Relazioni di laboratorio

Squadra n° 2

Sperimentazione sui propulsori
Proff. Aldo Coghe

Anno accademico 2002/2003
Anselmo Recanati
Matricola n° 643692

INDICE:

I ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calibrazione statica di un sensore di pressione pag 1

II ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Analisi statistica delle misure di temperatura di una termocoppia pag 5

III ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Analisi di misure dinamiche pag 8

IV ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calibrazione dinamica di termocoppie pag 10

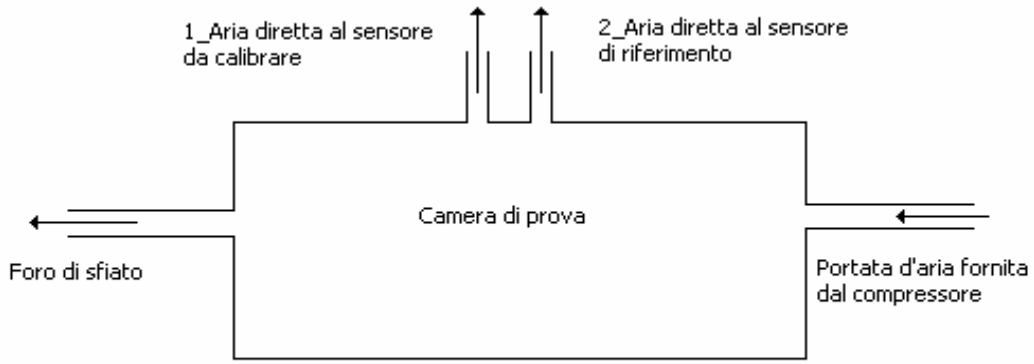
V ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calcolo dell'emissività superficiale di un corpo pag 18

VI ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calcolo del coefficiente di efflusso di un ugello pag 20

I ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calibrazione statica di un sensore di pressione

Lo scopo dell'esperimento svolto in laboratorio consiste nel calibrare un misuratore di pressione prendendo come riferimento uno strumento già calibrato.

L'apparato utilizzato per il test è costituito da due elementi principali: un regolatore di portata e una camera di misurazione. Dal regolatore di portata è possibile controllare il valore percentuale della portata massima (pari a 200 Nl/min) in uscita da un compressore ad aria; la camera di misurazione come si vede nella figura, è un cilindro cavo che presenta un foro di ingresso e uno di uscita. Sulla parete esterna del cilindro, nella zona mediana, ci sono due aperture collegate tramite manicotti ai due strumenti di misura della pressione; le due aperture sono molto vicine in modo tale da garantire condizioni di misura pressoché identiche tra loro. Il foro di uscita permette lo sfiato dell'aria così da evitare sovrapressione nella camera e un conseguente fallimento nella fase di taratura.

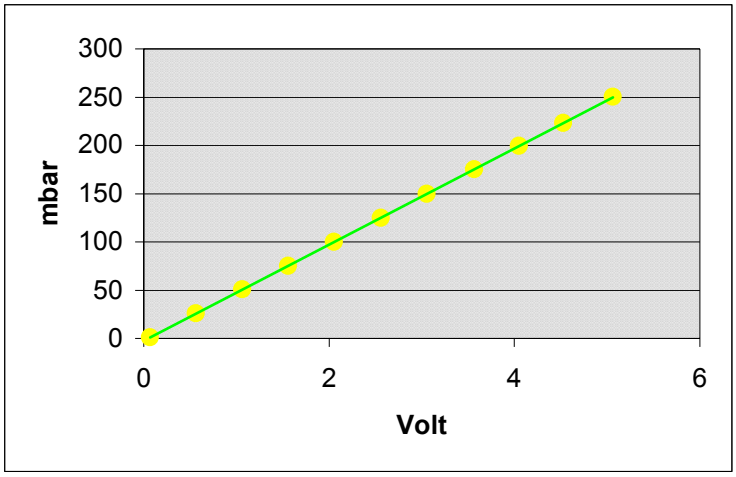


Lo strumento da calibrare restituisce in output una misura espressa in volt, mentre lo strumento campione esprime la misura in mbar.

Prima di procedere all'acquisizione dei dati è necessario regolare lo zero. Questa operazione è possibile variando la tensione con la quale viene alimentato il sensore di pressione in volt. Tale valore viene fornito dal costruttore mediante un certificato su cui inoltre sono riportati i valori di calibrazione per lo strumento (tabella 1). Nel nostro caso l'errore di zero è 6.5 mV.

In WC	Volt	mbar
0.4687	0.0683	1.166313
10.3259	0.5616	25.69497
20.4215	1.0667	50.81686
30.2287	1.5575	75.2211
40.1483	2.0543	99.90503
50.2752	2.5617	125.1048
60.0888	3.0524	149.525
70.3626	3.5646	175.0903
80.1472	4.0521	199.4383
89.7113	4.5275	223.2376
100.492	5.0619	250.0643

Tabella 1

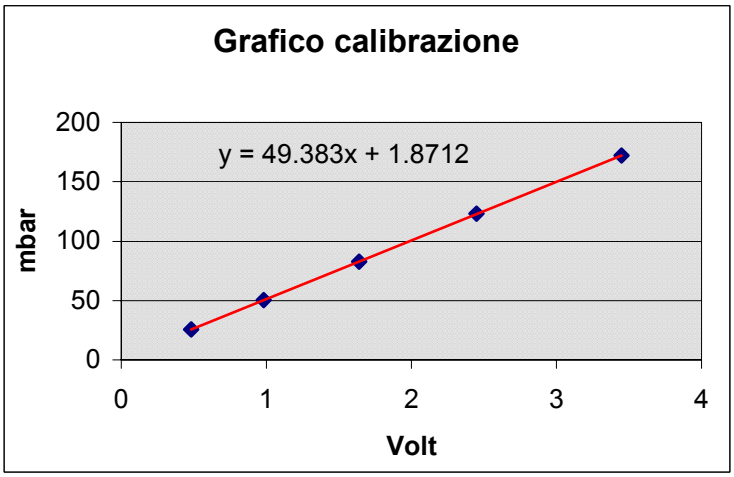


Una volta tarato lo zero, si procede con la calibrazione, che avviene confrontando il valore della misura fornita dallo strumento da calibrare con quella espressa dallo strumento campione. Questa rilevazione si effettua attraverso 5 misurazioni successive, ciascuna delle quali è associata ad una diversa portata d'aria in ingresso (tabella 2).

Portata %	Volt	mbar
10	0.48	25.7
14	0.98	50.2
18	1.64	82.5
22	2.45	123.3
26	3.45	172.1

Tabella 2

Riportando i valori della tabella 2 su un grafico, e facendo la regressione lineare dei punti, otteniamo la retta di interpolazione che costituisce la curva di calibrazione del sensore.



Come si evince dal grafico, l'equazione della curva di calibrazione è

y_{sper} =49.383x+1.8712.

La curva ci permette di effettuare una stima sulle y previste:

Volt	STIMA(y)
0.48	25.57486733
0.98	50.26620546
1.64	82.8587718
2.45	122.8587396
3.45	172.2414158

Il fattore di correlazione al quadrato, R^2, è

R^2=0.999973316,

molto prossimo a 1.

L' errore di interpolazione invece è

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (y_i - STIMA(y_i))^2}{N-2}} = 0.348074587,$$

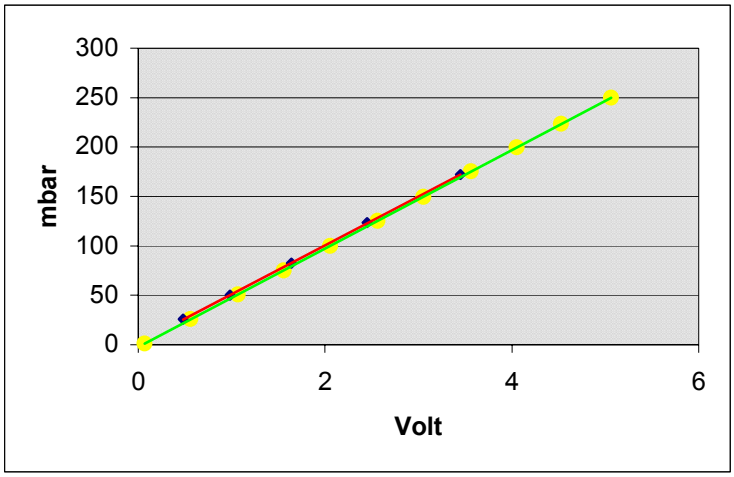
dove N=5 è il numero di misurazioni effettuate.

L'errore sistematico dello strumento, valutato su N-2 misurazioni, è

$$\varepsilon = t_{3,95} * \sigma = 3.182 * \sigma = 1.107573336$$

dove $t_{3,95}$ è la t della funzione di Student al 95% di probabilità e a N-2 misurazioni.

Da un confronto finale tra i dati ottenuti dalla calibrazione e quelli forniti dal costruttore si nota come la curva di calibrazione sperimentale sia compatibile con quella del costruttore.



II ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Analisi statistica delle misure di temperatura di una termocoppia

Lo scopo dell'esperimento svolto in laboratorio consiste nel misurare, per mezzo di una termocoppia, la temperatura di una friggitrice contenente acqua riscaldata con una fiamma di gas metano.

La termocoppia, costituita da due sonde, è immersa nella fiamma in due punti diversi. Si utilizza un potenziometro a 16 bit e canale con intervallo 0÷10 V. Questo riceve dal sensore una differenza di potenziale e converte il segnale da analogico a digitale affinché sia acquisito da un PC, il quale provvede a commutare la tensione in temperatura.

Successivamente si procede ad un'analisi critica dei valori ottenuti.

Sono state effettuate due serie di rilevazioni, entrambe con una frequenza di campionamento di 100 Hz: la prima di 500 campioni, la seconda di 5000.

PRIMA ACQUISIZIONE

Numero campioni: $N = 500$

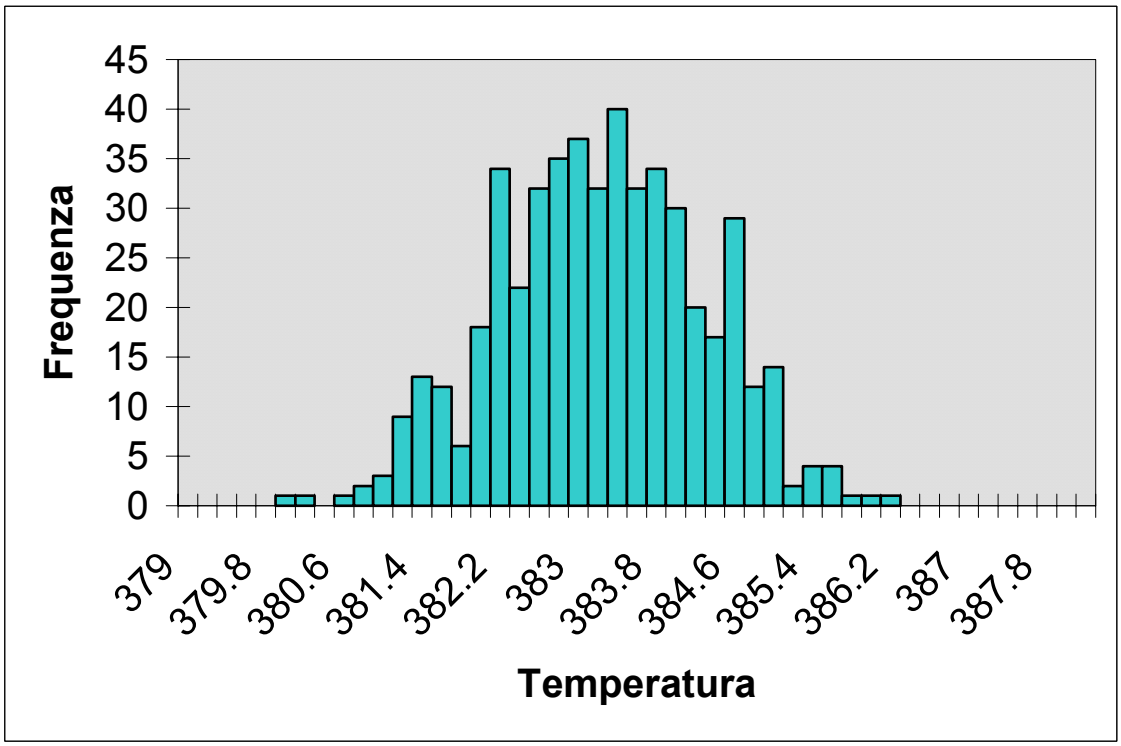
Tempo di acquisizione: $T = 5$ s

Valore medio: $\overline{X} = 383.1425$ °C

Deviazione standard: $\sigma = 1.054344$ °C

Errore statistico: $\varepsilon = t_{N-1,95} * \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 0.092417$ °C con $t_{N-1,95} = 1.960$

Istogramma dei dati:



SECONDA ACQUISIZIONE

Numero campioni: $N = 5000$

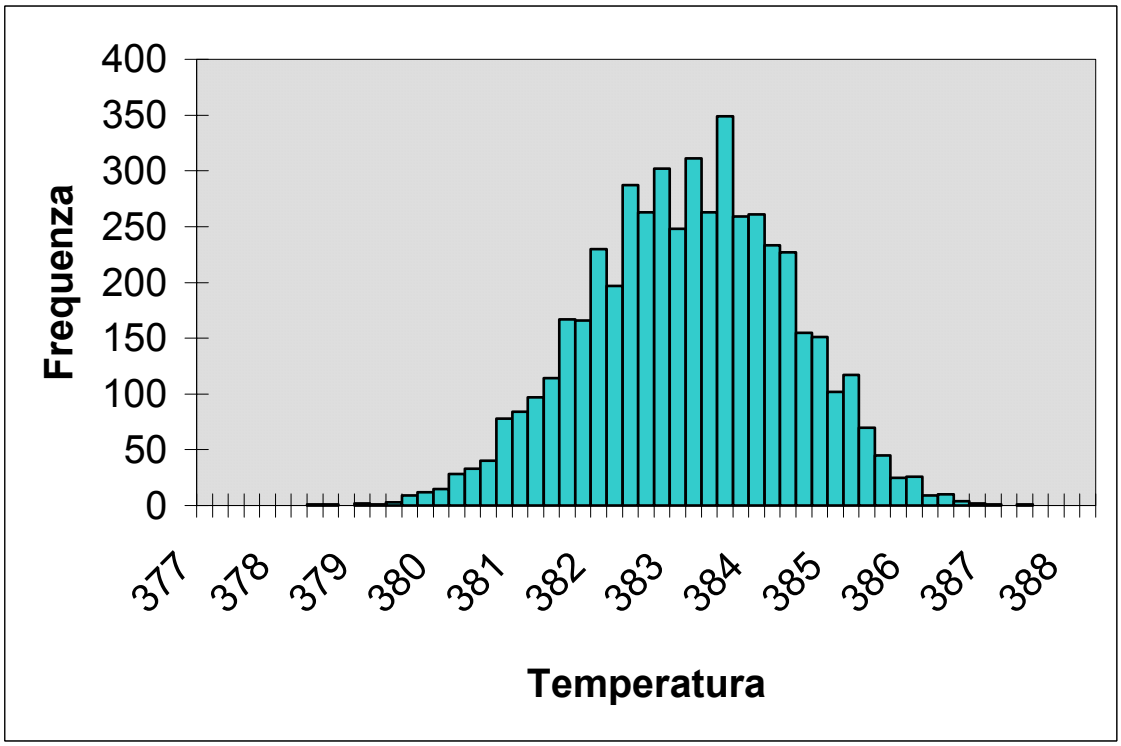
Tempo di acquisizione: $T = 50$ s

Valore medio: $\overline{X} = 383.0367$ °C

Deviazione standard: $\sigma = 1.275369$ °C

Errore statistico: $\varepsilon = t_{N-1,95} * \frac{\sigma}{\sqrt{N}} = 0.035351$ °C con $t_{N-1,95} = 1.960$

Istogramma dei dati:



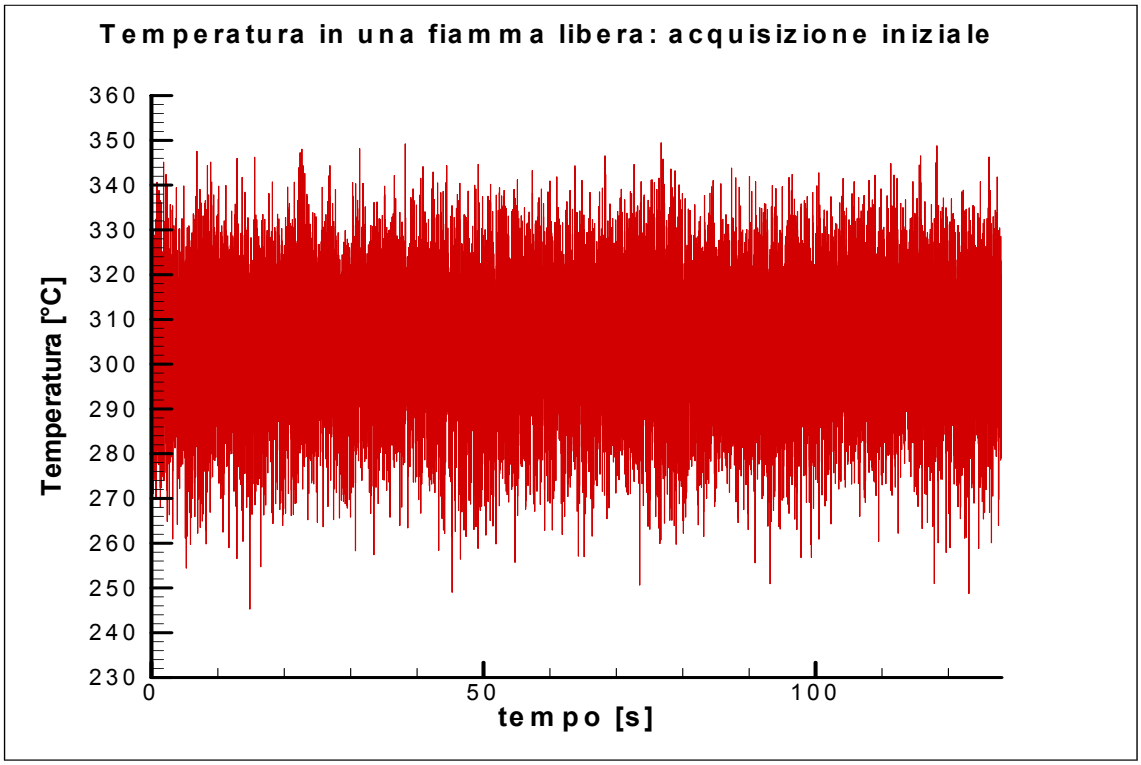
Confrontando i risultati delle due esperienze si nota come all'aumentare del numero di campioni la distribuzione dei dati approssima meglio la curva di Gauss e si ha una crescita del valore della deviazione standard. Come previsto inoltre l'errore statistico diminuisce in quanto il valor medio è più vicino al valore vero.

III ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Analisi di misure dinamiche

Scopo dell'esperimento è fare l'analisi in frequenza dei dati acquisiti da una termocoppia posta alla base di una fiamma di gas naturale.

La termocoppia è collegata ad una scheda di acquisizione che converte il segnale da analogico a digitale in modo tale che i dati possano essere rielaborati dalla macchina e poi visualizzati con l'ausilio del programma LabView.

Si sono acquisiti 64000 dati con una frequenza di campionamento di 500 Hz.



Lo spettro delle fluttuazioni attorno al valore medio è compreso in un intervallo che va da 250 fino a 350 °C. La media dei dati dello spettro è 305.949 °C.

Ai fini di un'analisi più accurata è necessario applicare un filtro al segnale in modo tale da eliminare le componenti in frequenza indesiderate.

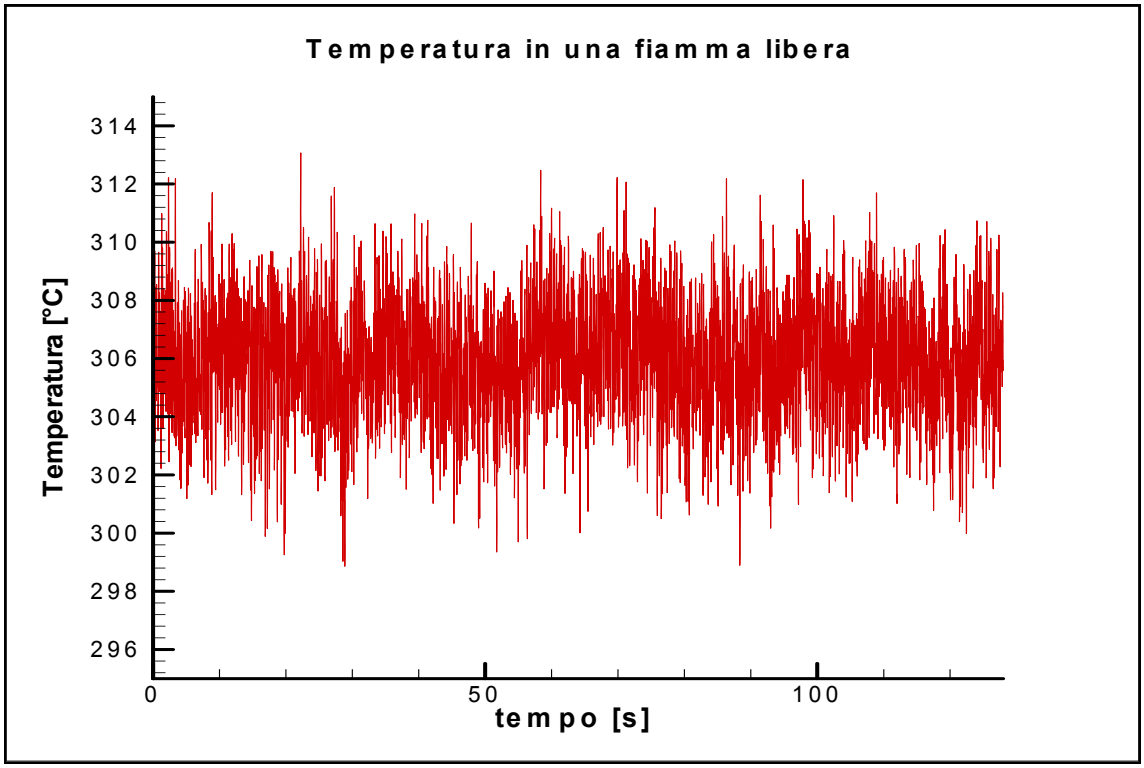
Nel nostro caso si è passati da 64000 a 16000 campioni mediando ogni 4 dati originali. Così facendo non sono state modificate le condizioni temporali (intervallo di acquisizione) ed è rimasta invariata la risoluzione in frequenza. Infatti:

$$\Delta f_1 = \frac{1}{N_1 \Delta t_1} = \frac{1}{N_2 \Delta t_2} = \Delta f_2$$

dove $N_1=64000$ e $\Delta t_1=0.002$

mentre $N_2=16000$ e $\Delta t_2=0.008$

Il grafico così ottenuto è:



Confrontando i due grafici si nota come il secondo segnale si discosti molto meno dal valore medio.

IV ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calibrazione dinamica di termocoppie

Scopo dell'esperimento è la calibrazione dinamica di due termocoppie di tipo B (Pt-Rh 6%, Pt-Rh 30%), una con giunto caldo scoperto di morfologia sferica e una con giunto caldo schermato da materiale ceramico. Queste termocoppie sono impiegate prevalentemente per misurare elevate temperature (~ 1800°C) e hanno come valore minimo di calibrazione 100°C.

L'apparato è costituito da un bruciatore alimentato da una miscela metano-aria che genera una fiamma "ad ali di farfalla" o "a cono inverso".

La termocoppia, immersa nella fiamma, è collegata ad una scheda di acquisizione che converte il segnale da analogico a digitale in modo tale che i dati possano essere rielaborati dalla macchina per poi essere visualizzati con l'ausilio del programma LabView.

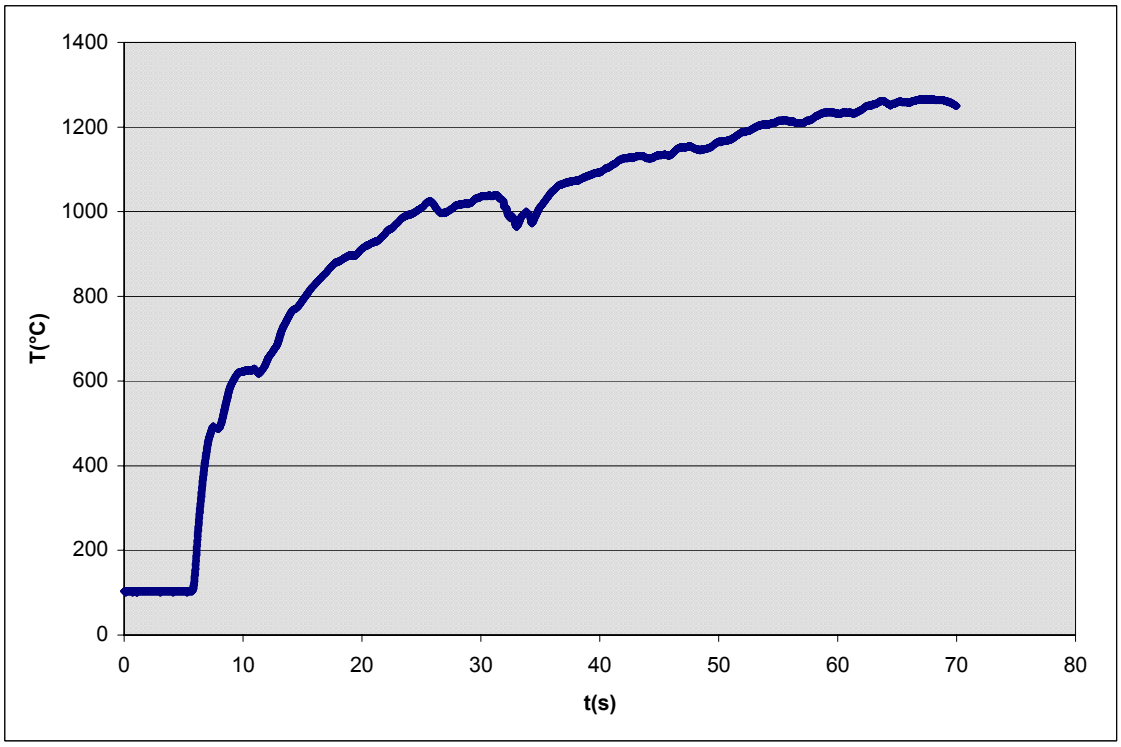
Sono state effettuate due serie di rilevazioni, la prima con giunto caldo scoperto e la seconda con giunto schermato.

PRIMA ACQUISIZIONE

Frequenza di campionamento: $f_C = 100$ Hz

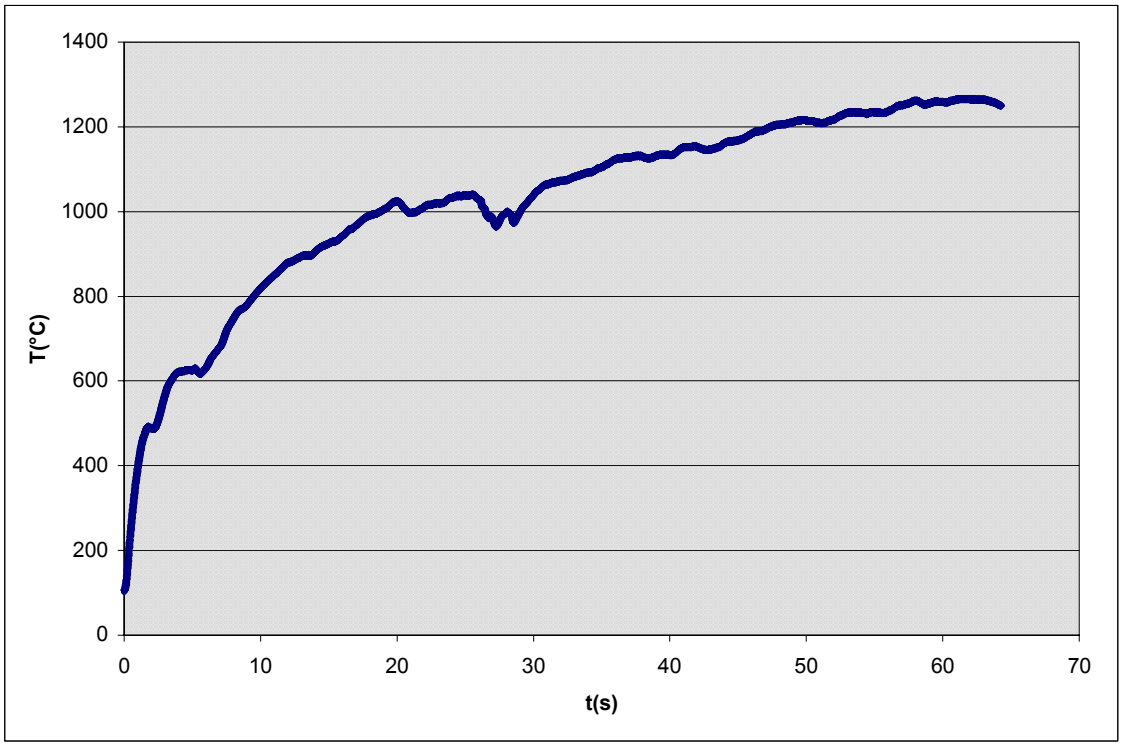
Numero campioni: $N = 7000$

Tempo di acquisizione: $T = 70$ s



Osservando il grafico si nota che il tempo di salita è molto rapido (dinamica molto veloce) e non è possibile identificare un valore di regime a causa dell'elevata instabilità dovuta alle fluttuazioni della fiamma che il giunto, proprio perché scoperto, percepisce maggiormente (maggiore sensibilità).

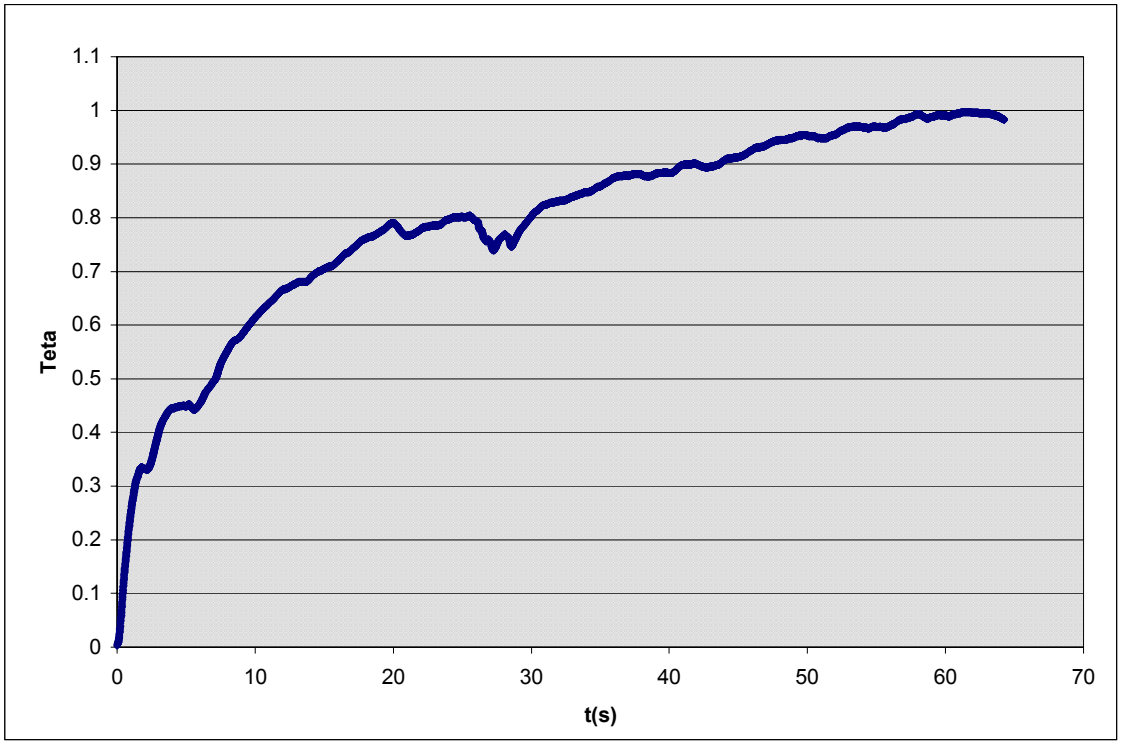
Il primo passo consiste nel considerare solo quella parte di grafico che ci permette di effettuare una calibrazione dinamica corretta. Questo vuol dire trascurare i valori costanti a 100°C rilevati nei primi 5.74 secondi di misurazioni.



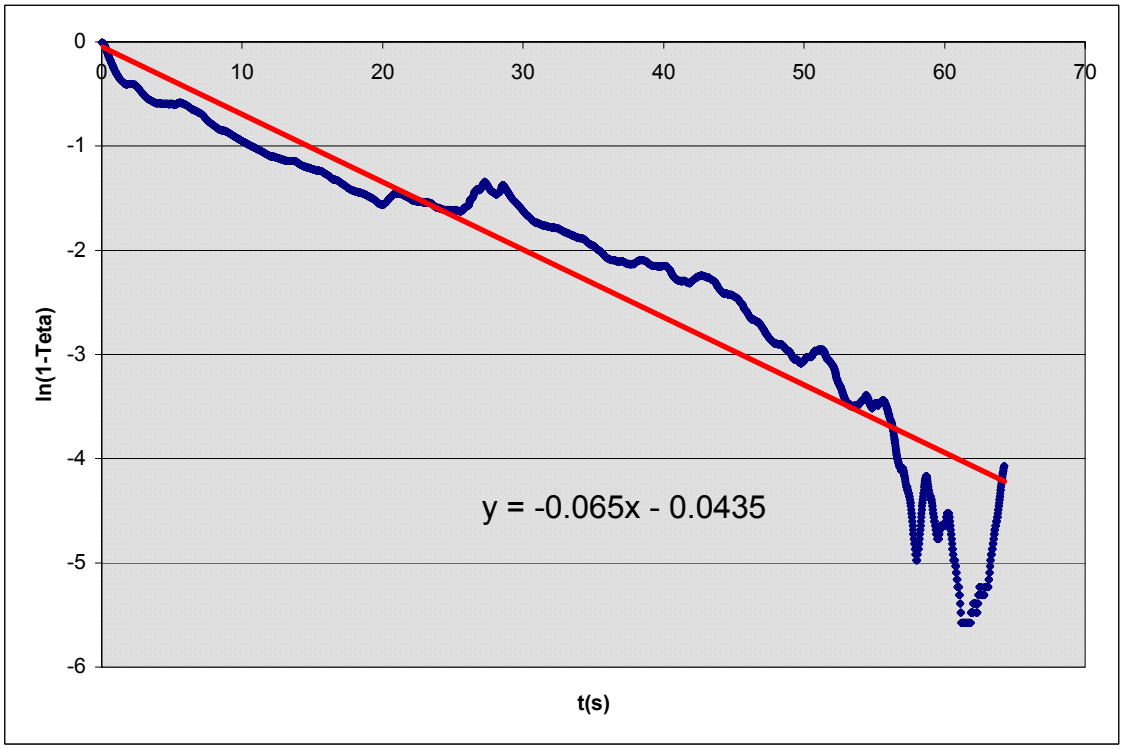
Si passa poi all'adimensionalizzazione della temperatura. Indichiamo con θ la temperatura adimensionale:

$$\theta = \frac{T_S - T_0}{T_g - T_0}$$

dove T_s è la temperatura della sonda, T_0 è la temperatura di riferimento, che in questo caso vale 100 °C , e T_g è la temperatura di regime uguale a 1270 °C.



Per eseguire l'analisi di regressione lineare del grafico sopra riportato si passa al logaritmo naturale dell'errore dinamico. Ponendo y = ln(1-θ) e x = t, si ottiene il seguente grafico:



Nel grafico è rappresentata la retta di regressione di equazione y = -0.065x –0.0435. Da questa si ricava il tempo caratteristico t_c:

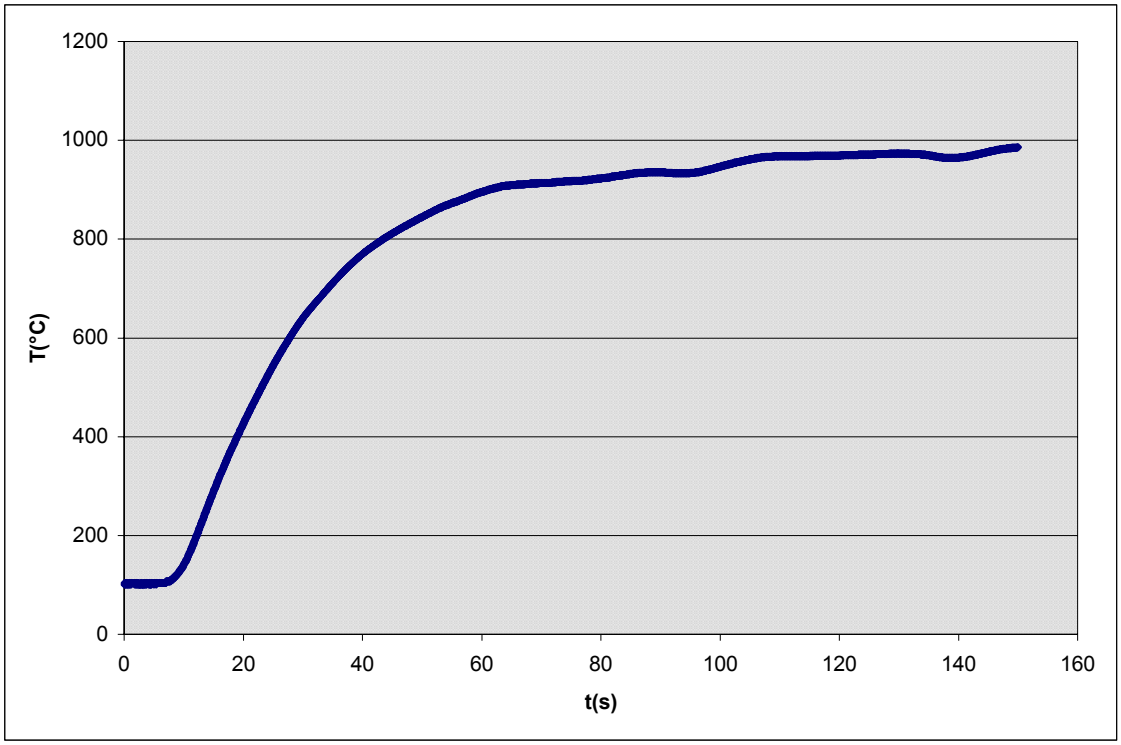
$$t_c = -\frac{1}{-0.065} = 15.38\,\mathrm{s}$$

SECONDA ACQUISIZIONE

Frequenza di campionamento: $f_C = 20$ Hz

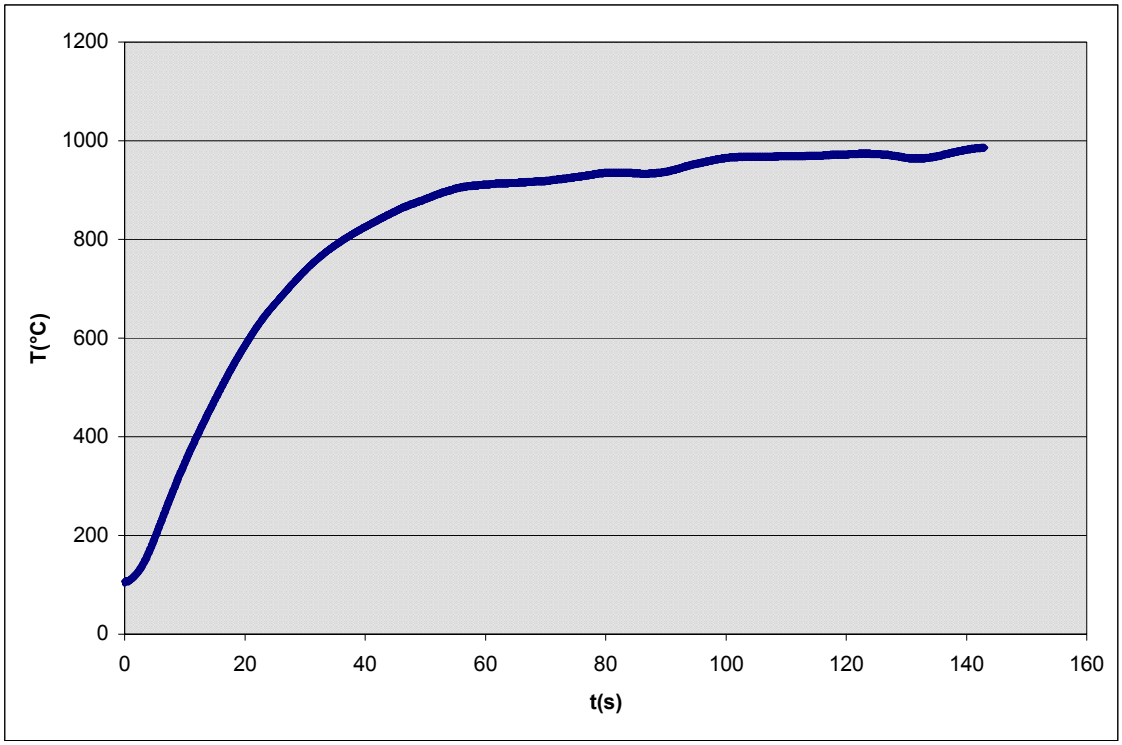
Numero campioni: $N = 3000$

Tempo di acquisizione: $T = 150$ s



In questo caso si nota che la dinamica è molto più lenta, proprio per questo il segnale viene campionato ad una frequenza inferiore. Il sensore, essendo ricoperto da una guaina di 4 mm, ha una superficie di acquisizione maggiore rispetto al giunto scoperto di diametro 0.35 mm. Il segnale risente molto meno delle fluttuazioni della fiamma poiché l'integrazione avviene su una zona più ampia. E' quindi possibile definire una temperatura di regime.

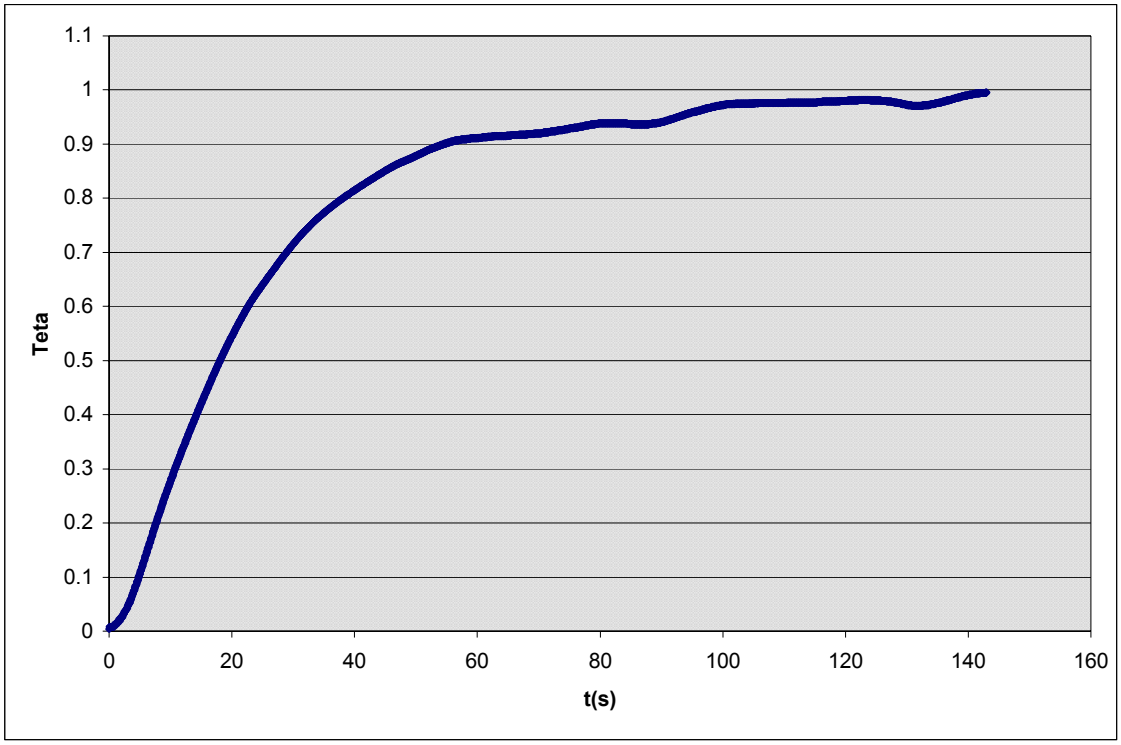
Come nel caso precedente si considera solo quella parte di grafico che ci permette di effettuare una calibrazione dinamica corretta. Si trascurano quindi i valori costanti a 100°C rilevati nei primi 6.95 secondi di misurazioni.



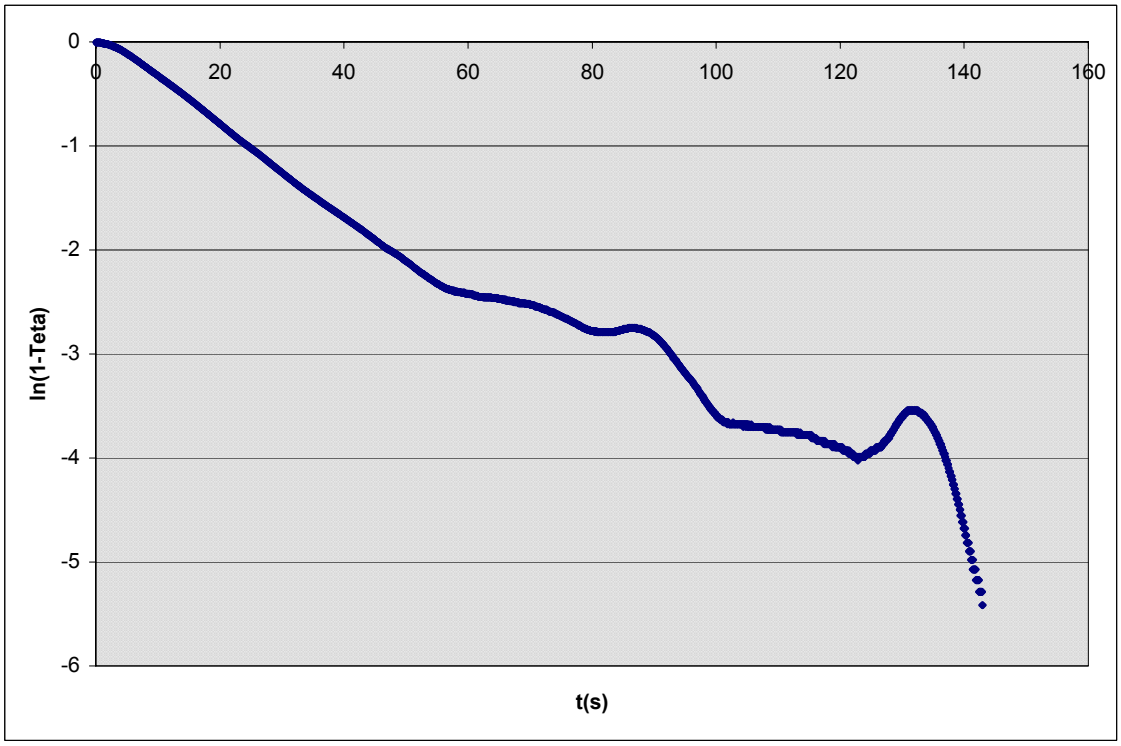
Si passa poi all'adimensionalizzazione della temperatura. Indichiamo con θ la temperatura adimensionale:

$$\theta = \frac{T_S - T_0}{T_g - T_0}$$

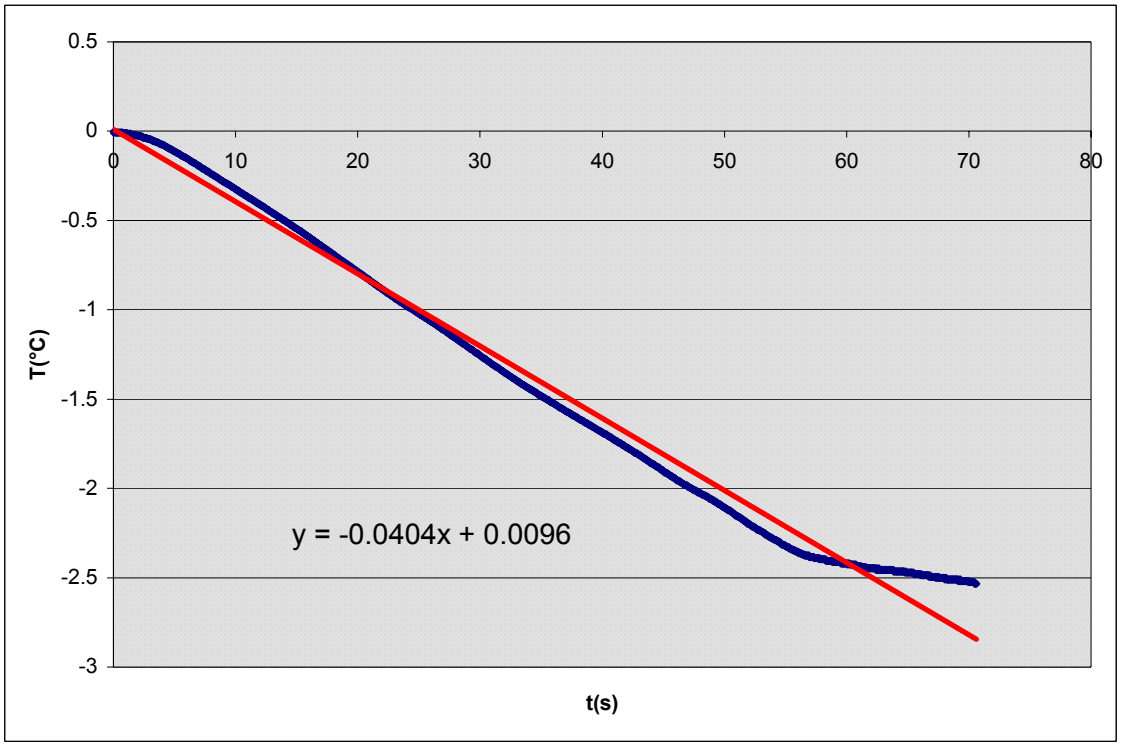
dove T_s è la temperatura della sonda, T_0 è la temperatura di riferimento, che in questo caso vale 100 °C , e T_g è la temperatura di regime uguale a 990 °C.



Per eseguire l'analisi di regressione lineare del grafico sopra riportato si passa al logaritmo naturale dell'errore dinamico. Ponendo y = ln(1-θ) e x = t, si ottiene il seguente grafico:



Si considerano i valori compresi nell'intervallo di tempo che va da 0 a 70.6 secondi. La nostra scelta non è casuale, ma dettata dalla necessità di avere una retta in grado di approssimare nel miglior modo possibile l'andamento dei valori e nello stesso tempo di trovare un buon tempo caratteristico (t_c). Non si considera il tratto finale perché irregolare.



Nel grafico è rappresentata la retta di regressione di equazione y = -0.0404x – 0.0096. Da questa si ricava il tempo caratteristico t_c:

$$t_c = -\frac{1}{-0.0404} = 24.75 \text{ s}$$

Confrontando le due acquisizioni si nota come nel caso di giunto scoperto il tempo caratteristico sia inferiore rispetto al giunto schermato. Questo rispecchia le osservazioni fatte precedentemente riguardo l'andamento dei grafici di acquisizione.

V ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calcolo dell'emissività superficiale di un corpo

Scopo dell' esperimento è la misura dell' emissività di un bruciatore industriale tramite due rilevazioni della temperatura superficiale , una con termocoppia e l'altra con pirometro ottico.

Il bruciatore su cui avviene la misurazione è formato da un condotto verticale composto da due tubi concentrici; in quello interno, in lega ceramica, brucia una fiamma alimentata da una miscela metano-aria immessa dall'ingresso superiore mentre inferiormente vengono espulsi i gas combusti che risalgono nell'intercapedine tra i due condotti.

La misurazione viene effettuata sulla parte bassa del condotto per non risentire della presenza della fiamma e quindi rilevare un valore di temperatura che rimanga al di sotto dei 500 °C pari al fondoscala del pirometro ottico.

La termocoppia usata è di tipo "k". Questa ha al suo interno un sensore che compensa la temperatura ambiente in modo tale da visualizzare direttamente la temperatura reale. Inoltre ha una certa inerzia termica, perciò è necessario attendere alcuni secondi prima di rilevare il valore esatto.

Il pirometro ottico con termoresistenza è tarato per misurare la temperatura di un corpo nero ($\varepsilon = 1$), pertanto il valore ottenuto non è quello esatto. La temperatura misurata dallo strumento è la temperatura "di brillanza", cioè quella di un corpo nero che emette la stessa radianza totale. Per questo motivo la temperatura di brillanza sarà sicuramente inferiore rispetto a quella della termocoppia.

In condizioni di equilibrio termico è però possibile regolare manualmente sul pirometro il coefficiente di emissività in modo che restituisca un risultato il più possibile vicino a quello della termocoppia: per esempio passando da 1 a 0.9 si ottiene una misura di temperatura più elevata.

Il pirometro ottico ha un tempo di salita breve, infatti va a regime dopo 0.5 secondi; per leggere un valore corretto di temperatura è necessario stare molto vicini alla fonte di calore da misurare per non allargare troppo il campo visivo raccolto dallo strumento e non falsare così la rilevazione effettuata. Infatti allontanando lo strumento dal corpo la temperatura di brillanza diminuisce.

Per calcolare l'emissività ε usiamo la seguente relazione:

$$1 - \frac{T_{pir}}{T_{tcoppia}} = 1 - \varepsilon^{\frac{1}{4}}$$

cioè

$$\varepsilon = \left(\frac{T_{pir}}{T_{tcoppia}} \right)^4$$

dove T_{pir} è la temperatura apparente o di brillanza, e $T_{tcoppia}$ è la temperatura reale del corpo.

Nel nostro caso (prima squadra ad entrare in laboratorio) il bruciatore non aveva ancora raggiunto la condizione di equilibrio termico. Per ovviare a questa situazione si è cercato di effettuare le due misurazioni in modo simultaneo. Queste hanno restituito i seguenti valori:

$T_{pir} = 313$ °C

$T_{tcoppia} = 324$ °C

da cui si ottiene ε=0.871.

Nel caso di equilibrio termico le misurazioni non vengono effettuate simultaneamente. Questo è un vantaggio perché permette di rilevare la temperatura nello stesso punto. I valori ottenuti sono:

$T_{pir} = 410$ °C

$T_{tcoppia} = 425$ °C

da cui ε=0.866

Per curiosità si è puntato il pirometro ottico in direzione del sole. Questo ha restituito una temperatura tra i 30 °C e gli 80 °C, del tutto errata rispetto alla reale temperatura solare (~5800 K). L' errore è dovuto al fatto che il campo visivo raccolto dal pirometro è molto ampio e di questo il sole ne occupa solo una minima parte. Quindi facendo una media su tutto lo spazio che cade nel cono visivo del pirometro i valori ottenuti si avvicinano maggiormente alla temperatura ambiente piuttosto che a quella solare.

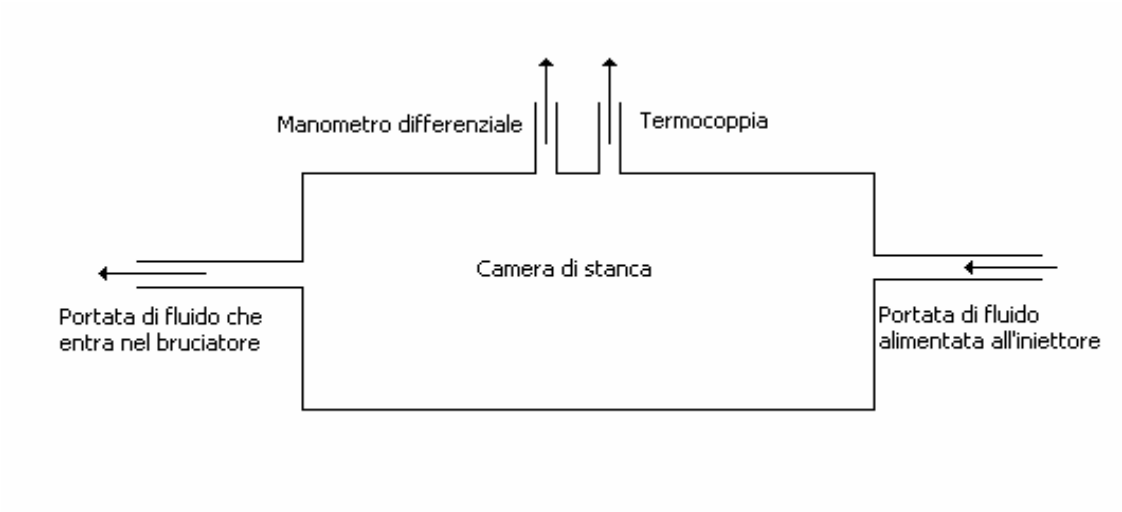
VI ESERCITAZIONE DI LABORATORIO: Calcolo del coefficiente di efflusso di un ugello

Scopo dell' esperimento è la misura del coefficiente di efflusso di un ugello al variare dei parametri caratteristici di funzionamento (Reynolds, Mach).

Il coefficiente di efflusso

$$C_D = \frac{m_{reale}}{m_{teorica}}$$

è un numero adimensionale definito come il rapporto tra la portata reale iniettata (m_{reale}) e quella massima ottenibile da un flusso isoentropico ($m_{teorica}$), calcolata conoscendo il diametro dell'ugello (2.7 mm) e le condizioni di prova che sono il valore della temperatura e la differenza di pressione fra la camera di stanca e l'ambiente circostante (pressione atmosferica).



La misura del coefficiente di efflusso viene svolta al variare della portata di fluido alimentata all'iniettore. Ad ogni valore di portata alimentata all'iniettore (nel nostro caso si alimenta metano), vengono misurati temperatura del flusso , tramite termocoppia, e differenza di pressione, con un manometro differenziale, tra la camera di stanca e l'ambiente esterno.

Per poter calcolare quanto vale la $m_{teorica}$ dove

$$m_{teorica} = \rho V_{teorica} A$$

bisogna conoscere la $V_{teorica}$. Ipotizzando che il profilo di velocità sia uniforme nella sezione di efflusso e che siano soddisfatte le ipotesi del teorema di Bernoulli si trova:

$$V_{teorica} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}}$$

$\Delta p =$ differenza di pressione tra camera di stanca e ambiente esterno;

$\rho =$ densità del fluido alimentato all'iniettore.

La densità si ricava dall'equazione di stato dei gas perfetti:

$$\rho = \frac{pw}{\Re T}$$

$p =$ pressione nella camera di stanca;

$w=$ peso molecolare del fluido iniettato (w_{metano}= 16 g/mol);

$\Re = 8.314 \frac{J}{molK}$, costante universale dei gas;

$T=$ temperatura nella camera di stanca.

La misura della portata di fluido avviene utilizzando un asametro cioè uno strumento dotato di galleggiante posto lungo la linea di alimentazione. Questo restituisce il valore della portata reale (m_{reale}) misurata in Nl/min.

Si sono effettuate undici rilevazioni successive, ciascuna delle quali è associata ad una diversa portata d'aria in ingresso (Tabella 1),

Portata (Nl/min)	Pressione differenziale (Pa)	Temperatura (K)
20	1630	303.27
19	1520	303.35
18	1360	303.45
17	1220	303.45
16	1100	303.45
15	950	303.45
14	820	303.55
13	680	303.55
12	540	303.65
11	420	303.65
10	280	303.55

Tabella 1

Sostituendo i valori acquisiti nelle formule riportate precedentemente otteniamo questi nuovi valori (Tabella 2):

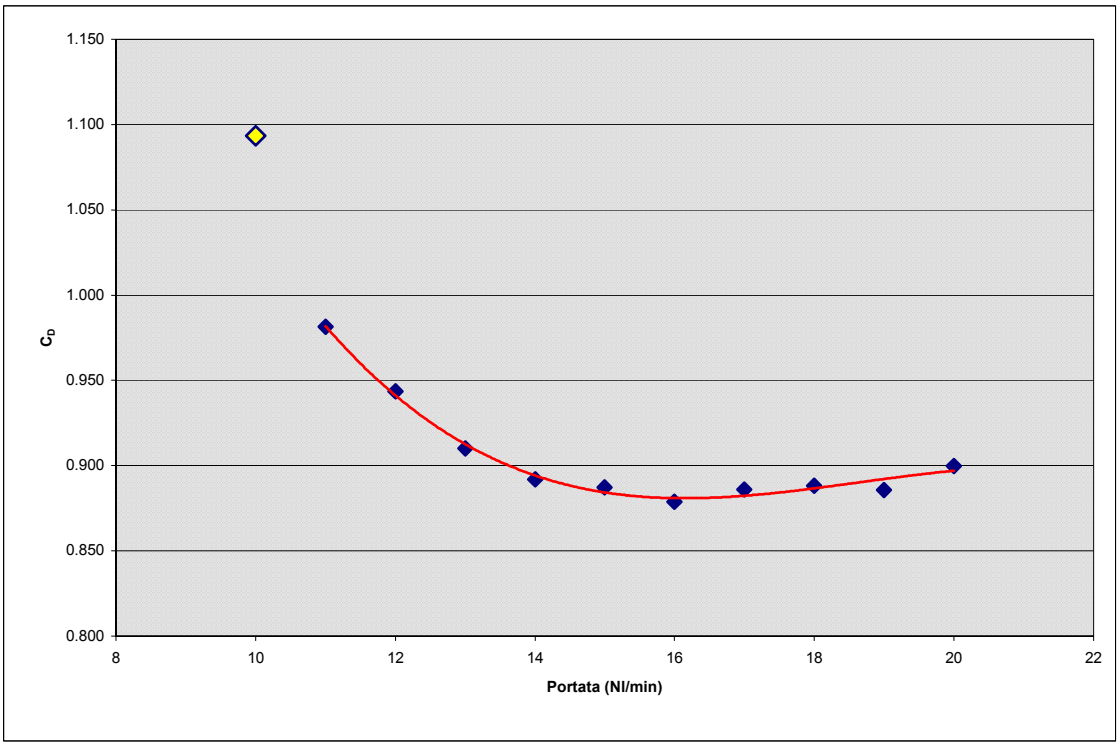
Densità (kg/m^3)	Velocità teorica (m/s)
0.653	70.639
0.652	68.259
0.651	64.628
0.650	61.253
0.650	58.197
0.649	54.123
0.648	50.324
0.647	45.858
0.646	40.901
0.645	36.092
0.644	29.485
Tabella 2	

Sapendo che l'area dell'ugello vale 5.73 mm^2, si può calcolare la portata teorica del flusso e quindi il coefficiente di efflusso C_D (Tabella 3):

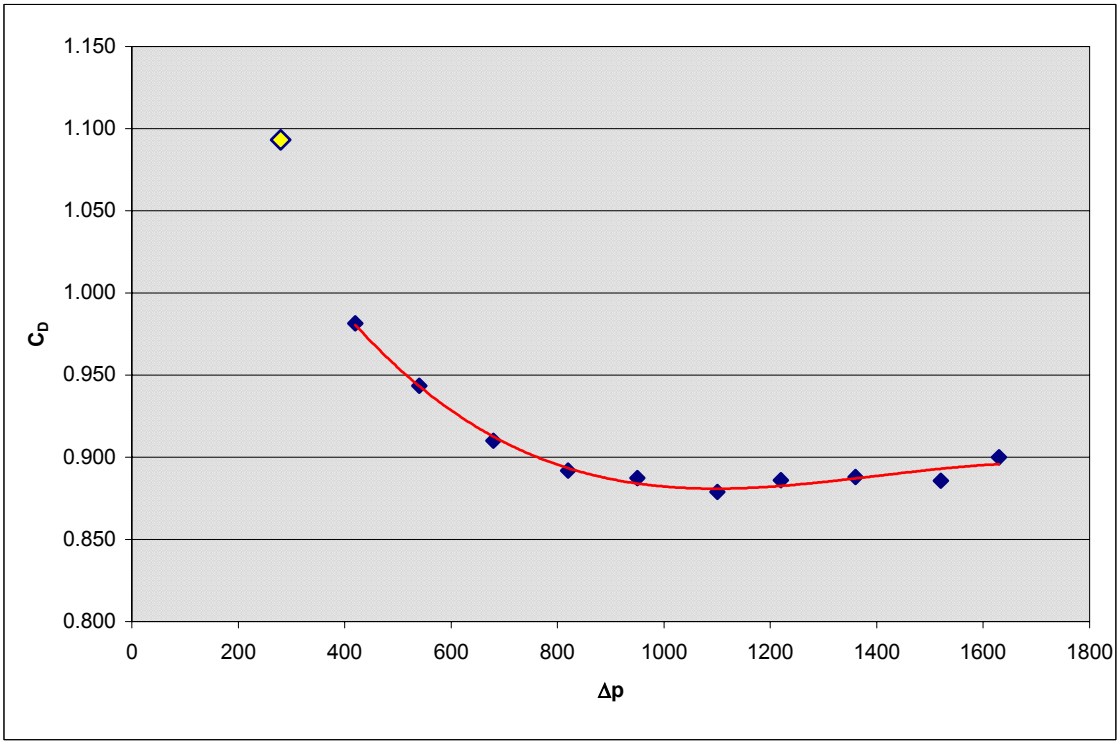
Portata reale		Portata teorica (kg/s)	Coefficiente di efflusso
Nl/min	kg/s		
20	2.38E-04	2.64E-04	0.900
19	2.26E-04	2.55E-04	0.886
18	2.14E-04	2.41E-04	0.888
17	2.02E-04	2.28E-04	0.886
16	1.90E-04	2.17E-04	0.879
15	1.78E-04	2.01E-04	0.887
14	1.67E-04	1.87E-04	0.892
13	1.55E-04	1.70E-04	0.910
12	1.43E-04	1.51E-04	0.944
11	1.31E-04	1.33E-04	0.981
10	1.19E-04	1.09E-04	1.093
Tabella 3			

Dalla Tabella 3 si nota che ad un valore di portata pari a 10 Nl/min, si ha un coefficiente di efflusso superiore a 1, che non è corretto. Ciò è imputabile ad errori nella misurazione.

L'andamento del coefficiente di efflusso al variare della portata reale è:



L'andamento del coefficiente di efflusso al variare della pressione differenziale (Δp) è:



Da ultimo, si può ricavare l'andamento del coefficiente di efflusso in funzione del numero di Reynolds e del numero di Mach:

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

$$Ma = \frac{V}{\sqrt{\gamma R T}}$$

dove V è la velocità reale data da:

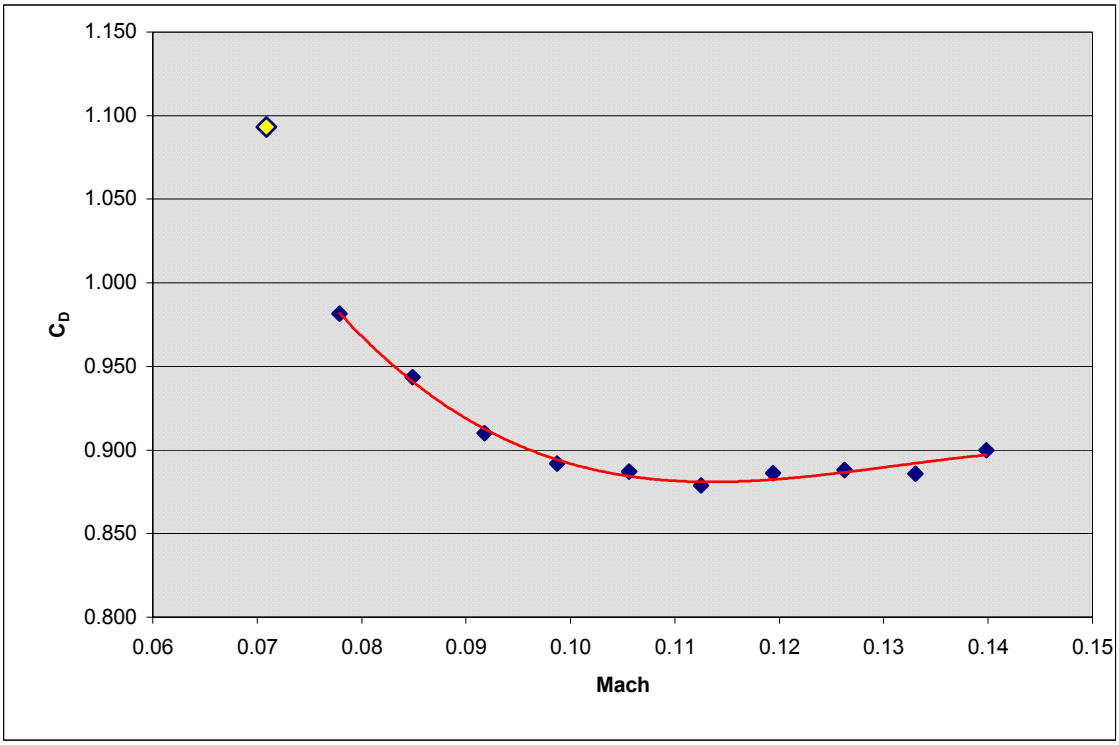
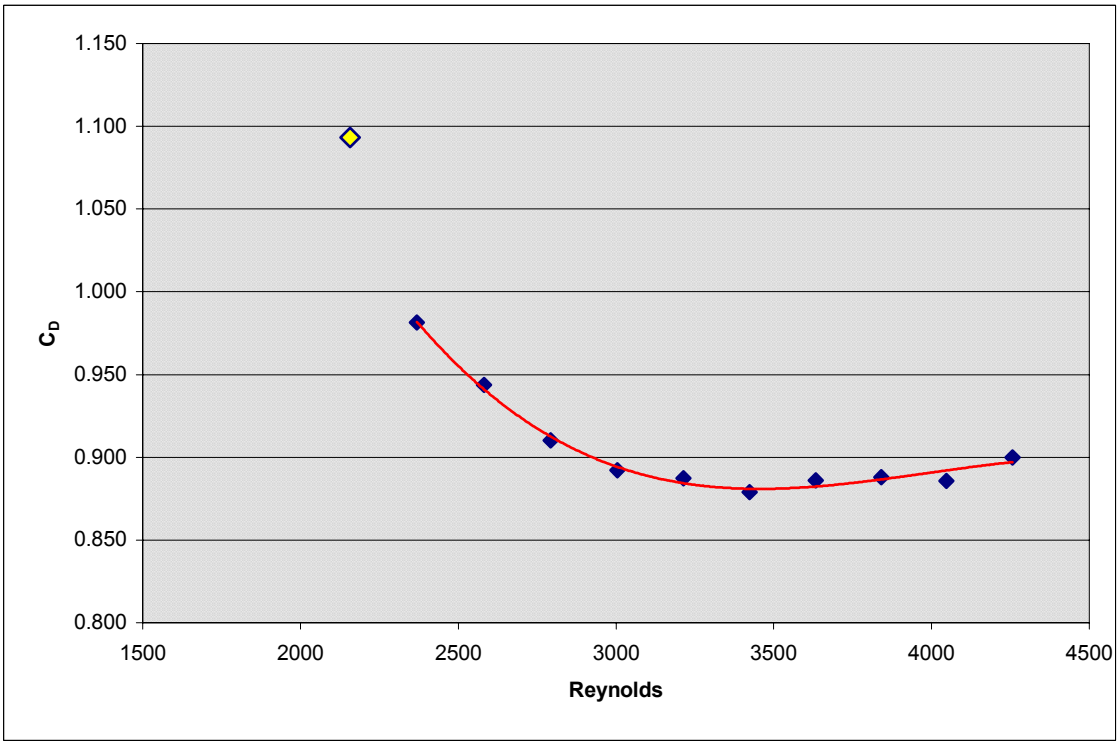
$$V = \frac{m_{reale}}{\rho A}$$

La viscosità cinematica del metano si trova interpolando linearmente i due valori a disposizione:

ν = 16,5E-6 m^2/s alla temperatura di 20 °C

ν = 18,44E-6 m^2/s alla temperatura di 40 °C

L'andamento del coefficiente di efflusso al variare del numero di Mach (γ=1.31 e R=520) è:



L'andamento del coefficiente di efflusso al variare del numero di Reynolds è: