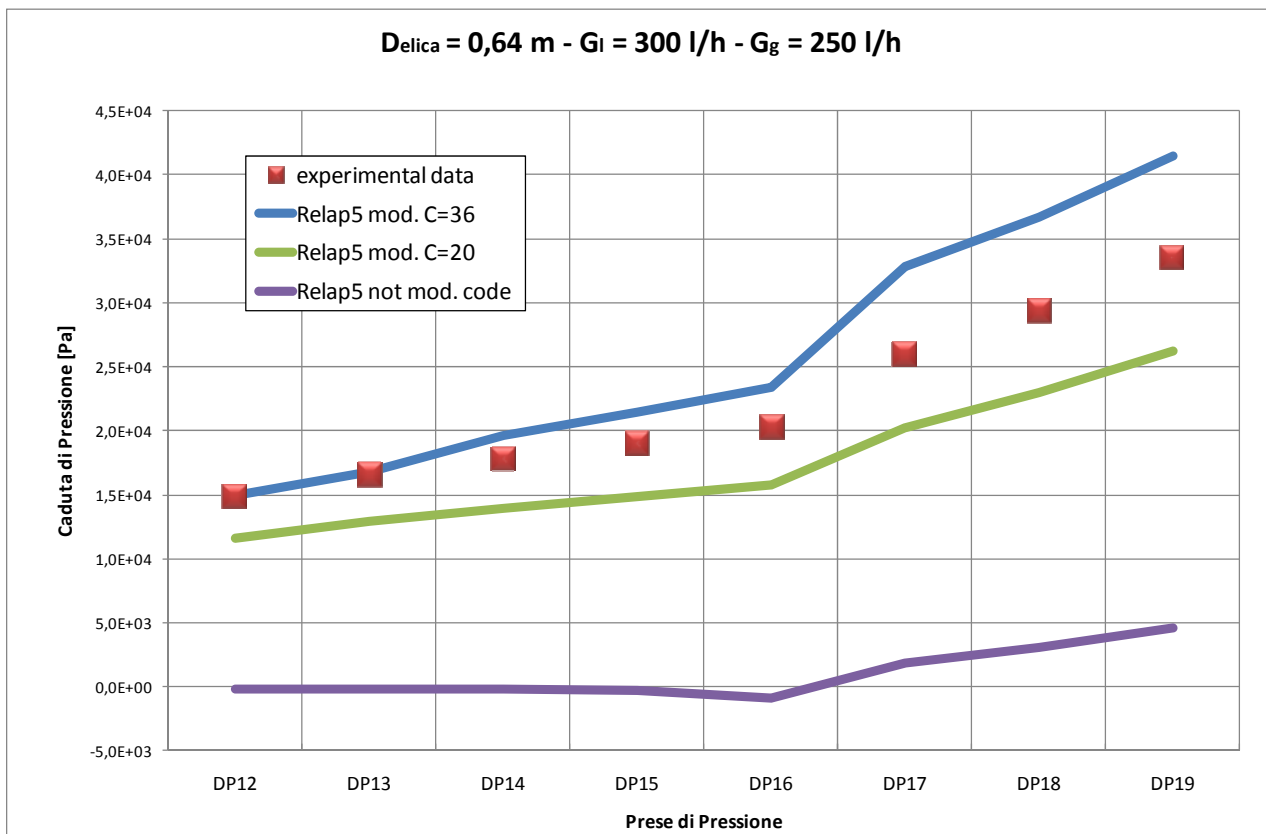
**Figura 3** – Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 300$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



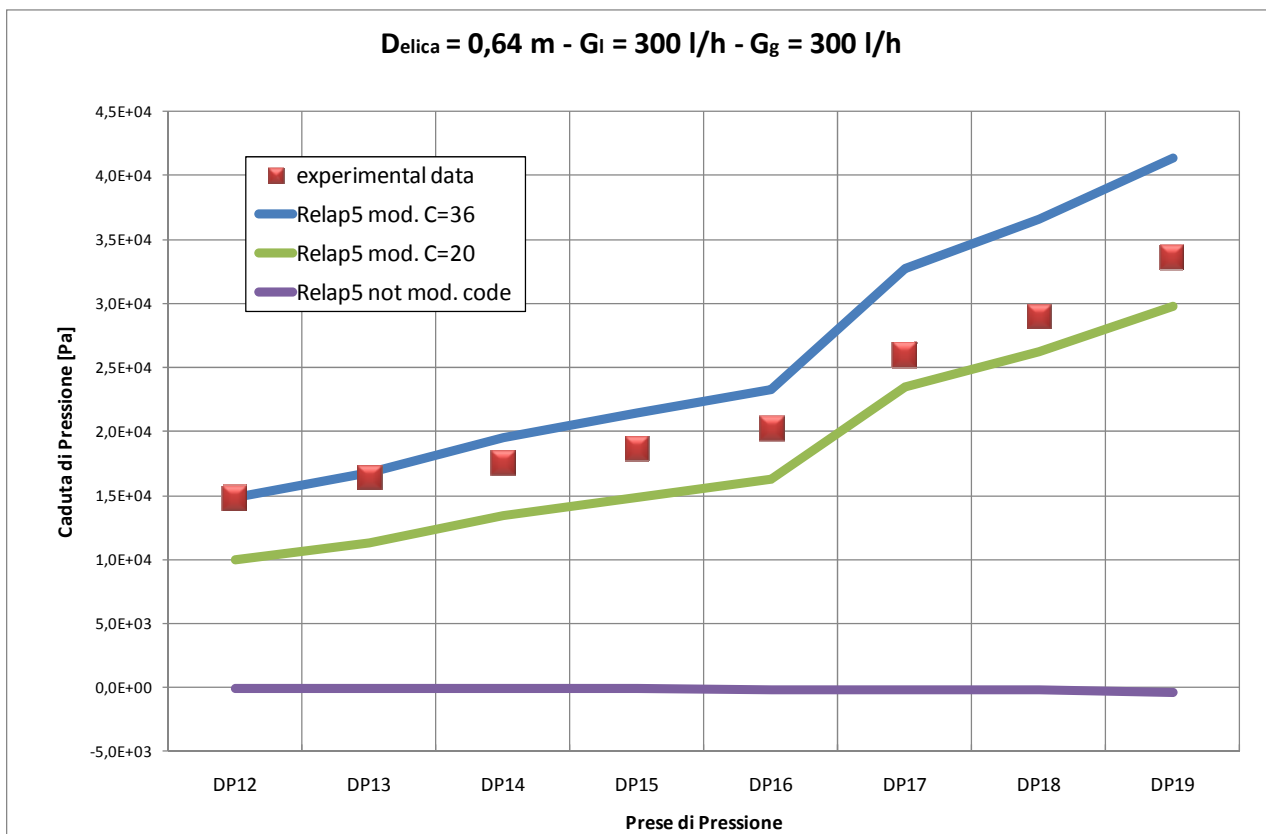
**Figura 4** – Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



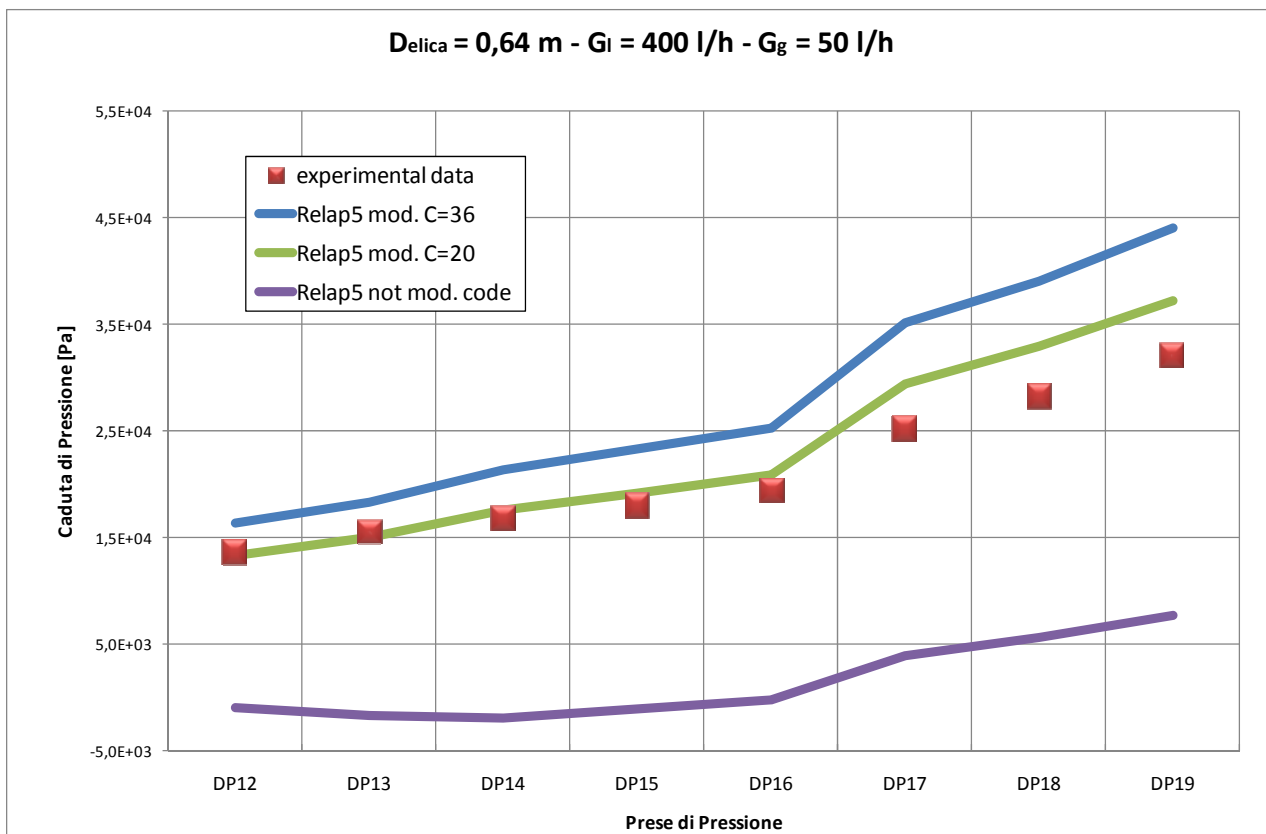
**Figura 5** – Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



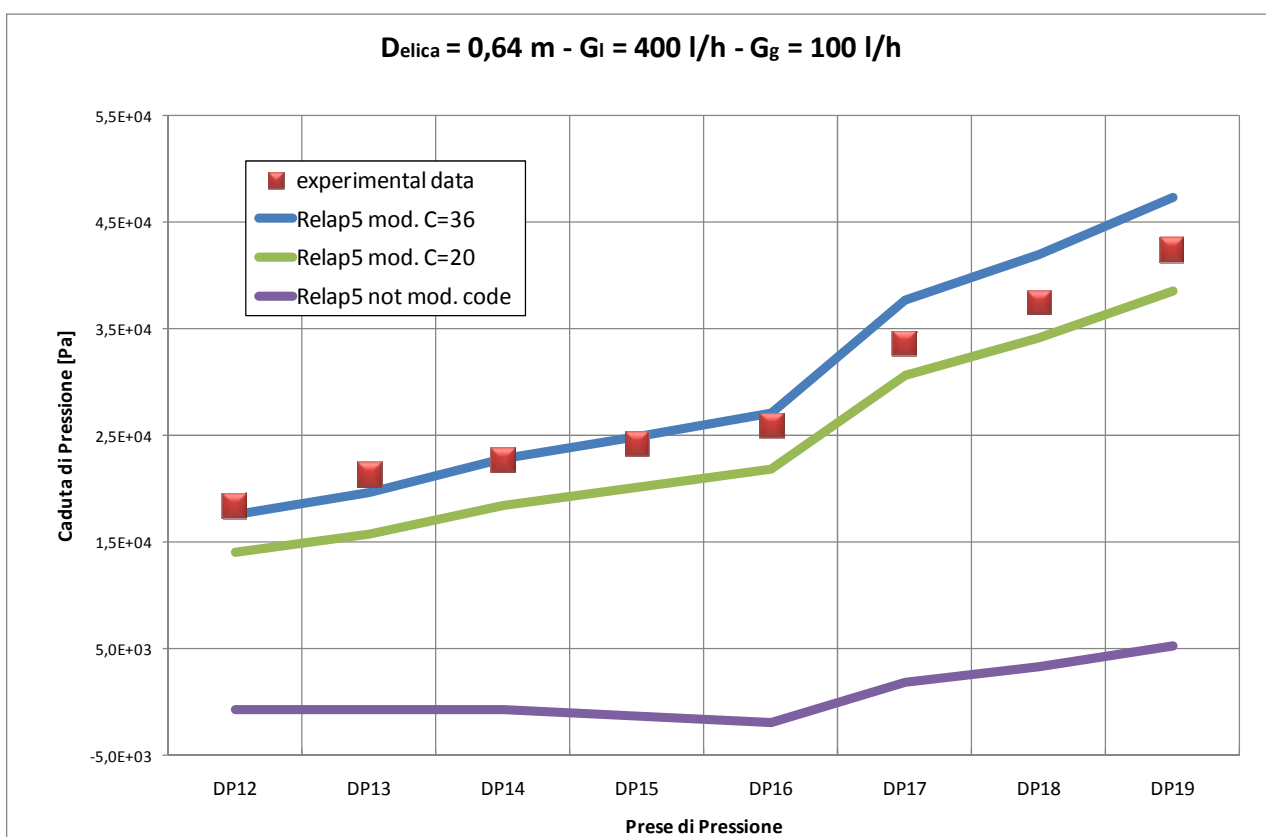
**Figura 6** – Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 300$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



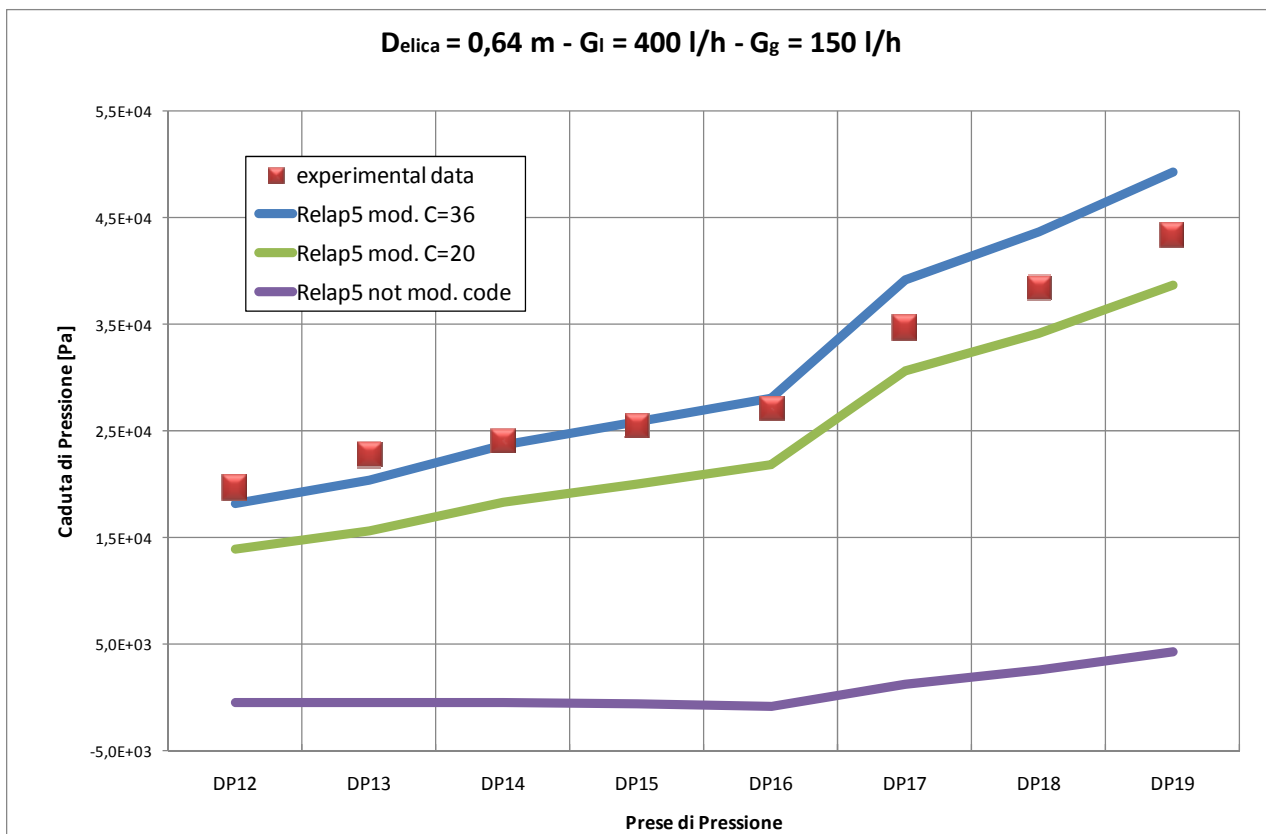
**Figura 7** – Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 300$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



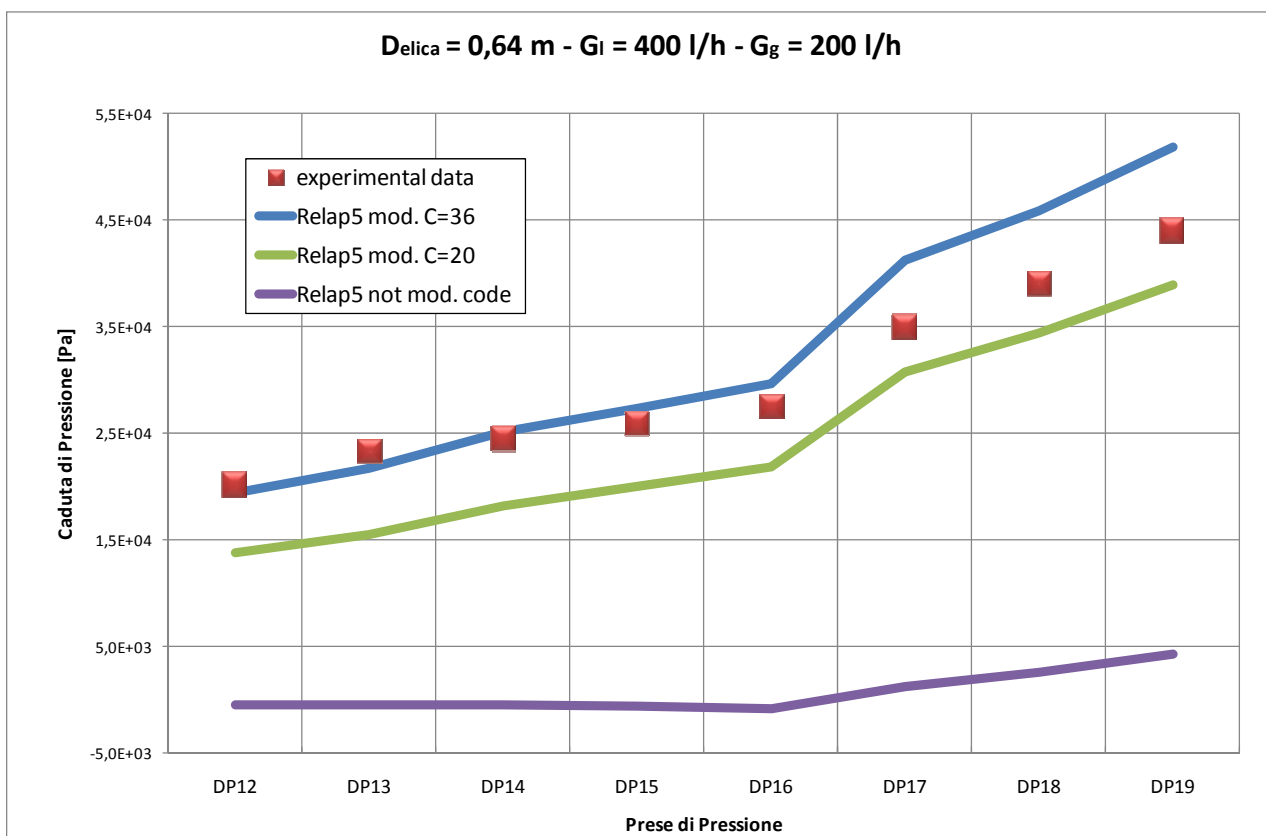
**Figura 8** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.



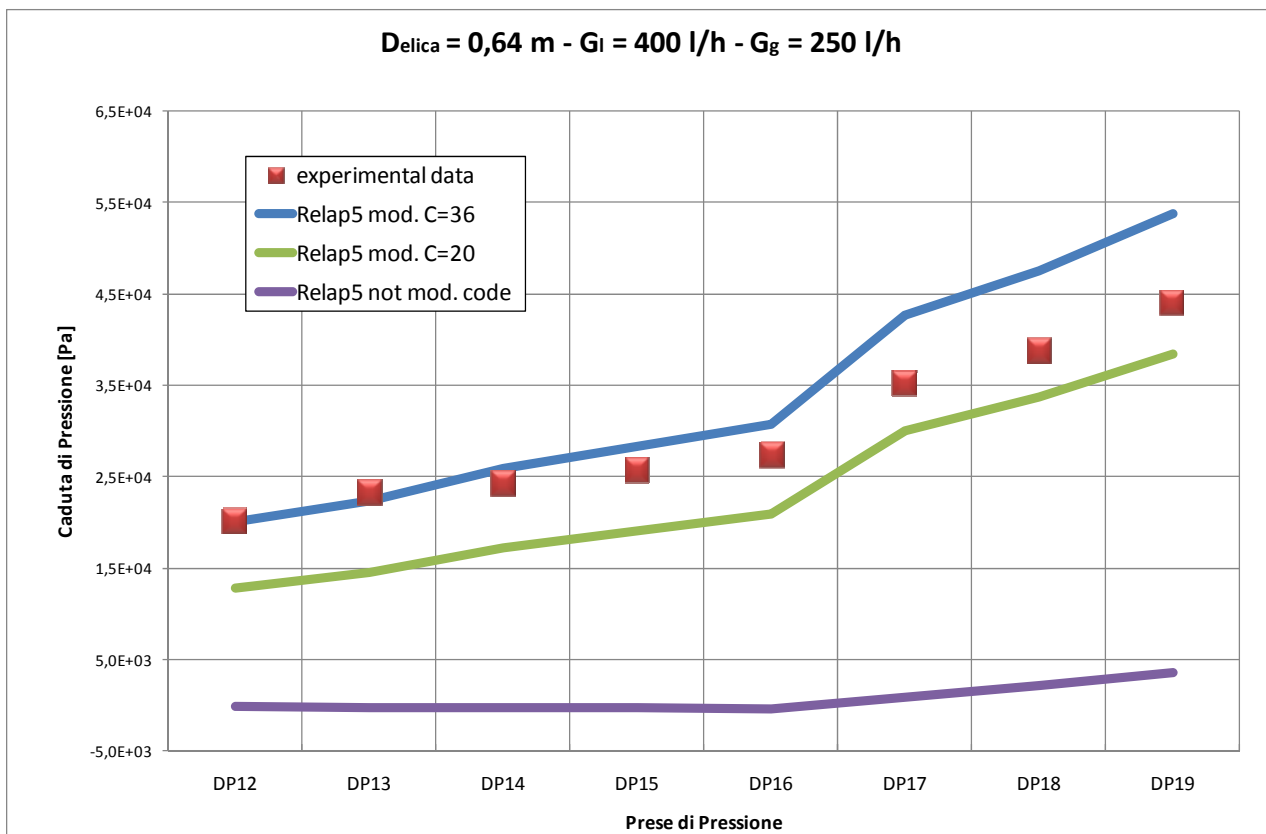
**Figura 9** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



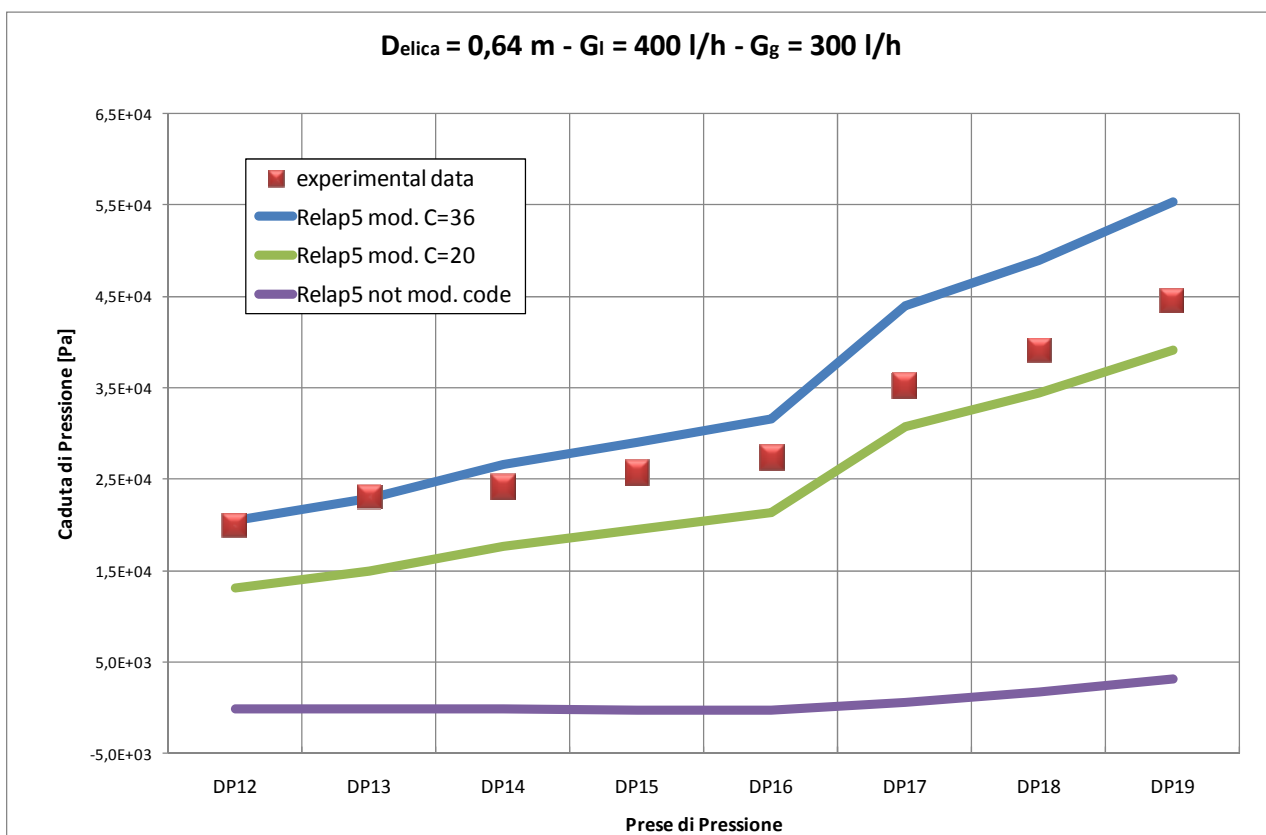
**Figura 10**- Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



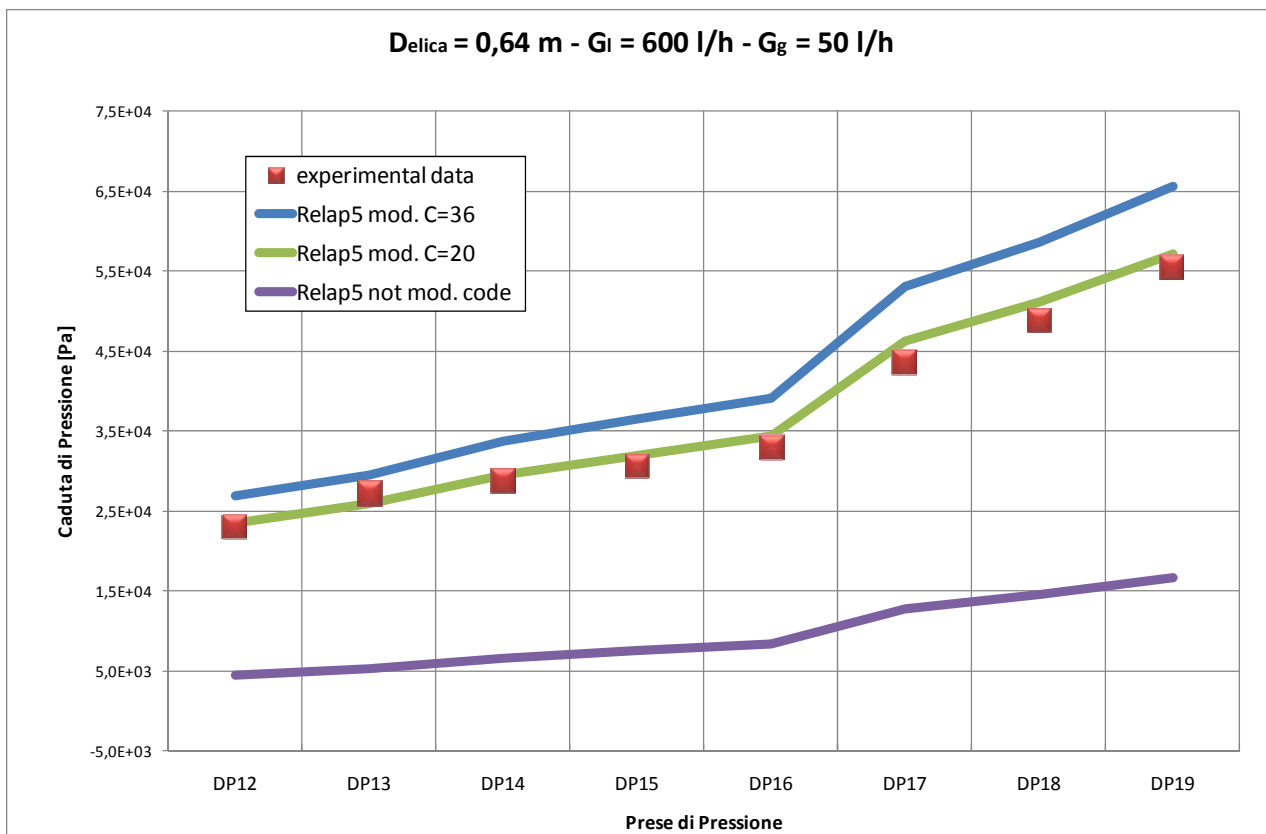
**Figura 11** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



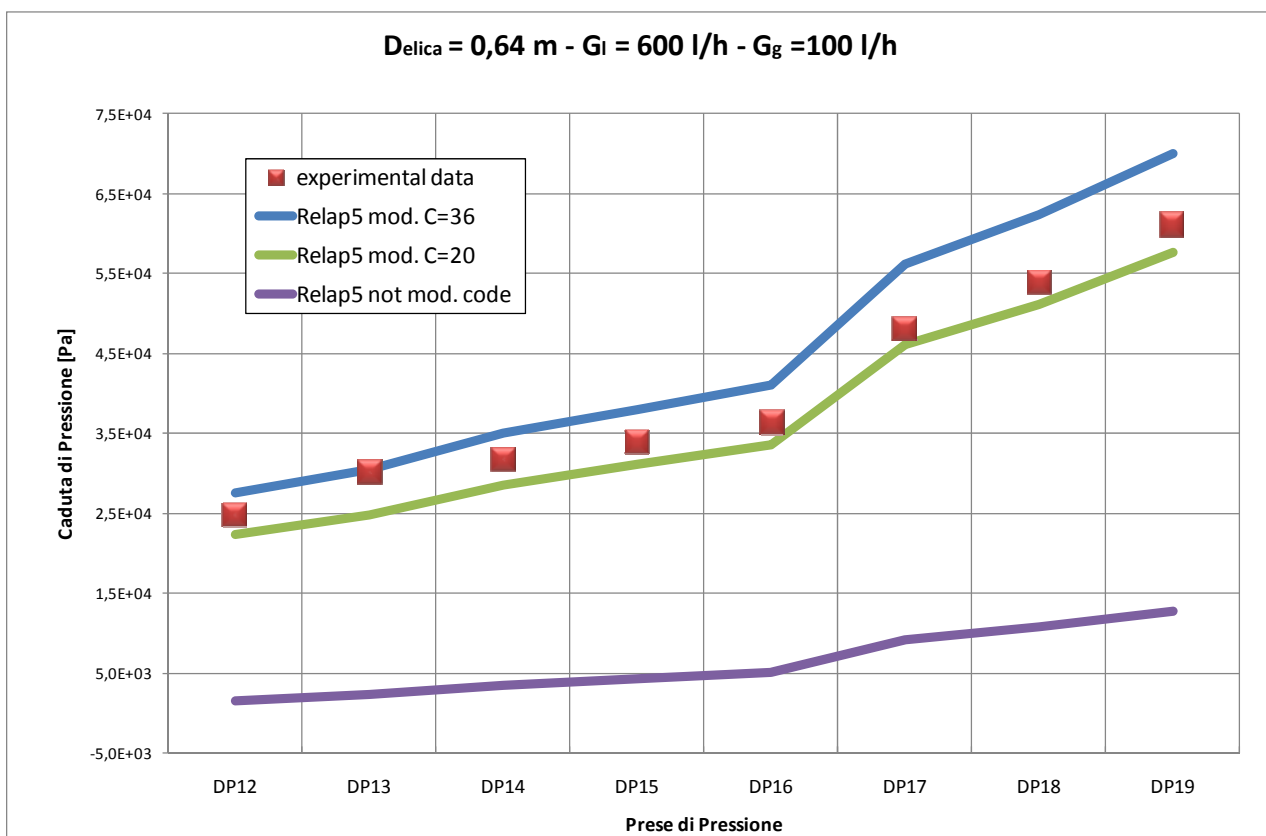
**Figura 12** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



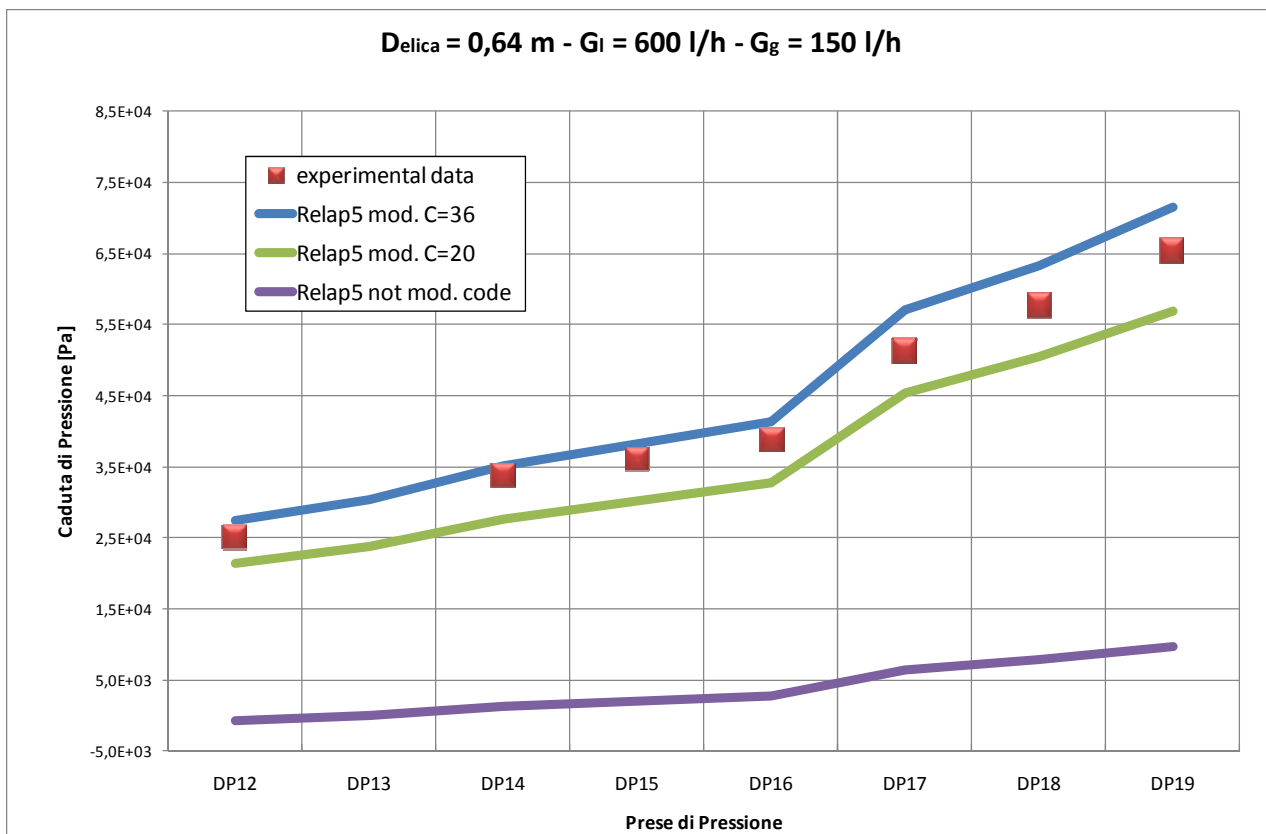
**Figura 13** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



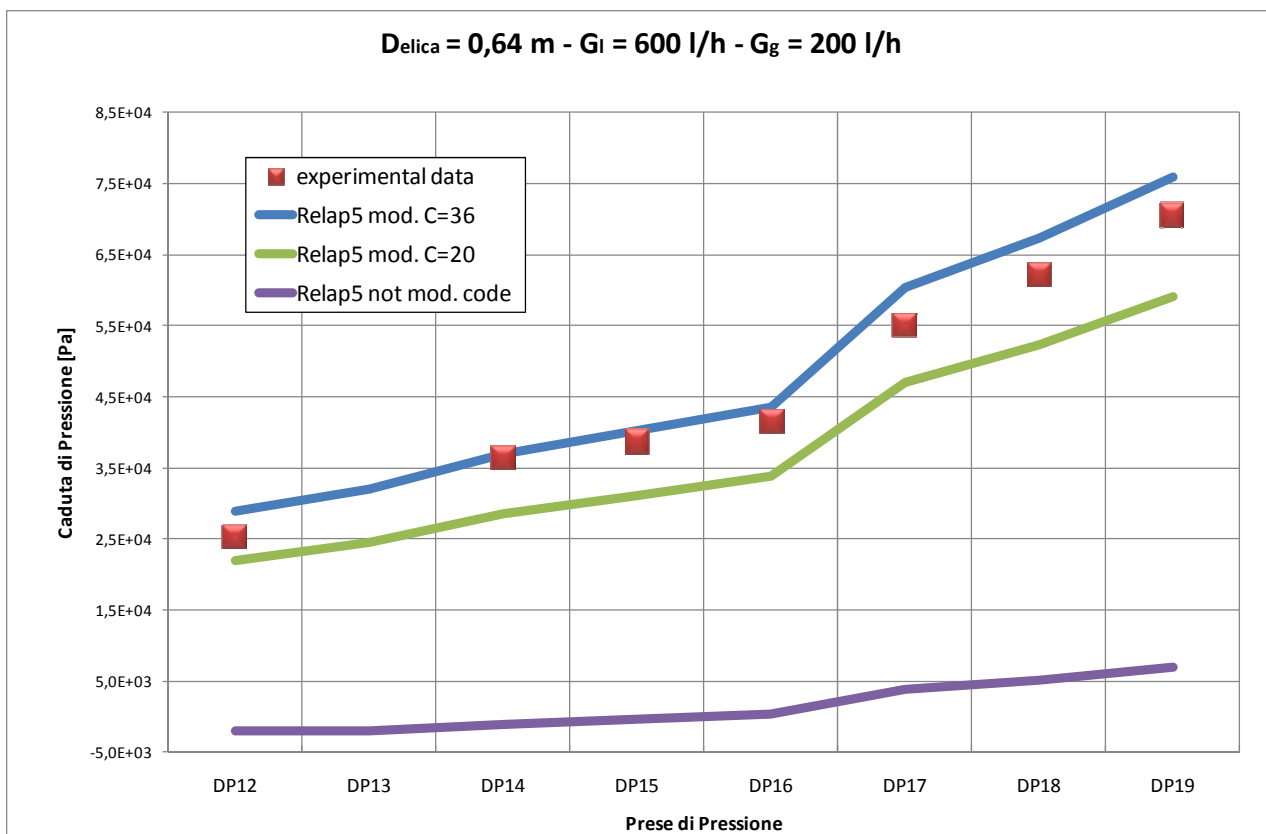
**Figura 14** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 600$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.



**Figura 15** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 600$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.

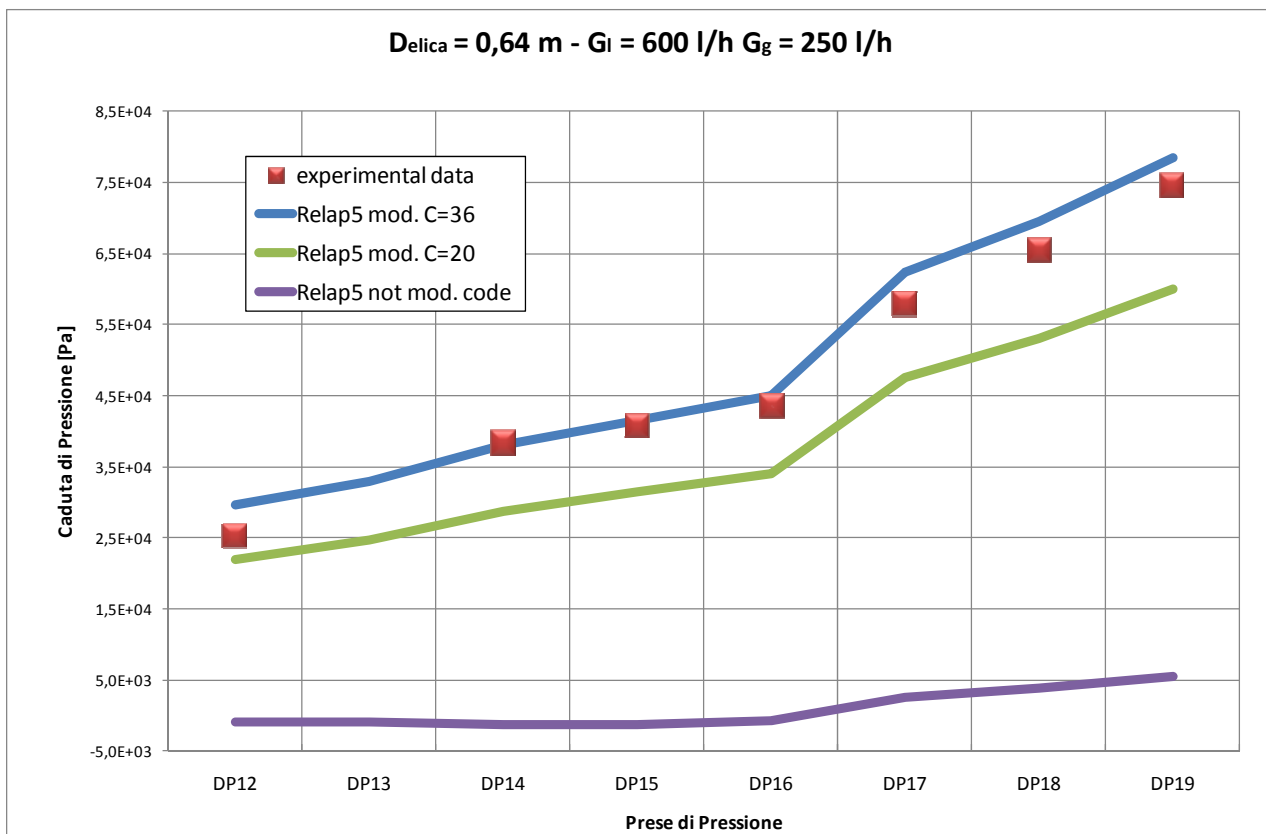


**Figura 16** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.

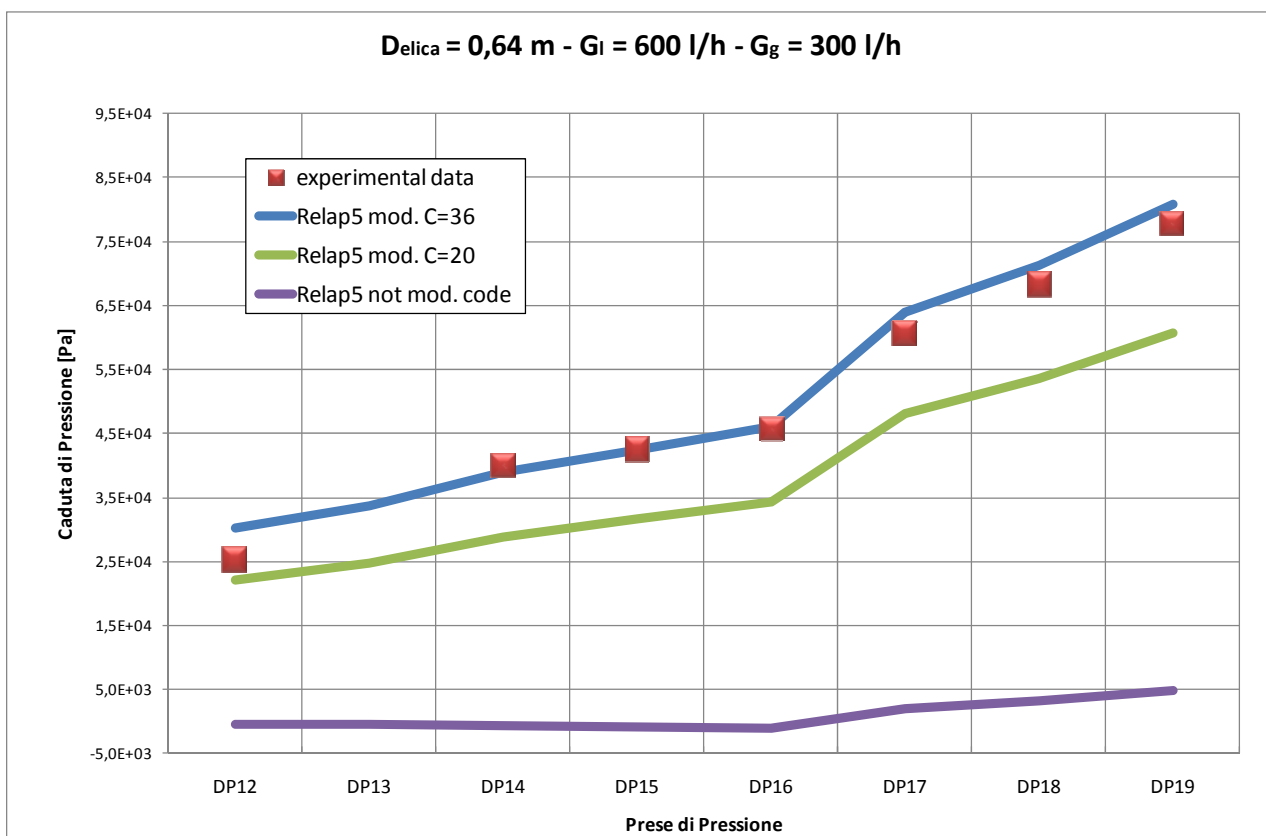


**Figura 17** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.

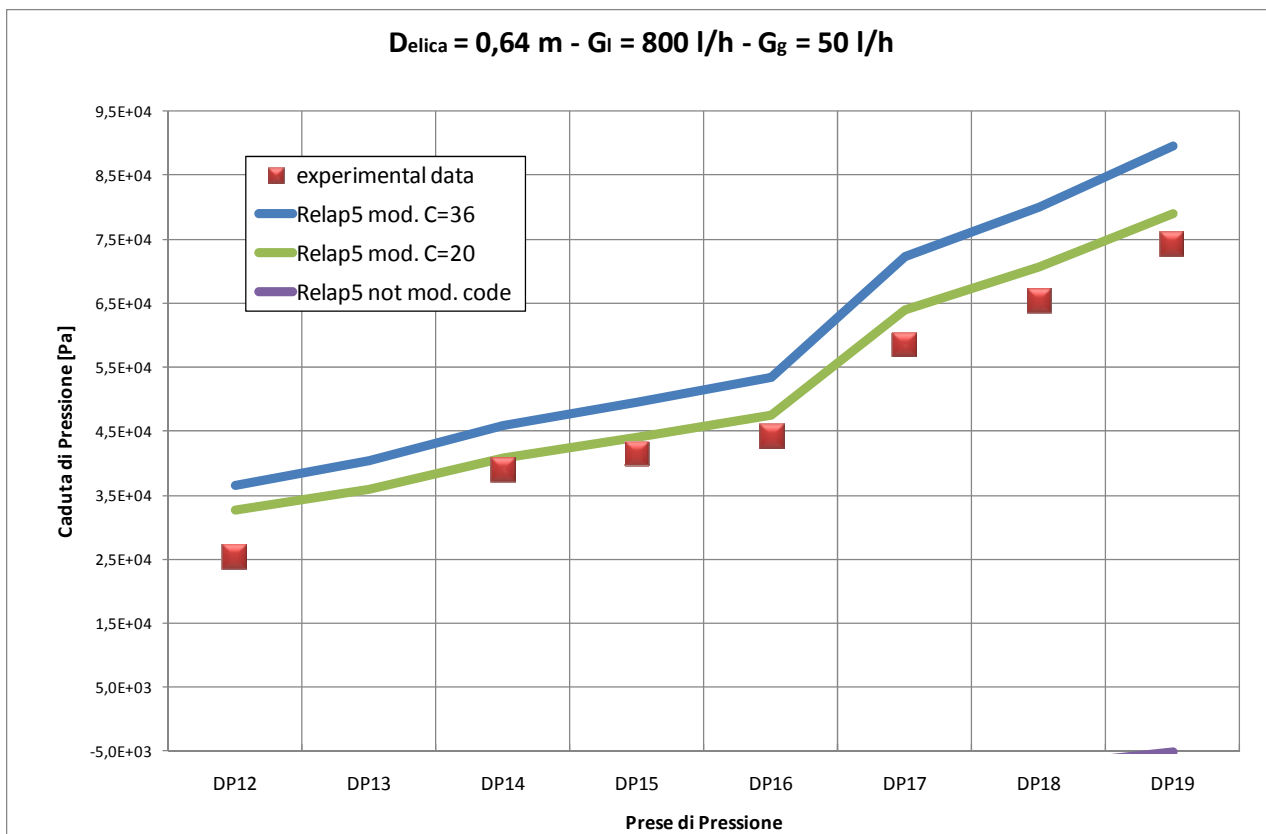




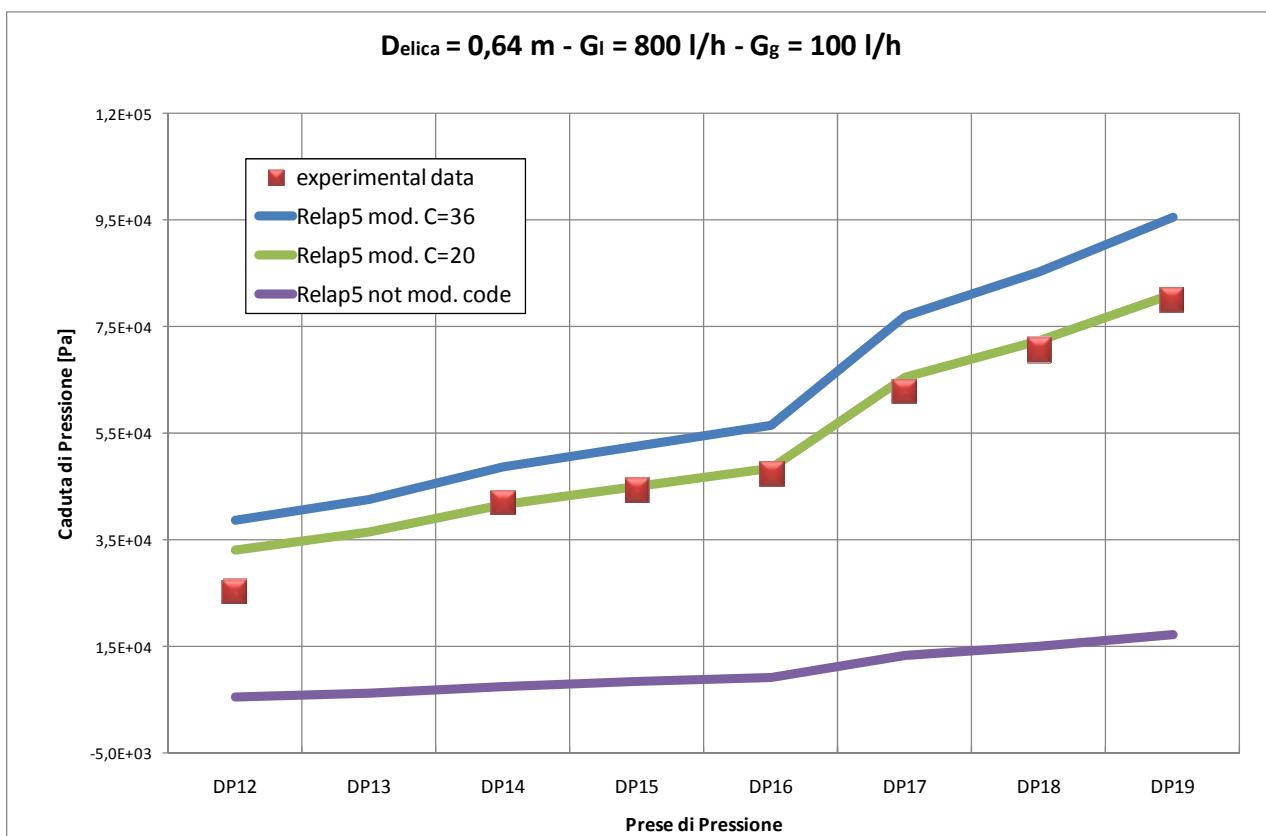
**Figura 18**- Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con G<sub>i</sub> = 600 l/h e G<sub>g</sub> = 250 l/h.



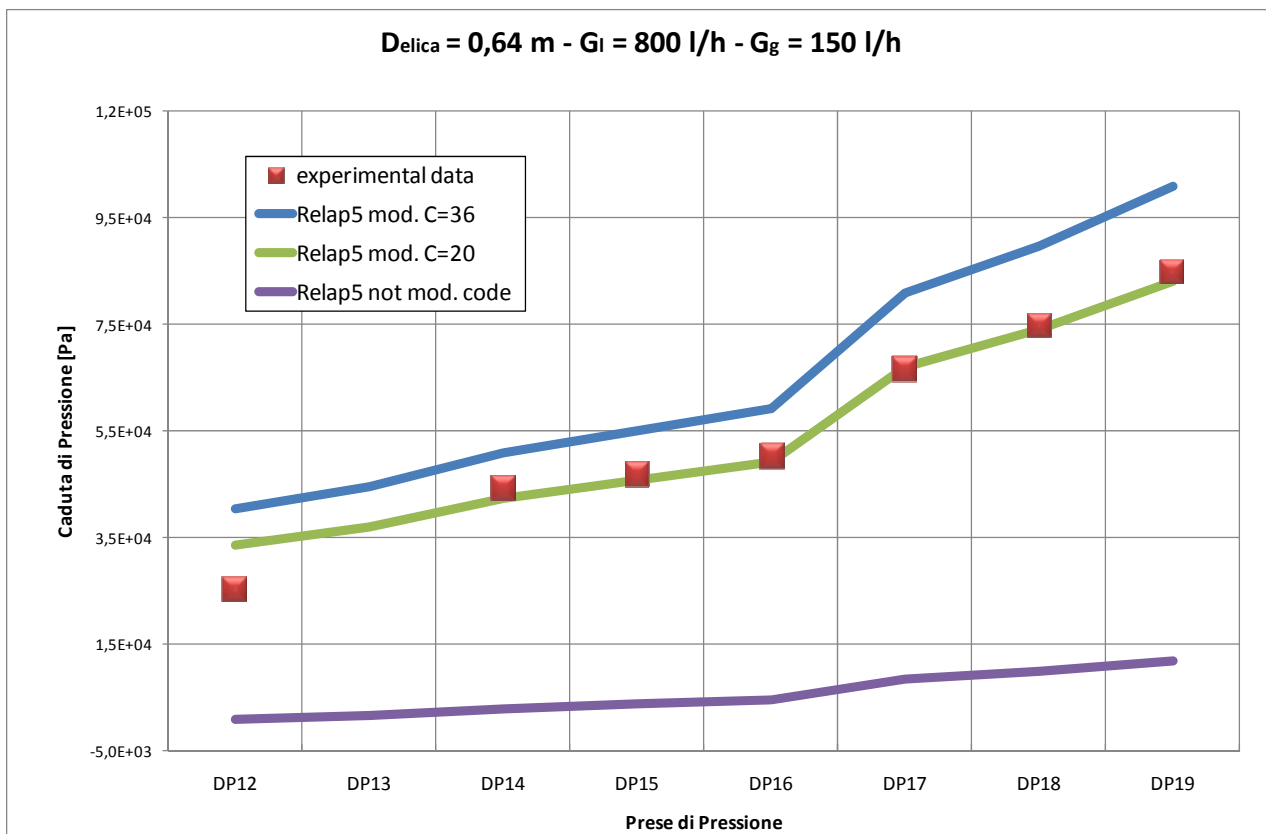
**Figura 19** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con G<sub>i</sub> = 600 l/h e G<sub>g</sub> = 300 l/h.



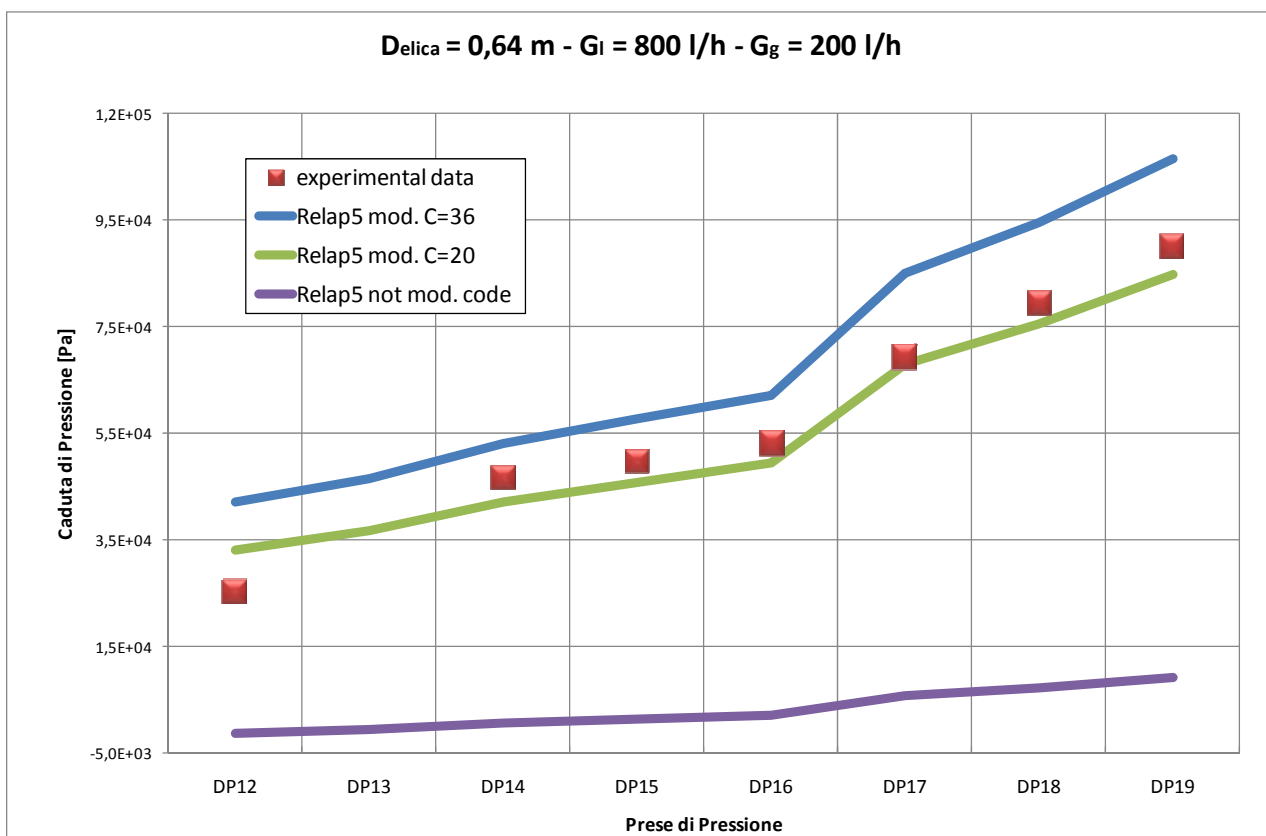
**Figura 20** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 800$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.



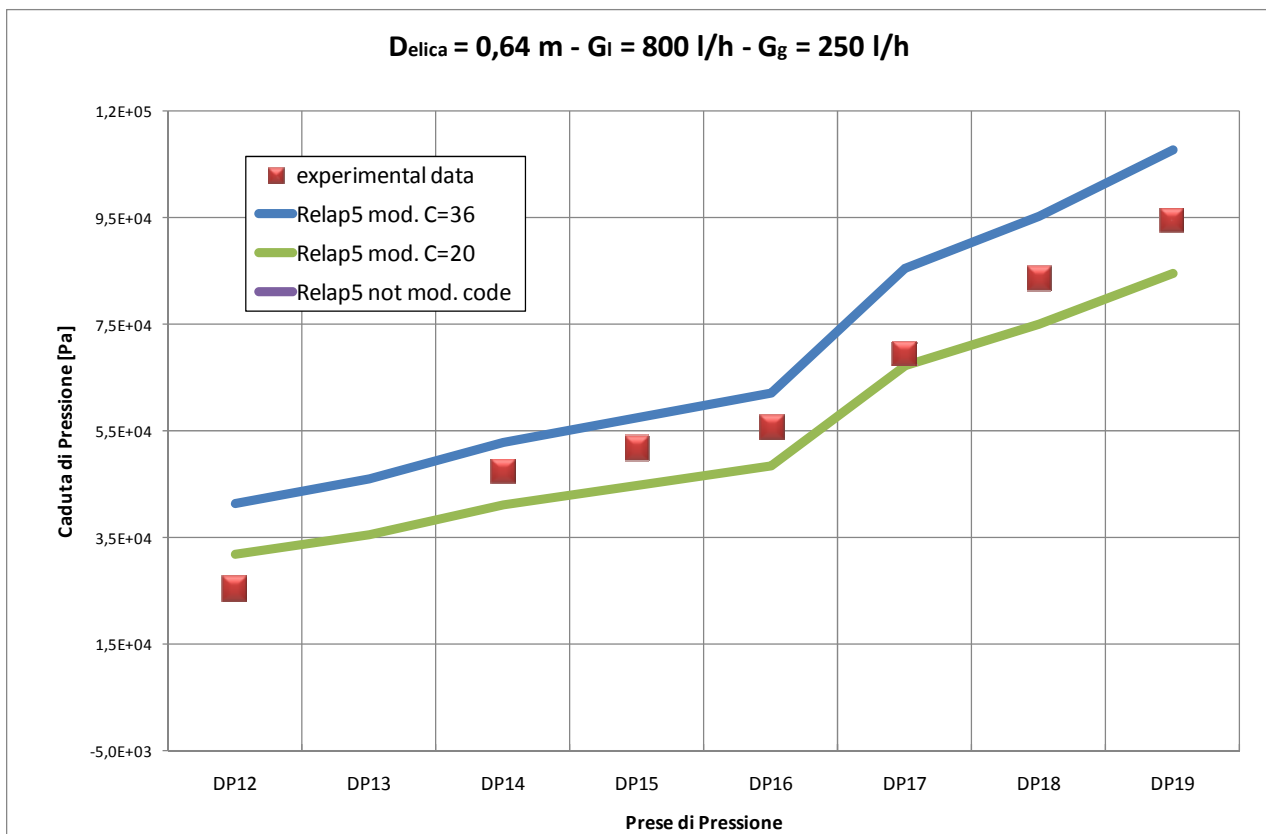
**Figura 21** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 800$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



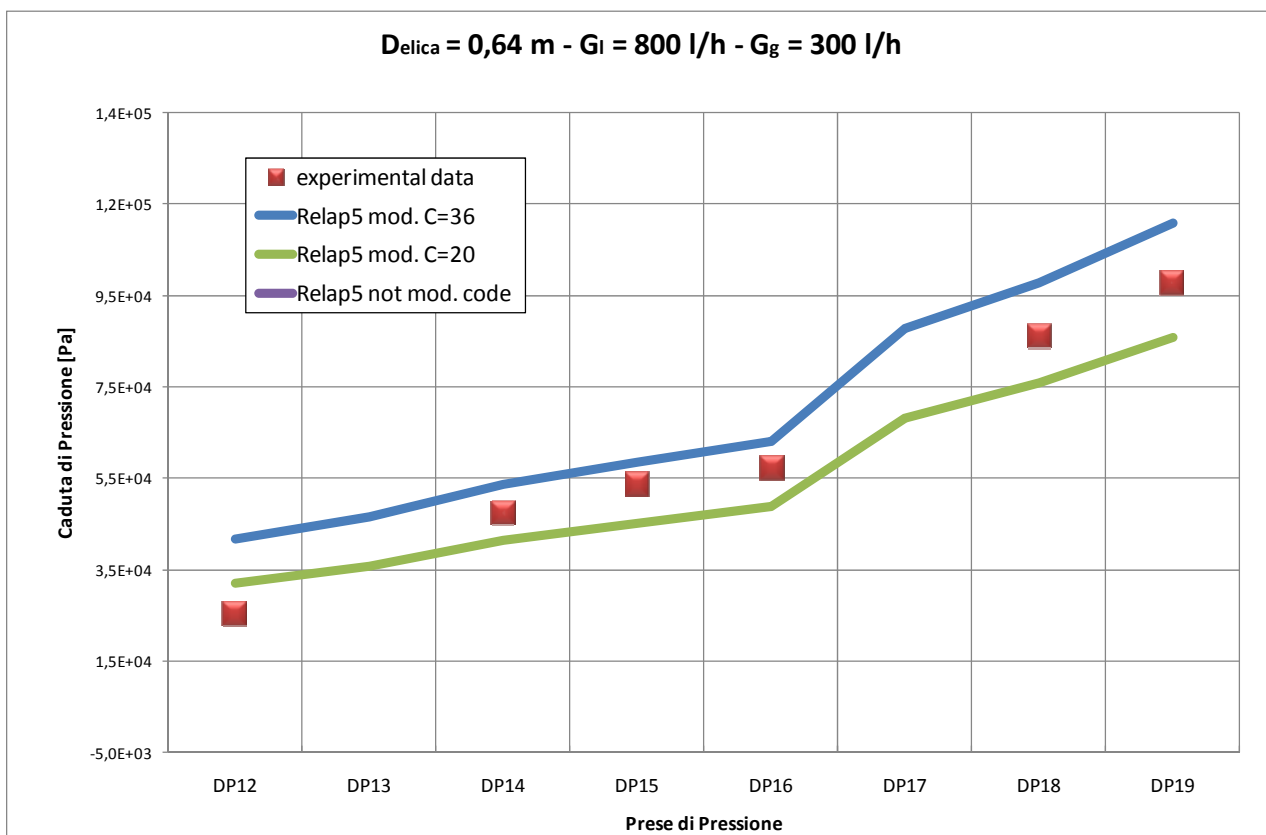
**Figura 22** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



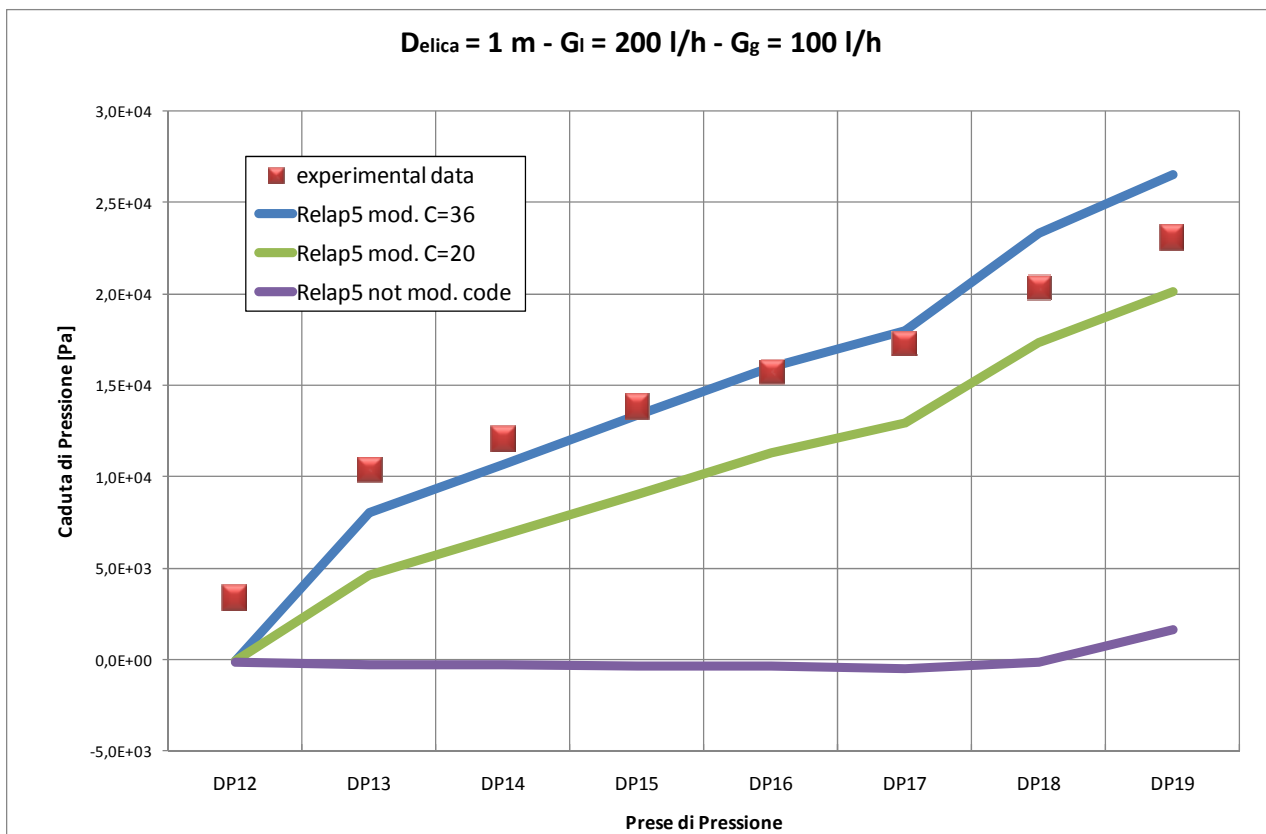
**Figura 23** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



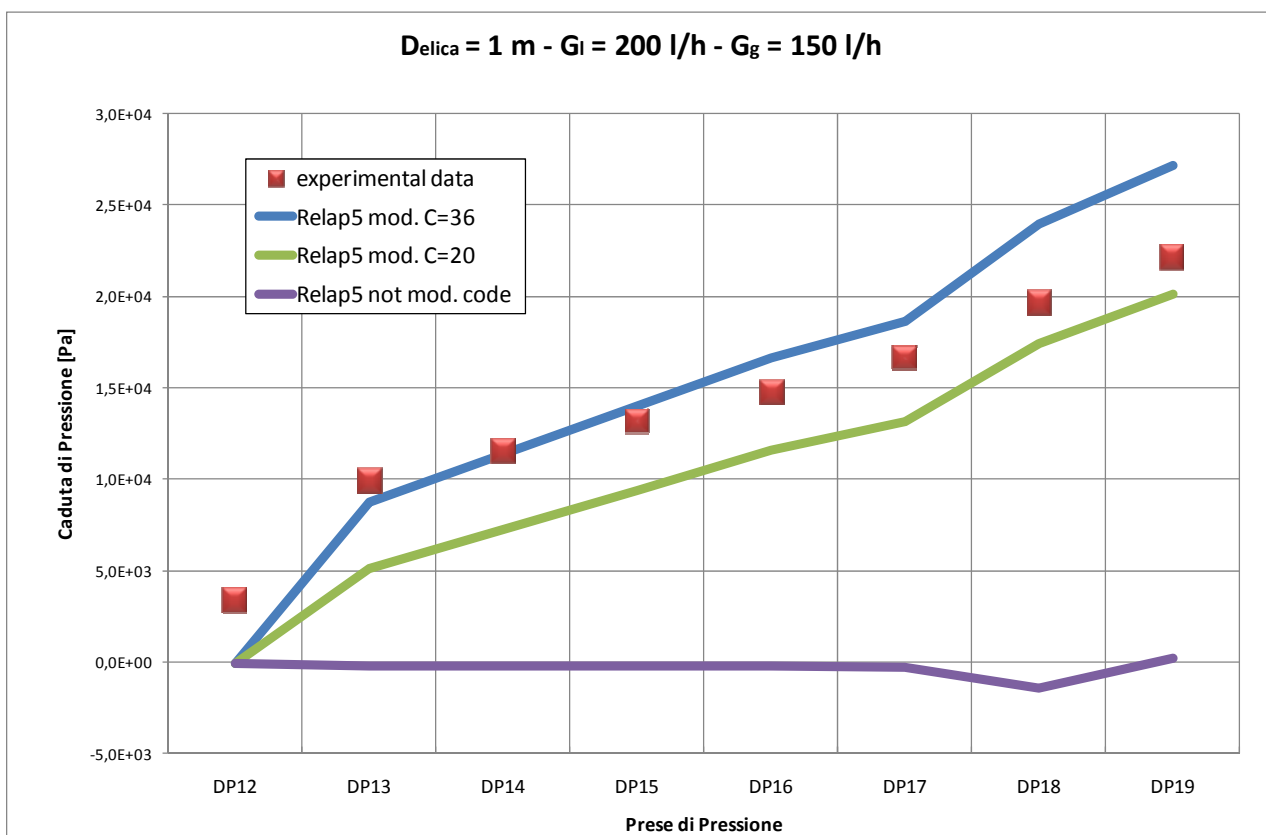
**Figura 24** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



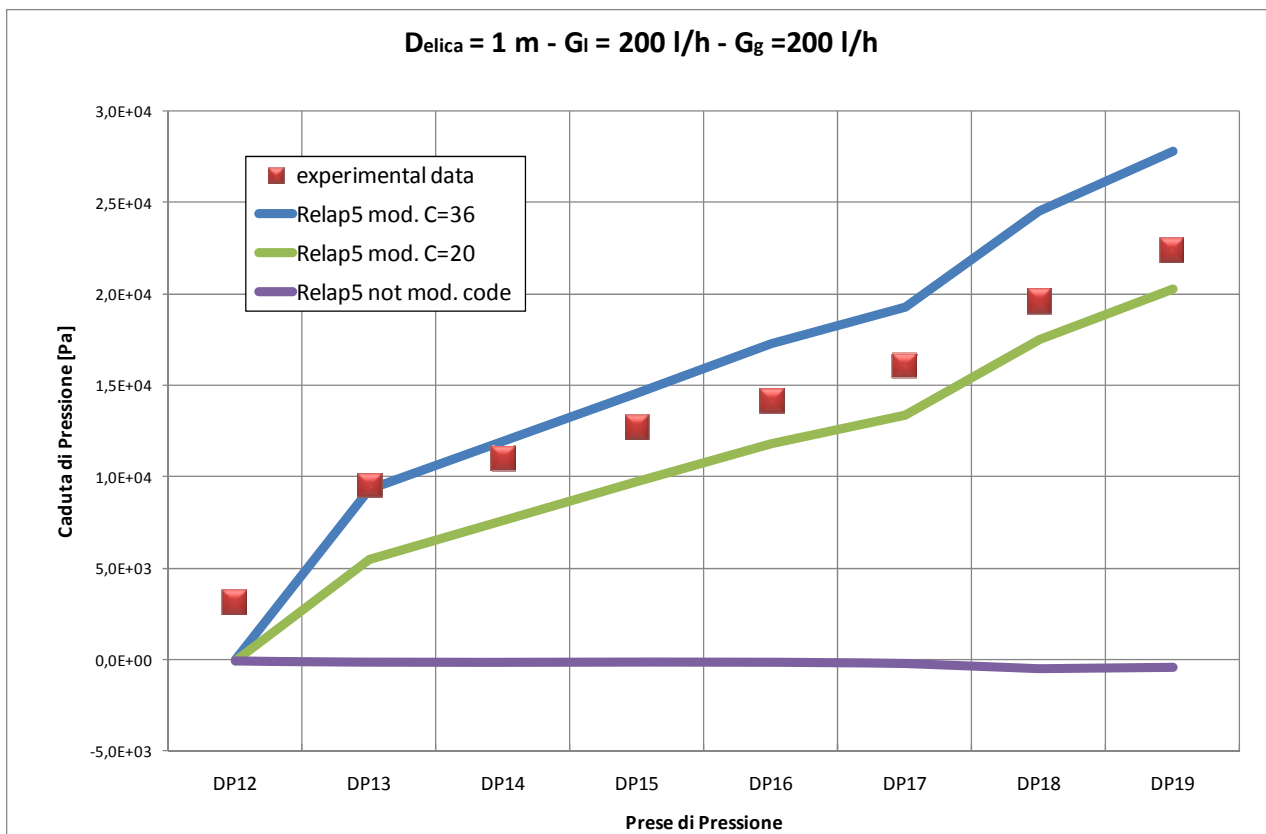
**Figura 25** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



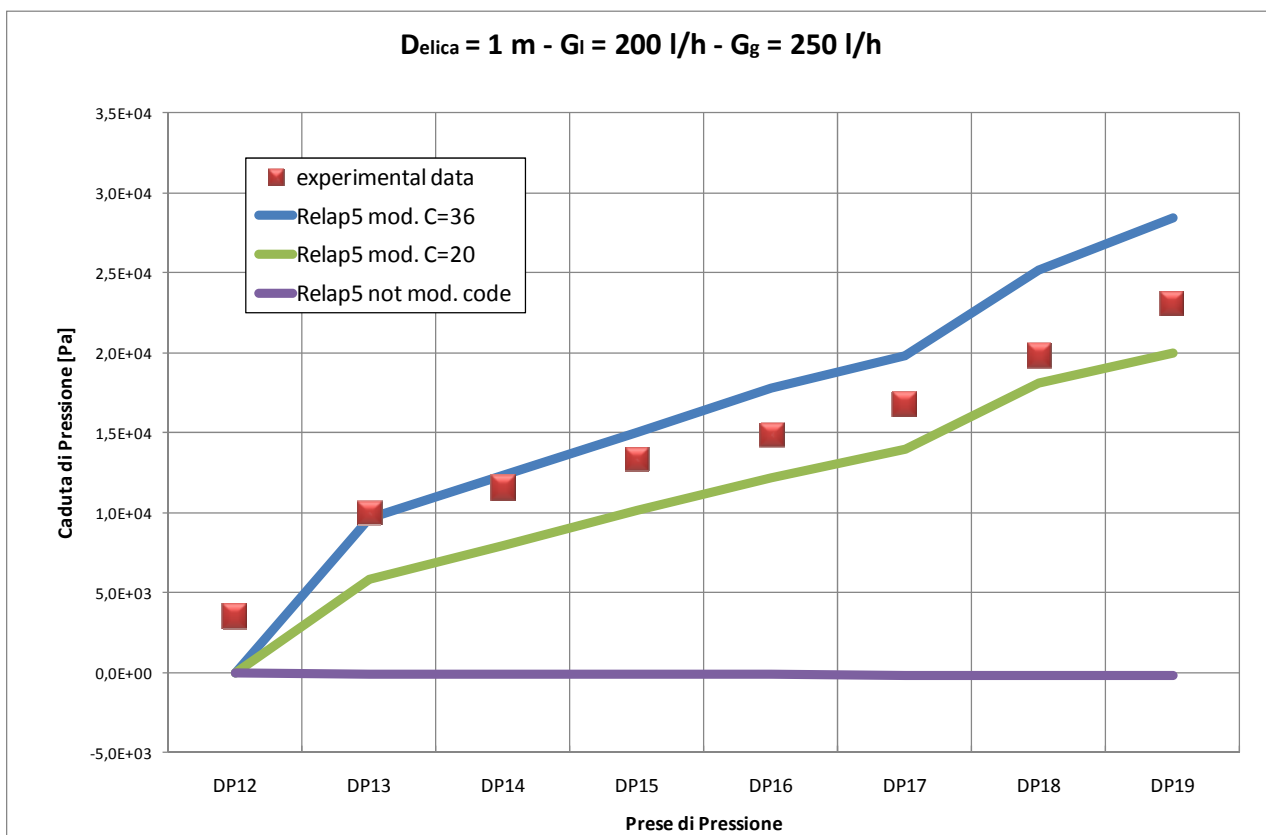
**Figura 26** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 200$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



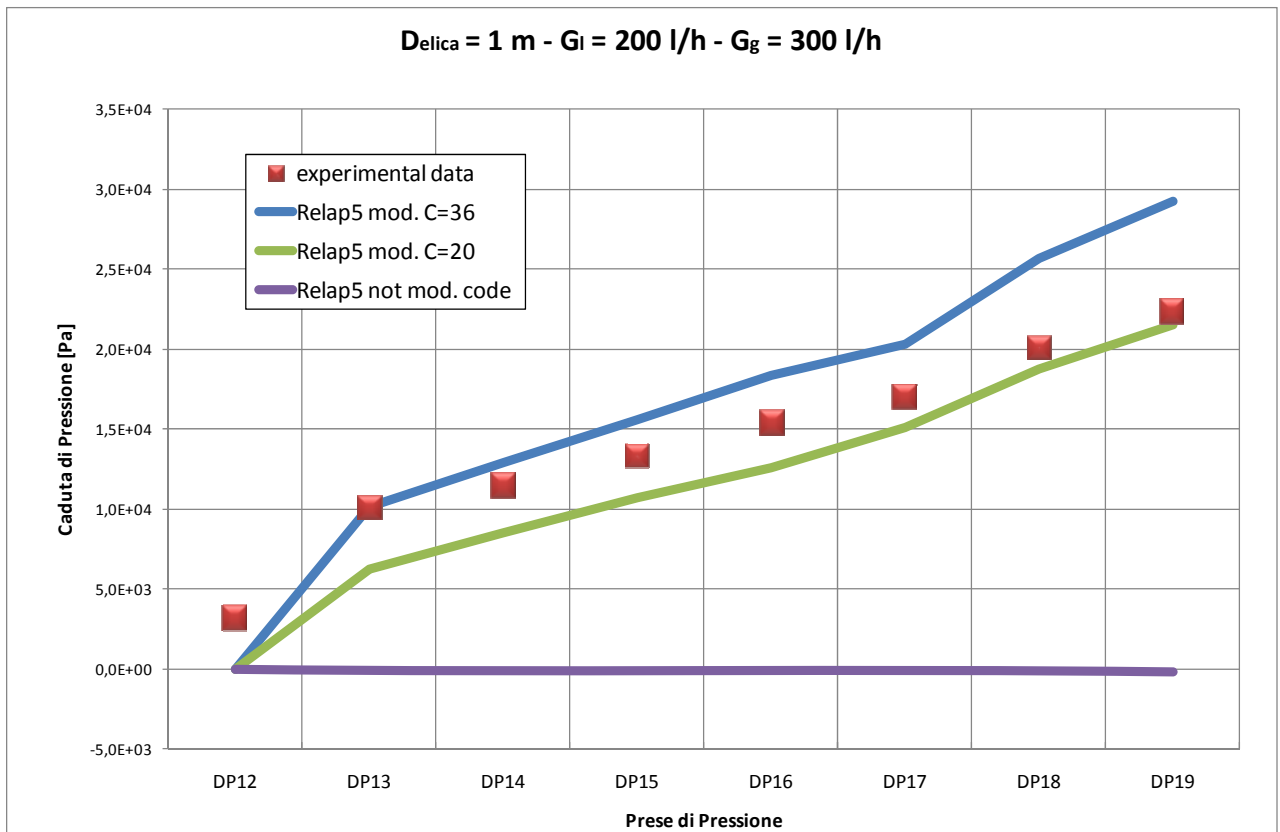
**Figura 27** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 200$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



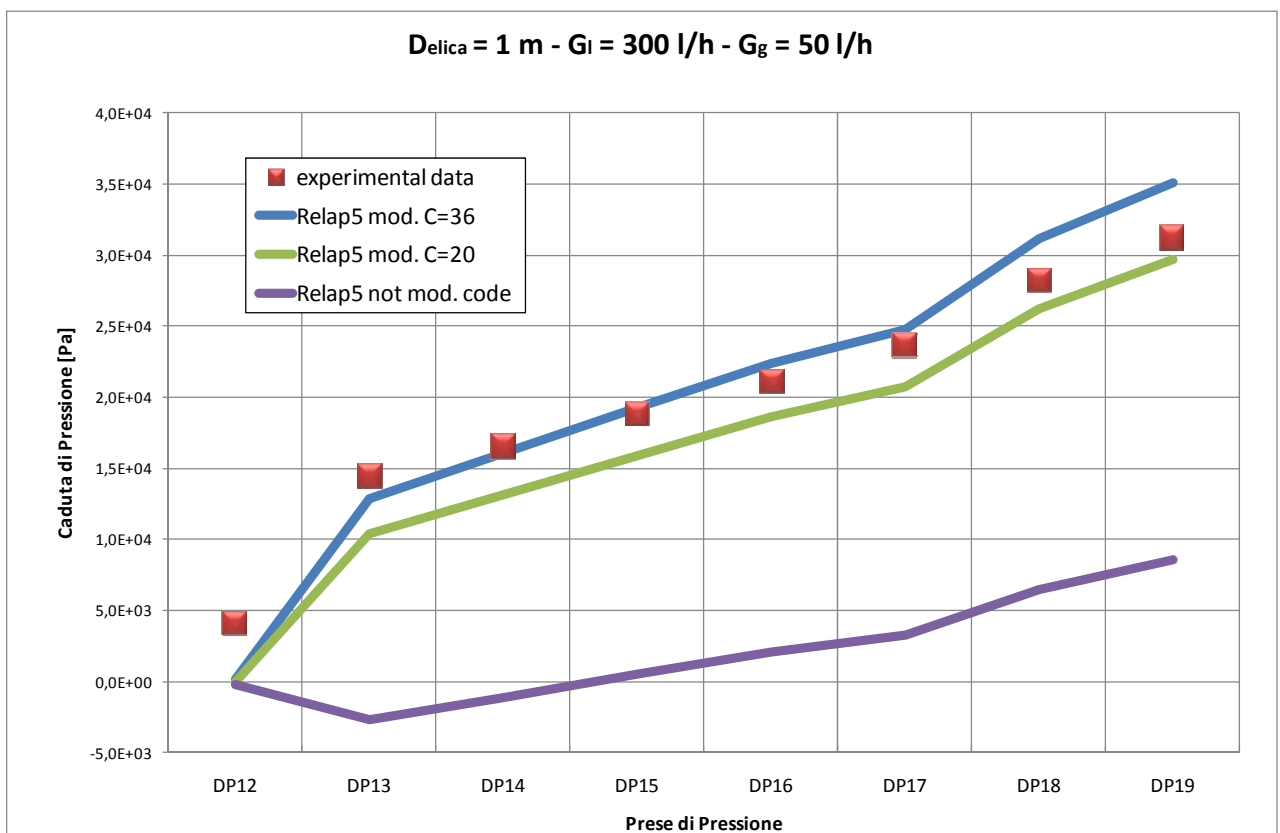
**Figura 28** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 200$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



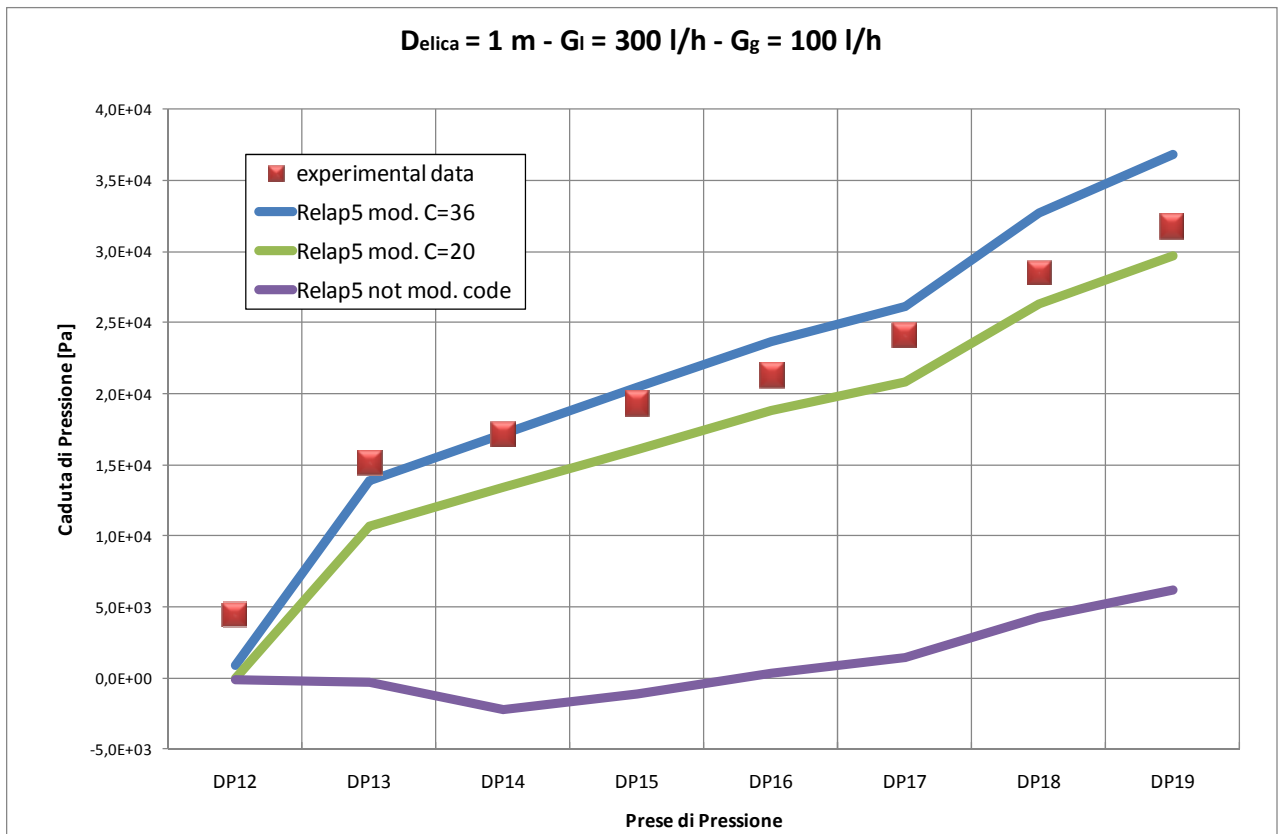
**Figura 29** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 200$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



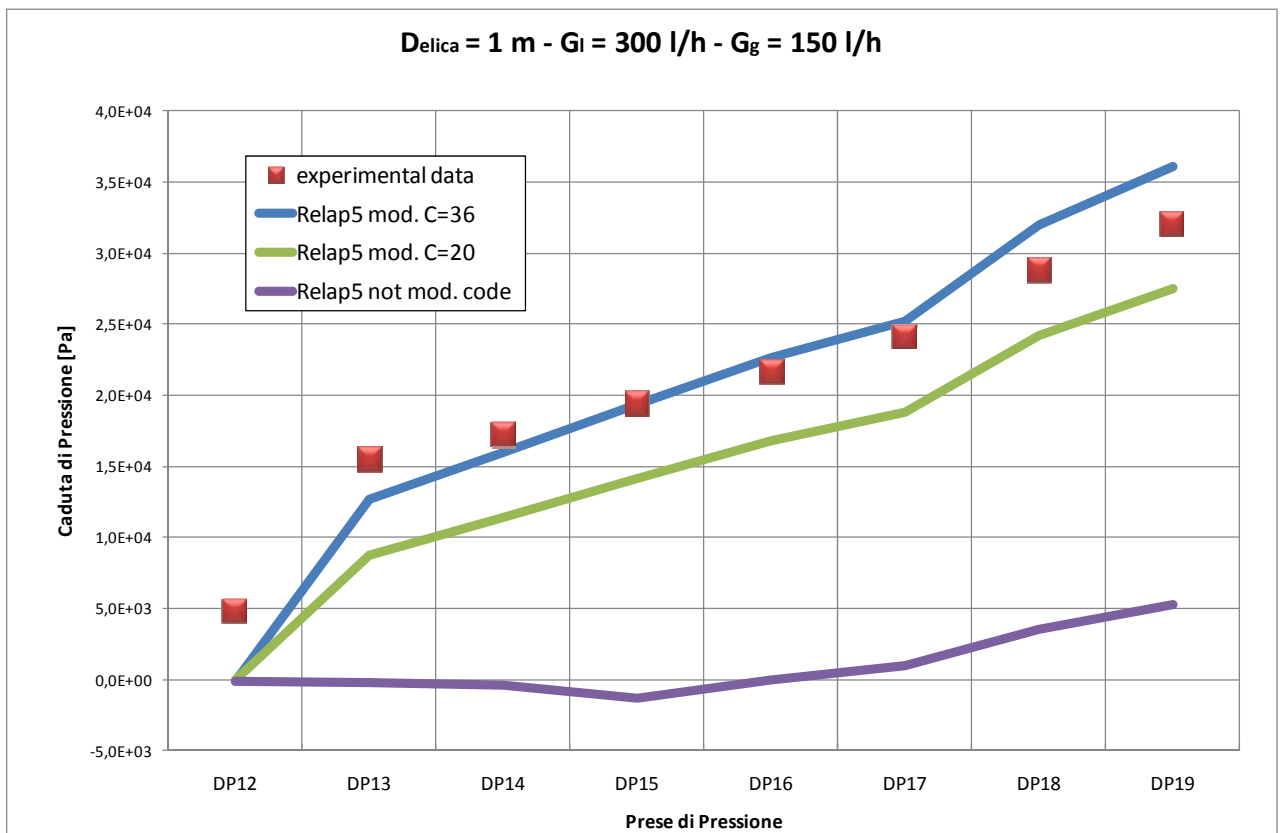
**Figura 30** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 200$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



**Figura 31**- Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.

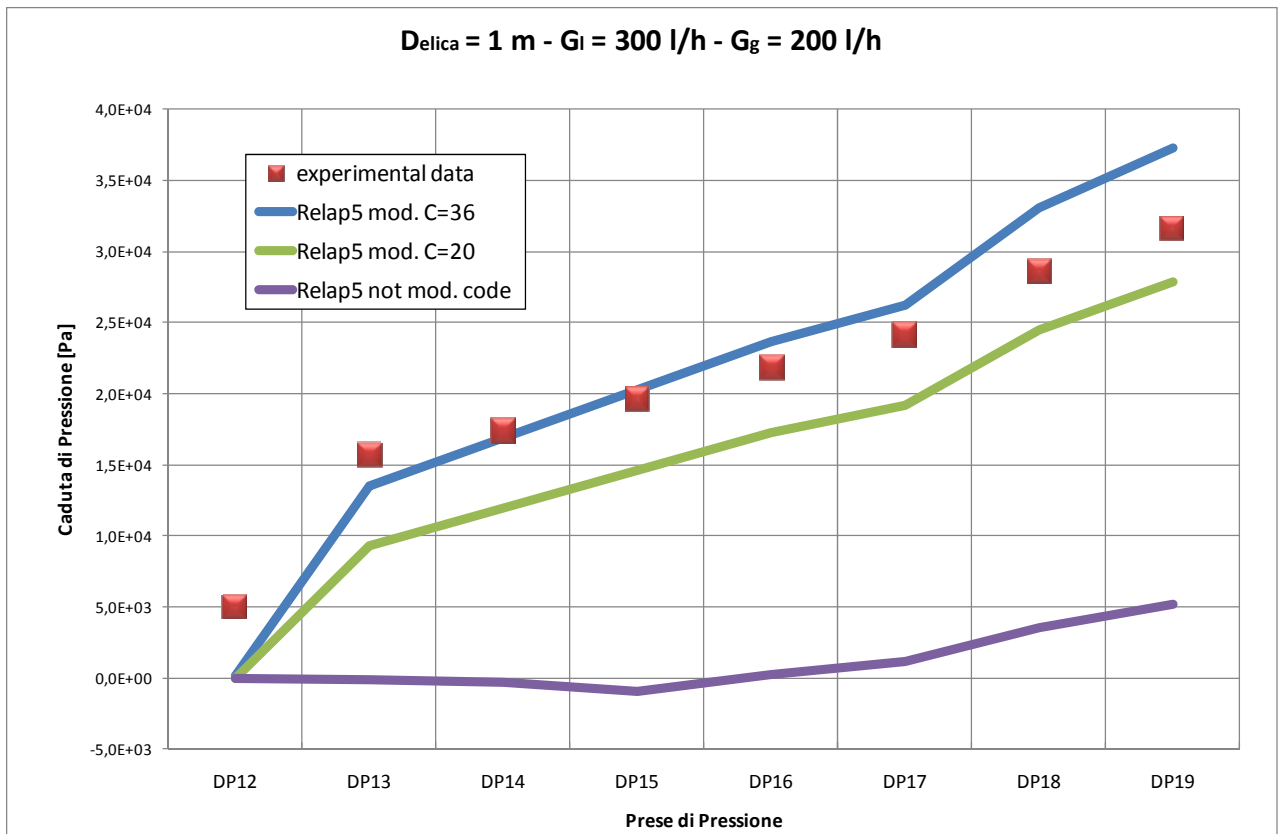


**Figura 32** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.

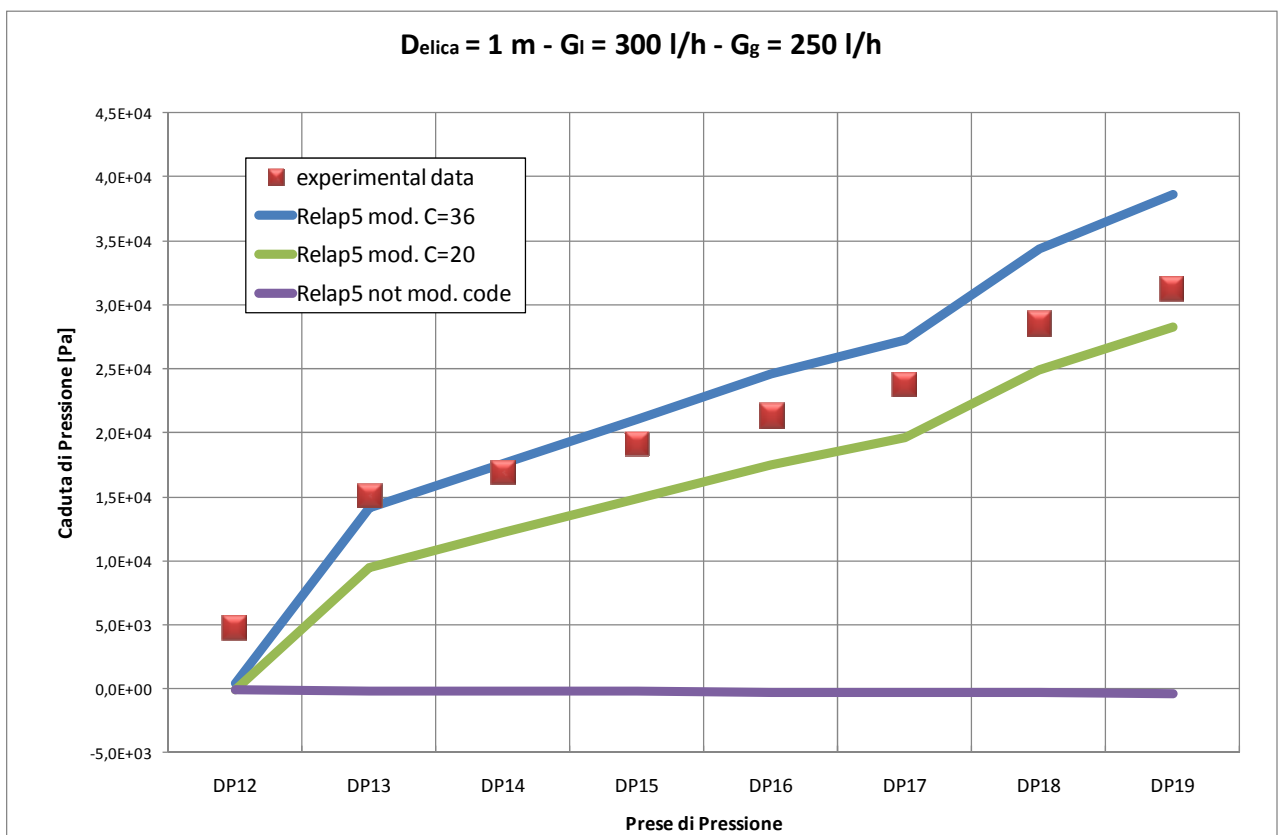


**Figura 33** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.

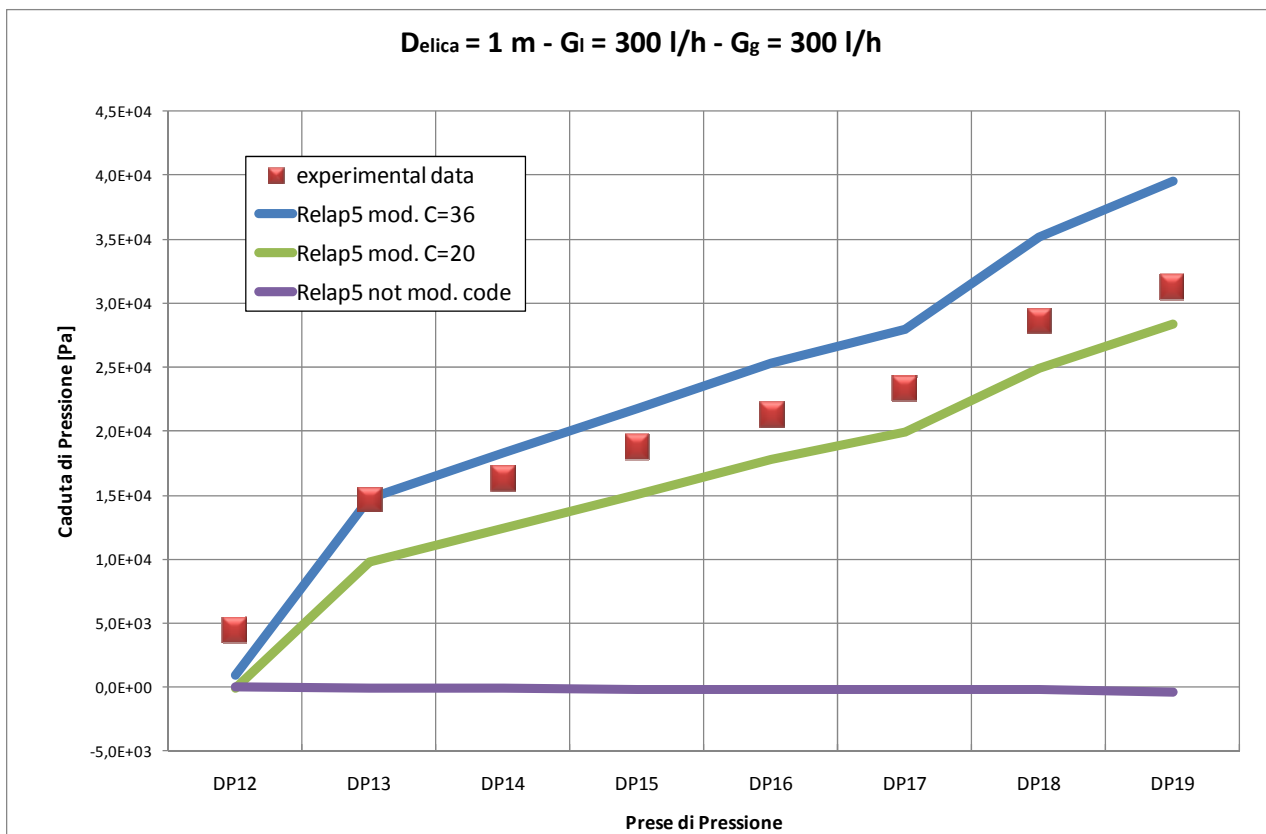




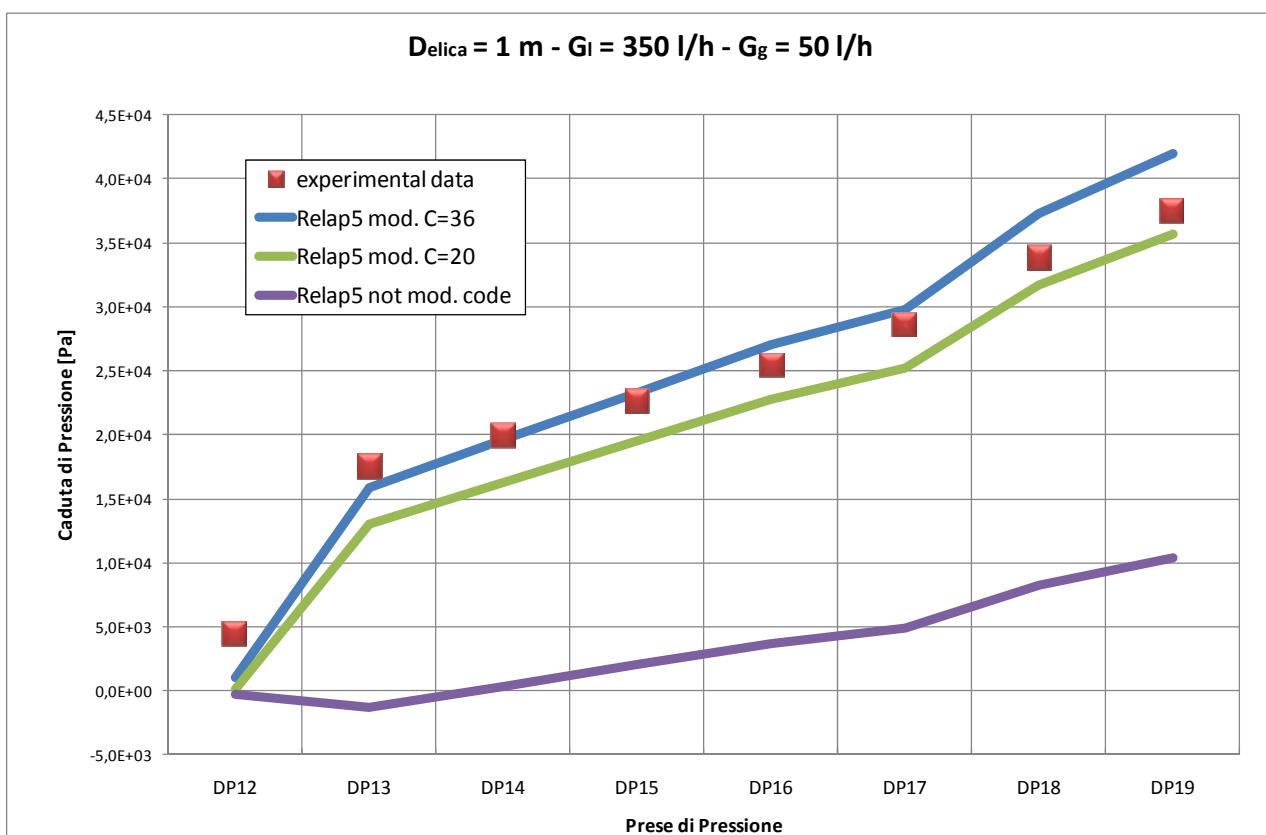
**Figura 34** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



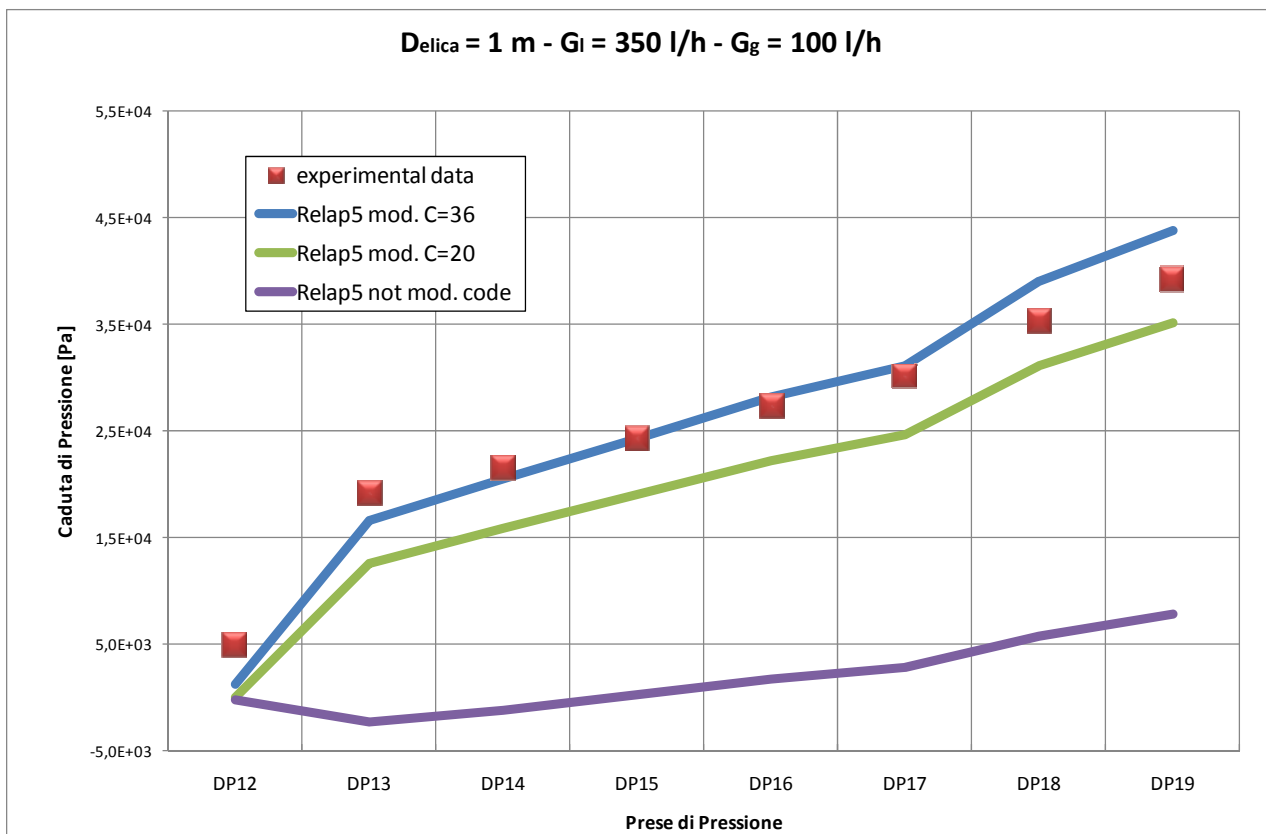
**Figura 35** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



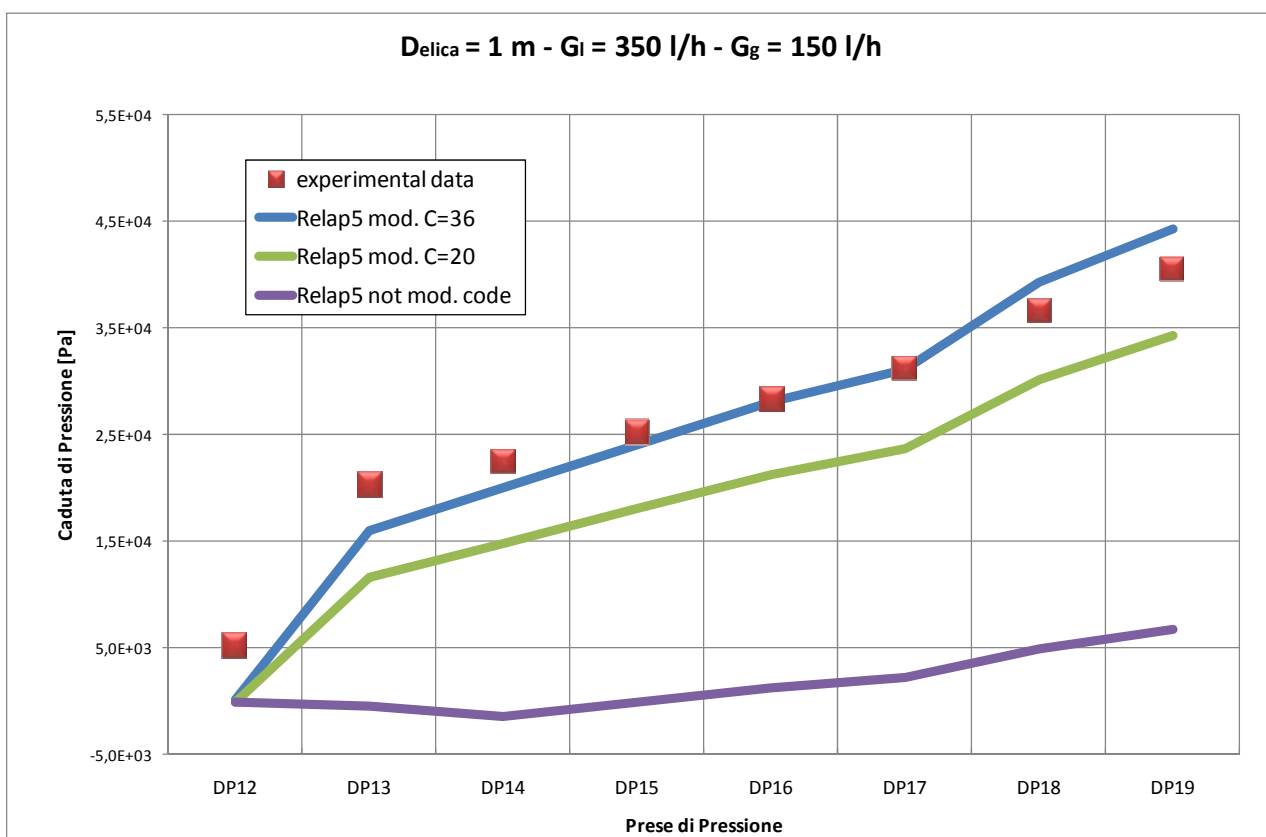
**Figura 36** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 300$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



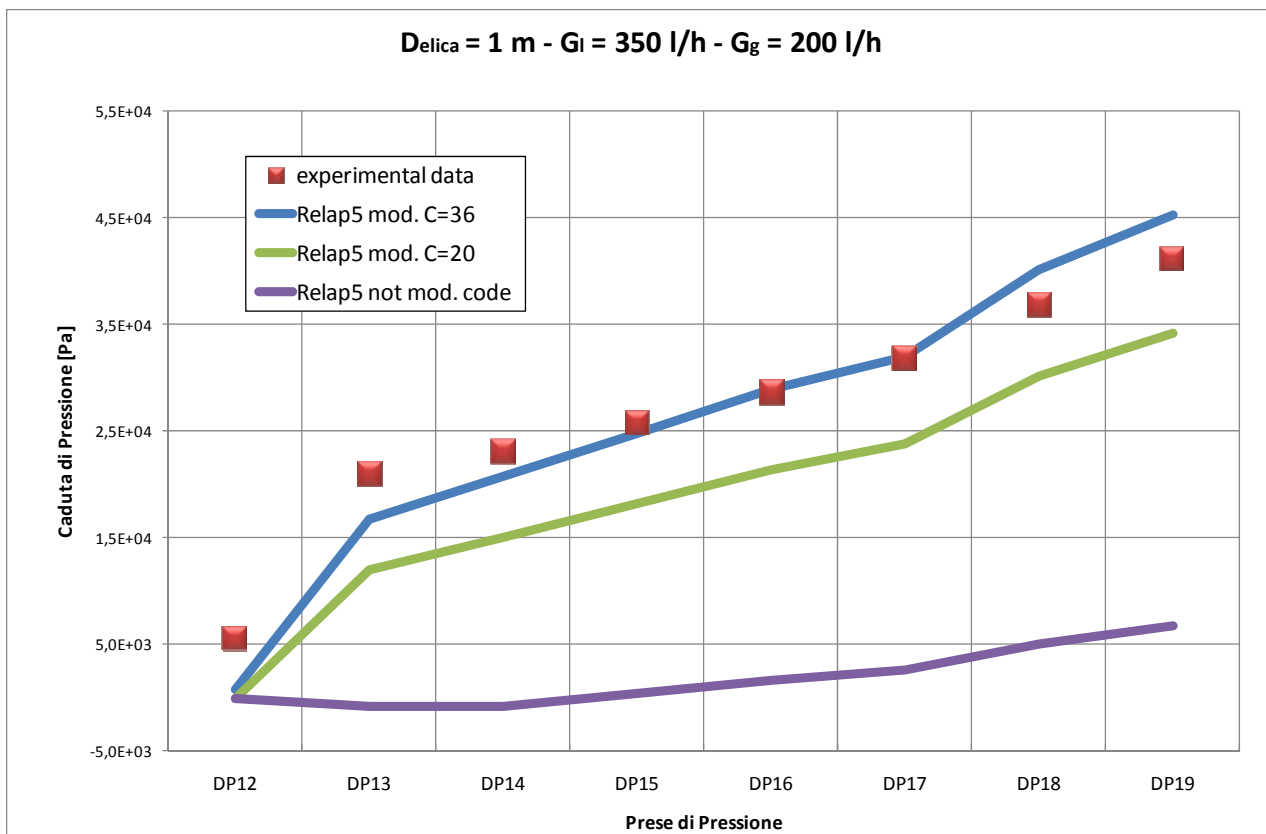
**Figura 37** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 350$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.



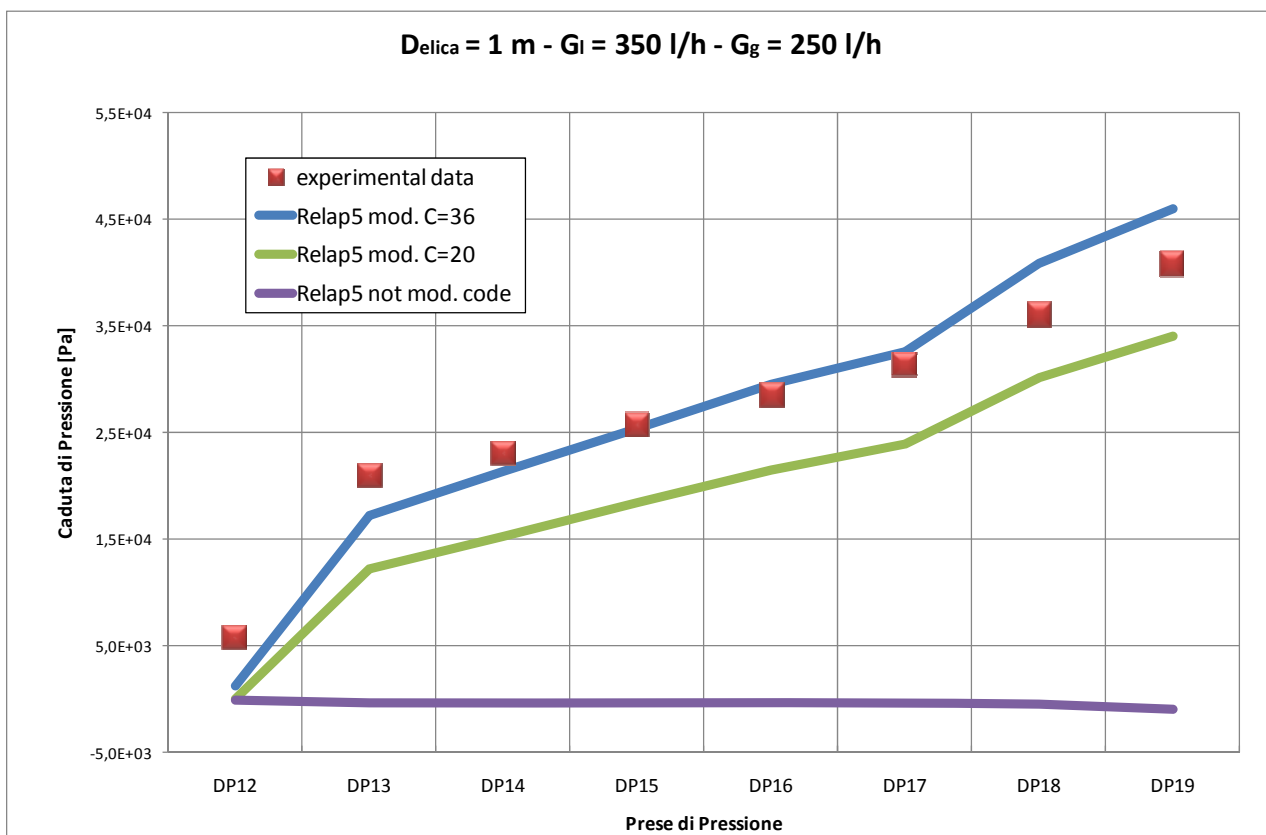
**Figura 38** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 350$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



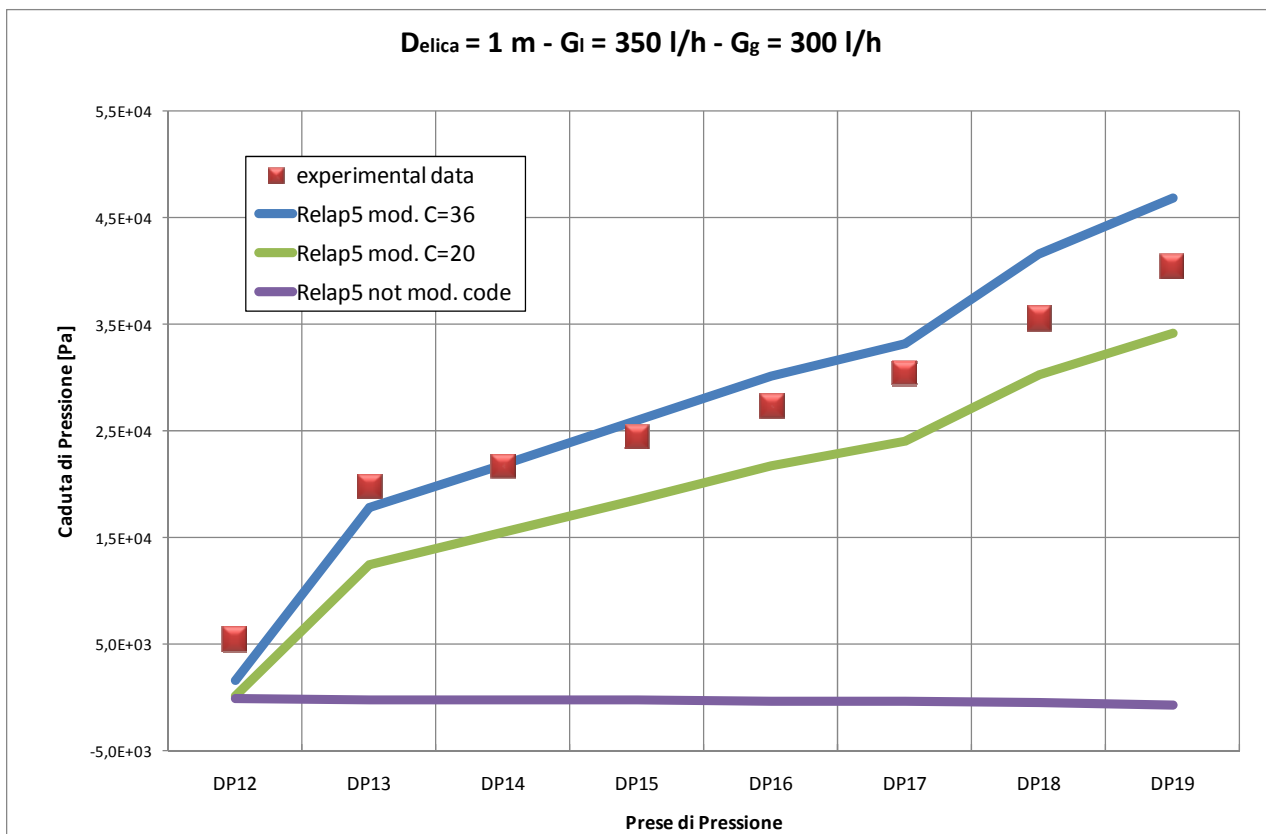
**Figura 39** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 350$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



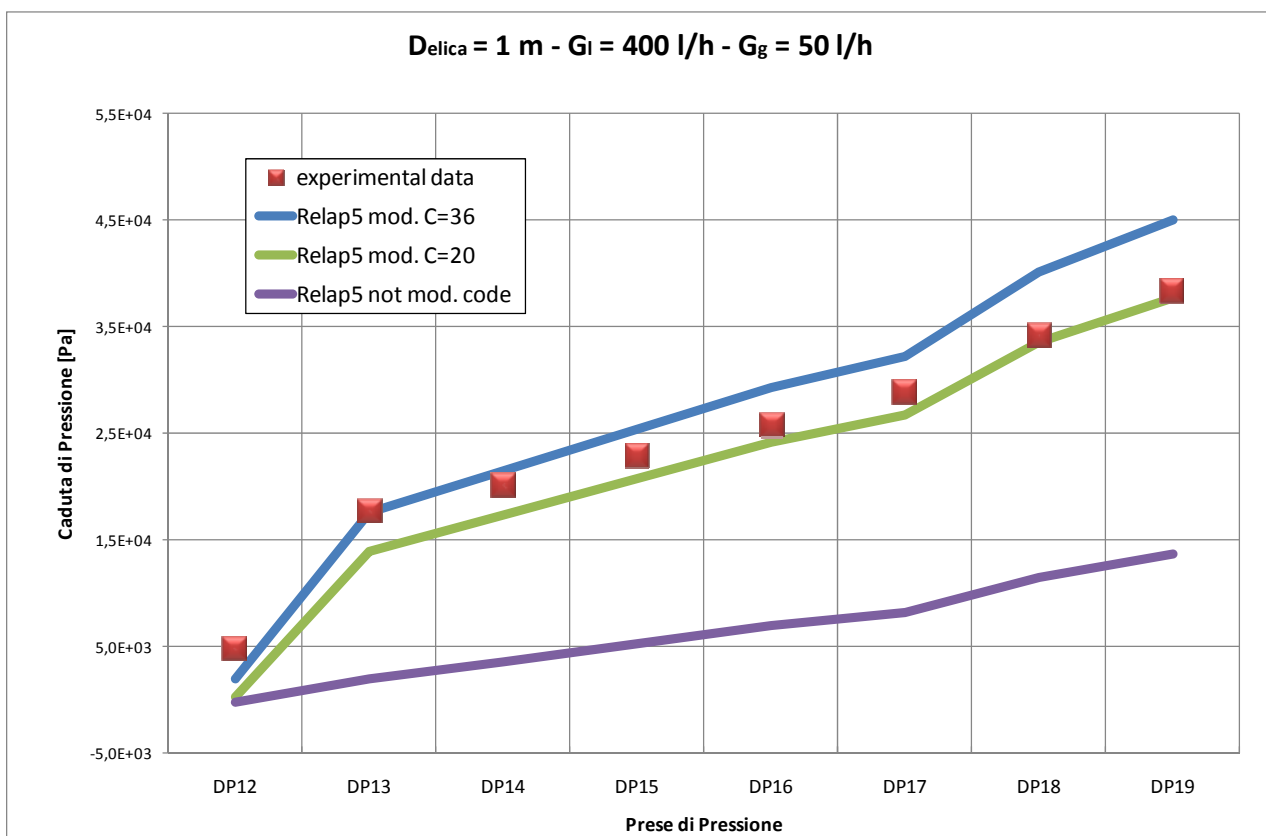
**Figura 40** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 350$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



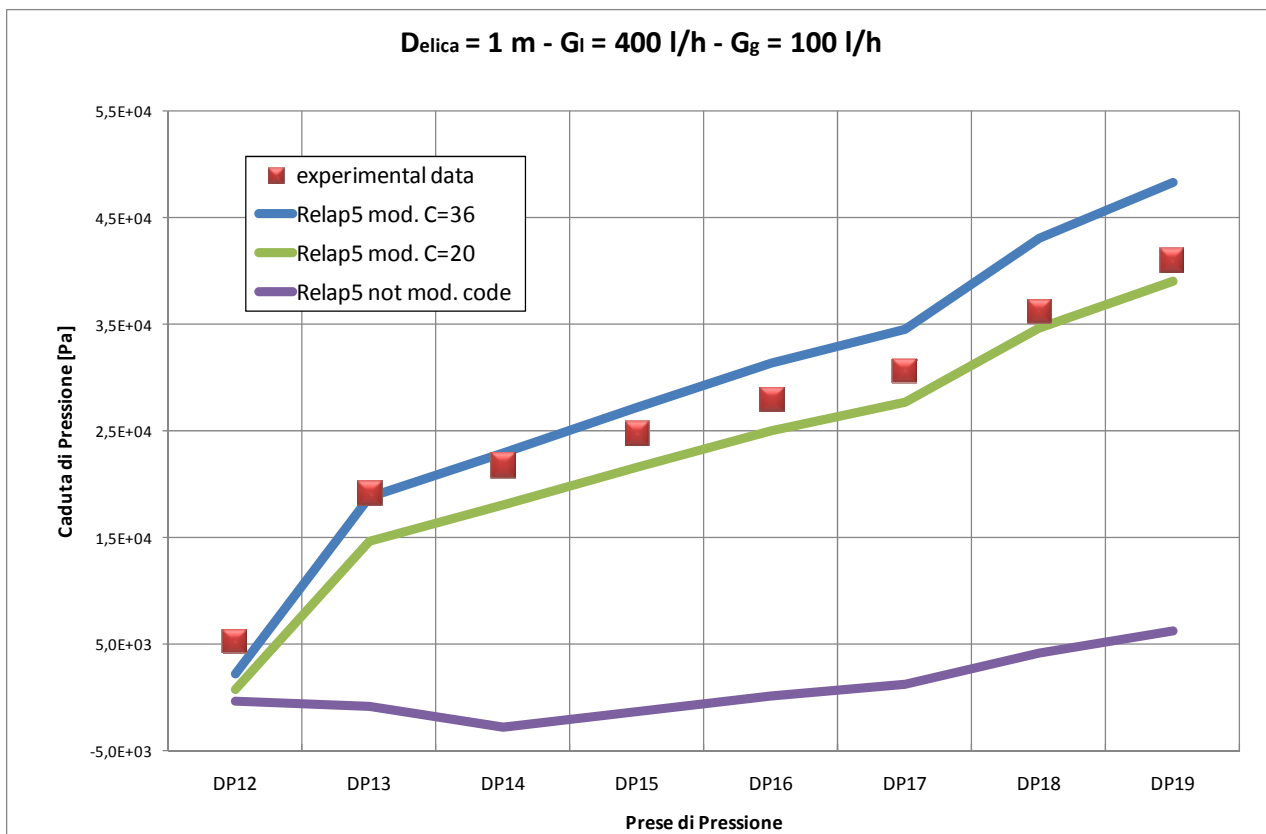
**Figura 41**- Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 350$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



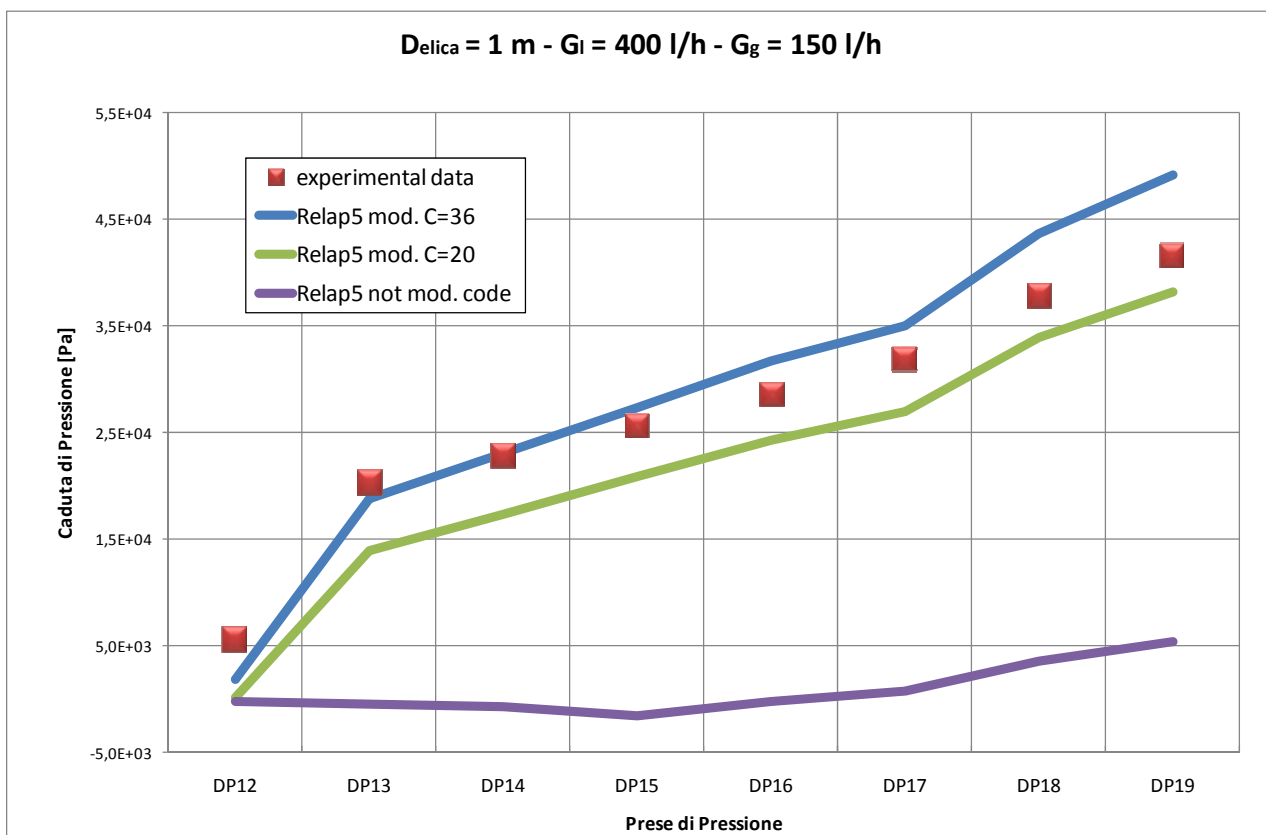
**Figura 42** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 350$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



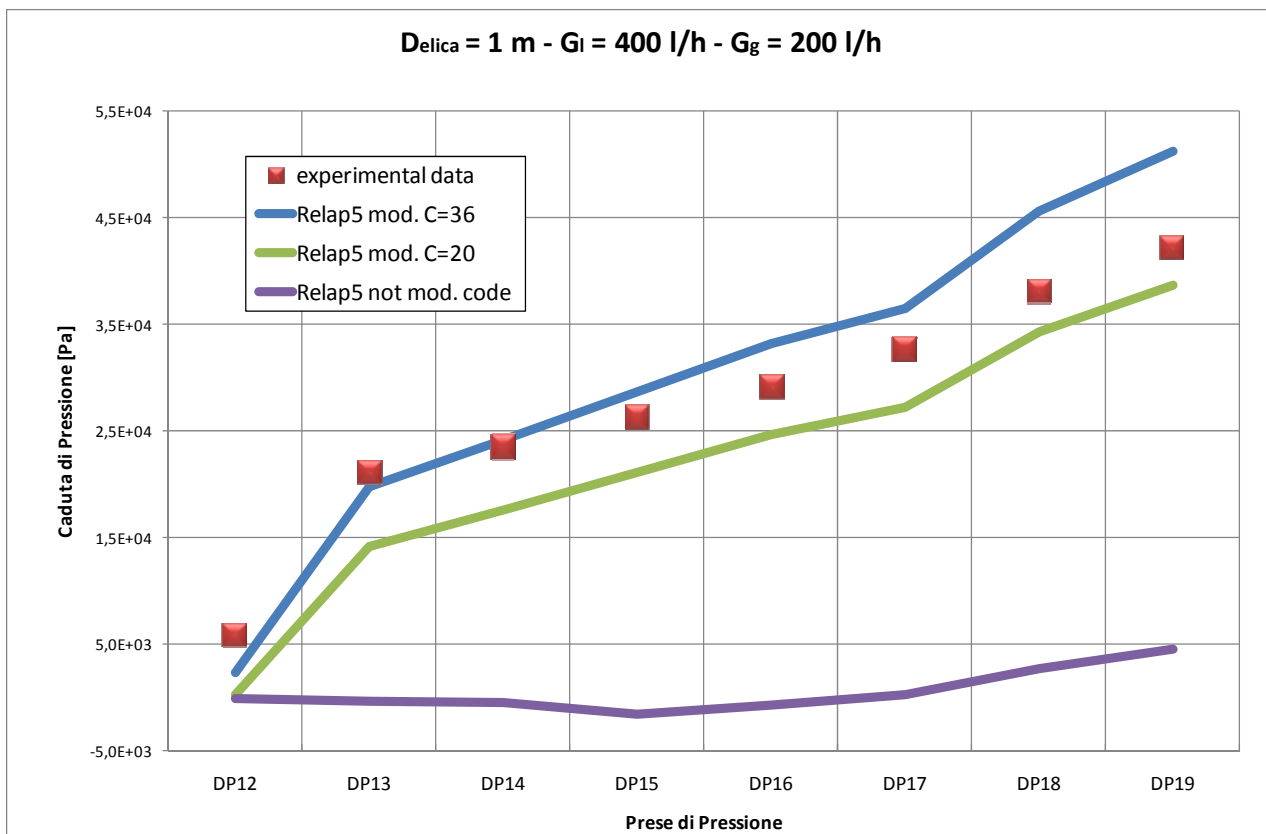
**Figura 43** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.



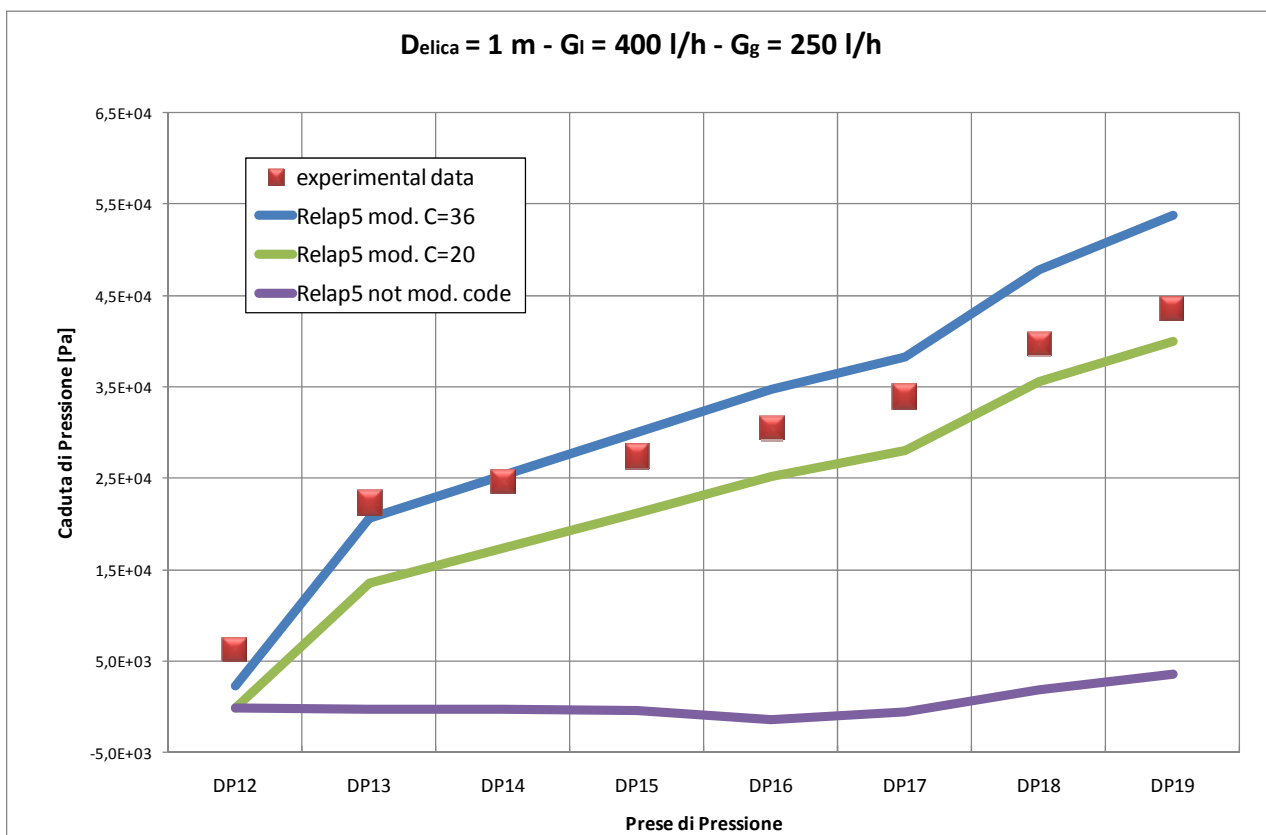
**Figura 44** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



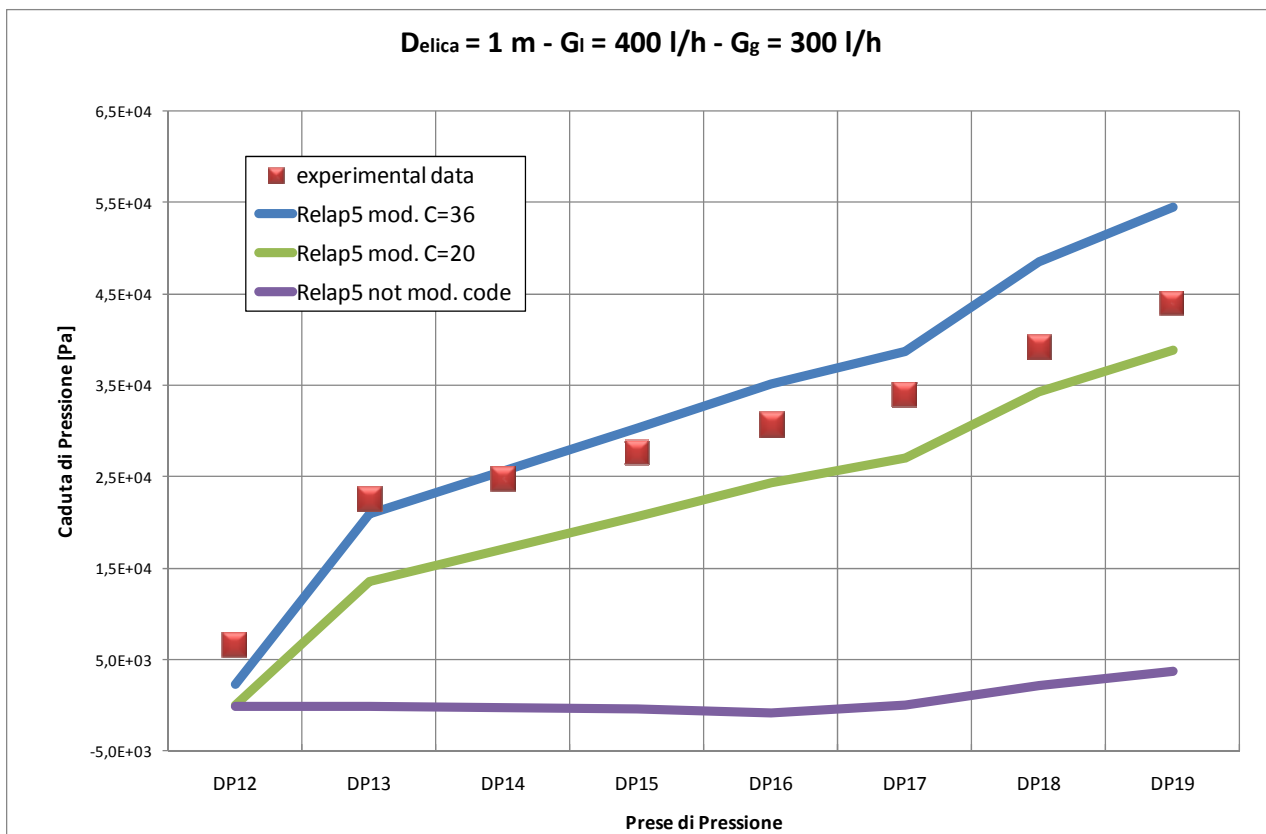
**Figura 45** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



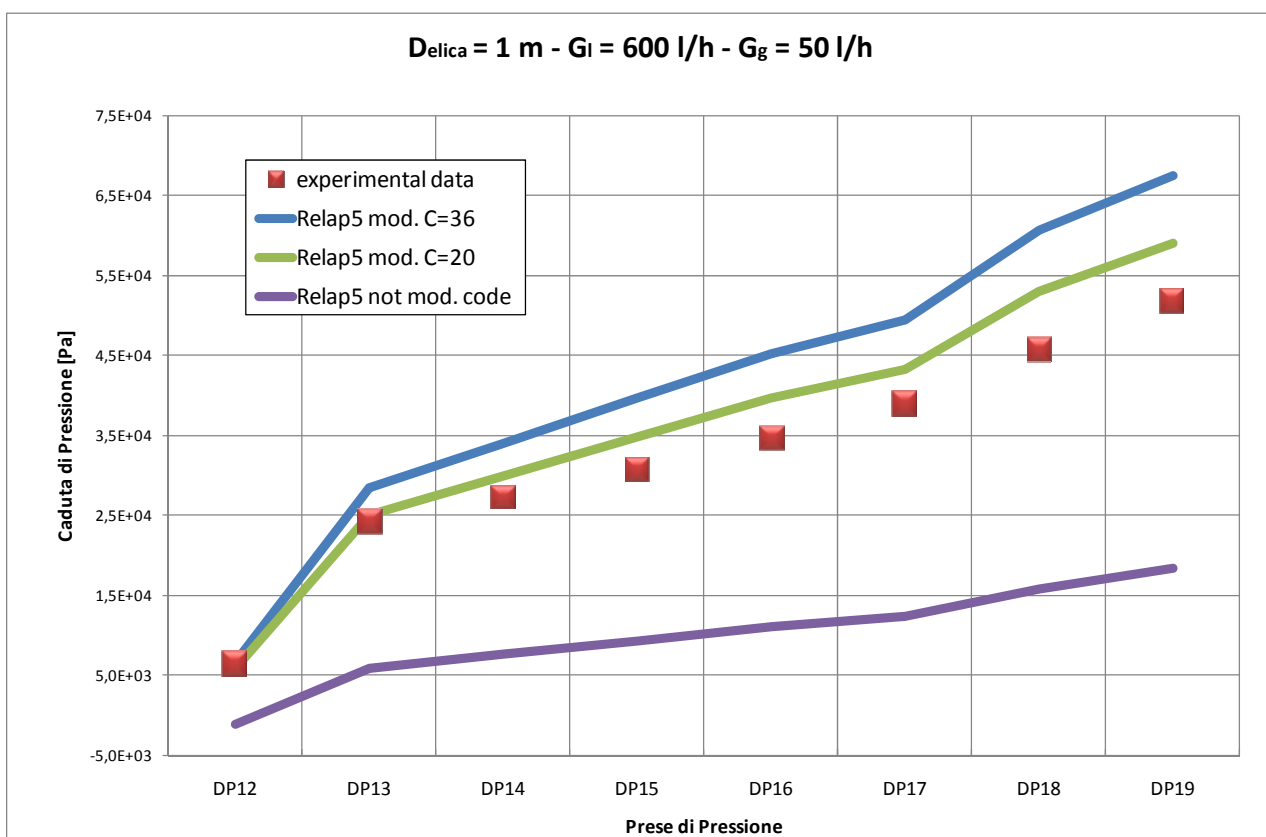
**Figura 46** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



**Figura 47** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.

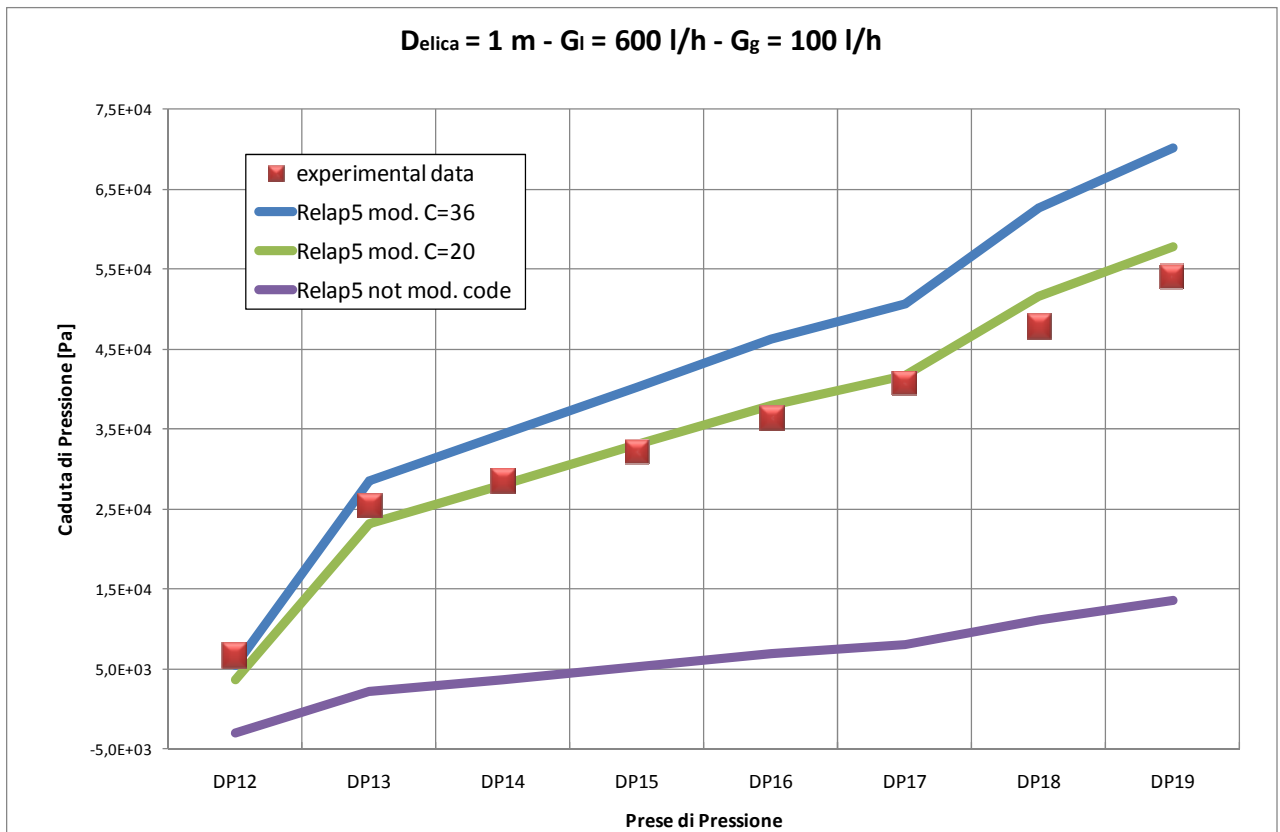


**Figura 48** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 400$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.

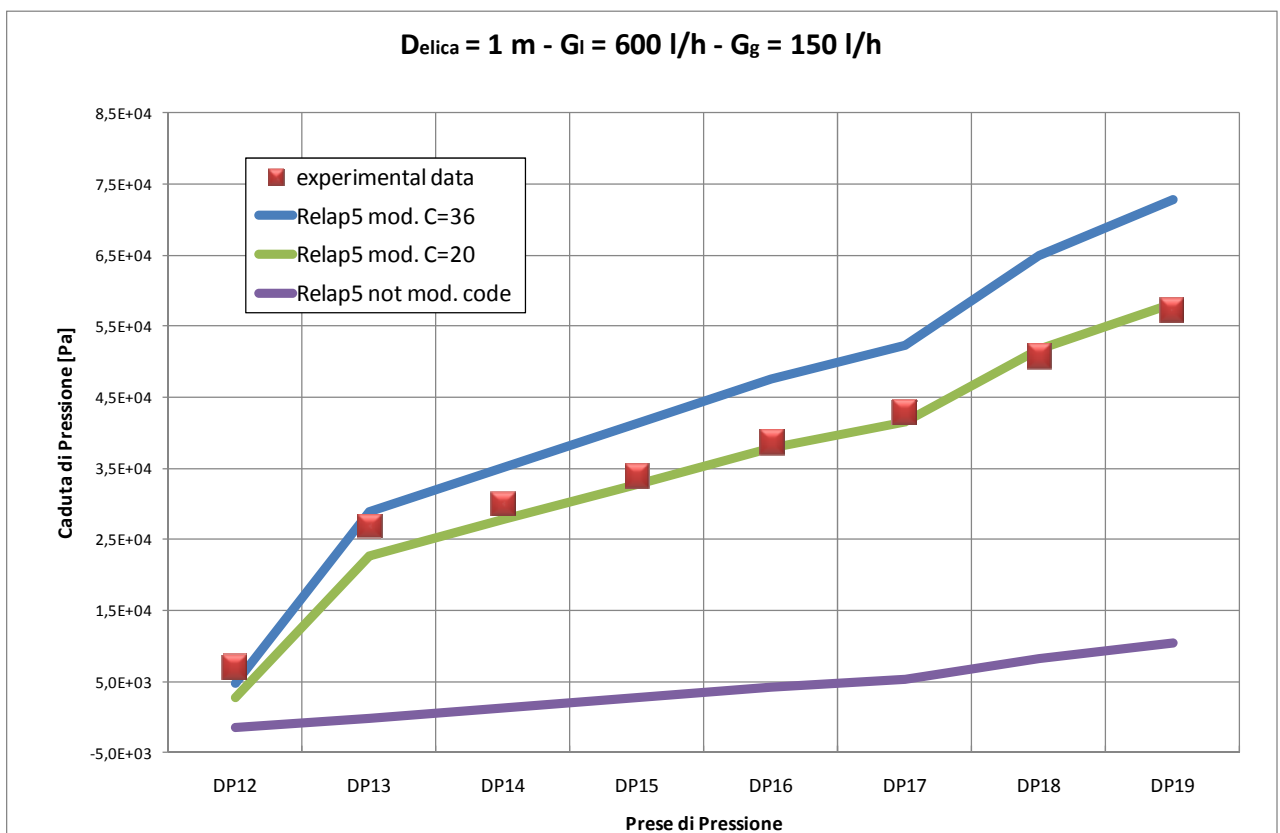


**Figura 49** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.

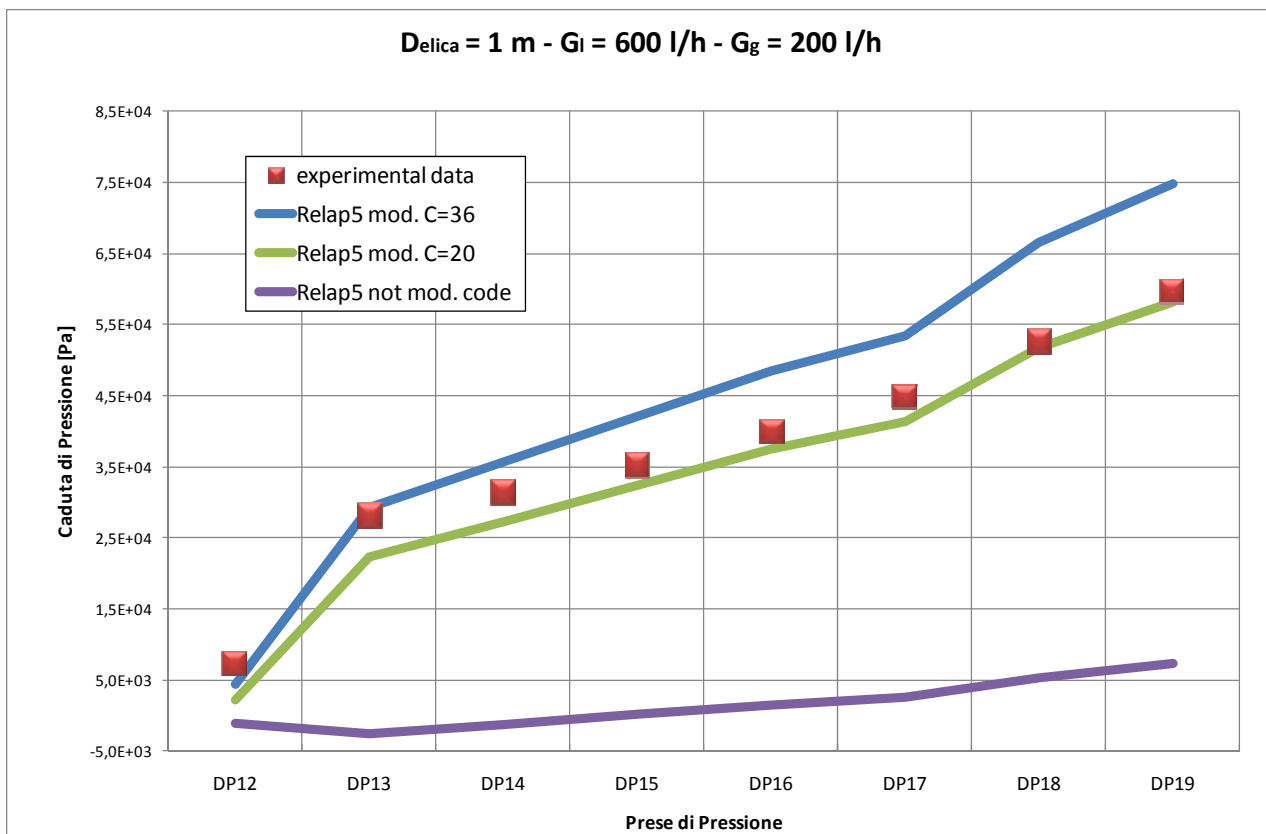




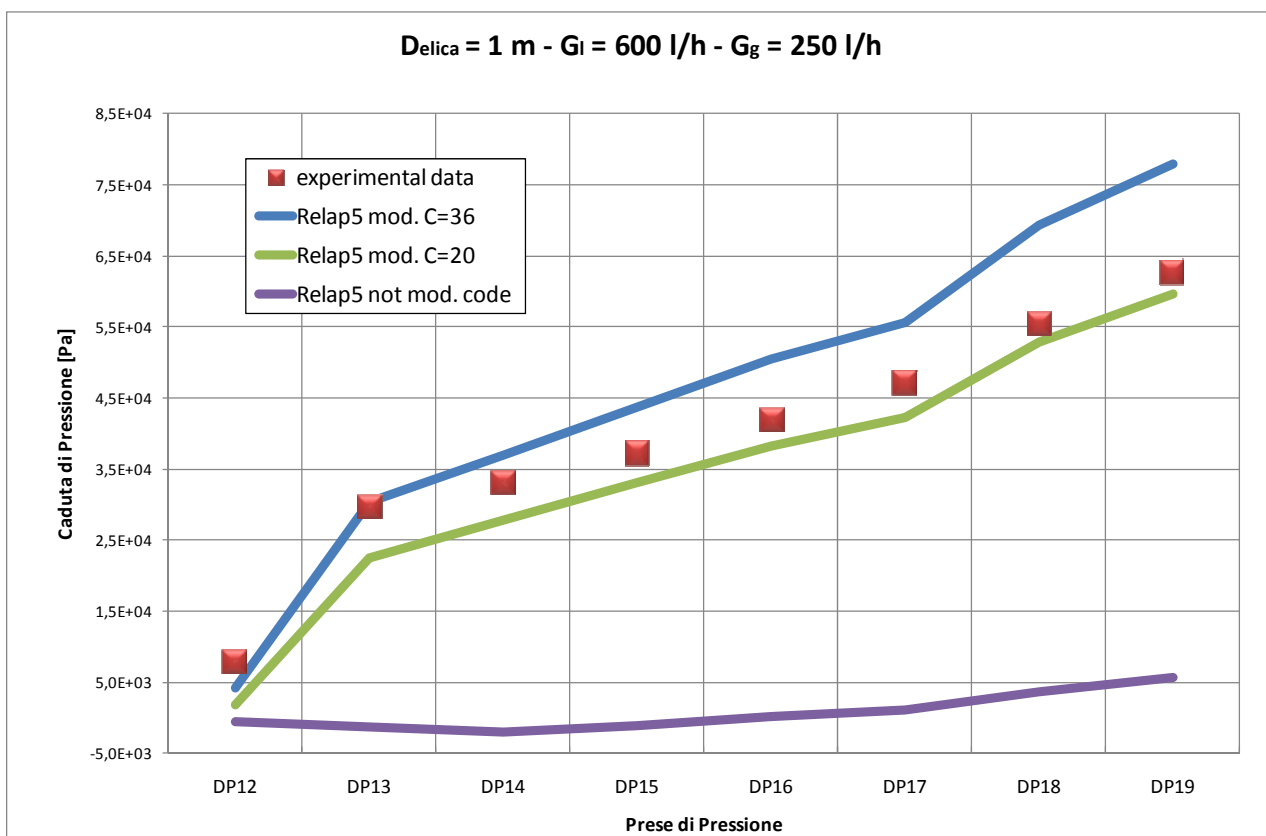
**Figura 50** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



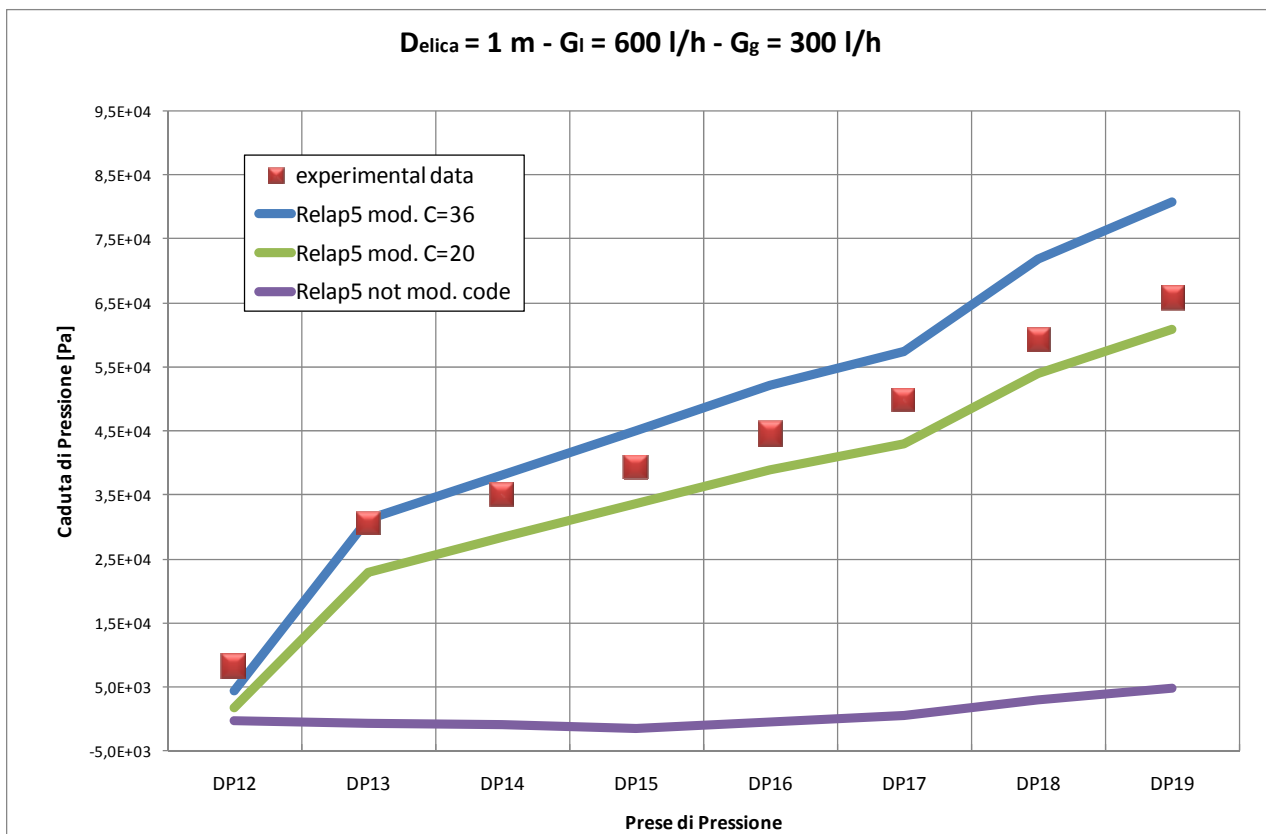
**Figura 51** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



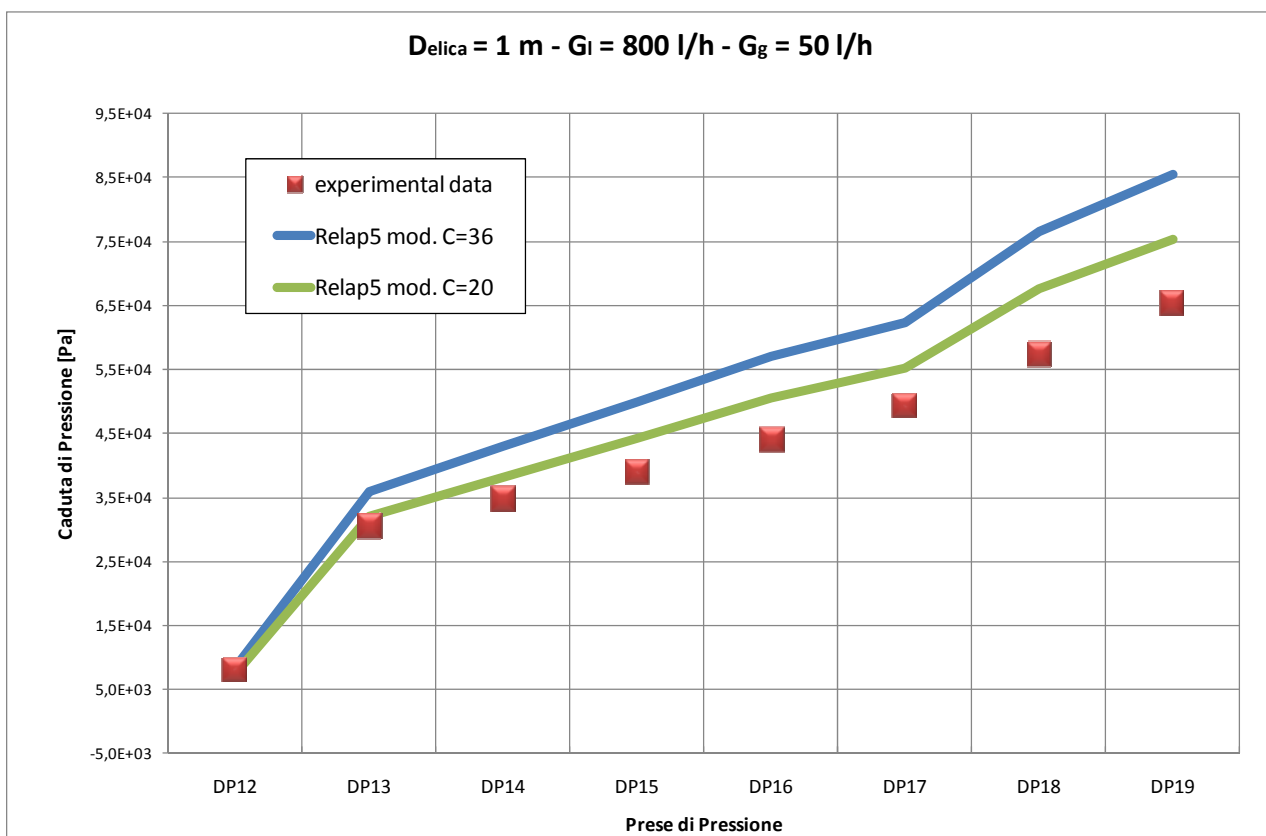
**Figura 52** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



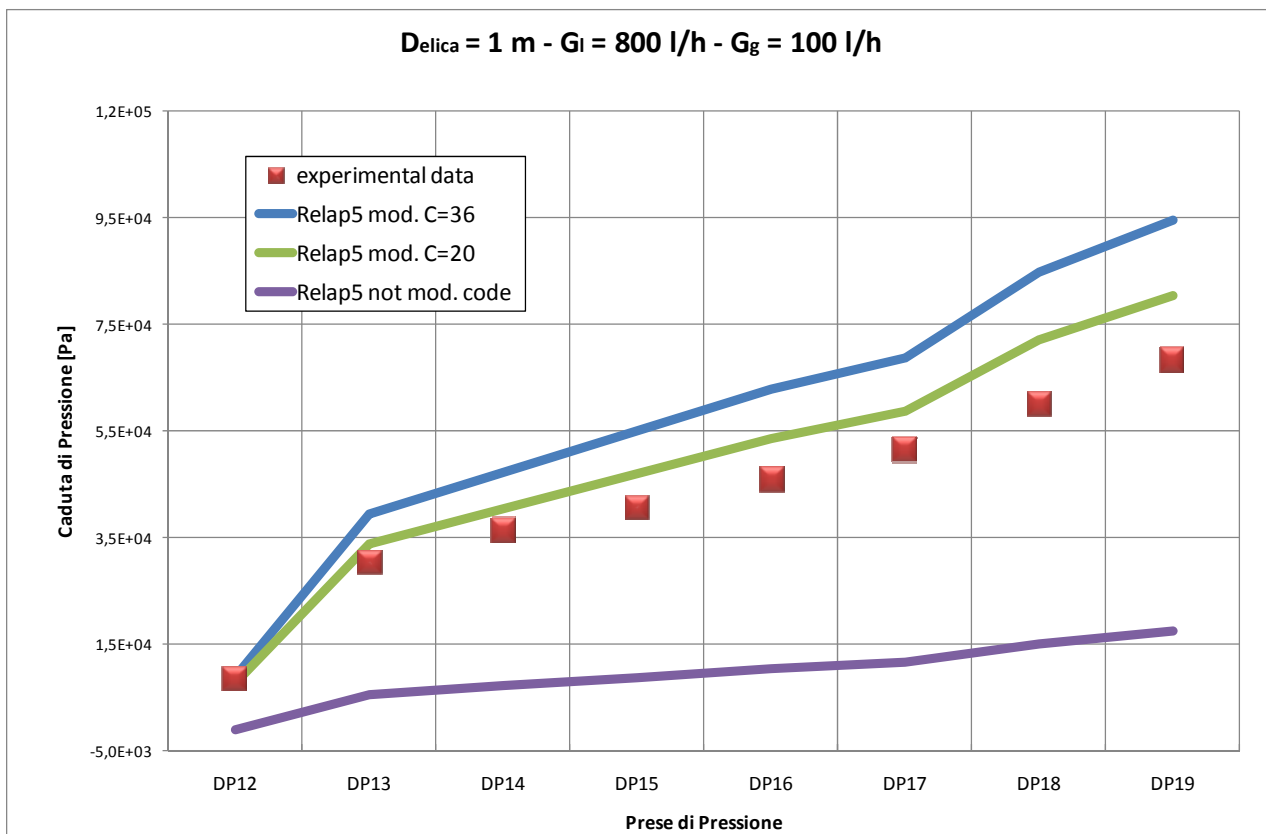
**Figura 53**- Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



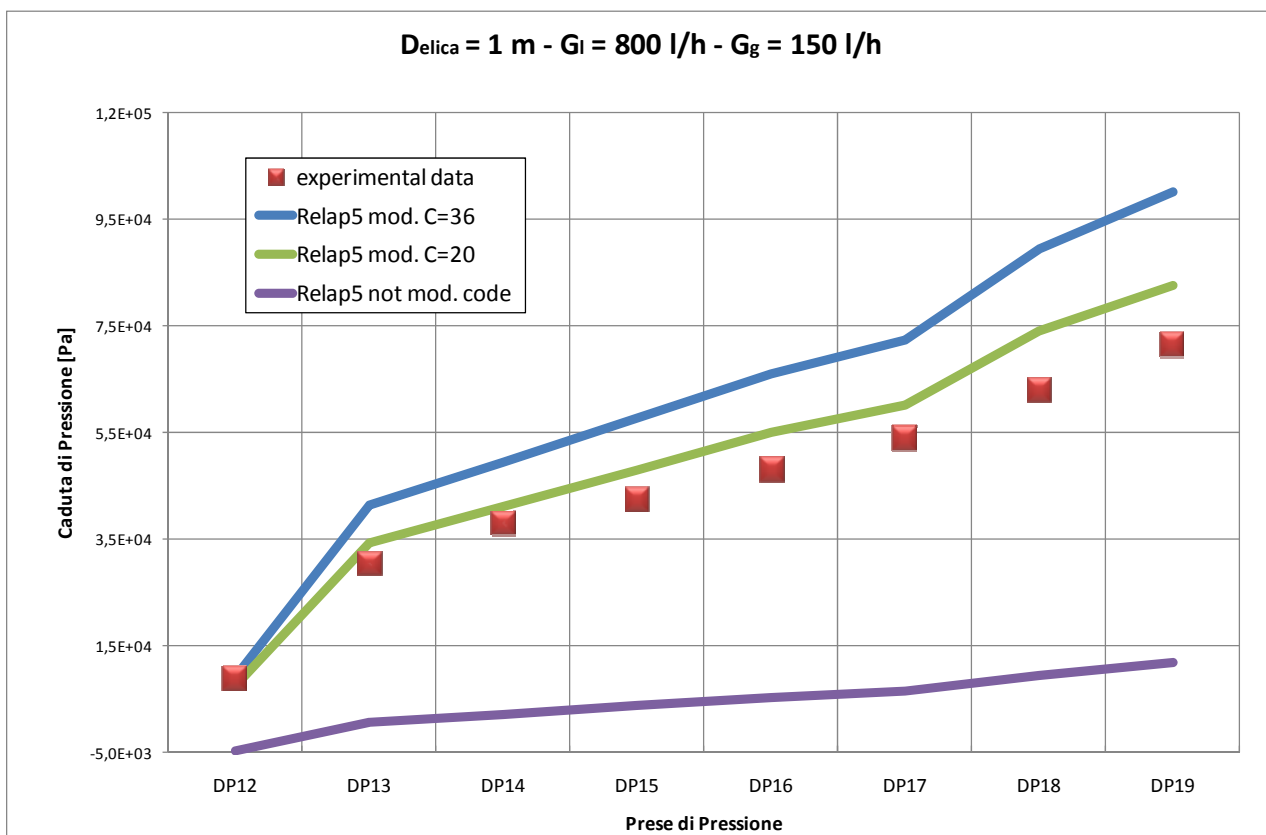
**Figura 54** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 600$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



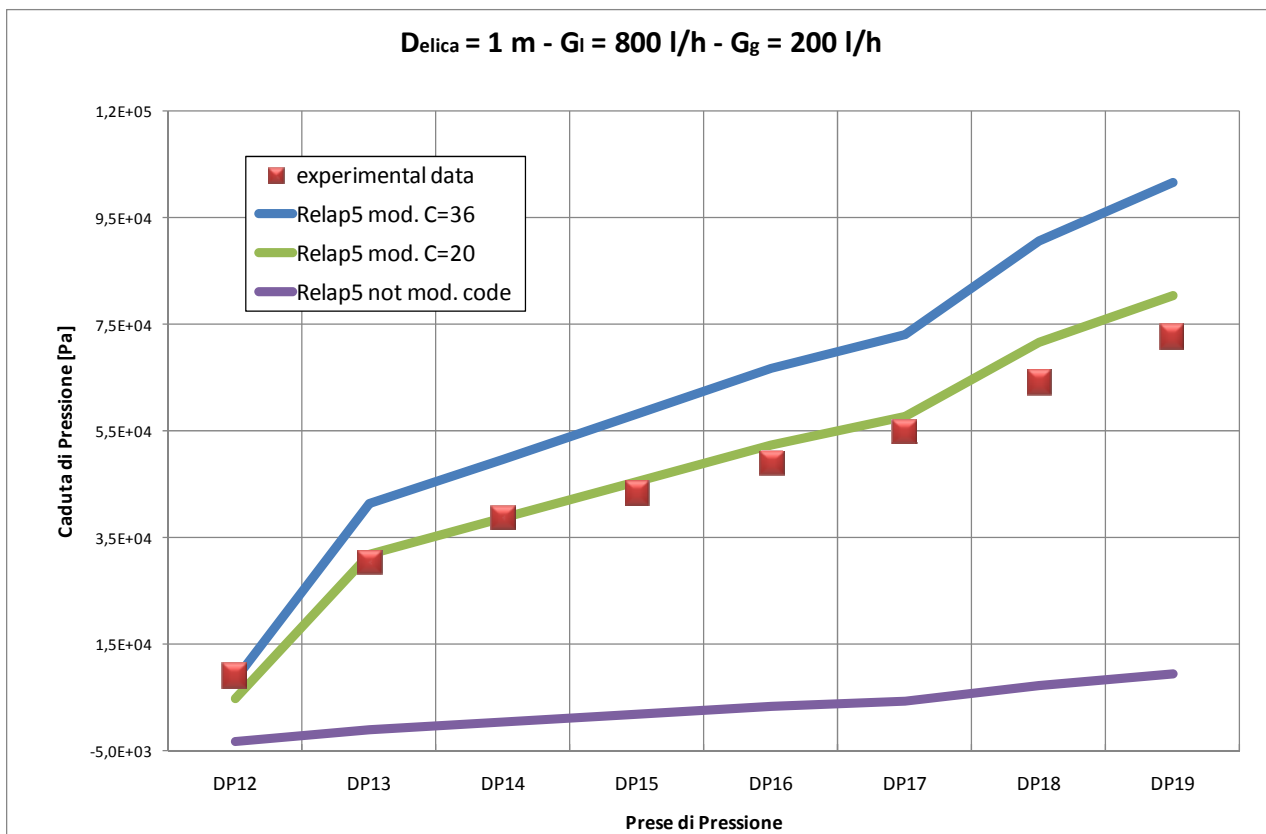
**Figura 55** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 50$  l/h.



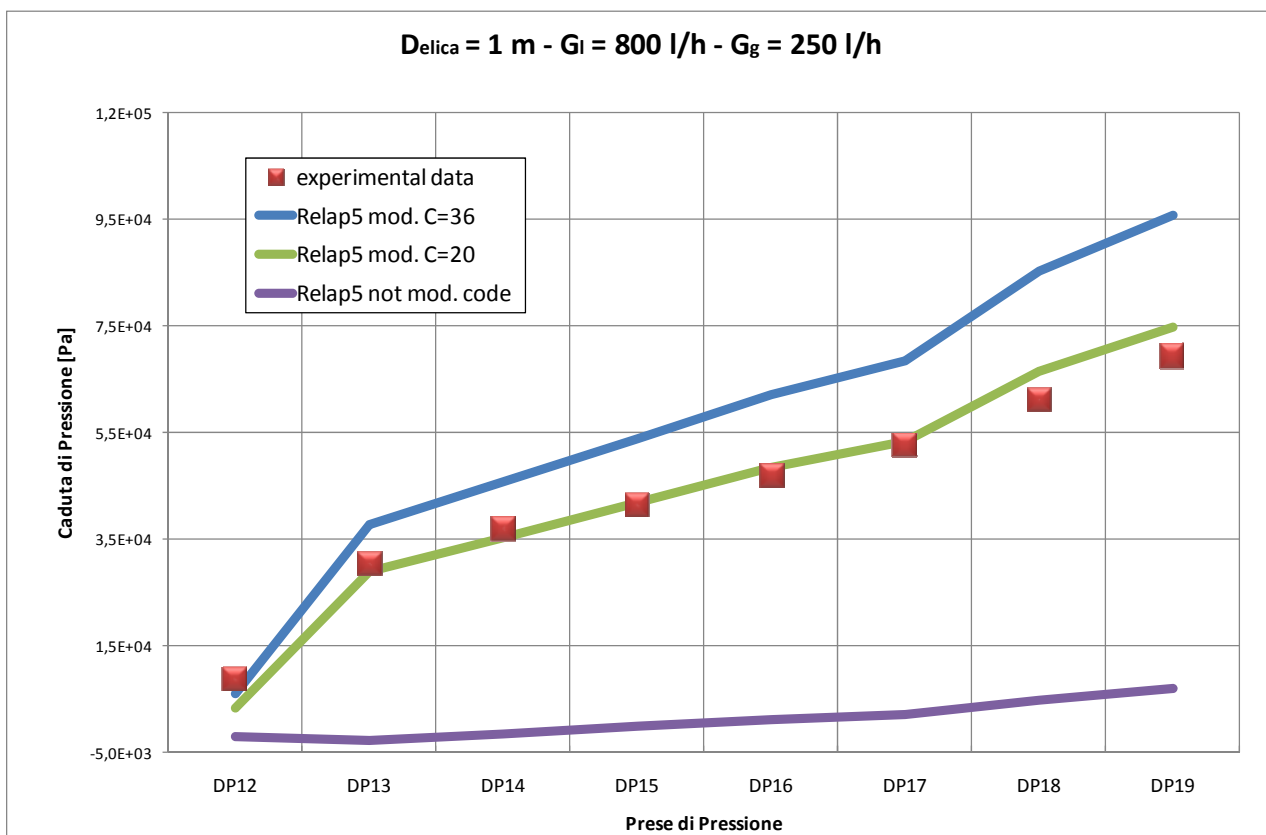
**Figura 56-** Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



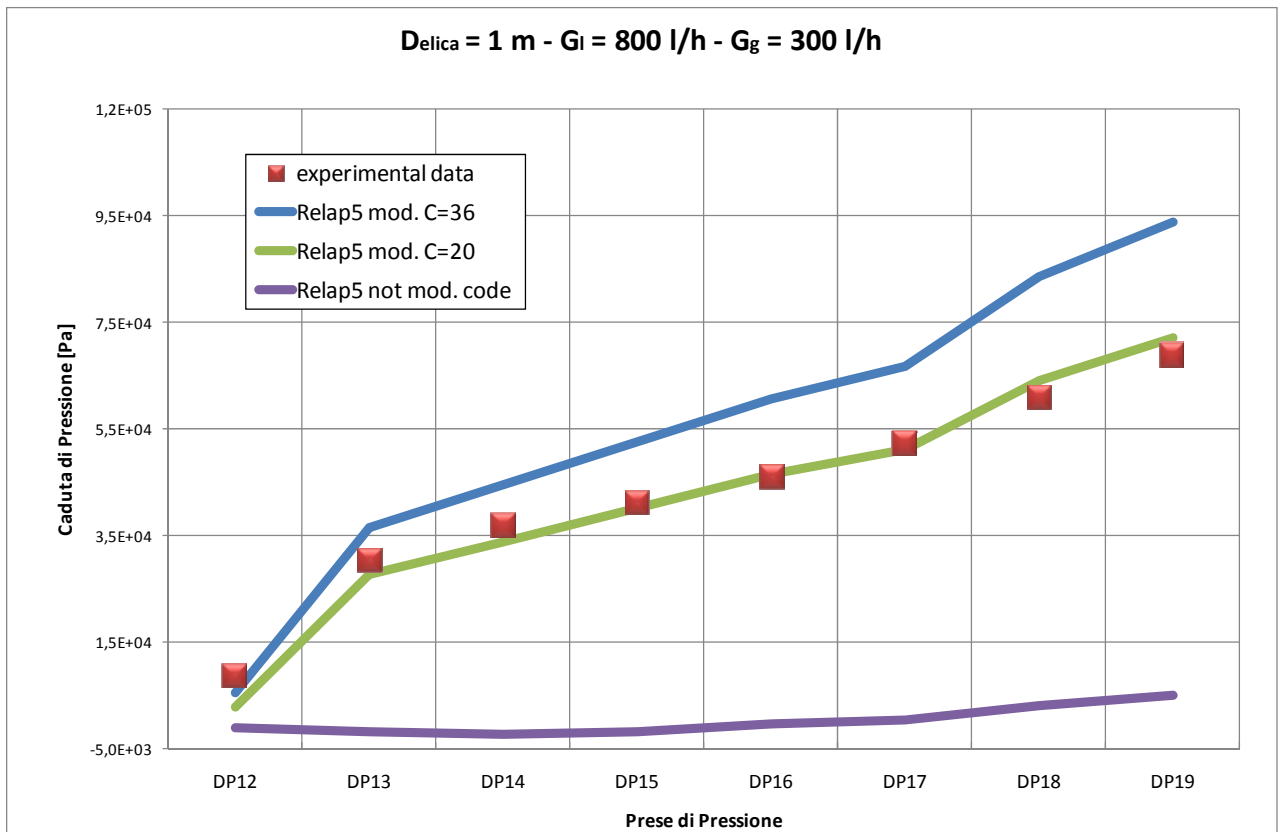
**Figura 57-** Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



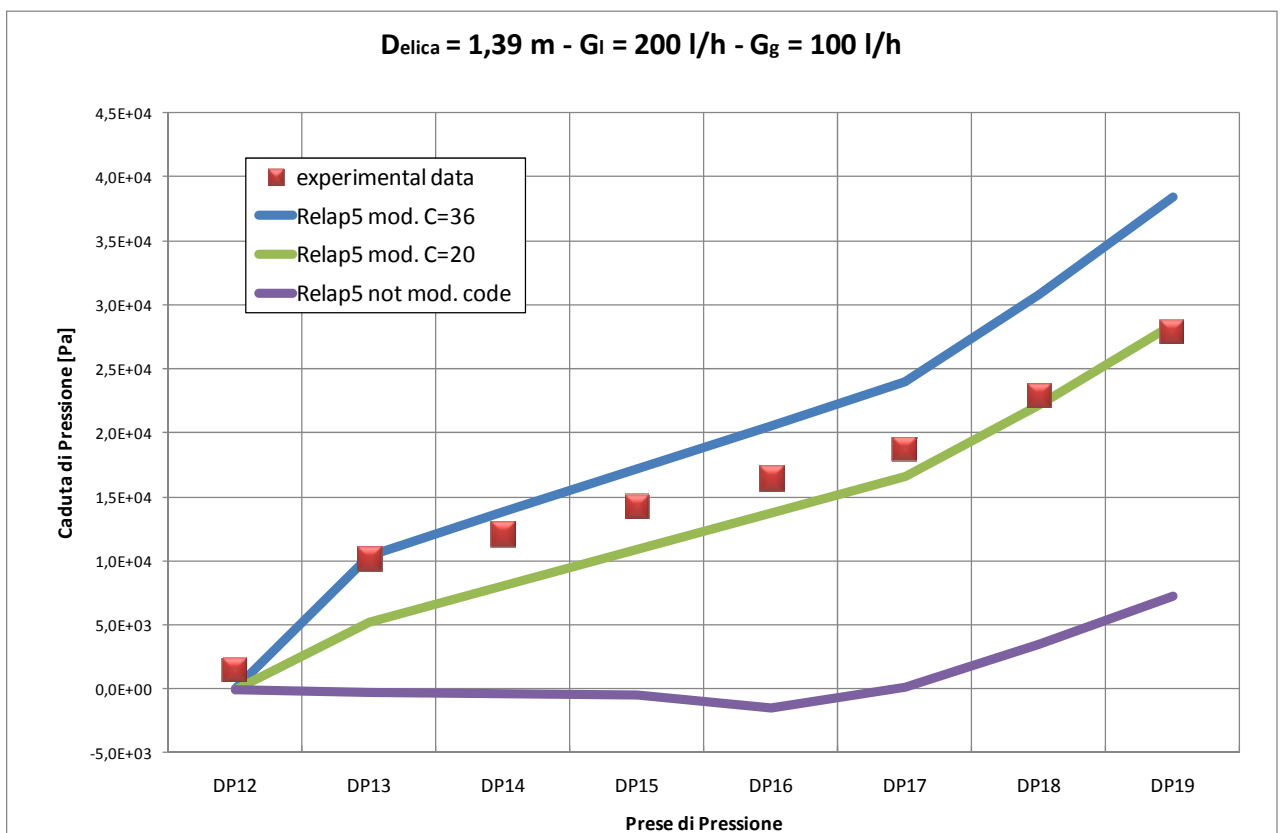
**Figura 58** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.



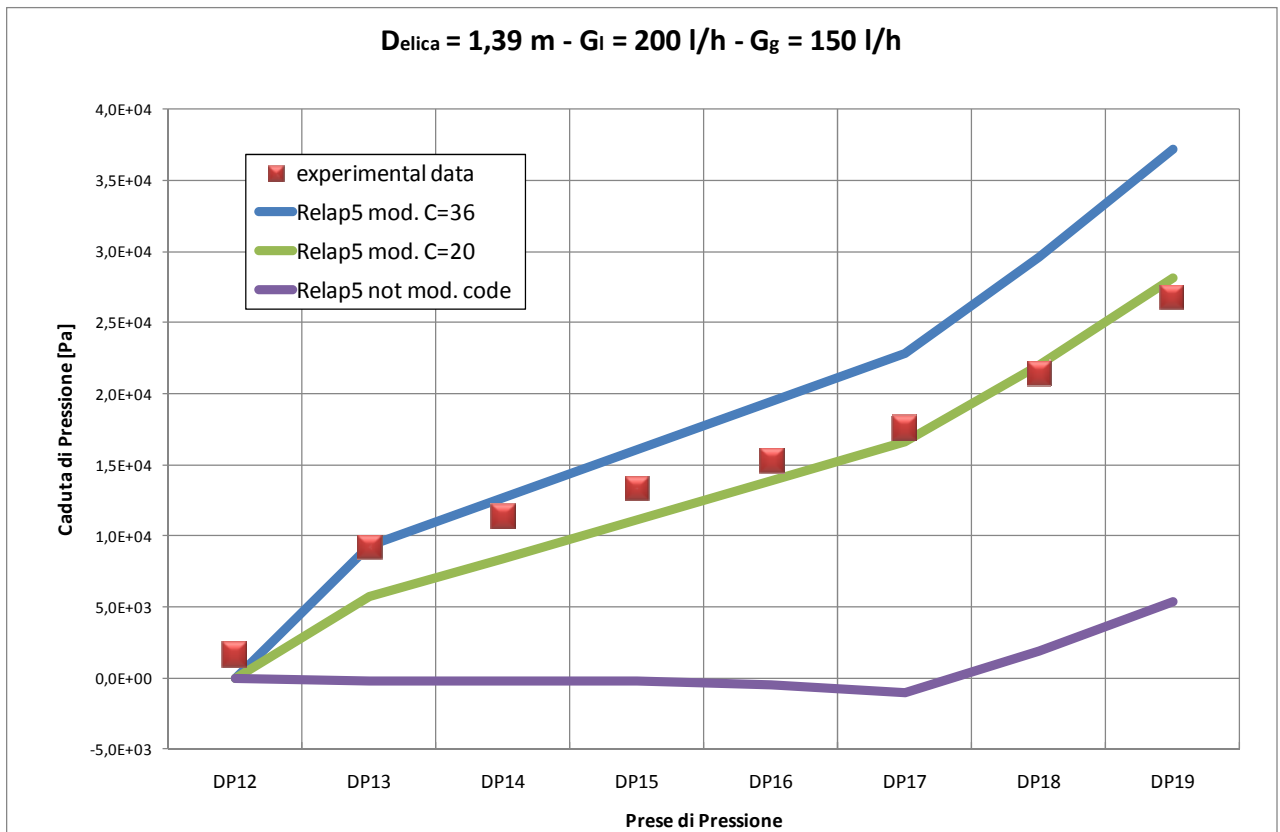
**Figura 59** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.



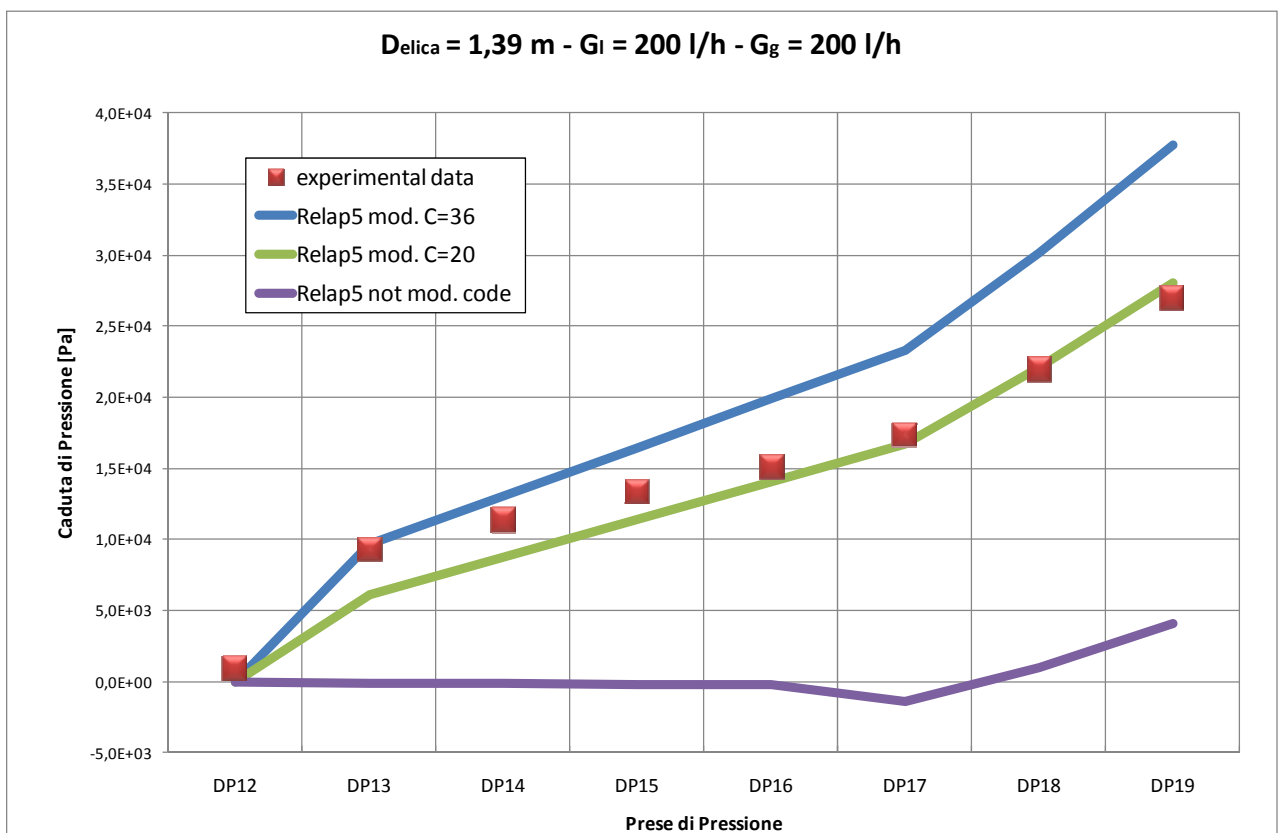
**Figura 60** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 800$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.



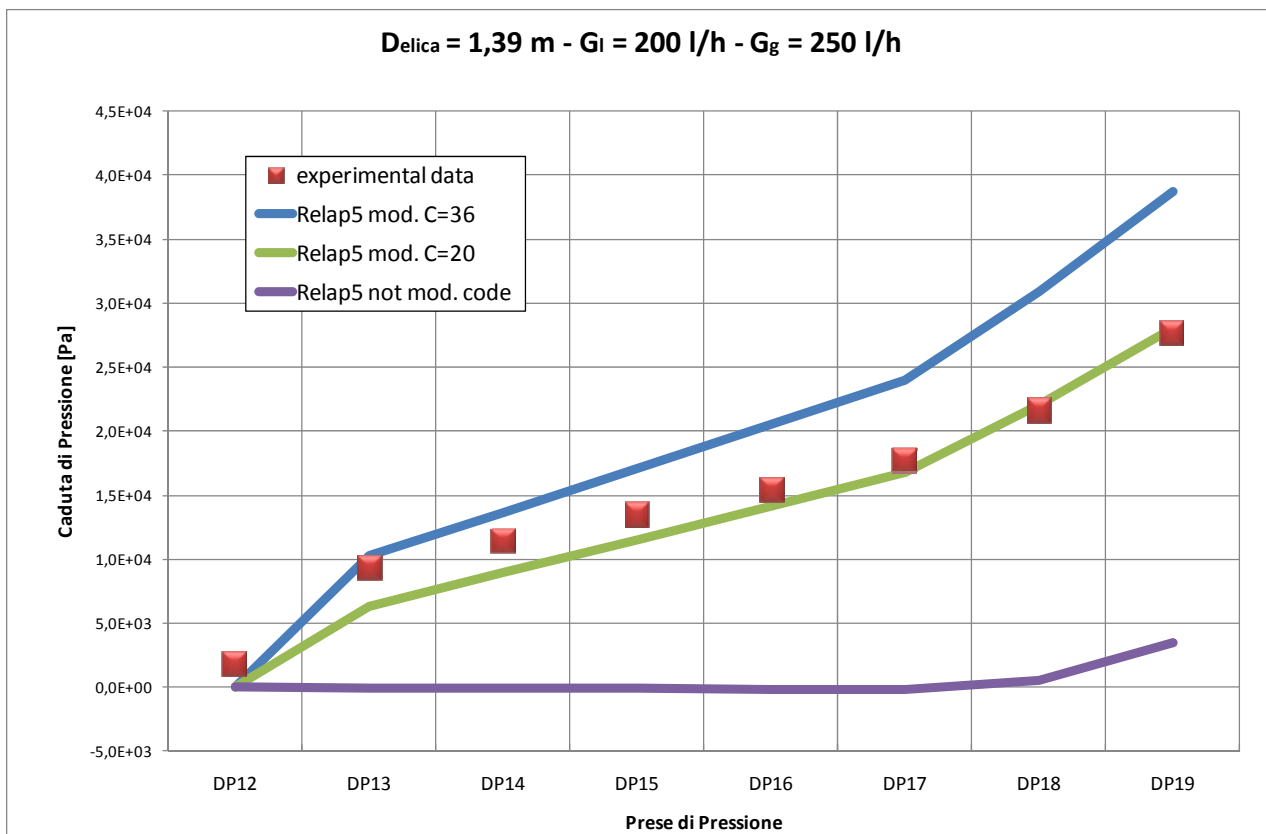
**Figura 61** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_l = 200$  l/h e  $G_g = 100$  l/h.



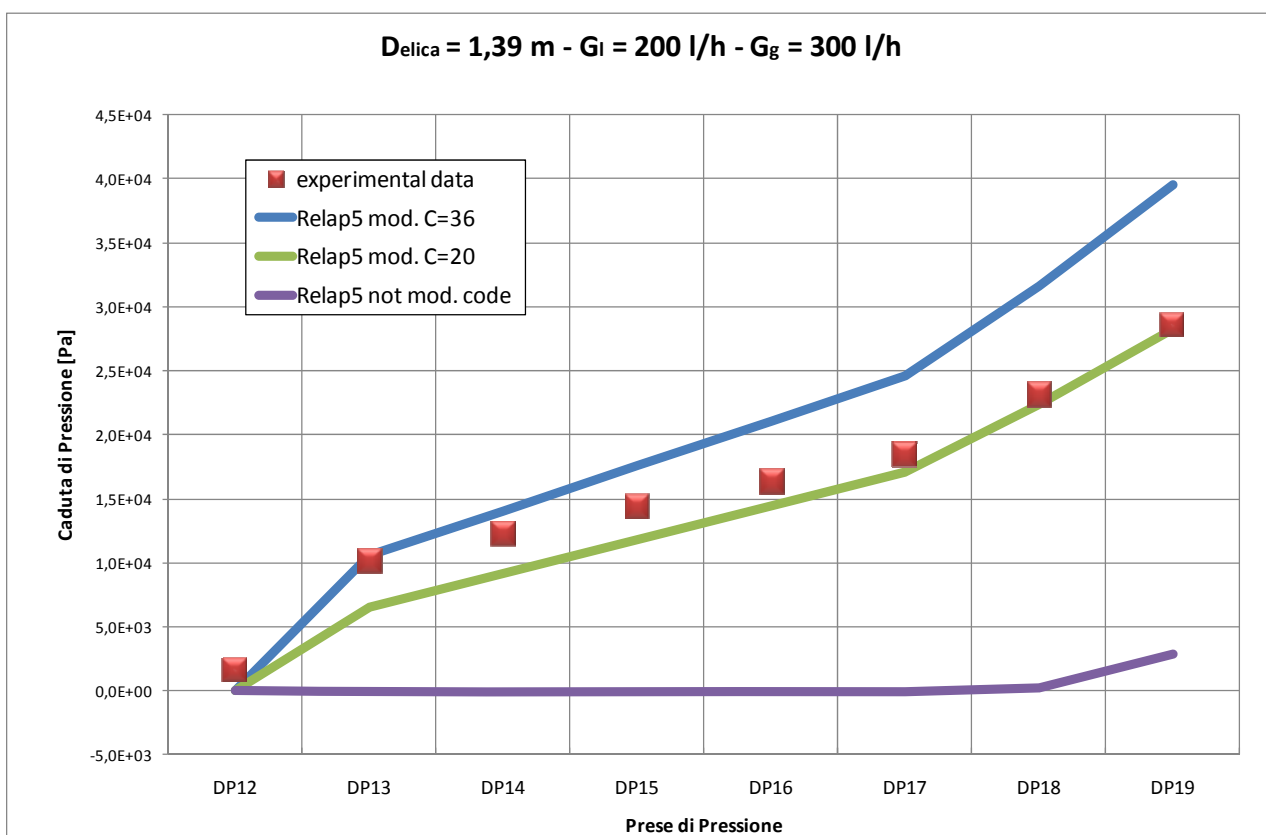
**Figura 62** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 200$  l/h e  $G_g = 150$  l/h.



**Figura 63** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 200$  l/h e  $G_g = 200$  l/h.

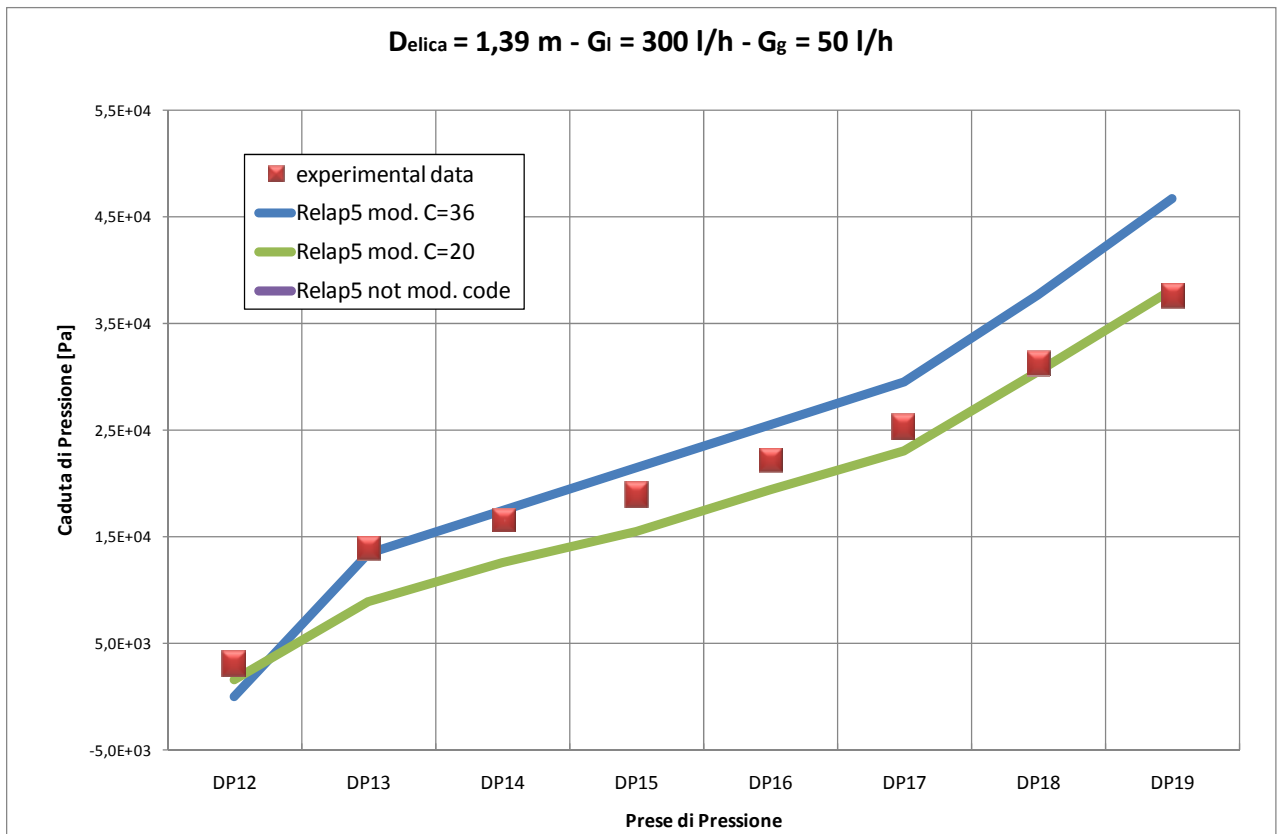


**Figura 64** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 200$  l/h e  $G_g = 250$  l/h.

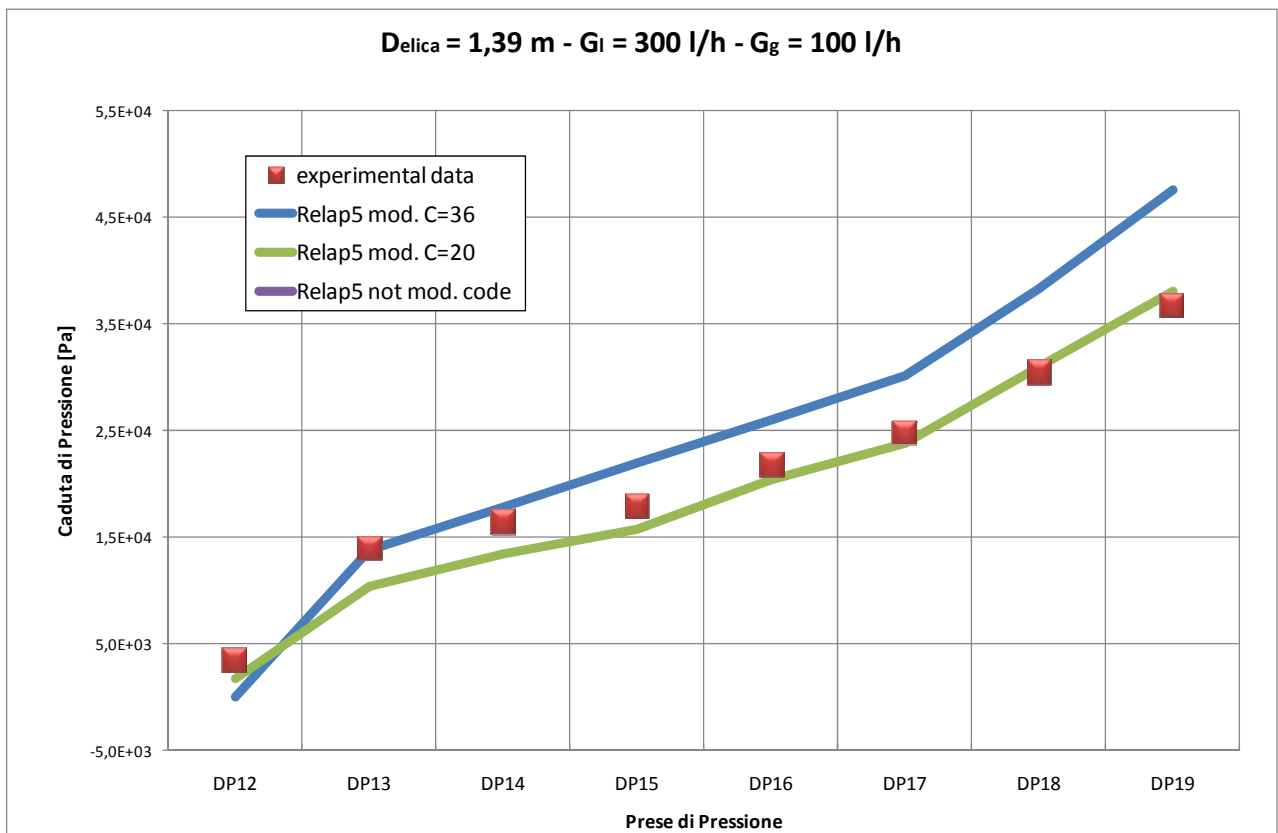


**Figura 65** - Differenza di pressione relative alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
con  $G_i = 200$  l/h e  $G_g = 300$  l/h.

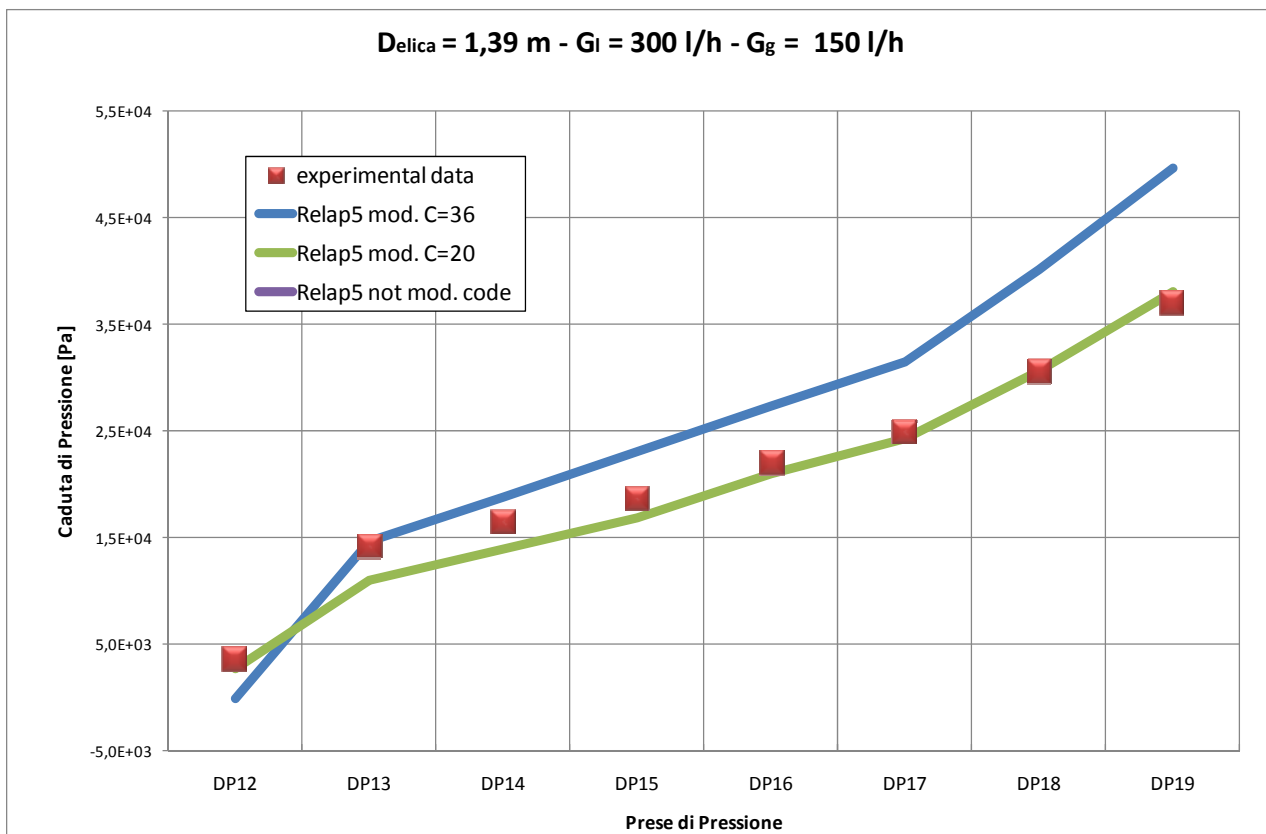




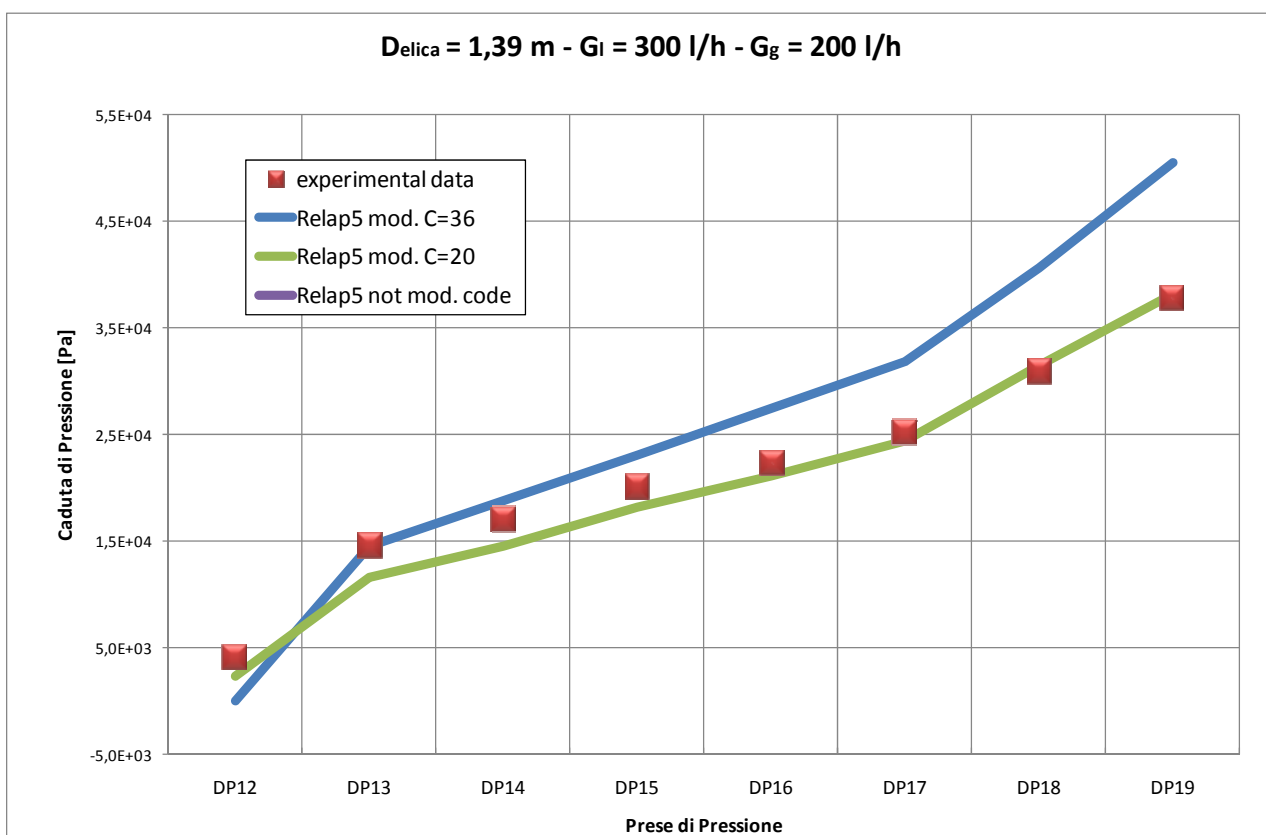
**Figura 66** - Differenza di pressione relativa alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
 $G_i$  = portata d'acqua -  $G_g$  = portata aria.



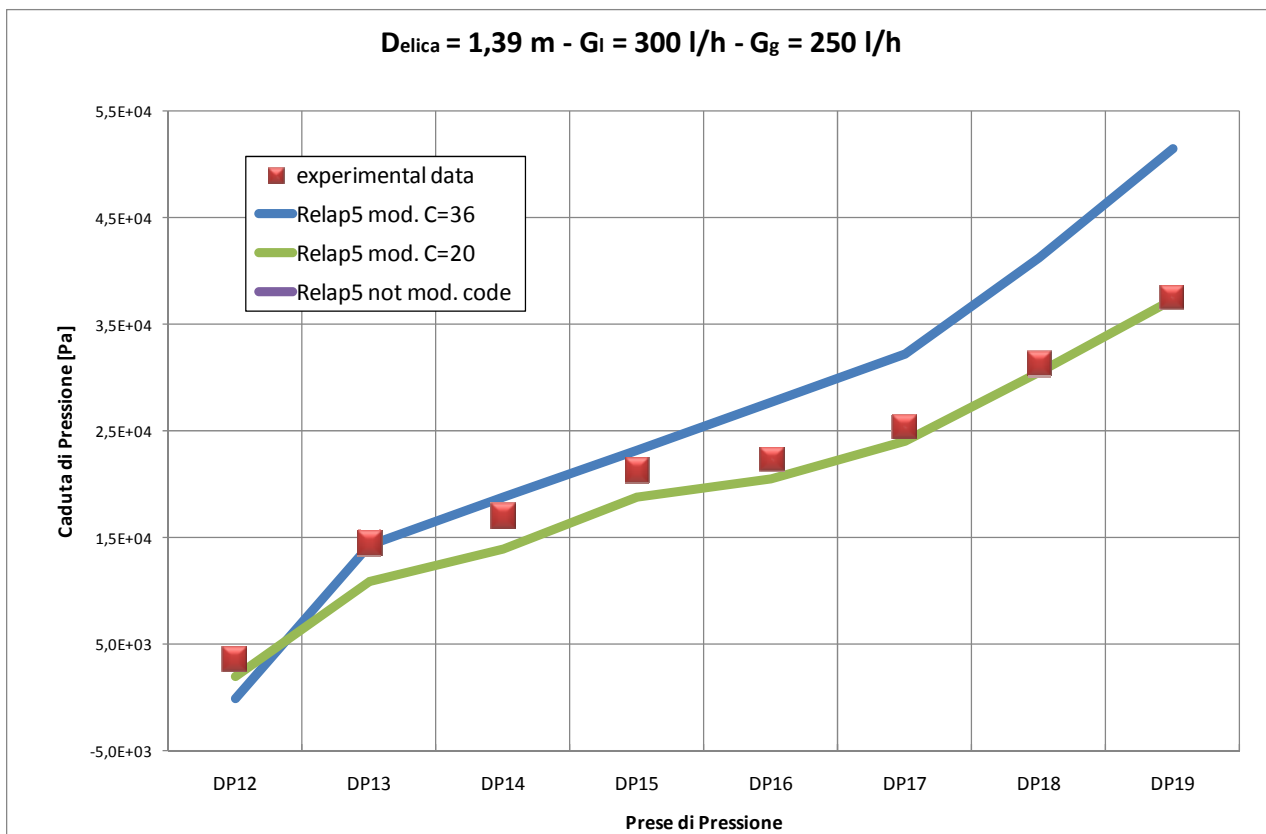
**Figura 67** - Differenza di pressione relativa alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
 $G_i$  = portata d'acqua -  $G_g$  = portata aria.



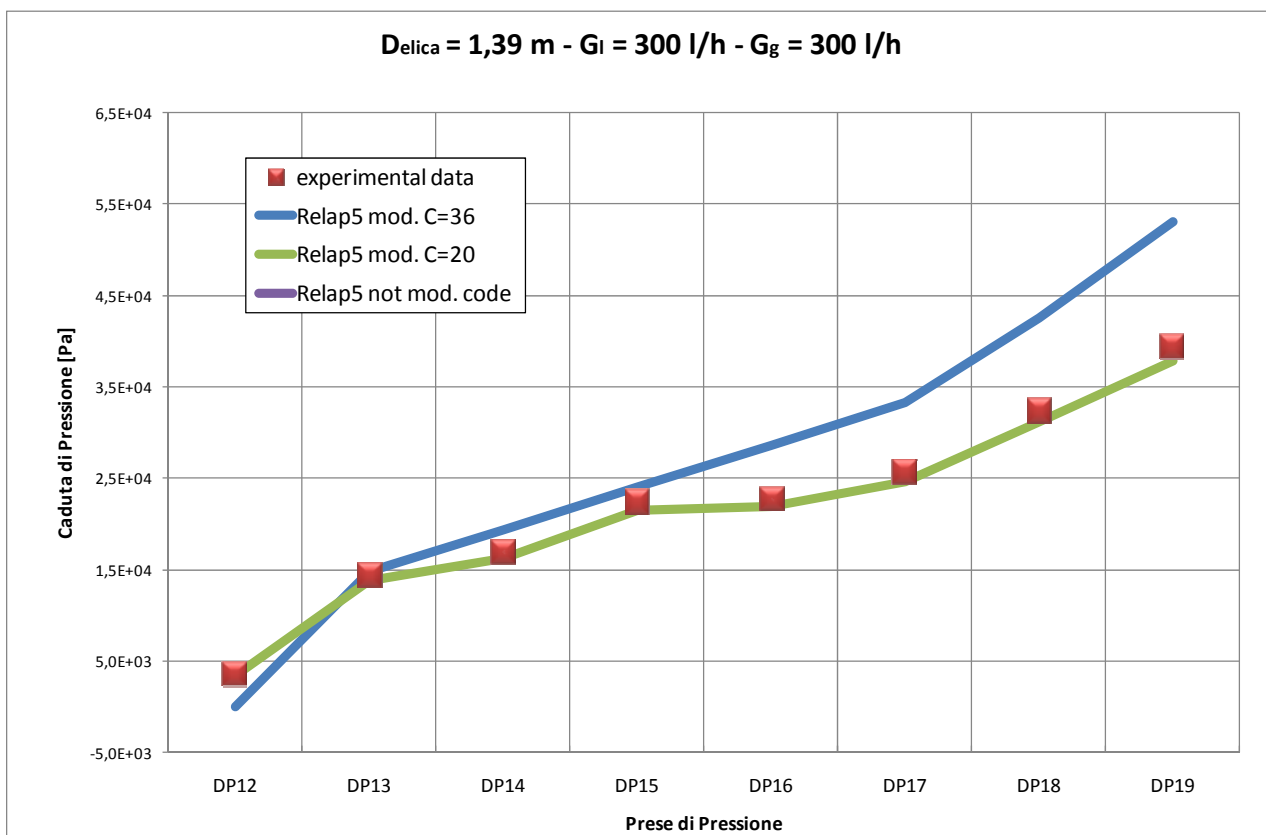
**Figura 68** - Differenza di pressione relativa alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
G<sub>l</sub> = portata d'acqua – G<sub>g</sub> = portata aria.



**Figura 69** - Differenza di pressione relativa alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
G<sub>l</sub> = portata d'acqua – G<sub>g</sub> = portata aria.



**Figura 70** - Differenza di pressione relativa alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
 $G_i$  = portata d'acqua -  $G_g$  = portata aria.



**Figura 71** - Differenza di pressione relativa alla caduta di pressione tra la prima presa (1) e le successive (2-9).  
 $G_i$  = portata d'acqua -  $G_g$  = portata aria.

### **Simbologia**

C	costante
d	diametro del tubo elicoidale
D	diametro dell'elica
$f_c$	coefficiente di attrito di Fanning
M	portata in massa
$F_r$	numero di Froude
g	accelerazione di gravità
Re	numero di Reynolds
v	velocità

### **Pedici**

TP	bifase
L	liquido
G	gas

### **Simboli greci**

$\alpha$	diffusività termica
$\beta$	angolo di inclinazione dell'elica
$\chi^2$	parametro di Martinelli
$\phi$	moltiplicatore bifase
$\rho$	densità

## BIBLIOGRAFIA

1. R.C. Xin, A. Awwad, Z. Dong, M.A. Ebadian, H.M. Soliman, An Investigation and Comparative Study of the Pressure Drop in Air-Water Two-Phase Flow in Vertical Helicoidal pipes, *Int. J. Heat and Mass Transf.*, vol. 39, pp.735-743, 1996.
2. R.C. Xin, A. Awwad, Z. Dong, M.A. Ebadian, An experimental study of single-phase and two-phase flow pressure drop in anular helicoidal pipes, *Int. J. Heat and Fluid Flow*, 18, pp.482-488, 1997.
3. C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, M. Orio, B. Panella, Studio sperimentale del deflusso bifase aria acqua in un tubo elicoidale, XXV Congresso Nazionale UIT sulla Trasmissione del Calore, Trieste, 18-20 Giugno 2007.
4. C. Bertani, M. De Salve, M. Malandrone, M. Orio, B. Panella, Cadute di pressione e grado di vuoto in condotti elicoidali: confronto tra risultati sperimentali e modelli semiempirici, XXVI Congresso Nazionale UIT sulla Trasmissione del Calore, Palermo, 23-25 Giugno 2008.
5. G. R. Rippel, C. R. Eidt, and H. B. Joran, 1966, Two-phase flow in a coiled tube. *Ind. Eng. Chem.*, 5, 32-39.
6. S. Banerjee, E. Rhodes, and D. S. Scott, 1969, Studies on concurrent gas-liquid flow in helically coiled tubes. I-Flow patterns, pressure drop, and holdup, *Can. J. Chem. Eng.*, 47, 445-453.
7. K.T. Chaxton, J.G. Collier, J.A. Ward, H.T.F.S. Correlation for Two-Phase Pressure Drop and Void Fraction in Tubes, AERE-R7162, 1972.
8. H. Ito, Friction factors for turbulent flow in curved pipes, *Journal of Basic Engineering*, *Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs.*, Vol. D81, 1959, pp 123-134.
9. Andrea Cioncolini, Lorenzo Santini, An experimental investigation regarding the laminar to turbulent flow transition in helically coiled pipes, *Experimental Thermal and Fluid Science*, (2005).
10. A. Caronia, M. Casamirra, F. Castiglia, P. Chiovaro, M. Ciofalo, P.A. Di Maio, I. Di Piazza, M. Giardina, C. Lombardo, E. Oliveri, S. Puleo, G. Vella, Studio con il codice RELAP5 dello scambio termico e delle perdite di carico in generatori di vapore a tubi elicoidali, Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP2.P- punto LP3.G dell'AdP ENEA MSE del 21/06/07, Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fusione”, CIRTEN-UNIPA RL-1201/2008, 2008.

