

I transitori termici

piastra irraggiata sulle due facce parte seconda

Ci interessa studiare i tempi necessari per ottenere un certo riscaldamento della piastra mediante irraggiamento delle due facce da parte di una fonte di calore ad una certa temperatura, che si ipotizza essere rappresentata da due pareti contrapposte alle facce della piastra. Per poter utilizzare quanto già visto per la piastra immersa in un fluido sono necessarie due operazioni.

La prima consiste nell'individuare un'adduttanza ideale a irraggiamento che ci consenta di ricavare un valore del numero di Biot con il quale entrare nella Tabella 2 e ricavare dal valore di X il valore di θ . La seconda consiste nell'individuare il rapporto esistente fra la temperatura superficiale della piastra, che interessa per l'irraggiamento, e la temperatura media della parete a cui sempre ci siamo riferiti nei calcoli che precedono.

Osserviamo anche che, dato che la temperatura superficiale della piastra varia nel tempo, considereremo, nei riguardi dell'irraggiamento, la temperatura media fra inizio e fine del processo. Osserviamo infine che il calcolo dovrà essere condotto per tentativi o, se si preferisce, per successive approssimazioni, come vedremo. Cominciamo con il considerare il primo problema. Osserviamo che, indicando al solito con α l'adduttanza, che in questo caso è un'adduttanza ideale a irraggiamento e ricordando quanto noto dell'irraggiamento, deve essere

$$\alpha(T_f - T_s) = N_m \sigma (T_f^4 - T_s^4) \quad (9)$$

da cui

$$\alpha = N_m \sigma (T_f + T_s) (T_f^2 + T_s^2) \quad (10)$$

Nella (9) e nella (10) T_f è la temperatura assoluta della fonte di calore, T_s è la temperatura assoluta delle facce irraggiate della piastra, N_m è il grado di nero mutuo delle superfici irraggianti e delle facce della piastra e σ è la costante di Stefan-Boltzmann, pari, come noto, a $5,672 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$. Se poniamo

$$Y = 5,672 \times 10^{-8} (T_f + T_s) (T_f^2 + T_s^2) \quad (11)$$

possiamo quindi scrivere che

$$\alpha = Y N_m \quad (12)$$

Un'indagine approfondita sui transitori termici condotta dal prof. Donatello Annaratone, che ha pubblicato recentemente per la Springer un incisivo testo di tipo generalista sulla trasmissione del calore (Engineering Heat Transfer, Springer Verlag), ha permesso all'Autore di elaborare e proporre ai lettori de "La Termotecnica", per alcune situazioni significative, criteri di calcolo di immediata applicazione e molto semplici, in alternativa al calcolo mediante programmi alle differenze finite. Nel precedente numero di giugno Annaratone, già docente di Generatori di Vapore alla Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano, ha trattato il caso della piastra piana immersa in un fluido o lambita da un fluido su una sola faccia, mentre in questo l'autore affronta il caso della piastra piana irraggiata su entrambe le facce o su una sola faccia. Nei numeri successivi verranno trattati i casi della trasmissione del calore in regime transitorio da un fluido all'altro attraverso una piastra piana o una parete curva (tubo) e, infine, lo studio della diffusione del calore all'interno di un solido. Ringraziamo il professor Annaratone per questo ennesimo contributo, che offre al lettore le procedure più semplici, che la pragmaticità della sua lunga esperienza gli consente di enunciare con grande sintesi e chiarezza. Ricordiamo dell'Autore i due volumi specialistici, editi precedentemente sempre per la Springer, ben noti agli operatori per i loro validi e aggiornati contenuti, quali sono "Pressure Vessel Design" e "Steam Generators", che costituiscono un indiscusso riferimento per gli "addetti ai lavori".

Nella Tabella 4 abbiamo riportato i valori di Y in funzione di t_f e di t_s in °C. Come si vede, una volta noto il valore di N_m e delle temperature t_f e t_s , mediante la Tabella 4 e la (12) si calcola agevolmente il valore dell'adduttanza ideale ad irraggiamento α . A questo punto però si tratta di individuare il valore di t_s . Come già fatto osservare adotteremo il valor medio di tale temperatura considerando la condizione iniziale e quella finale della piastra; ma se il va-

Prof. Donatello Annaratone, Politecnico di Milano

TABELLA 4 - Fattore Y

t _f	t _s									
	80	100	120	140	160	180	200	220	240	260
400	33.64	35.15	36.75	38.44	40.21	42.07	.....	.....	.....	.....
420	35.91	37.48	39.13	40.86	42.68	44.59	46.59	.....	.....	.....
440	38.30	39.92	41.61	43.39	45.27	47.23	49.28	.....	.....	.....
460	40.80	42.47	44.21	46.05	47.97	49.98	52.09	54.30	.....	.....
480	43.42	45.13	46.93	48.82	50.79	52.86	55.03	57.29	.....	.....
500	46.15	47.92	49.77	51.71	53.74	55.86	58.08	60.40	62.82	.....
520	49.01	50.83	52.73	54.72	56.81	58.99	61.26	63.64	66.12	.....
540	51.99	53.86	55.82	57.86	60.00	62.24	64.57	67.01	69.55	72.20
560	55.10	57.02	59.03	61.14	63.33	65.63	68.02	70.51	73.11	75.82
580	58.33	60.31	62.38	64.54	66.79	69.14	71.60	74.15	76.81	79.58
600	61.70	63.74	65.86	68.08	70.39	72.80	75.31	77.93	80.65	83.49
620	65.21	67.30	69.48	71.75	74.12	76.60	79.17	81.85	84.63	87.53
640	68.85	71.00	73.23	75.57	78.00	80.53	83.17	85.91	88.76	91.72
660	72.63	74.83	77.13	79.53	82.02	84.62	87.31	90.12	93.03	96.06
680	76.55	78.82	81.18	83.63	86.19	88.85	91.61	94.48	97.46	100.55
700	80.62	82.95	85.37	87.89	90.50	93.23	96.05	98.99	102.04	105.20
720	84.84	87.23	89.71	92.29	94.97	97.76	100.65	103.65	106.77	110.00
740	89.21	91.66	94.21	96.85	99.60	102.45	105.41	108.48	111.66	114.96
760	93.74	96.25	98.86	101.57	104.38	107.30	110.32	113.46	116.71	120.08
780	98.42	100.99	103.67	106.44	109.32	112.30	115.40	118.61	121.93	125.37
800	103.26	105.90	108.64	111.48	114.42	117.48	120.64	123.92	127.31	130.82
820	108.26	110.96	113.77	116.68	119.69	122.82	126.05	129.40	132.86	136.45
840	113.43	116.20	119.07	122.05	125.13	128.33	131.63	135.05	138.59	142.25
860	118.76	121.60	124.54	127.59	130.74	134.01	137.38	140.88	144.49	148.22
880	124.27	127.17	130.18	133.30	136.53	139.86	143.31	146.88	150.57	154.37
900	129.94	132.92	136.00	139.19	142.49	145.90	149.42	153.06	156.82	160.71
920	135.80	138.84	142.00	145.26	148.63	152.11	155.71	159.42	163.26	167.23
940	141.83	144.95	148.17	151.50	154.95	158.50	162.18	165.97	169.89	173.93
960	148.04	151.23	154.53	157.94	161.45	165.09	168.84	172.71	176.70	180.82
980	154.44	157.70	161.07	164.55	168.15	171.86	175.69	179.64	183.71	187.91
1000	161.06	164.36	167.80	171.36	175.03	178.82	182.73	186.75	190.91	195.19
	280	300	320	340	360	380	400	420	440	460
580	82.46	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
600	86.43	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
620	90.54	93.67	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
640	94.80	97.99	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
660	99.20	102.46	105.84	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
680	103.76	107.09	110.54	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
700	108.47	111.87	115.39	119.03	.....	.....	.....	.....	.....	.....
720	113.34	116.81	120.40	124.12	.....	.....	.....	.....	.....	.....
740	118.38	121.91	125.58	129.37	133.28	.....	.....	.....	.....	.....
760	123.57	127.18	130.91	134.78	138.77	.....	.....	.....	.....	.....
780	128.93	132.61	136.42	140.36	144.43	148.63	.....	.....	.....	.....
800	134.46	138.21	142.10	146.11	150.26	154.54	.....	.....	.....	.....
820	140.16	143.99	147.95	152.04	156.26	160.62	165.11	.....	.....	.....
840	146.03	149.94	153.97	158.14	162.44	166.88	171.46	.....	.....	.....
860	152.08	156.06	160.18	164.42	168.80	173.32	177.98	182.78	.....	.....
880	158.31	162.37	166.56	170.89	175.35	179.94	184.69	189.57	.....	.....
900	164.72	168.86	173.13	177.53	182.08	186.76	191.58	196.55	201.66	.....
920	171.32	175.53	179.89	184.37	188.99	193.76	198.66	203.72	208.92	.....
940	178.10	182.40	186.83	191.40	196.10	200.95	205.94	211.08	216.37	221.81
960	185.07	189.45	193.97	198.62	203.41	208.34	213.42	218.64	224.02	229.54
980	192.24	196.70	201.30	206.03	210.91	215.93	221.09	226.40	231.86	237.48
1000	199.60	204.15	208.83	213.65	218.61	223.71	228.96	234.36	239.92	245.62

lore iniziale è ben noto quello finale dipende dal rapporto fra la temperatura delle facce irraggiate e quella media della piastra, che noi imponiamo onde pervenire al tempo necessario per raggiungerla, come abbiamo sempre fatto finora. Indicando tale rapporto con t_s/t_m (essendo t_m la temperatura media della piastra) si constata che anche questo rapporto, come il numero adimensionale X, dipende dal numero di Biot e dalla percentuale di riscaldamento della piastra (vedi le Tabelle 2 e 3). È stato quindi possibile costruire la Tabella 5, che ci permette, attraverso t_m , di pervenire al necessario valore di t_s . Come si vede tale rapporto è di poco superiore all'unità per bassi valori del numero di Biot e in particolare per elevato riscaldamento percentuale ma se il numero di Biot è elevato e in particolare per basso riscaldamento percentuale il rapporto in questione può essere elevato e quindi certamente non trascurabile. Si osservi che il numero di Biot non è noto finché non si conosce il valore di α , che dipende, come visto, da Y e quindi da t_s , il cui valore dipende anche dal numero di Biot; è quindi necessario operare per successive approssimazioni, come vedremo dagli esempi; generalmente è però sufficiente fare due passaggi per ottenere valori dei vari parametri che successivi passaggi non farebbero variare in modo significativo. Una volta definito il numero di Biot e nota la percentuale di riscaldamento, per ottenere il valore del numero adimensionale X e infine del tempo θ ci si deve riferire alla Tabella 2.

Il risultato che si ottiene è approssimato; infatti se è vero che ad un certo valore di α e quindi di Bi corrisponde, attraverso la Tabella 2, un sicuro valore di X e quindi di θ , non va dimenticato che il valore di α si ottiene ipotizzando che la temperatura di riferimento della superficie della piastra sia il valor medio fra la temperatura all'inizio del processo e quella alla fine del processo; si tratta di una temperatura convenzionale che non è sicuro che corrisponda alla realtà del fenomeno, trattandosi di irraggiamento; d'altra parte tale soluzione se non è l'unica possibile è la più semplice e altre soluzioni sarebbero di difficile individuazione. A questo punto riteniamo che gli esempi siano il modo migliore per chiarire eventuali dubbi sulla procedura da seguire.

Esempi

1. Si voglia riscaldare da 20 °C a 460 °C, mediante irraggiamento sulle due facce, una lamiera d'acciaio di 60 mm di spessore. La fonte di calore sia a 900 °C e il grado di nero mutuo N_m sia pari a 0.6.

Sia inoltre $c = 500 \text{ J/kgK}$; $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 45 \text{ W/mK}$. Se trascuriamo al momento la differenza fra temperatura superficiale e temperatura media della piastra, la temperatura superficiale media della piastra fra inizio e fine del riscaldamento è pari a $(20 + 460)/2 = 240 \text{ °C}$.

In base alla Tab. 4 con $t_f = 900 \text{ °C}$ e $t_s = 240 \text{ °C}$ si ottiene $Y = 156.82$; in base alla (12) si ha quindi che $\alpha = 0.6 \times 156.82 = 94.1 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il numero di Biot è quindi pari a $94.1 \times 0.06/45 = 0.125$.

Il riscaldamento della piastra è pari a $440/880 = 0.5 = 50\%$. In base a Bi e alla percentuale di riscaldamento dalla Tabella 5 otteniamo che $t_s/t_m = 1.021$; pertanto alla fine del processo la temperatura superficiale della piastra non è pari a 460 °C ma a $1.021 \times 460 = 470 \text{ °C}$. La temperatura superficiale media fra inizio e fine del riscaldamento non è quindi pari a 240 °C, come prima supposto, ma è pari a $(20+470)/2 = 245 \text{ °C}$.

Conseguentemente il valore di Y è pari a 157.8 e si ha $\alpha = 94.68 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il numero di Biot risulta pari a 0.126 e a questo punto si può ritenere chiuso il procedimento per successive approssimazioni; ulteriori passi non porterebbero a variazioni significative dei vari parametri. In base al valore di Bi e alla percentuale di riscaldamento dalla Tabella 2 ricaviamo $X = 0.3467$. Abbiamo quindi che $\theta = 0.3467 \times 500 \times 7850 \times 0.06/94.68 = 862 \text{ s}$, corrispondenti a circa 14 min.

2. Si abbia una lamiera d'acciaio, irraggiata sulle due facce, di 100 mm di spessore; la si vuol portare da 20 a 300 °C mediante una fonte di calore a 800 °C; il grado mutuo di nero sia pari a 0.7.

Sia inoltre, come al solito, $c = 500 \text{ J/kgK}$; $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$; $\lambda = 45 \text{ W/mK}$.

Trascurando la differenza fra temperatura superficiale e media della piastra la temperatura superficiale media fra inizio e fine del processo è pari a $(20+300)/2 = 160 \text{ °C}$. Con $t_f = 800 \text{ °C}$ e $t_s = 160 \text{ °C}$ dalla Tabella 5 ricaviamo $Y = 114.42$ e quindi risulta $\alpha = 0.7 \times 114.42 = 80.1 \text{ W/m}^2\text{K}$ e $Bi = 80.1 \times 0.1/45 = 0.178$. Il riscaldamento è pari a $280/780 = 0.359 = 35.9\%$.

Dalla Tabella 5 si ricava $t_s/t_m = 1.0538$ per cui alla fine del processo la temperatura superficiale della piastra è pari a $1.0538 \times 300 = 316 \text{ °C}$. La temperatura superficiale media è quindi pari a $(20+316)/2 = 168 \text{ °C}$. Dalla Tabella 4 si ha $Y = 115,64$ e quindi $\alpha = 80.95 \text{ W/m}^2\text{K}$. Il numero di Biot risulta quindi pari a $80.95 \times 0.1/45 = 0.18$. Dalla Tabella 2 si ricava $X = 0.2257$. Risulta infine $\theta = 0.2257 \times 500 \times 7850 \times 0.1/80.95 = 1094 \text{ s}$, corrispondenti a circa 18 min.

TABELLA 5 - Rapporto t_s/t_m per piastra irraggiata sulle due facce

Bi	Riscaldamento della piastra (%)						
	20	30	40	50	60	70	80
0.010	1.0067	1.0039	1.0025	1.0017	1.0011	1.0007	1.0004
0.015	1.0101	1.0059	1.0038	1.0025	1.0017	1.0011	1.0006
0.020	1.0134	1.0078	1.0050	1.0034	1.0022	1.0014	1.0008
0.025	1.0168	1.0098	1.0063	1.0042	1.0028	1.0018	1.0010
0.030	1.0201	1.0117	1.0075	1.0050	1.0034	1.0022	1.0013
0.040	1.0268	1.0156	1.0100	1.0067	1.0045	1.0029	1.0017
0.050	1.0334	1.0195	1.0125	1.0084	1.0056	1.0036	1.0021
0.060	1.0401	1.0234	1.0150	1.0100	1.0067	1.0043	1.0025
0.070	1.0467	1.0272	1.0175	1.0117	1.0078	1.0050	1.0029
0.080	1.0533	1.0311	1.0200	1.0133	1.0089	1.0057	1.0033
0.10	1.0664	1.0387	1.0243	1.0166	1.0111	1.0071	1.0042
0.12	1.0795	1.0464	1.0298	1.0199	1.0132	1.0085	1.0050
0.15	1.0990	1.0577	1.0371	1.0247	1.0165	1.0106	1.0062
0.20	1.1311	1.0764	1.0491	1.0328	1.0218	1.0140	1.0082
0.25	1.1627	1.0949	1.0610	1.0407	1.0271	1.0174	1.0102
0.30	1.1940	1.1191	1.0727	1.0485	1.0323	1.0208	1.0121
0.40	1.2552	1.1489	1.0957	1.0638	1.0425	1.0273	1.0159
0.50	1.3147	1.1836	1.1180	1.0787	1.0525	1.0337	1.0197
0.60	1.3727	1.2174	1.1398	1.0932	1.0621	1.0399	1.0233
0.80	1.4838	1.2824	1.1816	1.1210	1.0807	1.0519	1.0303
1.0	1.5875	1.3440	1.2212	1.1475	1.0983	1.0632	1.0369
1.2	1.6865	1.4025	1.2588	1.1725	1.1150	1.0739	1.0431
1.4	1.7784	1.4579	1.2945	1.1963	1.1309	1.0841	1.0491
1.7	1.9051	1.5355	1.3448	1.2299	1.1532	1.0985	1.0575
2.0	2.0200	1.6071	1.3913	1.2610	1.1740	1.1118	1.0652
2.5	2.1890	1.7145	1.4617	1.3081	1.2054	1.1320	1.0770
3.0	2.3352	1.8089	1.5242	1.3493	1.2333	1.1500	1.0875
4.0	2.5767	1.9666	1.6294	1.4207	1.2806	1.1804	1.1052
5.0	2.7700	2.0931	1.7146	1.4783	1.3191	1.2051	1.1197
6.0	2.9300	2.1969	1.7847	1.5257	1.3508	1.2256	1.1316
8.0	3.1819	2.3578	1.8929	1.5991	1.4000	1.2572	1.1500
10.	3.3740	2.4772	1.9727	1.6532	1.4363	1.2805	1.1636

Piastra irraggiata su una sola faccia

Per la piastra irraggiata su una sola faccia e ipotizzando che attraverso l'altra faccia non vi siano disperdimenti di calore o essi siano trascurabili, si deve seguire la stessa procedura indicata per la piastra irraggiata su entrambe le facce. Naturalmente i valori del rapporto t_s/t_m differiscono da quelli riportati nella Tabella 5 per l'irraggiamento su entrambe le facce; essi sono riportati nella Tabella 6. Si constata che i valori della Tabella 6 sono superiori a quelli della Tabella 5, come era prevedibile che fosse, data la maggior difficoltà che ha il calore a pene-

TABELLA 6 - Rapporto t_s/t_m per piastra irraggiata su una sola faccia

Bi	Riscaldamento della piastra (%)						
	20	30	40	50	60	70	80
0.010	1.0133	1.0078	1.0050	1.0033	1.0022	1.0014	1.0008
0.015	1.0200	1.0116	1.0075	1.0050	1.0033	1.0021	1.0013
0.020	1.0266	1.0155	1.0100	1.0066	1.0044	1.0029	1.0017
0.025	1.0332	1.0194	1.0124	1.0083	1.0055	1.0036	1.0021
0.030	1.0398	1.0232	1.0149	1.0099	1.0066	1.0043	1.0025
0.040	1.0529	1.0309	1.0198	1.0132	1.0088	1.0057	1.0033
0.050	1.0659	1.0385	1.0247	1.0165	1.0110	1.0071	1.0041
0.060	1.0789	1.0460	1.0296	1.0197	1.0132	1.0085	1.0049
0.070	1.0918	1.0536	1.0344	1.0230	1.0153	1.0098	1.0057
0.080	1.1047	1.0610	1.0392	1.0262	1.0174	1.0112	1.0065
0.10	1.1301	1.0759	1.0488	1.0325	1.0217	1.0139	1.0081
0.12	1.1553	1.0906	1.0582	1.0388	1.0259	1.0166	1.0097
0.15	1.1926	1.1124	1.0722	1.0481	1.0321	1.0206	1.0120
0.20	1.2534	1.1478	1.0950	1.0634	1.0422	1.0272	1.0158
0.25	1.3127	1.1824	1.1173	1.0782	1.0521	1.0335	1.0195
0.30	1.3703	1.2160	1.1389	1.0926	1.0617	1.0397	1.0231
0.40	1.4809	1.2807	1.1805	1.1203	1.0802	1.0516	1.0301
0.50	1.5850	1.3421	1.2199	1.1466	1.0977	1.0628	1.0367
0.60	1.6829	1.4003	1.2574	1.1716	1.1144	1.0735	1.0429
0.80	1.8605	1.5078	1.3268	1.2179	1.1453	1.0934	1.0545
1.0	2.0163	1.6045	1.3896	1.2599	1.1732	1.1114	1.0650
1.2	2.1540	1.6915	1.4466	1.2979	1.1986	1.1277	1.0745
1.4	2.2766	1.7700	1.4983	1.3325	1.2217	1.1425	1.0831
1.7	2.4373	1.8740	1.5674	1.3789	1.2527	1.1624	1.0947
2.0	2.5764	1.9646	1.6278	1.4196	1.2799	1.1799	1.1050
2.5	2.7715	2.0916	1.7131	1.4773	1.3184	1.2047	1.1194
3.0	2.9332	2.1960	1.7834	1.5248	1.3502	1.2251	1.1313
4.0	3.1881	2.3581	1.8921	1.5985	1.3995	1.2569	1.1499
5.0	3.3823	2.4783	1.9723	1.6527	1.4358	1.2803	1.1635
6.0	3.5364	2.5716	2.0337	1.6941	1.4636	1.2981	1.1739
8.0	3.7678	2.7073	2.1219	1.7533	1.5031	1.3235	—
10	3.9342	2.8015	2.1820	1.7934	1.5298	—	—

trare nella piastra. Naturalmente una volta ricavato il valore del numero di Biot e nota la percentuale di riscaldamento, il valore del numero adimensionale X si ricava dalla Tabella 3; noto il valore di X si calcola il tempo θ come abbiamo già visto in precedenza.

Non ci resta quindi che fare qualche esempio. Circa l'approssimazione dei valori di θ che si ottengono con il procedimento descritto vale quanto già detto a proposito della piastra irraggiata sulle due facce.

Esempi

1. Si abbia una lamiera d'acciaio di 30 mm di spessore che si vuol riscaldare, mediante irraggiamento su una so-

la faccia, da 20 °C a 400 °C con una fonte di calore a 1000 °C; il grado di nero mutuo sia pari a 0.65. Sia inoltre, come al solito, $c = 500$ J/kgK; $\rho = 7850$ kg/m³; $\lambda = 45$ W/mK. Trascurando per ora la differenza fra la temperatura superficiale e quella media della piastra abbiamo che la temperatura superficiale media è pari a $(20+400)/2 = 210$ °C. In base alla Tabella 4 con $t_f = 1000$ °C e $t_s = 210$ °C otteniamo $Y = 184.74$ per cui $\alpha = 0.65 \times 184.74 = 120.02$ W/m²K. Il numero di Biot è quindi pari a $120.02 \times 0.03 / 45 = 0.08$. Il riscaldamento della piastra è pari a $380/980 = 0.388 = 38.8\%$. Dalla Tab. 6 ricaviamo $t_s/t_m = 1.0418$; alla fine del processo la temperatura superficiale della piastra è quindi pari a $1.0418 \times 400 = 417$ °C. La temperatura superficiale media è quindi pari a $(20+417)/2 = 218.5$ °C. Ricaviamo dalla Tabella 4 il nuovo valore di Y; esso è pari a 186.45; pertanto si ha $\alpha = 0.65 \times 186.45 = 121.19$ W/m²K. Il numero di Biot è quindi pari a $121.19 \times 0.03 / 45 = 0.0808$.

In base a questo nuovo numero di Biot e alla percentuale di riscaldamento dalla Tabella 3 ricaviamo $X = 0.4954$. Si ottiene quindi $\theta = 0.4954 \times 500 \times 7850 \times 0.03 / 121.19 = 481$ s, corrispondenti a 8 min.

2. Si voglia riscaldare da 20 °C a 300 °C una lastra di materiale refrattario di 80 mm di spessore, mediante irraggiamento da parte di una fonte di calore a 700 °C; sia 0.8 il valore del grado di nero mutuo. Sia inoltre $c = 1200$ J/kgK; $\rho = 2000$ kg/m³; $\lambda = 1.5$ W/mK.

In prima approssimazione la temperatura superficiale media della piastra è pari a $(20+300)/2 = 160$ °C. Dalla Tabella 4 ricaviamo al solito il valore di Y che è pari a 90.5; abbiamo quindi che $\alpha = 0.8 \times 90.5 = 72.4$ W/m²K. Il numero di Biot è pari a $72.4 \times 0.08 / 1.5 = 3.86$.

La percentuale di riscaldamento è pari a $280/680 = 0.412 = 41.2\%$. Dalla Tabella 6 otteniamo $t_s/t_m = 1.842$; come si vede tale valore è molto elevato e richiederà più passaggi per pervenire a valori di Bi vicini al vero.

La temperatura superficiale della piastra alla fine del processo è quindi pari a $1.842 \times 300 = 552.6$ °C; la temperatura superficiale media è quindi pari a $(20+552.6)/2 = 286.3$ °C. Il nuovo valore di Y è quindi pari a 109.54; quindi $\alpha = 87.63$ W/m²K e Bi = 4.67.

Dalla Tabella 6 otteniamo $t_s/t_m = 1.9084$ per cui la temperatura superficiale della piastra alla fine del processo è pari a 572.5 °C e la temperatura superficiale media è pari a 296.26 °C. Il nuovo valore di Y è pari a 111.23; quindi $\alpha = 88.98$ W/m²K e Bi = 4.74.

Dalla Tabella 6 otteniamo $t_s/t_m = 1.914$ per cui la temperatura della piastra a fine processo è pari a 574.2 °C e quella media superficiale è pari a 297.1 per cui $Y = 111.38$, $\alpha = 89.1$ W/m²K e Bi = 4.752.

A questo punto l'avvicinamento all'effettivo valore di Bi può considerarsi concluso e dalla Tabella 3 ricaviamo $X = 1.227$. Si ha quindi $\theta = 1.227 \times 1200 \times 2000 \times 0.08 / 89.1 = 2644$ s, corrispondenti a circa 44 minuti.