

#### 4. Calcolo di verifica della circolazione naturale negli schermi di una camera di combustione

Si vuole eseguire il calcolo di verifica della circolazione naturale negli schermi della camera di combustione rappresentati in *Fig.1*; questo esercizio coinvolgerà il calcolo della potenza termica che viene trasmessa alla camera di combustione e il calcolo delle perdite di carico in ciascun ramo dei vari tubi dell'evaporatore.

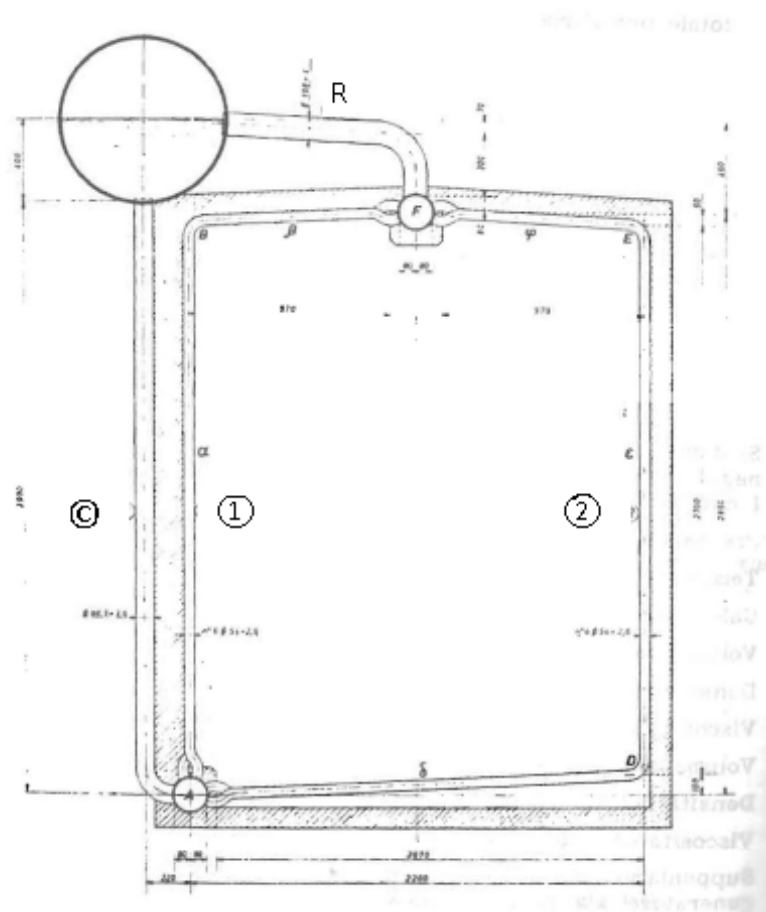


Fig.1

Si inizi a calcolare la potenza termica trasmessa in camera di combustione; in *Tab.1* sono riportati i dati di funzionamento:

Pressione assoluta di esercizio	$p$	21	$bar$
Temperatura dell'acqua e del vapore	$T$	215	$^{\circ}C$
Calore di vaporizzazione	$r$	1878.2	$\frac{kJ}{kg}$
Volume specifico dell'acqua	$v_a$	0.001181	$\frac{m^3}{kg}$
Densità dell'acqua	$\rho_a$	846.74	$\frac{kg}{m^3}$
Viscosità dinamica dell'acqua	$\mu_a$	$125 \times 10^{-6}$	$\frac{kg}{ms}$
Volume specifico del vapore	$v_v$	0.09489	$\frac{m^3}{kg}$
Densità del vapore	$\rho_v$	10.539	$\frac{kg}{m^3}$
Viscosità dinamica del vapore	$\mu_v$	$16.1 \times 10^{-6}$	$\frac{kg}{ms}$

Tab.1

Si supponga che la portata massica di olio combustibile  $\dot{m}_c$  per tale generatore sia pari a  $0.45 \text{ kg/s}$ , con un potere calorifico  $H_i$  dello stesso pari a  $40600 \text{ kJ/kg}$ ; per effetto del preriscaldamento del combustibile e dell'aria, si supponga che il calore introdotto in camera di combustione  $Q_{IN}$  sia pari a  $42300 \text{ kJ/kg}_{FUEL}$ . Inoltre, per il combustibile in gioco è noto il valore del rapporto reale aria-combustibile  $\alpha_R = 16.4$ .

Noto  $\alpha_R$  è possibile calcolare la quantità (in massa) di fumi prodotta per  $kg$  di combustibile bruciato:

$$\frac{kg_{FUMI}}{kg_{FUEL}} = \frac{kg_{ARIA} + kg_{FUEL}}{kg_{FUEL}} = \frac{kg_{ARIA}}{kg_{FUEL}} + 1 = \alpha_R + 1 = 16.4 + 1 = 17.4 \quad (4.1)$$

Pertanto, è possibile ottenere l'entalpia dei gas combusti  $h_g$  dividendo  $Q_{IN}$  per la (4.1):

$$h_g = \frac{\frac{kJ}{kg_{FUEL}}}{\frac{kg_{FUMI}}{kg_{FUEL}}} = \frac{42300}{17.4} = 2431 \frac{kJ}{kg_{FUMI}} \quad (4.2)$$

dato che il calore introdotto è pari a  $42300 \frac{kJ}{kg}$ , per passare alla potenza termica ( $\dot{Q}_{IN}$ ) basterà moltiplicare per la portata massica di combustibile;

$$\dot{Q}_{IN} = Q_{IN} \times \dot{m}_C = 42300 \frac{kJ}{kg_{FUEL}} \times 0.45 \frac{kg_{FUEL}}{s} = 19035 kW \quad (4.3)$$

Si supponga che la superficie irraggiata  $S$  sia pari a  $50 m^2$ ; è possibile calcolare la potenza termica introdotta per unità di area  $q_i$ :

$$q_i = \frac{\dot{Q}_{IN}}{S} = \frac{19035}{50} = 380.7 \frac{kW}{m^2} \quad (4.4)$$

Esiste una formula empirica che consente di calcolare la temperatura di uscita dei gas combusti sulla base della potenza termica per unità di area in ingresso ( $q_i$ ) e del calore per  $kg_{FUMI}$ :

$$t_{OUT} = 20 + \frac{1000}{\frac{2.52 \times h_g^{0.15}}{\sqrt{q_i}} + \frac{1164}{h_g}} \quad (4.5)$$

Applicando la (4.5) con i valori calcolati di  $h_g$  e  $q_i$  si ottiene che  $t_{OUT} = 1138^\circ C$ .

Si assuma ora che l'umidità massica dei gas combusti (tenendo conto anche dell'umidità media dell'aria) sia  $u = 6.5\%$  questo valore ci serve per calcolare l'entalpia dei gas combusti alla temperatura  $t_{OUT}$  utilizzando la seguente formula:

$$h_g = (972.7 + 10.76 \times u) \times \frac{t_{OUT}}{1000} + (166.31 - 3.25 \times u) \times \left(\frac{t_{OUT}}{1000}\right)^2 - (27.98 - 2.443 \times u) \times \left(\frac{t_{OUT}}{1000}\right)^3 \quad (4.6)$$

Applicando la (4.6) con il valore di  $u$  supposto, si ottiene che

$$h_g(t = 1138^\circ C) = 1357 \frac{kJ}{kg}$$

Dato che a temperatura ambiente ( $t_{AMB}$ ), l'entalpia dei gas è

$$h_g(t_{AMB} = 20^\circ\text{C}) = 21 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

e che la portata massica di gas  $\dot{m}_g$  è esprimibile come

$$\dot{m}_g = \dot{m}_{FUEL} \times \alpha_R = 0.45 \times 17.4 = 7.83 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

il calore utile uscente dalla camera di combustione è:

$$\dot{Q}_{OUT} = \dot{m}_g \times \Delta h_g = 7.83 \times (1357 - 21) = 10461 \text{ kW} \quad (4.7)$$

Il calore effettivamente trasmesso in camera di combustione può essere dunque calcolato come differenza tra quello in ingresso e quello in uscita dalla camera di combustione stessa:

$$\dot{Q}_{Trasm} = \Delta \dot{Q} = \dot{Q}_{IN} - \dot{Q}_{OUT} = 19035 - 10461 = 8754 \text{ kW} \quad (4.8)$$

La (4.8) può essere semplicemente espressa come potenza termica per unità di superficie dividendola per  $S$ :

$$q_{i,Trasm} = \frac{\dot{Q}_{Trasm}}{S} = \frac{8754}{50} = 171.48 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \quad (4.9)$$

Fatto ciò, il calcolo della circolazione naturale viene effettuato adottando un valore di picco  $q$  pari a 1.5 volte quello medio, ovvero  $q = 1.5 \times q_{i,trasm} = 1.5 \times 171.48 = 257.22 \text{ kW}/\text{m}^2$ .

Come mostrato in *Fig.1*, è previsto un tubo di caduta  $\varnothing 88.9 \times 3.6$  ed uno di ritorno  $\varnothing 108 \times 4$  ogni 6 anelli, i quali a loro volta sono costituiti da tubi  $\varnothing 54 \times 2.6$ ; essi sono disposti lungo le pareti, la suola ed il cielo della camera. Tali tubi sono praticamente accostati, con passo pari a 56 mm, per nel calcolo della potenza termica dispersa per convezione si deve tener conto anche di una superficie aventi larghezza pari a  $6 \times 0.056 = 0.336 \text{ m}$ .

Ramo	Tubi $\varnothing \times s$	$d_i$ [mm]	$\varepsilon$	Numero di tubi	Area della sezione di passaggio [ $m^2$ ]
1	54 × 2.6	48.8	$9 \times 10^{-4}$	6	0.01122
2	54 × 2.6	48.8	$9 \times 10^{-4}$	6	0.01122
c	88.9 × 3.6	81.7	$5.4 \times 10^{-4}$	1	0.00524
r	108 × 4	100	$4.4 \times 10^{-4}$	1	0.00785

Tab.2

In *Tab.2* sono riportati i diametri interni dei tubi, le rugosità relative<sup>1</sup> e l'area di passaggio della corrente d'acqua (ramo c) o della miscela acqua-vapore. Circa le superfici irraggiate e i rami per il calcolo delle perdite di carico distribuite, gli schermi vaporizzatore in parallelo (rami 1 e 2) sono stati schematizzati con le spezzate che, seguendo l'asse dei tratti rettilinei, vanno dal collettore d'ingresso a quello di uscita.

Sempre in riferimento a *Fig.1*, si nota la presenza delle curve nelle posizioni B, D ed E, mentre le divaricazioni in presenza dei collettori non vengono tenute in conto nel calcolo delle perdite di carico<sup>2</sup>. Per quanto riguarda la superficie degli schermi, si è tenuto conto della presenza di gettate protettive in corrispondenza dei collettori.

Soffermando l'attenzione sui rami 1 e 2 in *Fig.1* (che sono i due rami vaporizzatori, posti in parallelo), si nota come il ramo 1 è composto a sua volta dalla tratta  $\alpha$  e dalla tratta  $\beta$ , mentre il ramo 2 è composto dalle tratte  $\gamma, \delta$  ed  $\phi$ . I dati afferenti al calcolo delle perdite di carico, relativi ognuno a ciascuna tratta dei rispettivi rami, sono riportati in *Tab.3*.

<sup>1</sup> Le rugosità relative vengono calcolate con la formula empirica  $\varepsilon = \frac{4.4 \times 10^{-5}}{d}$

<sup>2</sup> E' dovuto al fatto che assumono uno scarso peso nel computo delle perdite di carico

Ramo	Tratta	$L [m]$	$S_R [m^2]$	$Q [kW]$	$\dot{m}_v [kg/s]$	$\sum \dot{m}_v [kg/s]$	$R$	$M_m [kg/s]$
1	$\alpha$	2.67	0.897	230.73	0.1228	0.1674	15	2.511
	$\beta$	0.97	0.326	83.85	0.0466			
							25	4.185
							35	5.859
2	$\gamma$	2.07	0.696	179.02	0.0953	0.2641	15	3.961
	$\delta$	2.70	0.907	233.30	0.1242			
	$\phi$	0.97	0.326	83.85	0.0446			
							25	6.602
							35	9.244

Tab.3

Nella terza colonna sono riportate le lunghezze delle tratte, attraverso le quali, ricordando la lunghezza degli schermi, si perviene alle superfici irraggiate, riportate nella quarta colonna. In base alla potenza termica per unità di superficie si perviene al calore irraggiato dalla fiamma alle varie tratte, riportato nella quinta colonna<sup>3</sup>. I valori di portata massica relativi a ciascuna tratta (colonna 6) vengono ottenuti tramite il calore di vaporizzazione  $r = 1878.2 \text{ kJ/kg}$ <sup>4</sup> (vedi Tab.1). La settima colonna riporta la portata di vapore lungo tutto il ramo, ottenuta semplicemente come somma dei contributi di portata delle singole tratte. Nell'ottava colonna sono riportati, per ciascun ramo, tre diversi valori del rapporti di circolazione  $R$ , dal quale (assieme a  $\sum \dot{m}_v$ ) dipende la portata massica della miscela acqua-vapore, il cui valore è riportato nella nona e ultima colonna<sup>5</sup>.

<sup>3</sup> Se si prende ad esempio in considerazione il valore di  $Q$  relativo alla tratta  $\alpha$  del ramo 1, il valore 230.73 lo si ottiene moltiplicando  $q$  (che si ricorda essere pari a  $257.22 \text{ kW/m}^2$ ) per la superficie relativa a tale tratta, e cioè  $0.897 \text{ m}^2$ . Si ottiene che  $q \times S = 257.22 \times 0.897 = 230.73 \text{ kW}$

<sup>4</sup> Il valore di  $\dot{m}_v$  è ottenuto semplicemente dall'equazione  $q = \dot{m}_v \times r \rightarrow \dot{m}_v = \frac{q}{r}$

<sup>5</sup> Il grado di circolazione è definito come il rapporto tra la portata della miscela acqua-vapore e la portata di vapore circolanti nel ramo:  $R = \frac{\dot{m}_m}{\sum \dot{m}_v}$

Si consideri ora la *Tab.4*:

Ramo	Posizione	$x$	$R$	$\delta^* [kg/m^3]$	$G [kg/m^2s]$	$\xi$	$\Delta p [Pa]$
1	A	0	15	846.74	223.8	0.5	14.79
			25		373.0		41.08
			35		522.2		80.51
	B	0.7336	15	173.49	223.8	0.26	37.53
			25	254.40	373.0		71.09
			35	317.95	522.2		111.49
	F	0	15	134.62	223.8	1	186.02
			25	202.87	373.0		342.89
			35	259.17	522.2		526.07
2	A	0	15	846.74	353.0	0.5	36.80
			25		588.4		102.22
			35		823.9		200.41
	D	0.3608	15	291.12	353.0	0.26	55.65
			25	394.73	588.4		114.03
			35	465.76	823.9		189.46
	E	0.8311	15	156.91	353.0	0.26	103.26
			25	232.76	588.4		193.38
			35	293.58	823.9		300.57
	F	1	15	134.62	353.0	1	462.90
			25	202.87	588.4		853.33
			35	259.17	823.9		1309.54

Tab.4

Nella terza colonna è riportata la grandezza  $x$ ; essa risulta essere pari al rapporto tra il vapore già prodotto in una determinata posizione (A,B,D ecc nel nostro caso) e il vapore globalmente prodotto nell'intero ramo. Tale valore è determinabile tramite i valori riportati in *Tab.3*<sup>6</sup>; si nota come nelle posizioni A ed F il valore di  $x$  è rispettivamente pari a 0 ed 1, dato che in tali posizioni il

<sup>6</sup> La posizione B del ramo 1, ad esempio, appartiene al ramo a, dove da *Tab.3* si legge che  $\dot{m}_v = 0.1228$  ed  $\sum \dot{m}_v = 0.1674$ , pertanto  $x = \frac{\dot{m}_v}{\sum \dot{m}_v} = \frac{0.1228}{0.1674} = 0.7336$ .

fluido di lavoro è presente rispettivamente sotto forma di liquido e vapore. Il valore di  $x$  entra in gioco per il calcolo della densità  $\delta^*$ , la quale è esprimibile tramite come segue:

$$\delta^* = \frac{R}{x \times v_v + (R - x) \times v_a} \quad (4.10)$$

Applicando la (4.10) con i valori in nostro possesso di  $x$ ,  $R$ ,  $v_v$  e  $v_a$  si ottengono i valori riportati nella quinta colonna di *Tab.4*. Inoltre, ricordando che l'area della sezione di passaggio (*Tab.2*) della miscela per il ramo 1 è pari a  $0.01122 \text{ m}^2$ , dalle portate in colonna 9 di *Tab.3* si perviene alla velocità massica  $G$  della miscela (sesta colonna)<sup>7</sup>.

Nella settima colonna sono riportati i valori di  $\xi$ , il quale viene calcolato da appositi diagrammi sulla base del rapporto raggio/spessore.

Infine, nell'ottava colonna sono riportate le perdite di carico concentrate  $\Delta p$  corrispondenti a ciascuna posizione; tali valori vengono calcolati con la formula:

$$\Delta p = \xi \frac{G^2}{2\delta^*} \quad (4.11)$$

---

<sup>7</sup>  $G = \frac{\dot{m}_m}{S_1}$

Ramo	Tratta	R	$\Delta z$ [m]	$\delta$ $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$	$\delta g \Delta z$ [Pa]	$G$ $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right]$	$\tau$	$\mu$ $\times 10^{-6} \left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$	$Re \times 10^{-3}$	$\lambda$	L [m]	$\Delta p$ distribuita [Pa]	$\Delta p$ totale [Pa]	P [Pa]	
1	$\alpha$	15		345.9	-9498	223.8	0.599	59.77	182.7	0.0208		83.94	98.73	-9597	
		25	-2.80	437.3	-12008	373.0	0.490	71.68	253.9	0.0203	2.72	180.00	221.08	-12229	
		35		498.7	-13694	522.2	0.416	79.67	319.9	0.0201		306.31	386.82	-14081	
	$\beta$	15		152.4	-75	223.8	0.830	34.58	315.9	0.0201		69.04	292.59	-368	
		25	-0.05	226.7	-111	373.0	0.742	44.25	411.4	0.0199	1.02	127.63	541.61	-653	
		35		286.6	-141	522.2	0.670	52.05	489.6	0.0198		196.89	834.45	-957	
	2	$\gamma$	15		473.7	-465	353.0	0.446	76.41	225.4	0.0205		117.13	153.93	-619
			25	-0.10	564.3	-553	588.4	0.338	88.22	325.5	0.0201	2.12	267.87	370.09	-923
			35		618.7	-607	823.9	0.273	95.31	421.9	0.0199		474.25	674.66	-1282
$\delta$		15		210.4	-5570	353.0	0.761	42.12	409.0	0.0199		326.04	381.69	-5952	
		25	-2.70	299.6	-7934	588.4	0.654	53.75	534.2	0.0197	2.70	629.77	743.80	-8678	
		35		366.5	-9705	823.9	0.574	62.46	643.7	0.0196		1004.26	1193.72	-10899	
$\phi$	15		145.2	-71	353.0	0.839	33.64	512.1	0.0198		177.58	743.74	-815		
	25	-0.05	217.1	-106	588.4	0.753	43.00	667.7	0.0196	1.02	326.66	1373.37	-1479		
	35		275.7	-135	823.9	0.683	50.63	794.2	0.0196		504.33	2114.44	-2249		

Tab.5

Si passi ora a considerare la *Tab.5*: nella quarta colonna sono presenti i battenti ( $\Delta z$ ) delle varie tratte. Nella quinta colonna è riportata la densità media della miscela, ricavata in base alla formula:

$$\delta = \frac{R}{(x_2 - x_1)(v_v - v_a)} \ln \frac{x_2 v_v + (R - x_2) v_a}{x_1 v_v + (R - x_1) v_a} \quad (4.12)$$

Nella (4.12) compaiono  $x_2$  e  $x_1$ , che sono i valori rispettivamente finale ed iniziale di  $x$ ; tali valori sono ricavabili da *Tab.4* in base alle posizioni che corrispondono all'inizio o alla fine della tratta. In questo modo, è possibile calcolare i valori della sesta colonna,  $\delta g \Delta z$ ; analogamente a quanto visto in precedenza, si calcola la velocità massica  $G$  (settima colonna).

Attraverso la densità media della miscela  $\delta$ , dell'acqua  $\delta_a$  e del vapore  $\delta_v$ , si perviene al coefficiente  $\tau$  (ottava colonna) tramite la formula:

$$\tau = \frac{\delta_a - \delta}{\delta_a - \delta_v} \quad (4.13)$$

I valori di viscosità dinamica media della miscela (colonna 9) si ottengono come segue.

$$\mu = \tau \mu_v + (1 - \tau) \mu_a \quad (4.14)$$

Il numero di Reynolds, che compare nella decima colonna, viene calcolato con la relazione:

$$Re = \frac{Gd}{\mu} \quad (4.15)$$

Ricordando il valore di rugosità relativa riportato in *Tab.2*, il coefficiente  $\lambda$  presente nell'undicesima colonna può essere calcolato con la formula:

$$\lambda(i) = \frac{1}{4 \log^2 \left( \frac{\epsilon}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda(i-1)}} \right)} \quad (4.16)^8$$

Nella dodicesima colonna è riportata la lunghezza delle tratte ed è quindi possibile, conoscendo i valori di tutte le grandezze interessate, calcolare la perdita di carico distribuita che compare nella tredicesima colonna; la formula che viene utilizzata è:

---

<sup>8</sup>  $i$  è un indice di posizione

$$\Delta p = \lambda \frac{L G^2}{d 2\delta} \quad (4.17)$$

Nella quattordicesima colonna è riportata la perdita di carico totale, comprensiva di quella distribuita e di quelle concentrate, che più convenzionalmente vengono assegnate alla tratta. Più precisamente, alle varie tratte vengono riferite le seguenti perdite:

Tratta $\alpha$	$\Delta p$ in A
Tratta $\beta$	$\Delta p$ in B e F
Tratta $\gamma$	$\Delta p$ in A
Tratta $\delta$	$\Delta p$ in D
Tratta $\phi$	$\Delta p$ in E e F

Tab.6

Infine, il fattore caratteristico  $P$  che compare nell'ultima colonna di *Tab.5* viene calcolato per tutte le tratte e per i tre valori del rapporto di circolazione  $R$  tramite la formula che segue:

$$P = \delta g \Delta z - \Delta p \quad (4.18)$$

Sommando tutti i valori di  $P$  corrispondenti a tutte le tratte di cui è composto il ramo, si perviene semplicemente al valore di  $P$  relativo all'intero ramo; tali valori sono riportati in *Tab.7*.

Ramo	$R$	$P$ [Pa]
1	15	-9965
	25	-12882
	35	-15056
2	15	-7386
	25	-11080
	35	-14430

Tab.7

In *Fig.2* è rappresentato l'andamento di  $P$  in funzione di  $R$  rispettivamente per i rami 1 e 2.

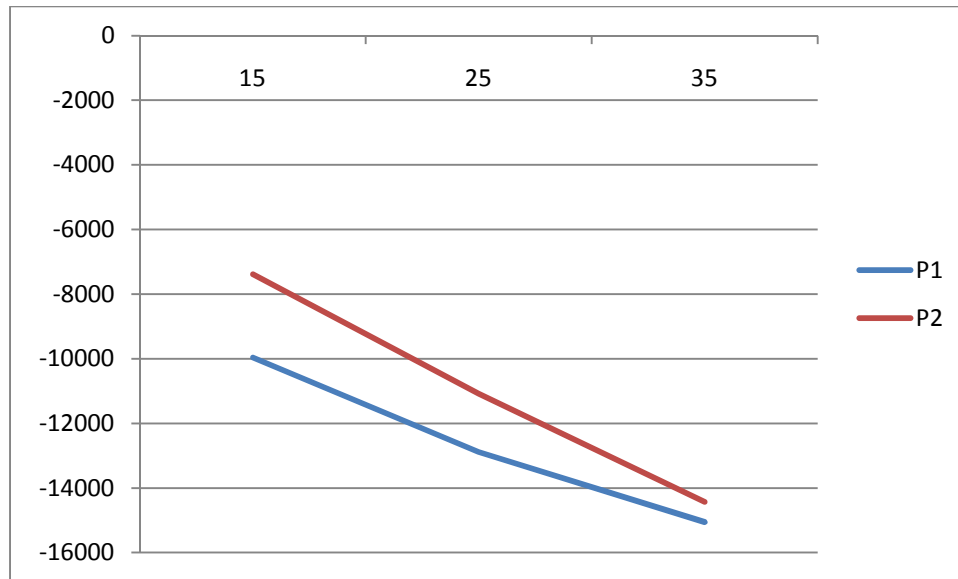


Fig.2

A questo punto passiamo ai rami *c* (tubo di caduta) ed *r* (tubo di ritorno) e si prenda in considerazione la *Tab.8*:

Ramo	$R_1$	$R_2$	$M_a = M_{mr} \left[ \frac{kg}{s} \right]$	$\delta_a$ o $\delta_{mr}$ $\left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	$G \left[ \frac{kg}{m^2 s} \right]$	$\sum \xi$	$\Delta p [Pa]$
<i>c</i>	16	22.8	8.700	846.74	1660.3	1.76	2864.9
	24	34.4	11.782		2248.5		5254.3
	31	34.4	14.274		2724.0		7711.6
<i>r</i>	16	22.8	8.700	171.56	1108.3	1.73	6199.2
	24	29.4	11.782	216.80	1500.9		8978.9
	31	34.4	14.274	249.14	1818.3		11479.0

Tab.8

Per i due rami in questione e per le tre coppie di valori  $R_1$  ed  $R_2$ , la portata della miscela viene calcolata tramite la seguente formula:

$$M_m = R \times \sum \dot{m}_v \quad (4.19)$$

Si nota che nella (4.19) i valori  $M_m$  e  $\sum \dot{m}_v$  provengono da *Tab.3*. Nella quarta colonna è presente la portata d'acqua  $M_a$ , calcolabile con la relazione:

$$M_a = M_{mr} = \sum_1^n M_m \quad (4.20)$$

La densità dell'acqua è nota ed è riportata nella quinta colonna, relativamente al tubo di caduta; quella della miscela nei tubi di ritorno si calcola con le formule:

$$\Phi = \frac{\sum_1^n \dot{m}_v}{M_{mr}} \quad (4.21a)$$

$$\delta_{mr} = \frac{1}{\Phi v_v + (1 - \Phi) v_a} \quad (4.21b)$$

Si calcola al solito la velocità massica  $G$  (sesta colonna) in base alle sezioni di passaggio riportate in *Tab.2*. Essendo la densità costante, si considera la somma dei coefficienti  $\zeta$  (settima colonna) e si calcolano infine le perdite di carico concentrate in base alla (4.11).

I valori della sommatoria di  $\xi$  tengono conto dell'imbocco ( $\xi = 0.5$ ), dello sbocco ( $\xi = 1$ ) e della curva ( $\xi = 0.26$  per il tubo di caduta e  $\xi = 0.23$  per quello di ritorno per il verso rapporto  $r/d$ ).

Ramo	$R_1$	$R_2$	$M_a = M_{es}$ [ $\frac{kg}{s}$ ]	$\Delta z$ [m]	$\delta$ [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$\delta g \Delta z$ [Pa]	$G$ [ $\frac{kg}{m^2 s}$ ]	$\tau$	$\mu \times 10^{-6}$ [ $\frac{kg}{ms}$ ]	$Re \times 10^{-3}$	$\lambda$	$L$ [m]	$\Delta p$ distribuita [Pa]	$\Delta p$ totale [Pa]	$P$ [Pa]
c	16	22.8	8.700				1660.3			1085	0.0174		1033.2	3898.0	23505
	24	29.4	11.782	3.30	846.74	27403	2248.5	0	125	1470	0.0173	2.98	1883.8	7138.1	20265
	31	34.4	14.274				2724.0			1780	0.0173		2764.9	10476.5	16926
r	16	22.8	8.700		171.56	-757.1	1108.3	0.807	37.07	2990	0.0164		681.0	6874.2	-7631
	24	29.4	11.782	-0.45	216.80	-956.8	1500.9	0.753	42.96	3494	0.0164	1.16	988.4	9976.3	-10933
	31	34.4	14.274		249.14	-1099.5	1818.3	0.715	47.17	3855	0.0164		1262.3	12741.3	-13841

Tab.9

La Tab.9 è analoga a Tab.5; in particolare, il prodotto  $\delta g \Delta z$  si calcola immediatamente, essendo già noti i valori di  $\delta$  da Tab.8. La perdita di carico distribuita si calcola con procedimento analogo a

quanto visto per *Tab.5*, la perdita di carico totale comprende quella distribuita e la somma delle perdite concentrate, riportata nell'ultima colonna di *Tab.5*. Si può dunque calcolare il fattore caratteristico  $P$  che compare in *Tab.9*. A questo punto, in funzione del rapporto di circolazione  $R_1$ , è possibile riportare in *Tab.10* il fattore caratteristico  $P$  relativo al tubo  $c$  (tubo di caduta) e al ramo  $r$  (tubo di ritorno), ricavato per entrambi da *Tab.9*. Inoltre, si riporta il valore di  $P$  per il ramo 1 ricavato, come già visto, da *Fig.2*. La somma di questi tre valori (relativi ai rami  $c$ , 1 ed  $r$ ), viene riportato nell'ultima colonna di *Tab.10*.

$R_1$	$P_c$ [Pa]	$P_1$ [Pa]	$P_r$ [Pa]	$P_c + P_1 + P_r$ [Pa]
16	23505	-10316	-7631	5558
24	20265	-12620	-10933	-3288
31	16926	-14240	-13481	-11155

Tab.10

A questo punto possiamo aggiungere al diagramma di *Fig.2* l'andamento della somma  $P_c + P_1 + P_r$ :

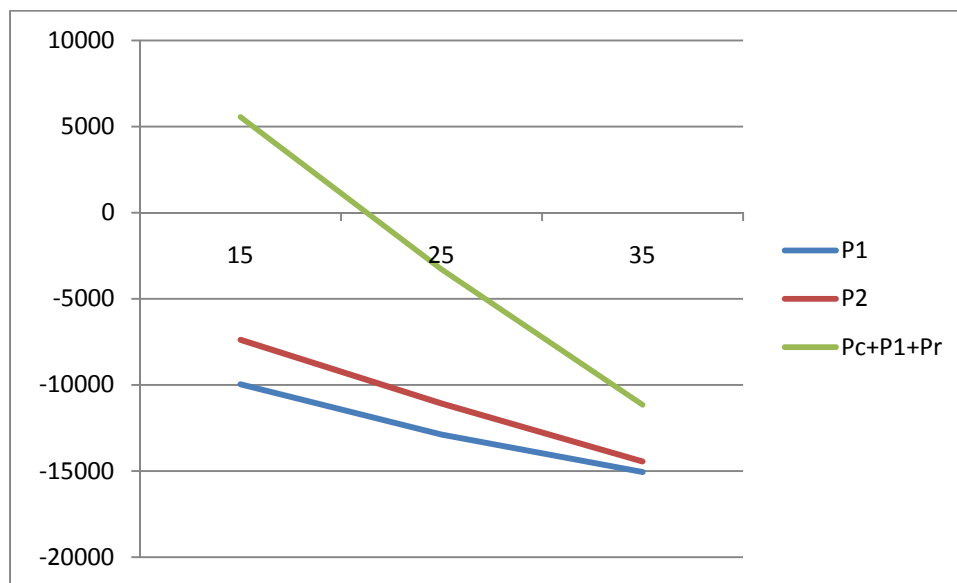


Fig.3

Tale curva (in verde nel diagramma) taglia l'asse delle ascisse per  $R_1 = 21$ , a cui corrisponde, a parità di  $P$ , un valore di  $R_2 = 27$ ; questi due valori di  $R$  rappresentano il rapporto di circolazione relativi ai due rami in parallelo. Essendo che  $R_2 > R_1$  (nonostante il fatto che il ramo 1 sia investito da una quantità di calore maggiore e che sia più lungo), il circuito risulta essere lievemente squilibrato. Facendo riferimento a *Tab.3*, è possibile calcolare (per interpolazione) i valori di portata massica della miscela corrispondenti rispettivamente ai rapporti di circolazione dei due rami. Per il ramo 1 si ottiene una portata massica  $M_{m1} = 3.515 \text{ kg/s}$ , per il 2  $M_{m2} = 7.13 \text{ kg/s}$ .

Si nota che la portata d'acqua relativa al ramo 2 è più che doppia rispetto a quella del ramo 1! Inoltre, osservando Fig.3 si nota che lo squilibrio del circuito sarebbe ancora più grande se i rapporti di circolazione fossero più bassi (ad esempio ad  $R_1 = 16$  corrisponderebbe  $R_2 = 22.8$ ); viceversa, se la circolazione fosse più abbondante (se ad esempio si diminuisse il numero di anelli alimentati da un tubo di caduta e confluenti in un tubo di ritorno, o ancora aumentando il diametro di questi ultimi) lo squilibrio diminuirebbe. Estremizzando questo ragionamento, segue che se la circolazione fosse abundantissima si potrebbe ottenere l'equilibratura del circuito, o addirittura l'inversione dello squilibrio, con rapporto di circolazione più elevato nel ramo 1. Quanto appena detto è intuibile osservando gli andamenti di  $P_1$  e  $P_2$  in Fig.3: al crescere del rapporto di circolazione, esse tendono ad incrociarsi. In definitiva, per poter giudicare se il circuito esaminato è accettabile si deve verificare se il rapporto di circolazione minimo nei due rami è in accordo con i valori sperimentali di sicurezza. A tale scopo, si faccia riferimento al diagramma che segue:

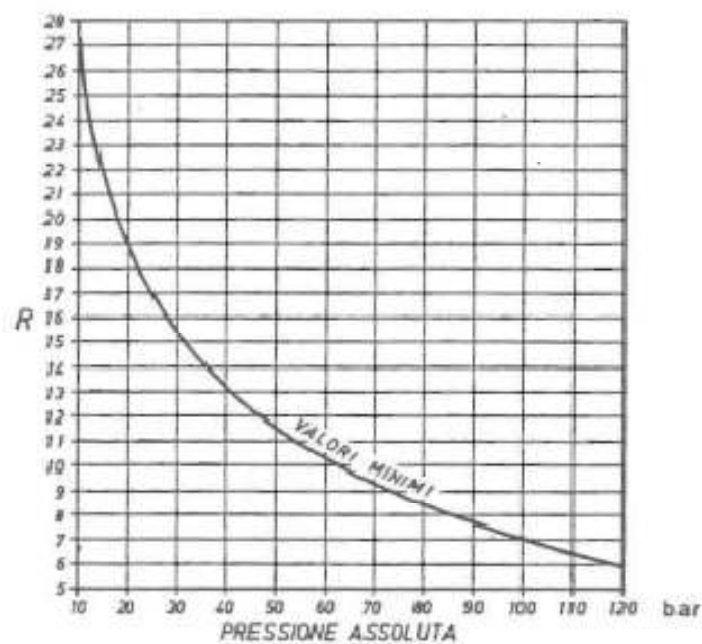


Fig.4

Entrando in Fig.4 con il valore di pressione assoluta del nostro sistema (21 bar, Tab.1), si ricava che  $R = 18.5$ . La verifica del circuito è quindi positiva