

SCIENZA  FIRENZE

Tredicesima Edizione

*Le trasformazioni nei fenomeni naturali
La dimensione sperimentale nello studio delle scienze
Firenze, 14-15 aprile 2016*

SEZIONE TESINA TRIENNIO

Primo classificato

*Adriano Fazzo, Giacomo Maria Gaffuri,
Elia Bucchieri, Hannah Taylor Parker*

*Classi I D, II D, II E
Liceo Classico "Giovanni Berchet"
Milano*

Docente Coordinatore Prof.ssa Barbara Chierichetti

Titolo

Tubi, antenne e pistoni: alla scoperta della termodinamica

Motivazione

Ottima la corrispondenza con il tema proposto: la trasformazione di energia termica in energia meccanica con la realizzazione di una macchina termica capace di sollevare piccole masse. Precisa ed essenziale l'introduzione teorica. La progettazione e la costruzione dell'apparato sperimentale sono state accurate. Le misure sono state effettuate con l'uso di sensori di temperatura, di pressione e di movimento. Ben condotta l'analisi dei dati. La relazione è dettagliata e critica, mostrando una notevole consapevolezza delle operazioni effettuate e delle possibili cause di errore.

Relazione dell'insegnante allegata alla tesina dal titolo:
Tubi, antenne e pistone: alla scoperta della termodinamica

Il lavoro che ho preparato per questa edizione di ScienzaFirenze dal titolo: *Le trasformazioni nei fenomeni naturali, la dimensione sperimentale nello studio delle scienze* consiste nella realizzazione di una macchina termica capace di sollevare piccole masse.

L'idea è nata da una conversazione con il tecnico di laboratorio del Liceo Scientifico Statale di Milano "L. Cremona" che ha collaborato concretamente alla costruzione del dispositivo e che ha sostenuto la fase iniziale dei lavori fornendo utili consigli.

La proposta di questo esperimento è stata rivolta principalmente a studenti del quarto anno del liceo, anno in cui è previsto l'insegnamento della termodinamica in fisica, ed è stata accolta da tre studenti del quarto anno e da una studentessa del terzo.

Per preparare i ragazzi alla comprensione del fenomeno studiato e per renderli più consapevoli delle operazioni che avrebbero eseguito, ho svolto un breve percorso teorico di tre incontri in cui ho introdotto alcuni concetti di base, come il modello del gas perfetto e la sua equazione di stato, il primo principio della termodinamica e la sua applicazione alle trasformazioni dei gas, le macchine termiche e i cicli termodinamici.

Le lezioni teoriche, come del resto tutta l'attività sperimentale, si sono svolte nel Laboratorio di Fisica della scuola durante incontri pomeridiani di due ore con cadenza settimanale.

Per costruire la macchina termica abbiamo utilizzato del materiale povero come una siringa di vetro da 50cm³, un recipiente di alluminio di 150cm³ con un tappo di gomma e dei tubi di plastica per collegare le parti.

Per eseguire le misure, invece, ci siamo serviti del sistema di acquisizione di cui è dotato il laboratorio del liceo, utilizzando i sensori di temperatura e di pressione e, in un secondo momento, anche quello di posizione.

Scopo dei dati raccolti era eseguire due misure indipendenti del lavoro compiuto dalla macchina e confrontarne i valori.

Il primo modo per ricavare il lavoro svolto dalla macchina si è basato sul calcolo del lavoro meccanico corrispondente all'innalzamento di un blocchetto cilindrico di duecento grammi, mentre il secondo sui risultati ottenuti dal grafico nel piano $p \times V$, registrato dal sistema di acquisizione durante lo svolgimento del ciclo.

Inizialmente le misure del volume occupato dal gas sono state dedotte dalla lettura della posizione assunta dallo stantuffo della siringa sulla scala graduata presente sul suo cilindro, in un secondo momento ci siamo serviti di un sensore di posizione. Questo cambiamento ha permesso di seguire in tempo reale le variazioni di pressione e volume e ha migliorato la qualità della misura.

Per misurare l'area racchiusa dal diagramma che descriveva il ciclo termodinamico, ho adottato un vecchio metodo utilizzato nei laboratori di spettroscopia, che consiste nel confrontare la massa della sagoma del grafico ottenuto su un foglio di carta con quella di un rettangolo di cui si conosce il valore corrispondente della superficie espressa secondo l'unità di misura della grandezza cercata, nel nostro caso il joule.

Le prime prove sono servite per testare la macchina, controllare l'eventuale presenza di fuoriuscite d'aria, verificare la buona scorrevolezza dello stantuffo della siringa e per far acquisire agli studenti una discreta manualità nell'esecuzione delle operazioni necessarie per allineare l'apparato sperimentale nelle sue parti e per far compiere alla macchina un ciclo.

I valori delle misure ottenute sono stati trattati come se provenissero da una situazione di uniformità per il gas e da trasformazioni quasi statiche - cosa che non corrisponde alla realtà.

Infatti la termocoppia misurava solamente la temperatura della sorgente in cui veniva immerso il cilindro di alluminio, mentre l'aria contenuta nella siringa si trovava praticamente a temperatura ambiente e un ragionamento analogo si potrebbe ripetere per le misure della pressione. A ciò si aggiungano le eventuali turbolenze che avrebbero potuto crearsi nei tubicini di connessione.

Queste cause, insieme all'energia spesa contro le forze di attrito che si creavano tra le pareti della siringa e la superficie esterna dello stantuffo durante il suo movimento, hanno portato ad una differenza percentuale tra i due valori di circa il 30%.

La ricerca di trovare ragioni che motivassero questa differenza, che ha inizialmente sorpreso gli studenti, è stata sicuramente un'occasione per far approfondire loro la conoscenza del fenomeno.

A questo proposito anche il momento della stesura della tesina ha avuto questa valenza educativa e ha offerto la possibilità, soprattutto ad alcuni di loro, di imparare a documentare le loro affermazioni e ad esprimerle con un lessico appropriato e un linguaggio rigoroso.

Tubi, antenne e pistone: alla scoperta della termodinamica



Ringraziamenti:

Si ringraziano le numerose persone che ci hanno aiutato con professionalità e simpatia a realizzare questa tesina.

In particolare ringraziamo il sig. Domenico Diaco per la costruzione dell'ascensore termico e il sig. Angelo Siviglia per la parte grafica del poster e della copertina.

Indice

1	Introduzione	p.3
2	Premessa teorica	p.3
3	Progettazione e costruzione dell'apparato sperimentale	p.6
4	Descrizione dell'esperimento	p.7
5	Raccolta dati	p.8
6	Discussione dei dati	p.11
7	Conclusioni	p.12
8	Bibliografia e sitografia	p.13

INTRODUZIONE

Nell'ambito delle trasformazioni nei fenomeni naturali ci siamo soffermati su quelle che riguardano i gas. Nel nostro esperimento abbiamo cercato di addentrarci nella dimensione sperimentale della scienza mediante lo studio di un'applicazione pratica del lavoro compiuto da un gas in relazione al fenomeno della dilatazione termica. Abbiamo dunque realizzato una macchina termica. Essa dà valenza pratica a due leggi fondamentali della fisica: il primo principio della termodinamica e la legge di stato dei gas perfetti.

Il nostro percorso è iniziato con la scelta di un esperimento che potesse stimolare il nostro interesse e allo stesso tempo fosse adeguato al tema di questa sedicesima edizione di "ScienzaFirenze". Abbiamo optato per l'ascensore termico, oltre che per la sua validità scientifica, perché ci sembrava interessante, anche se irrealista, l'idea di un edificio con ascensori mossi grazie alla variazione di volume del gas all'interno del vano. Il nostro esperimento prevede la realizzazione di un ciclo termodinamico composto da quattro trasformazioni speculari due a due. Dopo aver raccolto i dati attraverso una sonda termica, un sensore di posizione e un sensore di pressione, abbiamo calcolato il lavoro svolto dal gas nel sollevare, attraverso il movimento del pistone, un cilindro di 200g sovrastante. Per farlo abbiamo utilizzato due metodi differenti e li abbiamo poi messi a confronto. Uno prevede il calcolo dell'area delimitata dal grafico che descrive la variazione della pressione in relazione al volume. L'altro procede calcolando la variazione dell'energia potenziale gravitazionale del cilindro, che vale quanto il lavoro compiuto dal gas, ed è calcolabile attraverso la formula $\Delta U = mg\Delta h$.

Durante la progettazione dell'esperimento alcuni punti hanno stimolato la nostra creatività. In prima battuta abbiamo dovuto trovare un contenitore che allo stesso tempo non lasciasse uscire il gas contenuto al suo interno, e avesse una parete scorrevole, in modo che con il suo movimento verticale consentisse l'espressione del lavoro svolto dal gas. Inoltre avendo ampliato il nostro apparato sperimentale in modo da poter raccogliere i dati riguardanti la variazione di volume in modo automatico, è sorta la necessità che nelle fasi del ciclo in cui è prevista l'assenza del cilindro di 200g fosse presente al suo posto un cilindro di uguale altezza, in modo che il sensore di posizione non rilevasse alcuna variazione, ma di massa trascurabile affinché il gas non compiesse nessun lavoro significativo durante la fase conclusiva del ciclo.

Le componenti del nostro apparato sperimentale sono tutte facilmente reperibili. L'esperimento risulta dunque essere ripetibile in qualsiasi laboratorio di fisica e aumentano così le possibilità di confrontarsi con altri che hanno affrontato la medesima esperienza sperimentale.

Che l'esperimento abbia inizio.

PREMESSA TEORICA

Per comprendere le dinamiche dell'esperimento, nonché la nostra elaborazione dei dati ottenuti dopo l'esecuzione dell'esperimento stesso, è opportuno soffermarsi su alcuni aspetti teorici.

Due concetti importanti

Partiamo dall'equazione di stato dei gas perfetti.

I gas perfetti sono dei gas rarefatti che possiedono una temperatura nettamente superiore rispetto a quella in cui può avvenire la loro liquefazione per effetto della sola pressione.

Quando si deve studiare il comportamento di un gas, è importante conoscere la sua temperatura, il volume occupato e la sua pressione. Queste tre grandezze, insieme al numero di moli, descrivono lo stato del gas, ovvero le condizioni in cui questo si trova. Nel caso di un gas perfetto, i valori della pressione, del volume e della temperatura sono tra loro legati secondo un'equazione detta "**Equazione di stato dei gas perfetti**". Tale equazione è un'espressione matematica che lega tra loro queste grandezze, in modo tale che, note due delle tre, la terza è automaticamente determinata dall'equazione di stato. L'equazione di stato dei gas perfetti è la seguente: $PV = nRT$.

Dove: P = la pressione del gas ad una temperatura T ; V = il volume occupato dal gas alla temperatura T ; n = il numero di moli; R = una costante che vale $8,314 \text{ J/(K}\cdot\text{mol)}$; T = la temperatura del gas. Le unità di misura sono imposte dal Sistema Internazionale.

Durante l'esecuzione dell'esperimento, tale equazione si è rivelata essenziale per monitorare il numero di moli, e registrare così un'eventuale perdita di aria nella nostra macchina termica.

Il secondo principio teorico indispensabile per realizzare e comprendere il nostro esperimento è il **primo principio della termodinamica**. Tale principio afferma che "l'energia non si crea né si distrugge, ma si trasforma passando da una forma ad un'altra". Secondo tale principio, ogni qual volta si verifichi una variazione di energia interna del sistema, questo deve aver scambiato una quantità equivalente di energia con l'ambiente. Ma poiché il sistema può scambiare energia con l'ambiente solamente attraverso il calore ed il lavoro, è possibile allora quantificare, mediante una relazione matematica, la variazione della sua energia interna, sulla base del calore fornito o ceduto e del lavoro compiuto o subito. L'equazione che lo descrive è la seguente: $\Delta U = Q - L$.

Dove: ΔU rappresenta la variazione di energia interna; Q rappresenta il calore, che si considera positivo quando viene fornito al sistema, e negativo quando viene ceduto dal sistema; L rappresenta il lavoro, che si considera positivo quando è compiuto dal sistema e negativo altrimenti.

A partire dall'equazione $\Delta U = Q - L$ si ricava facilmente che $Q = \Delta U + L$.

Questa nuova formula ci indica che il calore fornito ad un sistema può essere utilizzato per variare la sua energia interna o per produrre lavoro meccanico.

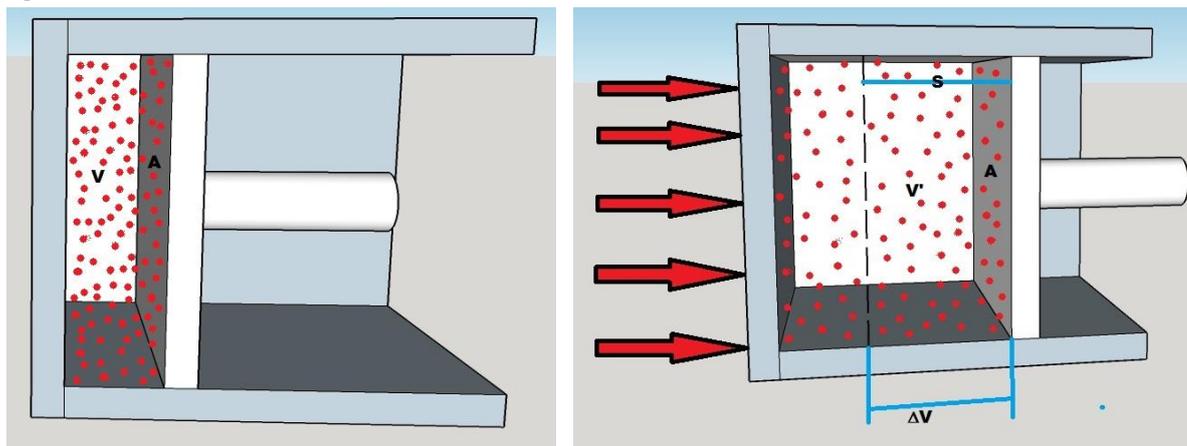
Trasformazione di calore in lavoro e suo significato grafico

Scopo del nostro esperimento è quello di confrontare il valore del lavoro meccanico compiuto dalla nostra macchina termica con quello che si può ottenere basandosi sullo studio del comportamento delle grandezze termodinamiche associate al suo funzionamento.

Per dare ragione del nostro operare però, sviluppiamo il seguente percorso teorico.

Iniziamo col ricavare in funzione delle grandezze termodinamiche il lavoro compiuto da un gas in una trasformazione isobara, ovvero una trasformazione che avviene a pressione costante.

Figura n°1



Nella Figura n°1 è rappresentato un gas contenuto in un recipiente, chiuso da un pistone a tenuta, dove A indica la superficie rivolta verso l'interno del contenitore. Tale pistone è libero di scorrere senza generare attriti rilevanti e lungo il corso della trasformazione assume la posizione corrispondente alla condizione di equilibrio tra la pressione interna del gas e quella esterna. Quando viene fornito del calore al sistema, il gas tende ad espandersi, producendo così lo spostamento del pistone e compiendo un lavoro.

In fisica, il lavoro è definito come il prodotto scalare tra il vettore forza \vec{F} ed il vettore spostamento \vec{s} .

In formula: $L = \vec{F} \cdot \vec{s} = F s \cos \alpha$, dove α è l'angolo che si crea tra i due vettori.

Nel nostro caso, poiché il vettore spostamento \vec{s} ed il vettore forza \vec{F} sono paralleli ed equiversi, ne consegue che l'angolo tra i due sia pari a 0° , e siccome $\cos 0^\circ = 1$, si ha:

$$L = F s .$$

La forza che compare nella formula si può esprimere in funzione della pressione. Sappiamo infatti che la pressione è definita come il rapporto tra il modulo della forza agente su una superficie e l'area della superficie stessa: $p = \frac{F}{A}$. Ne consegue che:

$$F = p A .$$

Da cui si deduce che:

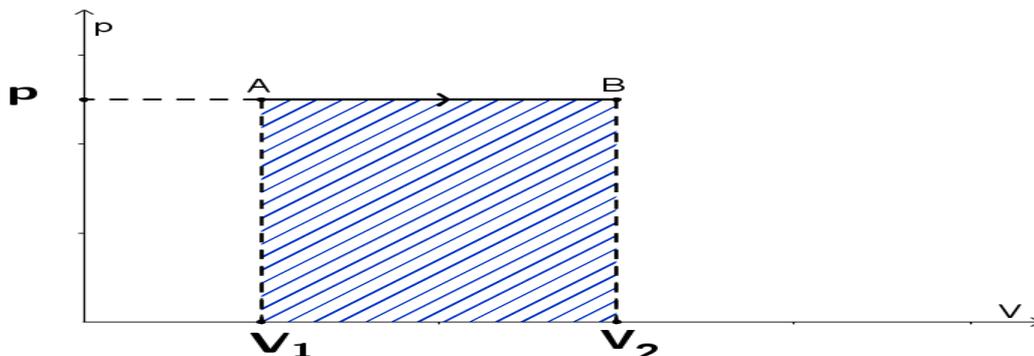
$$L = p A s .$$

Ma la superficie A moltiplicata per lo spostamento s risulta pari alla variazione di volume occupato dal gas ΔV come si può notare nella figura n°1. In definitiva :

$$L = p \Delta V.$$

A partire da questo risultato è possibile dare una interpretazione alle aree sottese dai diagrammi che descrivono le trasformazioni nel piano pressione-volume. È opportuno precisare, però, che il grafico pressione-volume può essere realizzato solamente quando, durante la trasformazione, istante per istante, la pressione e la temperatura sono uniformi per tutto il gas. Questo accade quando la trasformazione avviene per variazioni infinitesime delle grandezze che descrivono il sistema. In questo caso si parla di trasformazione quasi statica o di trasformazione reversibile.

Figura n°2



Dall'osservazione del grafico rappresentato in Figura n°2, si può constatare che l'area del rettangolo avente per base la variazione di volume $\Delta V = V_2 - V_1$ e per altezza la pressione costante p , corrisponde al prodotto tra la pressione del gas e la variazione del suo volume. Ma questa è l'espressione che abbiamo ricavato per il lavoro. Ne consegue che, per una trasformazione isobara, il lavoro compiuto da un gas può essere associato all'area racchiusa dal rettangolo appena descritto sul piano pressione-volume.

Facciamo notare che se la trasformazione fosse avvenuta nel senso opposto portando ad una compressione del gas, il volume iniziale dello stesso risulterebbe superiore al suo volume finale. Dunque la variazione di volume $\Delta V = V_1 - V_2$ risulterebbe negativa. Allora il prodotto tra la pressione costante e la variazione di volume, e quindi il lavoro, risulterebbe un numero negativo. In questo caso, anche all'area di un tale lavoro si attribuisce un segno negativo.

Quanto appena affermato può essere generalizzato e quindi esteso a qualsiasi tipo di trasformazione reversibile.

Ciò significa che, per qualsiasi di queste trasformazioni rappresentate sul piano $p \times V$, il lavoro è sempre corrispondente all'area racchiusa dal suo diagramma, dall'asse dei volumi e dalle due rette parallele all'asse delle pressioni passanti una per il volume iniziale e l'altra per il volume finale.

Le macchine termiche

Torniamo ora alla nostra macchina termica. Si definisce macchina termica un dispositivo fisico capace di trasformare l'energia termica fornita dall'ambiente esterno in lavoro meccanico mediante una trasformazione ciclica.

Il primo principio della termodinamica, applicato ad una macchina termica assume una espressione particolare.

Infatti come trattato in precedenza, questo può essere descritto tramite la seguente equazione:

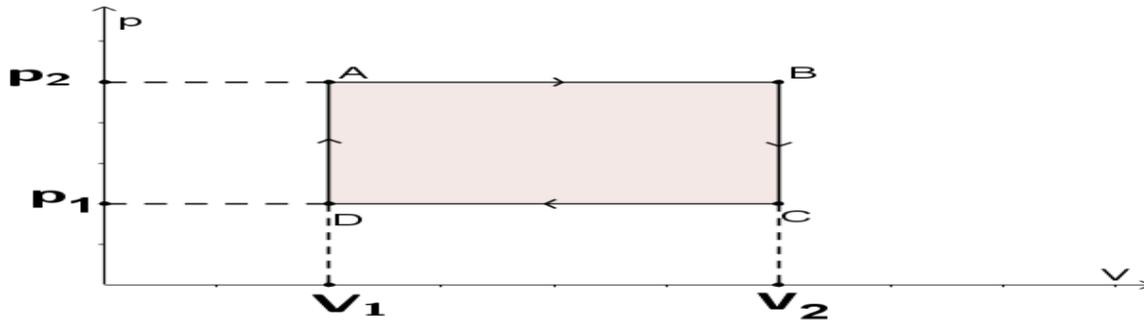
$Q = \Delta U + L$ poiché la macchina termica compie una trasformazione ciclica, il gas, terminata la trasformazione, torna nello stesso stato iniziale. E quindi, l'energia interna del gas, che è una funzione di stato, all'inizio e al termine della trasformazione assumerà lo stesso valore. Da ciò segue che la variazione di energia interna di un gas che compie un ciclo termodinamico è pari a zero e quindi l'equazione del primo principio della termodinamica si può riscrivere come: $L = Q$. Ciò significa che il lavoro compiuto dalla macchina corrisponde alla quantità di calore netta fornita o ceduta dalla macchina. Il lavoro sarà positivo qualora la quantità netta di calore sia positiva, e sarà negativo altrimenti.

Un esempio semplice di trasformazione ciclica è quella rappresentata in questo grafico (Figura n°3).

In una trasformazione ciclica, l'area compresa nel diagramma che descrive il ciclo compiuto dalla macchina termica sul grafico *pressione-volume*, rappresenta il lavoro compiuto dalla macchina stessa, proprio come, l'area sottostante al diagramma di una trasformazione isobara sul piano *pressione-volume* corrisponde al lavoro.

Infatti, il lavoro totale compiuto dalla macchina è dato dalla somma algebrica dei singoli lavori compiuti dal gas nelle varie trasformazioni che lo compongono.

Figura n°3



Nella Figura n°3 è rappresentato il grafico della trasformazione ciclica ABCDA formata da due trasformazioni isobare e da due trasformazioni isovolumiche. In questo caso il lavoro totale compiuto dal gas sarà:

$$L = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD} + L_{DA}.$$

Dove:

$$L_{AB} = p_2(V_2 - V_1).$$

Infatti il lavoro per andare da A a B, in una trasformazione isobara ove il gas si espande (poiché $V_2 > V_1$), è pari all'area compresa nel rettangolo ABV_2V_1 .

$$L_{BC} \text{ e } L_{DA} = 0.$$

Poiché il lavoro di una trasformazione isovolumica è pari a zero poiché la variazione di volume è nulla.

$$L_{CD} = -p_1(V_2 - V_1).$$

Infatti il lavoro per andare da C a D, in una trasformazione isobara ove il gas si comprime (poiché $V_2 > V_1$), è pari all'area delimitata dal rettangolo CDV_1V_2 dotata di segno negativo.

Di conseguenza sostituendo a ciascun addendo la corrispondente espressione si ottiene che:

$$L = p_2(V_2 - V_1) + 0 - p_1(V_2 - V_1) + 0 = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1).$$

In cui $(p_2 - p_1) * (V_2 - V_1)$ corrisponde proprio all'area racchiusa dal diagramma rappresentante il ciclo della macchina. Dunque, tale area corrisponde al lavoro compiuto dal gas della macchina stessa.

Questo risultato ottenuto per una particolare trasformazione ciclica può essere esteso ad una qualsiasi trasformazione ciclica formata da trasformazioni reversibili.

Sebbene la nostra macchina termica non esegua trasformazioni reversibili, abbiamo utilizzato questo risultato teorico per ricavare il lavoro prodotto da questa, attraverso la misura dell'area del corrispondente diagramma nel piano $p \times V$ e abbiamo confrontato questo risultato con il lavoro meccanico che è stato ottenuto grazie al suo funzionamento.

L'essersi discostati dalle condizioni teoriche di validità di tale risultato verrà discusso alla luce dei risultati ottenuti.

PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE



Figura n° X: Siringa in vetro montata alla struttura portante, si nota come il connettore sia stato attaccato al beccuccio con una guaina in gomma e delle fascette

Al fine di osservare il comportamento di un gas e il lavoro da esso compiuto in relazione al fenomeno della dilatazione termica, come accennato nel paragrafo introduttivo, abbiamo costruito un ascensore termico che si compone di diversi elementi.

Inizialmente abbiamo preso una siringa di vetro da 50cm³, al cui beccuccio abbiamo poi attaccato con del silicone – per evitare eventuali dispersioni di gas - un tubicino connettore in plastica (della lunghezza di 465mm e del diametro interno di 4mm), che la collegasse ad una piccola camera d'espansione. Nel corso dell'esperimento la camera d'espansione viene spostata alternativamente da un recipiente contenente una soluzione di ghiaccio, acqua e sale ad uno pieno di acqua bollente, questo al fine realizzare l'espansione e la compressione del gas dovute alla variazione della sua temperatura e provocare conseguentemente l'innalzamento e l'abbassamento dello stantuffo della siringa. Durante lo svolgimento dell'esperimento la temperatura registrata nei due recipienti, ha assunto valori compresi tra -2,0°C e 6,0°C per il primo recipiente e valori compresi tra 90,0 °C e 100,0°C

nel secondo. Questa variazione è dovuta al fatto che mentre si svolgeva l'esperimento, il ghiaccio si riduceva completamente in acqua e l'acqua bollente tolta dalla piastra di riscaldamento si raffreddava.

È stato necessario scegliere una siringa di vetro e non una di plastica, più facilmente reperibile, al fine di minimizzare il più possibile l'attrito che si sarebbe venuto a creare tra lo stantuffo della siringa e la siringa stessa. Infatti nel caso della siringa di plastica l'azione dell'attrito risulta significativa, tanto da impedire il movimento dello stantuffo. In questo caso il gas sarebbe fuoriuscito senza riuscire a sollevare minimamente lo stantuffo e di conseguenza sarebbe stato impossibile eseguire l'esperimento. Abbiamo poi preso un secondo connettore (lungo 565mm e del diametro interno di 3mm e lo abbiamo attaccato al tappo della camera d'espansione lasciando l'altro capo libero, in modo da poterlo avvitare a un misuratore di pressione durante l'esperimento.



Figura n°1: sensore di movimento

Al di sopra della siringa abbiamo posizionato un rilevatore di movimento (figura n°1) che fornisce i dati sulla posizione della base superiore dello stantuffo nel corso dell'esperimento. Ciò è stato utile per ottenere indirettamente la misura del volume che il gas ha occupato nelle varie fasi del ciclo termico.

Per sostenere la siringa e il sensore di movimento abbiamo usato una struttura composta da una base triangolare a cui sono state fissate due aste corredate di noci e supporti che mantenessero gli elementi in posizione.

L'esperimento prevedeva che nella fase ascensionale sulla base superiore dello stantuffo della siringa fosse appoggiata una massa di forma cilindrica di 200,0 g. La sua rimozione nella seconda parte del ciclo termodinamico avrebbe portato alla lettura di un dislivello pari alla sua altezza dal sensore di posizione. Per evitare questo errore abbiamo creato con una stampante 3D una copia della suddetta massa in acido polilattico (PLA), molto più leggera - la sua massa è di 6,30g - con cui sostituire la prima nella seconda parte dell'esperimento.

Per raccogliere i dati e organizzarli allo stesso tempo in un grafico, abbiamo infine utilizzato un sistema di acquisizione a cui sono stati collegati il sensore di posizione, la termocoppia e il sensore di pressione (figura n°2).



Figura n°2: Sensore di pressione e dispositivo per la raccolta dati.

DESCRIZIONE DELL'ESPERIMENTO

Preparazione

Per svolgere l'esperimento è stata necessaria la seguente preparazione: dopo aver riempito la pentola con dell'acqua, l'abbiamo posta sulla piastra elettrica fino a farle raggiungere circa 100°C, e abbiamo versato una soluzione di ghiaccio, acqua e sale in un contenitore di plastica. Abbiamo dunque predisposto il sostegno come già descritto per strutturare la macchina termica, fissando inoltre una molletta di legno su un altro supporto per sostenere la termocoppia sospesa nell'acqua bollente della pentola, così da evitare di scottarci e di danneggiare lo strumento. Dopo aver collegato tutti gli strumenti al sistema di acquisizione, abbiamo testato la macchina e i sensori curando con particolare attenzione l'allineamento del sensore di posizione in modo che potesse registrare correttamente il movimento verticale dello stantuffo della siringa e abbiamo controllato che non vi fossero fughe di gas. Nelle prime sperimentazioni se ne sono verificate alcune e abbiamo provveduto a sigillare i punti in cui queste avvenivano adoperando il silicone



Sperimentazione

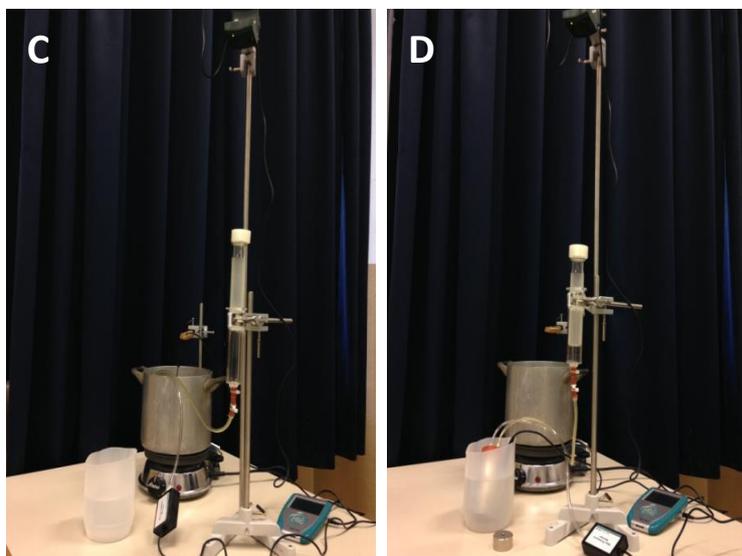
L'esperimento si divide in quattro fasi durante le quali, la termocoppia segue ogni spostamento della camera d'espansione:

La prima (figura A) prevede che la camera d'espansione sia nella soluzione col ghiaccio, mentre la massa metallica è posta sopra lo stantuffo.

Nella seconda (figura B) la camera d'espansione viene spostata nell'acqua bollente. Qui si osserva il primo sollevamento dello stantuffo e di conseguenza della massa metallica.

La terza fase (figura C), prevede la sostituzione della massa metallica con la sua copia di massa nettamente inferiore in PLA: si verifica un ulteriore spostamento verso l'alto.

Nella quarta (figura D) la copia rimane sullo stantuffo, ma la camera d'espansione viene spostata nel ghiaccio e la situazione ritorna simile a quella iniziale, chiudendo il ciclo.



Abbiamo eseguito il processo sopra descritto numerose volte, senza notare significative variazioni tra una prova l'altra. I dati sono stati registrati automaticamente sul software, tramite il quale abbiamo poi elaborato alcuni grafici. Il più interessante è certamente quello pressione-volume, nel quale, concluse tutte le fasi, appare una curva chiusa somigliante ad un parallelogramma il più delle volte perfettamente chiuso. Quando ciò non si verificava, ne abbiamo attribuito la causa alle perdite d'aria dovute alla non perfetta tenuta dello stantuffo della siringa.

Variazioni dall'esperimento iniziale.

La prima idea dell'esperimento prevedeva l'uso di una carrucola che legava attraverso un filo inestensibile lo stantuffo con un insieme di piccoli pesi, che lo controbilanciavano quasi esattamente (per rendere ciò possibile abbiamo utilizzato una bilancia di precisione).

L'ascensore termico doveva quindi muoversi soltanto in due fasi, semplicemente sollevando la massa metallica con lo spostamento della camera d'espansione dalla pentola alla miscela con il ghiaccio, ma la troppo influente forza d'attrito della siringa rendeva questa versione dell'esperimento decisamente troppo poco fluida per essere presa in considerazione. Siamo dunque passati alla realizzazione di un ciclo termodinamico come descritto in precedenza.

Infine nell'ultima versione sono stati aggiunti il sensore di spostamento e di conseguenza la copia della massa metallica. Il sensore è risultato uno strumento fondamentale per la misura del volume.

Infatti prima dell'utilizzo del sensore, il valore del volume era inserito manualmente, sommando al volume della camera d'espansione e dei tubi quello dell'aria contenuta nella siringa, ottenuto tramite la lettura sulla scala graduata impressa su questa.

RACCOLTA DATI

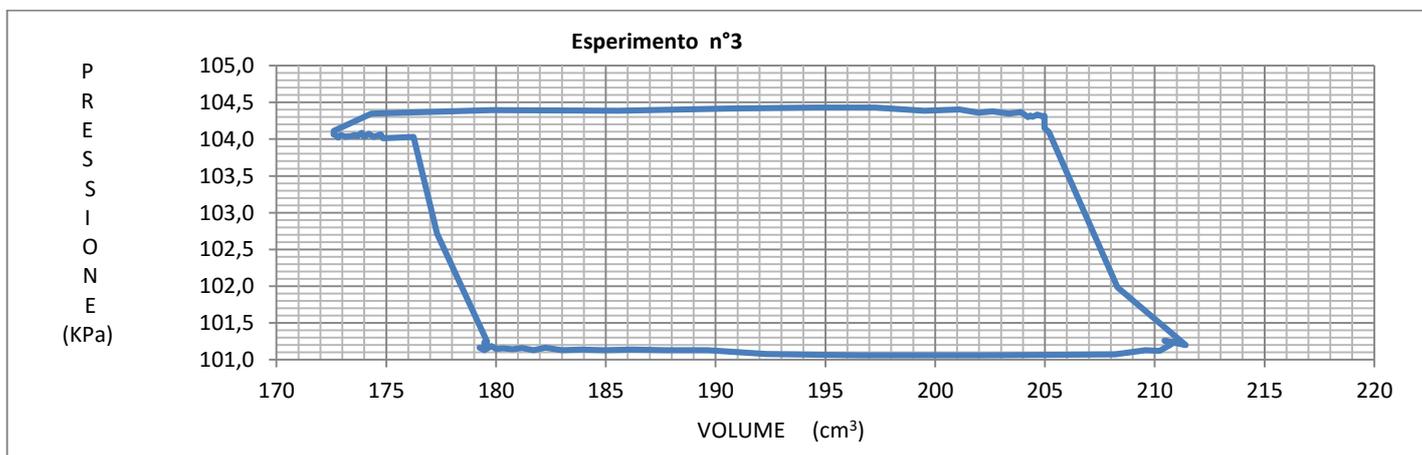
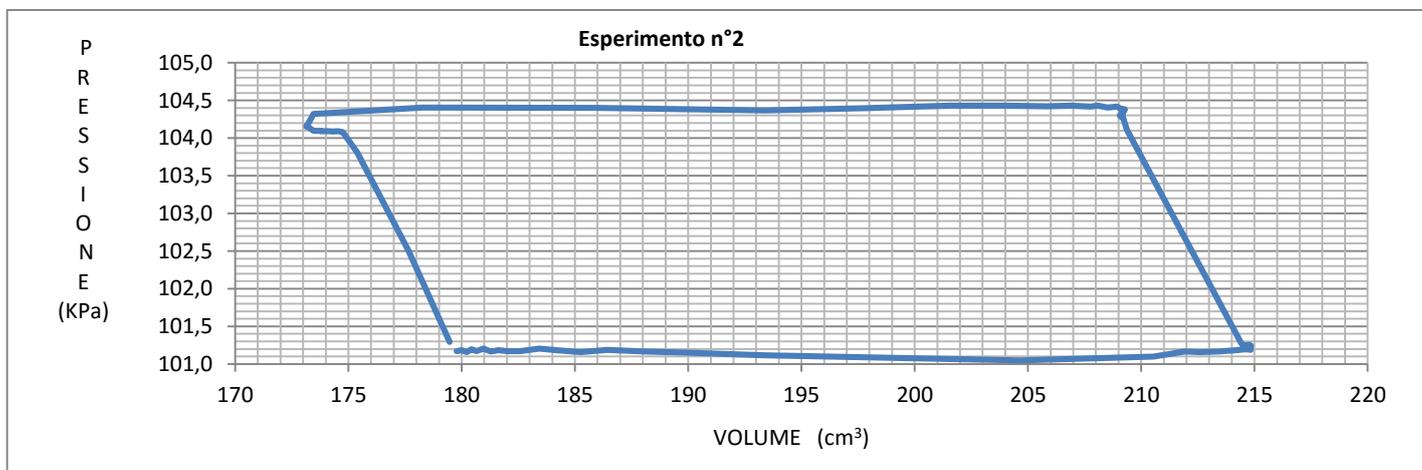
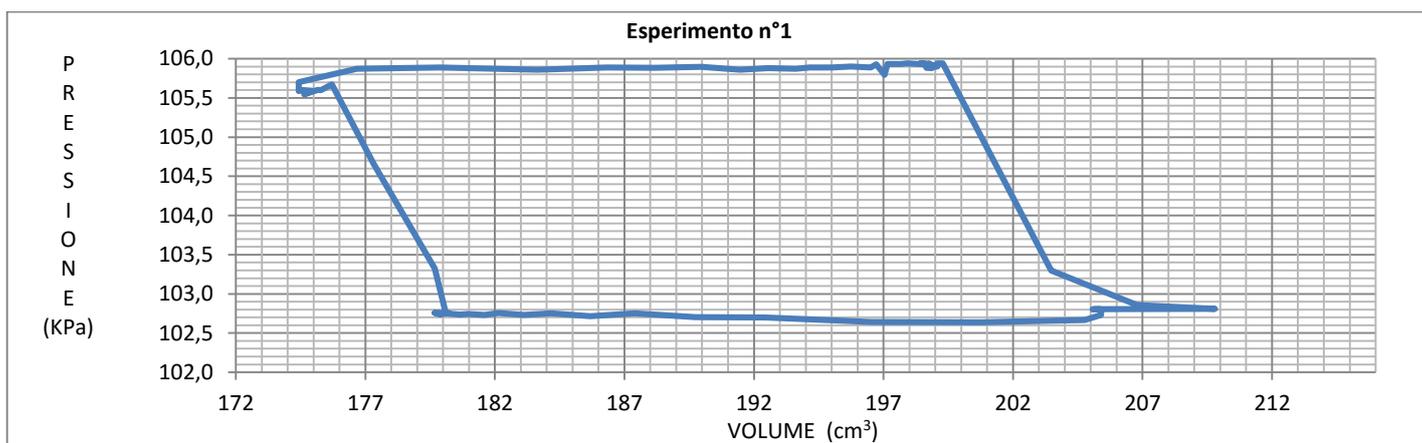
Abbiamo raccolto i dati mediante l'utilizzo del sensore di pressione (unità di misura: kPa; sensibilità: 0,1 kPa) collegato al cilindro di alluminio contenente il gas, del sensore termico (unità di misura: °C; sensibilità: 0,1 °C) e del sensore di posizione (unità di misura: m; sensibilità: 0,001m) collocato sopra la siringa. Questi erano tutti collegati a un dispositivo LabQuest che riceve i dati e li trasmette a un programma di elaborazione, Logger Pro 3.8.6.1, presente sul computer. Il sistema di acquisizione registra i valori ogni 0,5 s.

Per la misura del volume abbiamo inserito manualmente all'interno del programma l'equazione necessaria per ricavarlo a partire dai dati registrati dal sensore di posizione. Sapevamo infatti qual era il rapporto tra la variazione della posizione della base del pistone e quella del volume occupato dal gas all'interno della siringa. Per calcolarlo abbiamo utilizzato un righello con sensibilità del mm e la scala graduata riferita al volume presente sulla siringa con sensibilità ai 2 cm³. Abbiamo misurato la distanza tra la base della siringa, corrispondente a 0 cm³, e la tacca sulla scala graduata riferita ai 50 cm³. Abbiamo dunque messo a rapporto il valore della variazione di volume di 50 cm³ con quello della rispettiva distanza di 8 cm misurata col righello. Abbiamo dunque dedotto che ad una variazione di posizione di 1 cm corrisponde un incremento del volume di 6,3 cm³. Il volume complessivo del gas oltre alla parte all'interno della siringa, comprende anche il volume contenuto dalla camera d'espansione, che vale 150cm³, e quello dei due tubicini pari a 10cm³. Per ottenere quest'ultimo valore abbiamo moltiplicato le sezioni trasversali interne di ciascun tubicino per le rispettive lunghezze, e abbiamo sommato i due valori ottenuti. Dal momento che la precisione del valore del volume in relazione alla posizione

possiede una precisione al decimo di cm^3 , mentre quella del volume complessivo è del cm^3 , per il volume totale abbiamo tenuto la precisione del cm^3 .

Per ottenere il numero di moli abbiamo inserito la funzione necessaria: $n = (P \times V)/(R \times T)$, ricavata dalla legge di stato dei gas perfetti. Questa grandezza è espressa in mol e abbiamo tenuto in considerazione tre cifre significative, poiché la grandezza presente nel calcolo con meno cifre significative ne aveva soltanto tre. Infatti la pressione aveva quattro cifre significative, il volume e la temperatura ne avevano tre e per quanto riguarda la costante dei gas ne abbiamo assegnate quattro. Abbiamo poi organizzato la raccolta dei dati mediante tre grafici. Nel primo abbiamo inserito la temperatura in funzione del tempo, nel secondo abbiamo inserito il numero di moli come ordinata e il tempo come ascisse, e nel terzo la pressione in funzione del volume. Il primo grafico ci è servito per controllare se la temperatura tornasse o no al punto di partenza a ciclo concluso. Lo scopo del secondo grafico è stato di monitorare le eventuali perdite di gas che avrebbero potuto compromettere l'esperimento. Il terzo grafico, oltre a indicarci il momento adatto a concludere le misurazioni, ha avuto anche la funzione di prova della buona riuscita dell'esperimento.

Abbiamo eseguito numerose prove. Ai fini della nostra discussione ci sono sembrati significativi i risultati ottenuti da tre cicli di cui riportiamo i grafici.



Per calcolare il lavoro compiuto dal gas, abbiamo utilizzato due metodi differenti:

1) Nel primo metodo abbiamo ricavato il lavoro partendo dalla sua corrispondenza con l'area delimitata dal grafico pressione-volume. Per realizzarlo abbiamo esportato i dati da Logger Pro a un file Excell, all'interno del quale abbiamo poi utilizzato la funzione per disegnare i grafici. In questo modo abbiamo ottenuto i grafici sopra riportati. A causa dell'irregolarità delle figure rappresentate dai diagrammi, sarebbe stato troppo difficile calcolarne l'area in modo diretto, abbiamo dunque dovuto procedere per una strada alternativa. Abbiamo stampato due copie del grafico di ciascun esperimento. Da una abbiamo ottenuto, ritagliando seguendo la linea blu, la parte di grafico corrispondente al lavoro svolto dal gas. Dall'altra, invece, abbiamo tenuto tutto il rettangolo delimitato dagli assi cartesiani.

Dalla differenza tra il valore massimo e il valore minimo abbiamo ottenuto le lunghezze dei lati del rettangolo, e dalla loro moltiplicazione l'area della sua superficie espressa in joule. Nel caso degli esperimenti n°2 e 3 gli estremi sono: 105,0 kPa e 101,0 kPa per le ordinate e 220 cm³ e 170 cm³ per le ascisse, i lati sono lunghi rispettivamente 4,0 kPa e 50 cm³, per cui l'area risultante vale 0,20 J.

Abbiamo pesato i due ritagli con una bilancia da laboratorio di una sensibilità del centigrammo.

Per ottenere l'area della sagoma espressa in joule, corrispondente al lavoro del ciclo, abbiamo applicato la seguente formula ottenuta dalla proporzione tra le masse dei due ritagli e le rispettive superfici:

$$A_{sagoma} = (M_{sagoma} * A_{rettangolo}) / M_{rettangolo}$$

Nella seguente tabella sono riportati i risultati ottenuti.

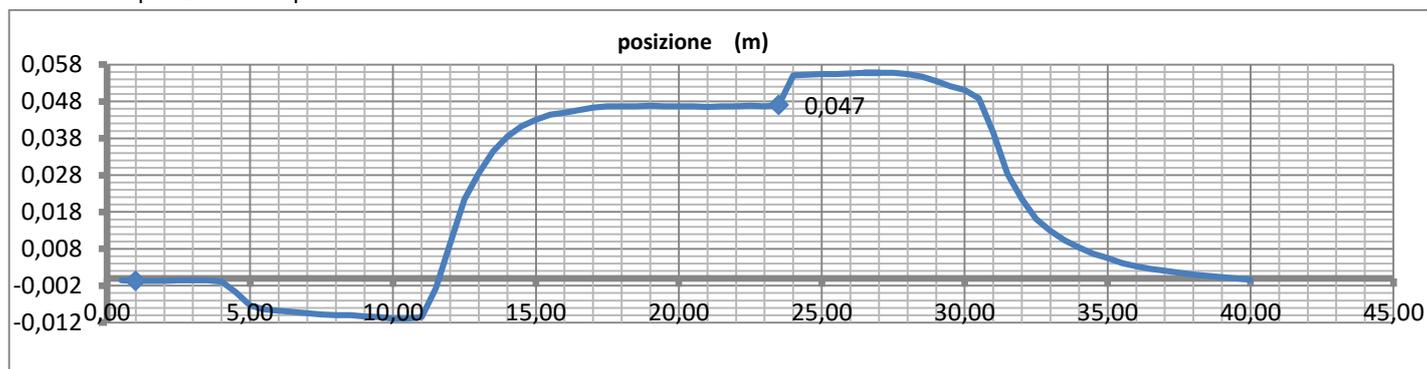
Tabella n°1 : Lavoro compiuto dalla macchina termica in un ciclo termodinamico

N°	ΔV cm ³	ΔP Kpa	M rettangolo g	M sagoma g	A rettangolo J	A sagoma J
1	40	4,0	1,75	0,85	0,16	0,078
2	50	4,0	1,62	0,99	0,20	0,12
3	50	4,0	1,68	0,87	0,20	0,10

2) Il secondo si basa sull'equivalenza tra il lavoro svolto dal gas e la variazione di energia potenziale gravitazionale del nostro cilindro di massa 200g. Essa è calcolabile attraverso la formula:

$\Delta U = mg\Delta h$, in cui m è la massa del cilindro (200 g), g è l'accelerazione di gravità (9,81 m/s²) e Δh è la variazione di altezza del peso ottenuta dalla differenza tra la quota iniziale e la quota finale dal cilindro. A questo proposito è importante osservare che nel calcolare la variazione di energia potenziale gravitazionale non bisogna tener conto della quota minima. Infatti, trattandosi di una variazione, dobbiamo tenere in considerazione soltanto il valore di energia potenziale gravitazionale iniziale e quello finale, e non i valori intermedi.

Grafico posizione-tempo



Ad esempio nel grafico riferito all'esperimento n°2, i valori limite da considerare sono -0,001 m e 0,047 m. L'aumento successivo della quota presente nel grafico è dovuto all'ulteriore sollevamento del pistone in seguito alla sostituzione del cilindro metallico con quello in PLA.

Per valutare la variazione di quota del pistone della siringa abbiamo dovuto cambiare segno a tutti i valori provenienti dal sensore di posizione. Infatti quest'ultimo, trovandosi sopra la siringa, registrava l'innalzamento del pistone (per noi segno +) come una

diminuzione della distanza (per il sensore segno -), mentre l'abbassamento (per noi segno -) come un incremento della distanza (per il sensore segno +).

Nella seguente tabella riportiamo i risultati ottenuti.

Tabella n°2 calcolo del lavoro compiuto per sollevare una massa di 200g

	H ₁	H ₂	ΔH	m	L = mgΔh
N°	m	m	m	Kg	J
1	-0,001	0,031	0,032	0,200	0,063
2	-0,001	0,047	0,048	0,200	0,094
3	-0,001	0,040	0,041	0,200	0,080

DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Al termine abbiamo paragonato per ciascun esperimento i risultati ottenuti dalla misura del lavoro compiuto dal gas durante la trasformazione ciclica, secondo le due differenti modalità descritte in precedenza. Riportiamo dunque i risultati ottenuti e le riflessioni che abbiamo fatto riguardo ad essi.

Tabella n°3 : Confronto tra il lavoro compiuto dalla macchina termica in un ciclo termodinamico (L ciclo) e il lavoro svolto per sollevare la massa di 200g (L).

	L ciclo	L = mgΔh	differenza = L ciclo - L	scarto percentuale
N°	J	J	J	%
1	0,078	0,06	0,02	30
2	0,12	0,09	0,03	33
3	0,10	0,08	0,02	25

Gli scarti in percentuale sono piuttosto significativi, ma il fatto che si mantengano tutti nell'intorno del 30% indica che siano dovuti a errori legati ai limiti dell'apparato sperimentale e alle condizioni in cui si sono svolti gli esperimenti, e non a imprecisioni legate al singolo esperimento. Questi errori erano previsti ed attesi dal momento che eravamo ben consci di star applicando la legge di stato dei gas perfetti ad un sistema inadeguato rispetto al modello di riferimento per tale legge. E' infatti altamente improbabile, anche a causa della velocità della reazione, che all'interno del nostro apparato sperimentale i valori della pressione e della temperatura misurati in riferimento alla camera d'espansione fossero gli stessi per ogni altro punto del gas. In particolare la temperatura del gas presente nella siringa rimaneva sempre prossima a quella dell'ambiente nonostante la camera d'espansione fosse immersa prima nella soluzione di acqua, ghiaccio e sale, e poi nell'acqua bollente. Dobbiamo inoltre tener conto che mediante il calcolo dell'area del diagramma (L ciclo) abbiamo misurato il lavoro effettivo compiuto dalla macchina termica. Esso non può coincidere con il lavoro compiuto dal gas (L) poiché per funzionare la macchina deve spendere parte dell'energia che ha prodotto per vincere gli attriti dovuti allo scorrimento del pistone all'interno della siringa. Le turbolenze che potrebbero essersi presentate nei punti di raccordo e all'interno dei tubi sono considerabili come un'ulteriore causa degli attriti.

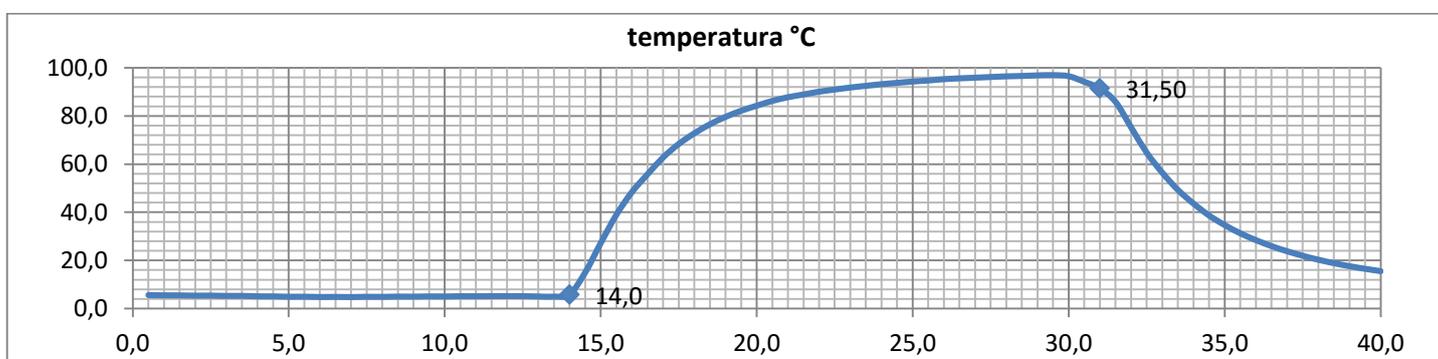
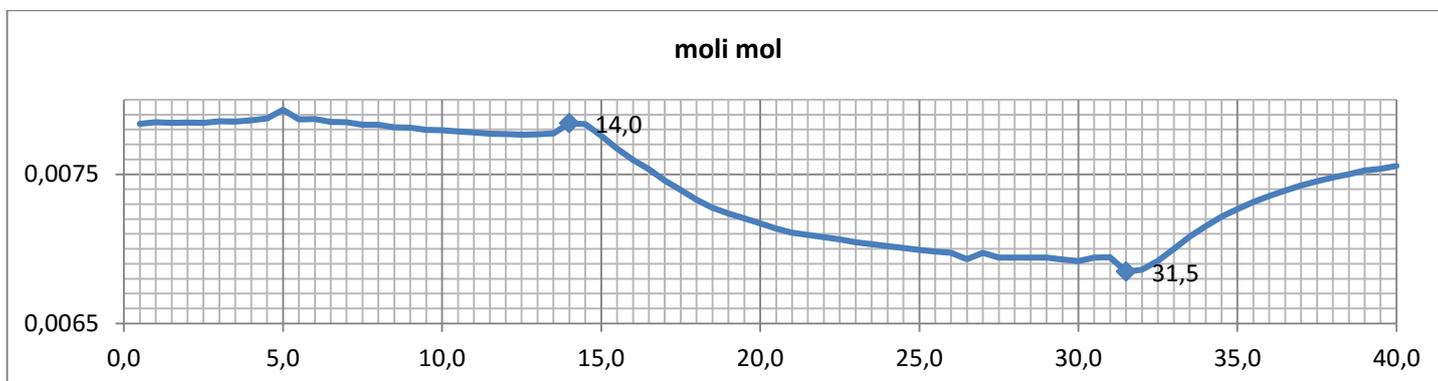
Bisogna inoltre tener conto che il metodo secondo cui abbiamo utilizzato i dati ha ridotto l'incidenza di parte degli errori. Infatti per il calcolo dell'area nel piano $p \times V$ abbiamo preso in considerazione non dei valori assoluti, ma delle variazioni di quelle grandezze che sono state misurate localmente in riferimento al gas contenuto nella camera d'espansione.

Per approfondire le nostre riflessioni riportiamo a titolo d'esempio i grafici moli-tempo e temperatura-tempo dell'esperimento n°3.

Esperimento n°3 –scarto percentuale: 25%

Dai due grafici moli-tempo e temperatura-tempo dell'esperimento n°3 notiamo che il numero di moli inizia a diminuire in modo continuativo nello stesso momento (14,0 s) in cui la temperatura assume un carattere ascendente, ed inizia ad aumentare nello stesso istante (31,5 s) in cui la temperatura comincia a diminuire. Nonostante il numero di moli non sia una grandezza misurata direttamente, ma derivi della legge di stato dei gas perfetti e sia dunque influenzata dagli errori presenti nei valori delle altre tre grandezze, la relazione con la variazione della temperatura possiede tuttavia un sua validità e un fondamento teorico. Infatti all'aumento della temperatura corrisponde non solo l'innalzamento del pistone, ma anche la fuoriuscita di un certo numero di moli Δmol , a causa della crescente pressione del gas all'interno della siringa. Diversamente il raffreddamento provoca una diminuzione

di pressione e conseguentemente di volume. Quest'ultima comporta, oltre all'abbassamento del pistone, anche l'entrata di un determinato numero di moli Δmol_+ . Dal grafico notiamo che $\Delta mol_- > \Delta mol_+$ e per questo il numero di moli finale non è uguale a quello iniziale. Questo è giustificabile dal momento che la differenza tra la temperatura dell'acqua bollente e quella dell'ambiente ($90^\circ\text{C}-20^\circ\text{C}$) è maggiore rispetto a quella tra quest'ultima e la temperatura della soluzione acqua, ghiaccio e sale ($20^\circ\text{C}-5^\circ\text{C}$). Inoltre la forza di attrazione gravitazionale contrasta l'innalzamento del pistone e favorisce, invece, il suo abbassamento. Di conseguenza la forza che il gas esercita alla base della siringa è maggiore durante la fase di espansione rispetto a quella di compressione, e quindi si prevede una maggior fuoriuscita di gas.



CONCLUSIONI

Anche se non ci aspettavamo, per le ragioni fin qui citate, un'equivalenza tra i valori del lavoro ottenuti secondo le due metodiche, tuttavia alcuni errori e discrepanze ci hanno fatto riflettere. Infatti le motivazioni teoriche sopra riportate sono in parte il risultato di una riflessione fatta a priori per inquadrare l'esperimento e fare una stima generale dei possibili risultati, ma soprattutto derivano dall'osservazione e dall'analisi dei risultati realmente ottenuti ad esperimento concluso. Le nostre previsioni, non avendo fatto una precisa valutazione di ogni possibile fonte di errore e poiché non avevamo potuto confrontarci con nessuno che avesse realizzato il medesimo esperimento, erano piuttosto imprecise. Tuttavia ci aspettavamo la presenza di uno scarto considerevole. Infatti quando, a causa di un errore, gli scarti in percentuale erano risultati del 22% per esperimento n°1, del 9% per il n°2 e del 0% per il n°3, all'inizio eravamo molto soddisfatti di questi valori, ma poi il fatto che fossero così bassi ci ha fatto sospettare che ci fosse qualcosa di sbagliato. Ci siamo fermati a riflettere e ci siamo resi conto che ciò era dovuto ad un errore nel valutare il valore dell'innalzamento del pistone da inserire nella formula $L = mg\Delta h$. Avevamo infatti considerato come h_2 (quota finale) il valore di posizione massimo assunto dalla base del pistone, senza tenere in conto che il gas compiva un lavoro soltanto nel momento in cui sollevava il cilindro di 200g, e che quindi l'ulteriore innalzamento successivo alla sostituzione con la massa in PLA non andava considerato (cfr. grafico posizione-tempo pag.10). Inoltre l'essere riusciti a dare una lettura più approfondita dei grafici, l'esserci posti dei quesiti partendo dall'osservazione dei dati e delle differenze tra i tre esperimenti, e l'aver formulato delle possibili risposte per i nostri interrogativi sono stati tutti motivi di soddisfazione.

Alle luce di queste considerazioni possiamo affermare la buona riuscita del nostro esperimento.

WE'RE HAPPY

BIBLIOGRAFIA & SITOGRAFIA

- Per gli appunti di teoria:
P. Marazzini, M. E. Bergamaschini, L. Mazzoni - "Fisica: ipotesi, teorie, esperimenti" vol.2 - Minerva Scuola – 2012, Milano.
- Per l'ideazione dell'esperimento:
http://www.roma1.infn.it/people/luci/labo_termo/TD-8572-MAN-MOTORE-TERMICO.pdf

Qui finisce la nostra tesina, ma non la storia dell'esperimento che continuerà a stimolare riflessioni in noi e, speriamo, anche in voi che leggerete.