

REGIONE
TOSCANA



**Prodotto realizzato con il contributo della Regione
Toscana nell'ambito dell'azione regionale di
sistema**

**Laboratori del
Sapere Scientifico**

Indagine sul calore

Percorso LSS sulla natura del calore

Classe 5Ac – a.s. 2012-2013
Liceo Classico – Linguistico
“G. Carducci” - Viareggio (LU)

Collocazione del percorso effettuato

Il percorso sul calore si colloca all'inizio della classe 5 liceo classico. Si tratta ancora di una classe che segue l'ordinamento pre-riforma: ha iniziato quindi lo studio della fisica solo al quarto anno con due ore settimanali, mentre in quinta ha tre ore settimanali. L'anno precedente è stato dedicato alla meccanica; in particolare nell'ultimo segmento è stato affrontato il tema dell'energia meccanica e sua conservazione (e non conservazione in presenza di forze di attrito), prerequisito essenziale per affrontare lo studio della termodinamica.

Gli obiettivi essenziali di apprendimento

del percorso sono:

- favorire lo sviluppo di una didattica di tipo laboratoriale a partire da problemi da affrontare mediante l'esecuzione di esperienze (alcune in autonomia) e successiva riflessione;
- favorire la discussione e l'analisi sulle possibili interpretazioni dei fenomeni osservati fino a raggiungere una concettualizzazione condivisa;
- comprendere la ragionevolezza dei modelli antichi del calore sulla base dei dati sperimentali accessibili al tempo (prospettiva storica);
- acquisire i concetti fondamentali della termodinamica all'interno di un contesto di senso opportunamente preparato.

Elementi salienti dell'approccio metodologico

L'elemento caratterizzante di questo percorso è rappresentato dalla modalità di esecuzione delle esperienze. All'inizio dell'anno è stato infatti proposto agli studenti di acquistare dei termometri (uno per ogni studente), in modo che le esperienze sarebbero state realizzate da loro in piena autonomia a casa, liberando così prezioso tempo scuola per fruttuose discussioni sui risultati. La scelta di una tale modalità è stata motivata dal particolare carattere delle esperienze di termologia. Queste sono spesso infatti non troppo impegnative come realizzazione, ma richiedono un certo tempo. Si è dunque pensato che gli studenti sarebbero stati in grado di realizzarle "in cucina" riservando l'attività in classe alla discussione dei risultati ottenuti.

Le esperienze sono state per la maggior parte realizzate a casa dagli studenti, utilizzando il materiale che si può trovare in cucina più un termometro da laboratorio acquistato da loro. Le sostanze utilizzate sono state acqua e olio. In taluni casi come fonte di calore si è usato il phon.

Inoltre, alcune esperienze (dilatazione termica, trasformazione di energia cinetica in energia termica) che richiedevano una attrezzatura più sofisticata sono state realizzate in laboratorio con le usuali dotazioni.

Ambiente/I in cui è stato realizzato il percorso

Gli ambienti in cui è stato sviluppato il percorso sono stati quindi quelli in cui gli studenti eseguivano le esperienze (tipicamente la cucina di casa) e l'aula di fisica a scuola (dotata di una LIM) in cui avveniva la presentazione dei dati, la discussione, la proposta e la progettazione degli esperimenti per la lezione successiva.

Tempi impiegati

Questo percorso nasce da un'idea di uno degli insegnanti del gruppo LSS. La messa a punto preliminare è stata discussa in 3-4 riunioni del gruppo all'inizio dell'anno (anche se ciascuna di tali riunioni non era interamente dedicata alla discussione di questo percorso il tempo della suddetta discussione è stato mediamente di un'ora). Una volta chiarita l'idea alla base del percorso è stato dedicato un intero pomeriggio di lavoro per mettere a punto i dettagli della progettazione: complessivamente questa prima fase ha richiesto circa 8 ore. L'intero percorso si è sviluppato nell'ambito del primo quadrimestre, da poco dopo l'inizio dell'anno alle vacanze di Natale per complessive 30 ore di tempo scuola (da aggiungere a quelle impiegate dagli studenti a casa per l'esecuzione delle esperienze).

Altre informazioni

Oltre agli aspetti laboratoriali, nello sviluppo del percorso si è cercato di dare particolare attenzione alla prospettiva storica ed epistemologica, evidenziando in particolare la “ragionevolezza” di teorie oggi abbandonate – come quella del fluido calorico – a fronte di una prospettiva sperimentale parziale come poteva essere quella alla fine del XVIII secolo.

Descrizione del percorso didattico

Il percorso viene introdotto con una ampia discussione plenaria in cui si riflette su diversi aspetti dell'esperienza quotidiana. Dall'analisi delle pre-conoscenze emerge una comprensione sostanzialmente corretta del concetto di temperatura come proprietà inerente ai corpi e distinta dal calore. Sebbene su quest'ultimo concetto le idee sono meno chiare, si conviene che il calore è quel “qualcosa” in grado di far variare la temperatura dei corpi. Nasce quindi l'esigenza di misurare la temperatura.

Vengono mostrate alcune esperienze dimostrative sulla dilatazione termica.



Vengono anche richiamati i primi termometri visti al museo Galileo a Firenze durante un'uscita didattica l'anno precedente.



Prendendo atto del fatto che le proprietà dei corpi variano con la temperatura si comprende il funzionamento del termometro e ci si rende conto della necessità di individuare dei punti fissi per tarare lo strumento.

Nella diapositiva seguente una mappa concettuale realizzata da uno studente dopo questa prima fase di brainstorming. Si osservi che – a fronte di una serie di affermazioni sostanzialmente corrette sulla temperatura – il calore viene definito come una variazione di temperatura.

Le sensazioni primarie sono il «caldo» e il «freddo»

Non misurabile direttamente

Grandezza fisica che consente di misurare lo stato termico di un corpo

La misurazione avviene attraverso termometri

La Temperatura

La caratteristica propria di ogni corpo

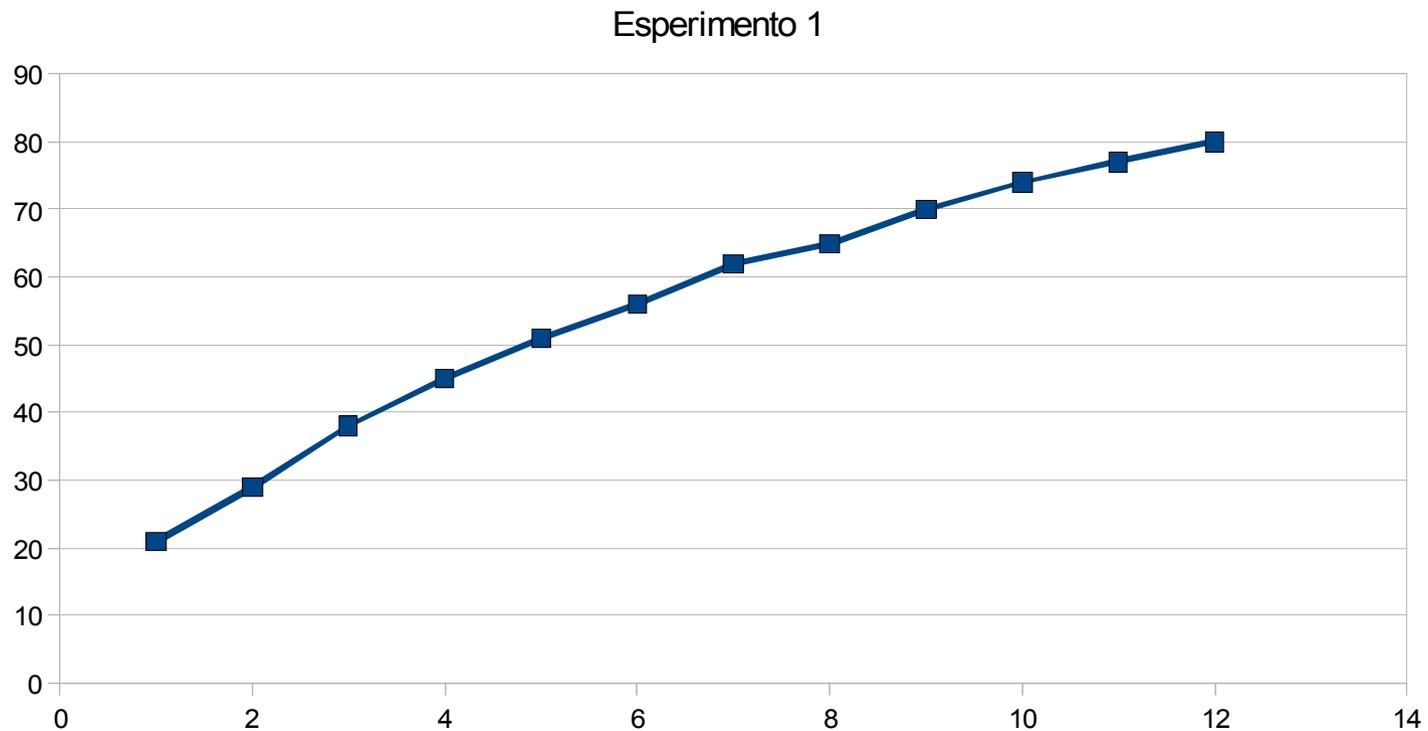
Per la taratura dei termometri vengono usati punti fissi

I termometri utilizzano scale termometriche

La variazione di temperatura viene definita calore

In seguito a questa discussione si propone un'attività di ricerca su internet per arrivare a individuare fenomeni che potrebbero servire come punti fissi per la costruzione di un termometro (record delle temperature max e min in una data città in vari anni, temperature nelle grotte, termoregolazione degli animali, alcuni particolari fenomeni fisici, ecc...). Si dà inoltre il compito di sperimentare l'andamento della temperatura durante il riscaldamento dell'acqua.

a. La prima di queste consiste nel ricavare la curva di riscaldamento dell'acqua. Si tratta di mettere una pentola con una certa quantità di acqua sul fornello e riscaldare prendendo la misura della temperatura a intervalli di tempo definiti, ad esempio ogni 2'. Alcuni studenti hanno riscaldato l'acqua senza arrivare all'ebollizione, altri ci sono arrivati. Nel grafico sottostante del primo tipo sull'asse x il tempo è in minuti e sull'asse y la temperatura in gradi celsius. *(Nota: per problemi legati alla conversione tra i vari formati in cui sono stati realizzati i grafici l'indicazione delle unità accanto agli assi è stata omessa e si è riportata solo l'area del grafico)*



Si osserva che per l'acqua le curve di riscaldamento tempo-temperatura sono con buona approssimazione delle rette, ma che cambiano radicalmente il loro andamento quando ci si approssima ai 100 gradi celsius, temperatura alla quale l'acqua inizia a bollire. Si concorda quindi di rimanere al di sotto della temperatura di ebollizione rimandando l'analisi di questo particolare fenomeno più avanti.

Queste semplici osservazioni iniziali provocano una serie di considerazioni molto interessanti all'interno della classe. Si riflette sul fatto che il calore è “qualcosa” che entrando nel corpo ne provoca l'aumento di temperatura. Uno studente osserva allora che l'acqua calda dovrebbe pesare di più (*in pratica è la teoria del flogisto*) e realizza l'esperimento. Di fatto, al termine del riscaldamento la massa di acqua è minore.

In molti attribuiscono la causa di ciò all'evaporazione, ma lo stesso studente che aveva sollevato la questione osserva che si potrebbe anche ipotizzare che responsabile delle variazioni di temperatura è una sostanza che quando entra nei corpi ne abbassa la temperatura, anziché alzarla. Se così fosse, i corpi dovrebbero aumentare la loro massa quando si raffreddano. Viene eseguita quindi un'esperienza per testare questa ipotesi, pesando una certa quantità di acqua prima e dopo essere stata raffreddata nel frigorifero. La massa non varia.

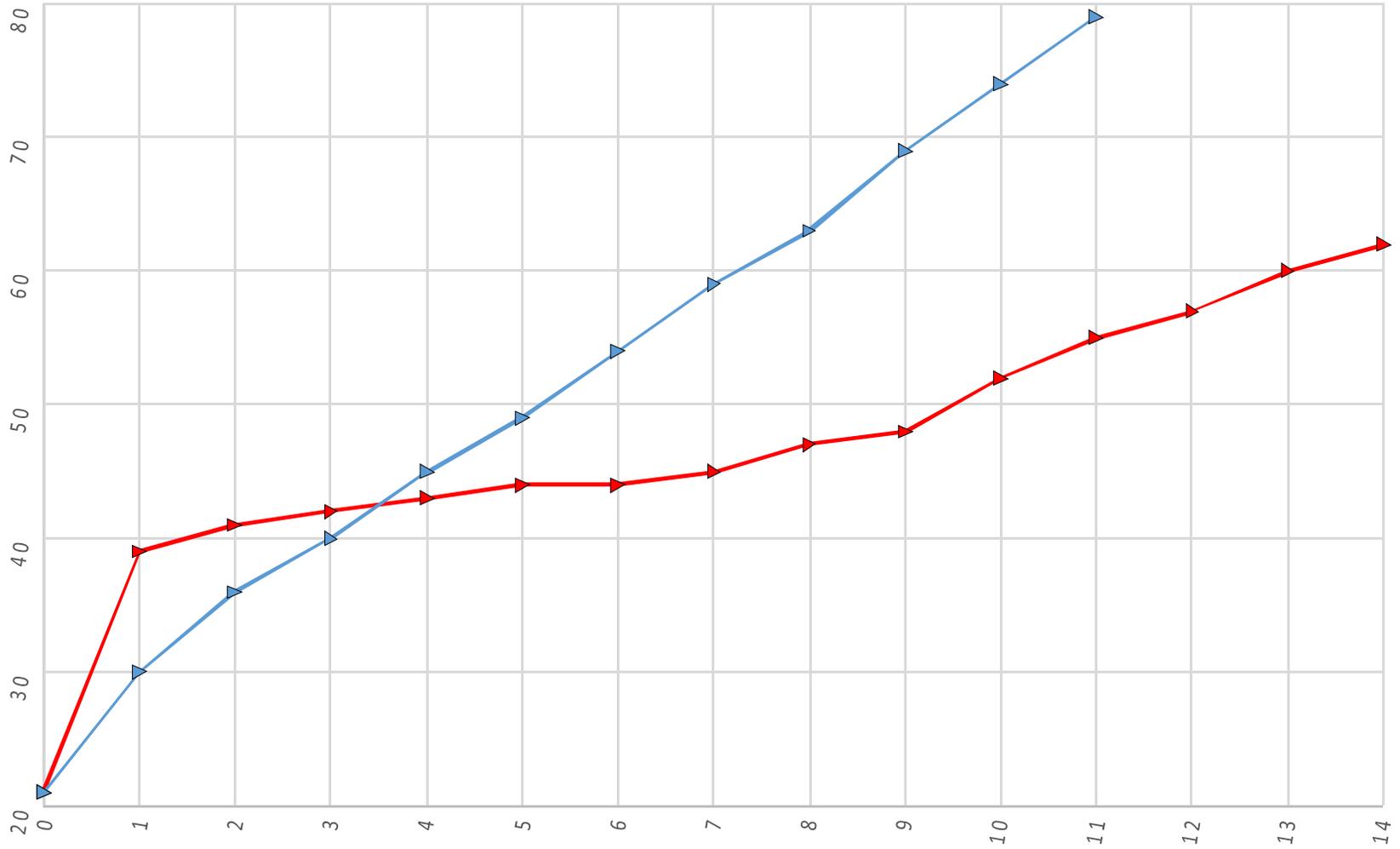
A questo punto l'idea di calore che emerge è sostanzialmente quella di una sostanza priva di massa, cioè quella di fluido calorico.

Sempre durante la discussione sulla natura del calore che segue l'analisi degli esperimenti delle curve di riscaldamento, viene proposto di realizzare il riscaldamento a partire da due fonti indipendenti (fornello e phon).



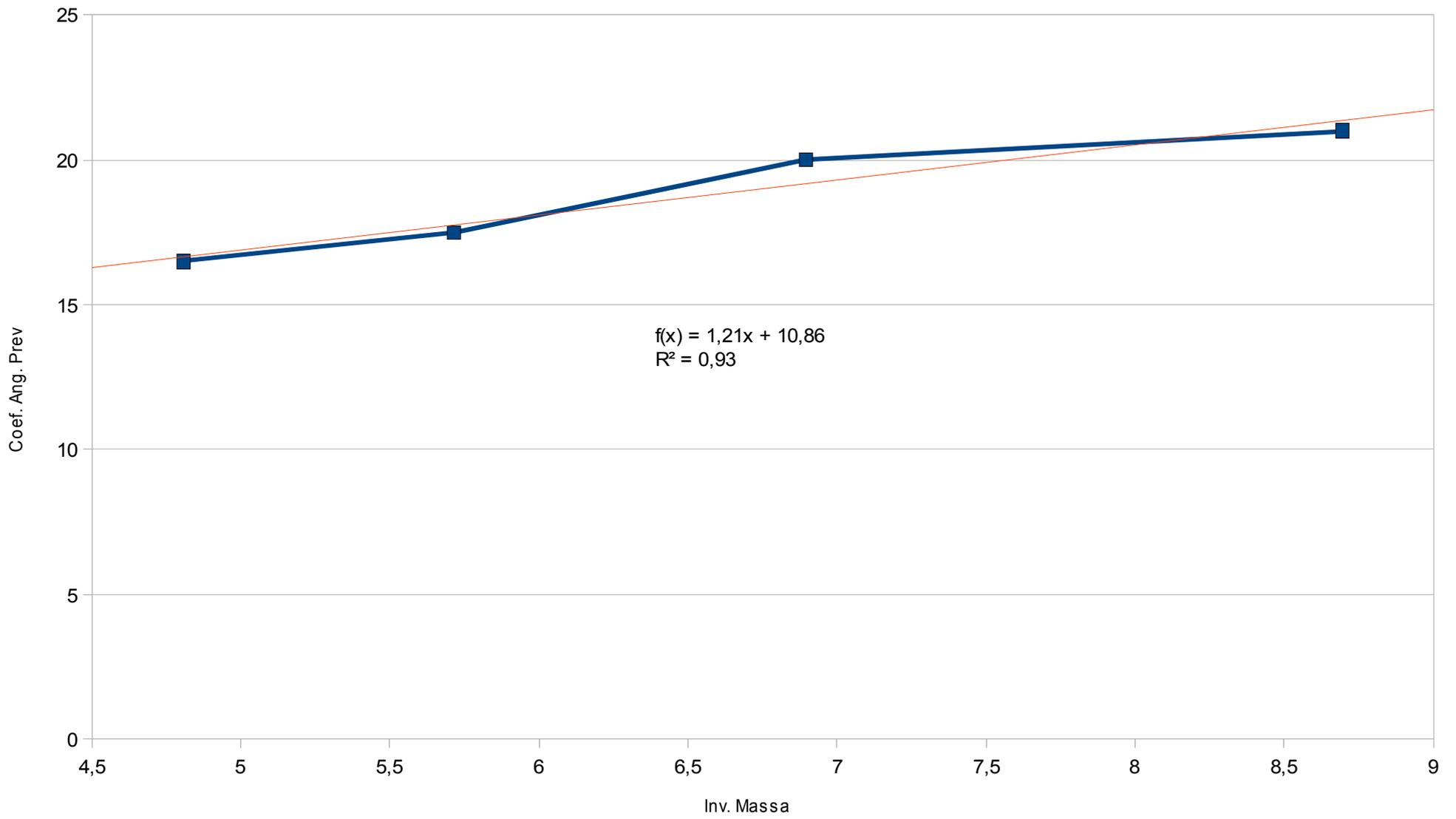
Ci si aspetterebbe di osservare un riscaldamento più veloce (due fonti = più calore), mentre si ha il risultato del seguente grafico (curva rossa => due fonti; curva azzurra => una fonte; tempo in minuti, temperatura in celsius)...

Grafico



Nella discussione che segue l'esperienza, la classe concorda nell'interpretare l'andamento in questi termini: finché la temperatura è bassa l'acqua riceve calore da entrambe le sorgenti, ma quando la sua temperatura diventa maggiore dell'aria calda del phon, quest'ultimo non solo non riscalda più, ma addirittura sottrae calore. Viene quindi acquisito il principio fondamentale che *si può avere passaggio di calore solo in presenza di una differenza di temperatura, e che tale passaggio avviene dal corpo più caldo a quello più freddo.*

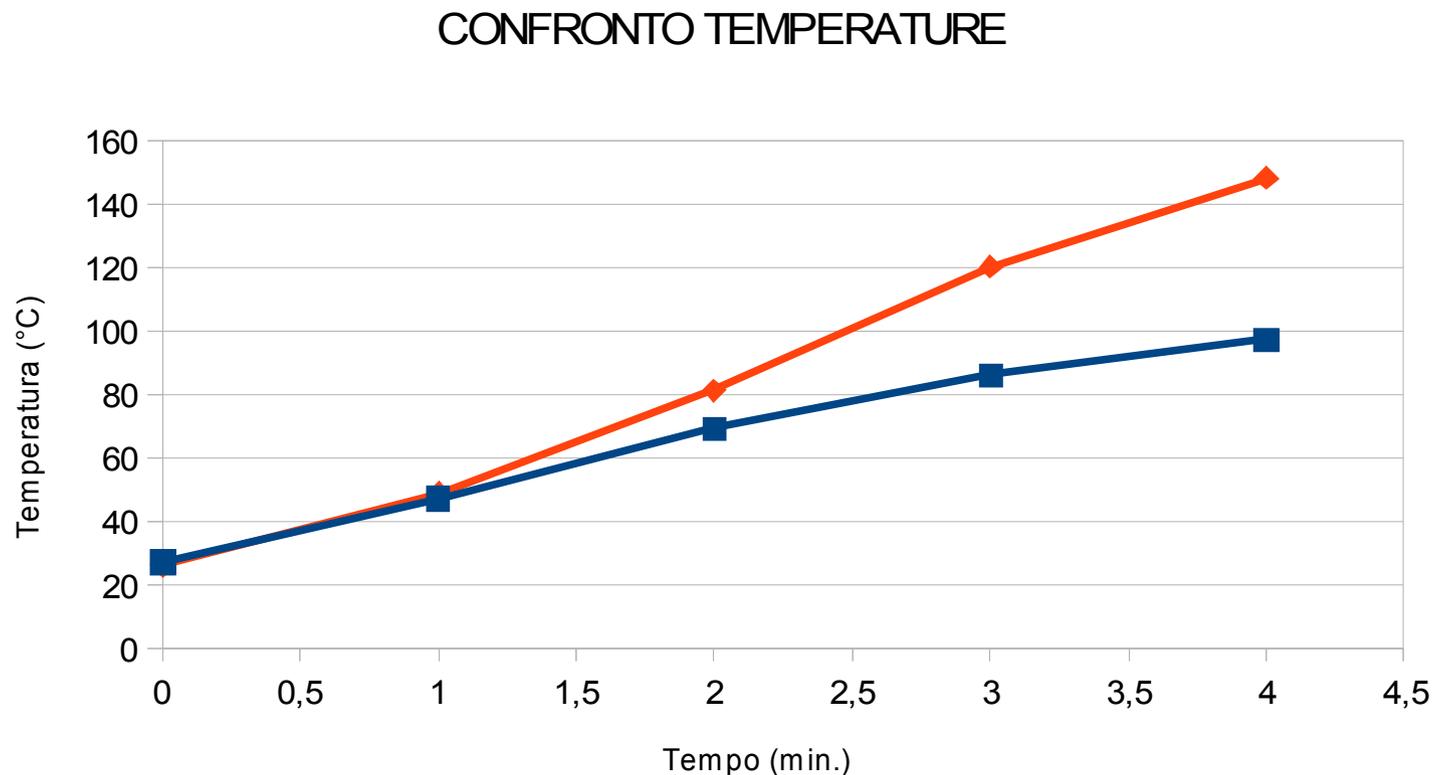
Inizia a questo punto la ricerca di una relazione quantitativa. Si concorda sull'assunzione “ragionevole” che la quantità di calore rilasciata dal fornello per unità di tempo è costante e sul fatto che a parità di tutti gli altri parametri la quantità di calore deve dipendere dalla massa. Sembra inoltre ragionevole che tale dipendenza sia una proporzionalità diretta. Per verificare l'ipotesi vengono realizzate varie curve di riscaldamento con lo stesso fornello variando la quantità di acqua. Si guarda poi come la pendenza delle rette tempo-temperatura dipende dalla massa di acqua impiegata.



Interpretazione del grafico: l'aumento di temperatura è proporzionale al calore fornito e quindi al tempo di riscaldamento; negli esperimenti effettuati questo tasso varia tra i 15 e i 20 gradi al minuto. La costante di proporzionalità tra variazione di temperatura e tempo è il coefficiente angolare della retta di riscaldamento. Ci aspettiamo che tale costante di proporzionalità sia a sua volta inversamente proporzionale alla massa. Per questo motivo sulle ascisse del grafico riportiamo l'inverso della massa misurata in kg.

Osserviamo che la proporzionalità con l'inverso della massa è ben soddisfatta, essendo il coefficiente di regressione lineare molto vicino a 1 (0,93). ***Se quindi l'aumento di temperatura è direttamente proporzionale al calore e inversamente alla massa, ciò significa che il calore è a sua volta direttamente proporzionale al prodotto tra la massa e il salto di temperatura, cioè

Sorge la domanda se la costante di proporzionalità tra calore e prodotto massa \times salto di temperatura sia una costante universale o dipenda dalla sostanza usata. Per rispondere alla domanda si dà il compito di ripetere alcune misure di curve di riscaldamento utilizzando con lo stesso fornello le stesse quantità di acqua e di olio....



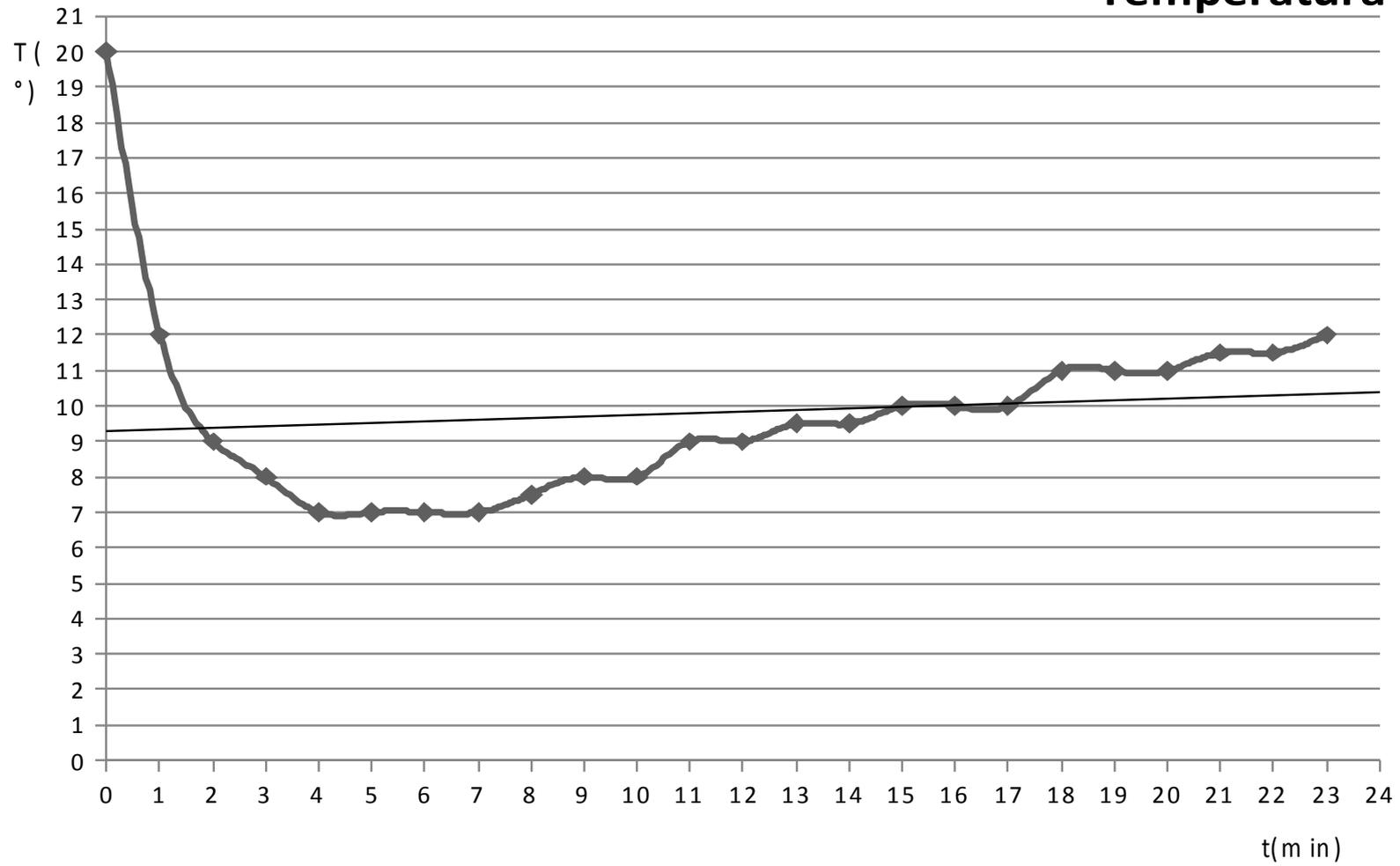
La costante di proporzionalità dipende dalla sostanza data e si giunge ai concetti di *calore specifico* e *capacità termica*.

Si può inoltre definire operativamente l'unità di misura della quantità di calore, **la caloria**: è la quantità di calore che occorre fornire a 1 g di acqua (distillata) per riscaldare la temperatura di 1°C (si tralascia per il momento il discorso sulla pressione atmosferica e sull'intervallo di temperatura da prendere tra 14,5 e 15,5 °C).

Ci si domanda poi se il passaggio di calore comporti sempre una variazione di temperatura. Già nelle misure sulle curve di riscaldamento ci si era resi conto del fatto che la temperatura non riesce a superare i 100 gradi. Inoltre vengono richiamate alcune pre-conoscenze in tal senso dal corso di chimica.

Durante la discussione viene proposto un semplice esperimento: monitorare la temperatura di una miscela di acqua e ghiaccio in un recipiente. Sembra ragionevole che la temperatura debba stabilizzarsi sullo zero, almeno finché è presente una sufficiente quantità di ghiaccio. Invece...

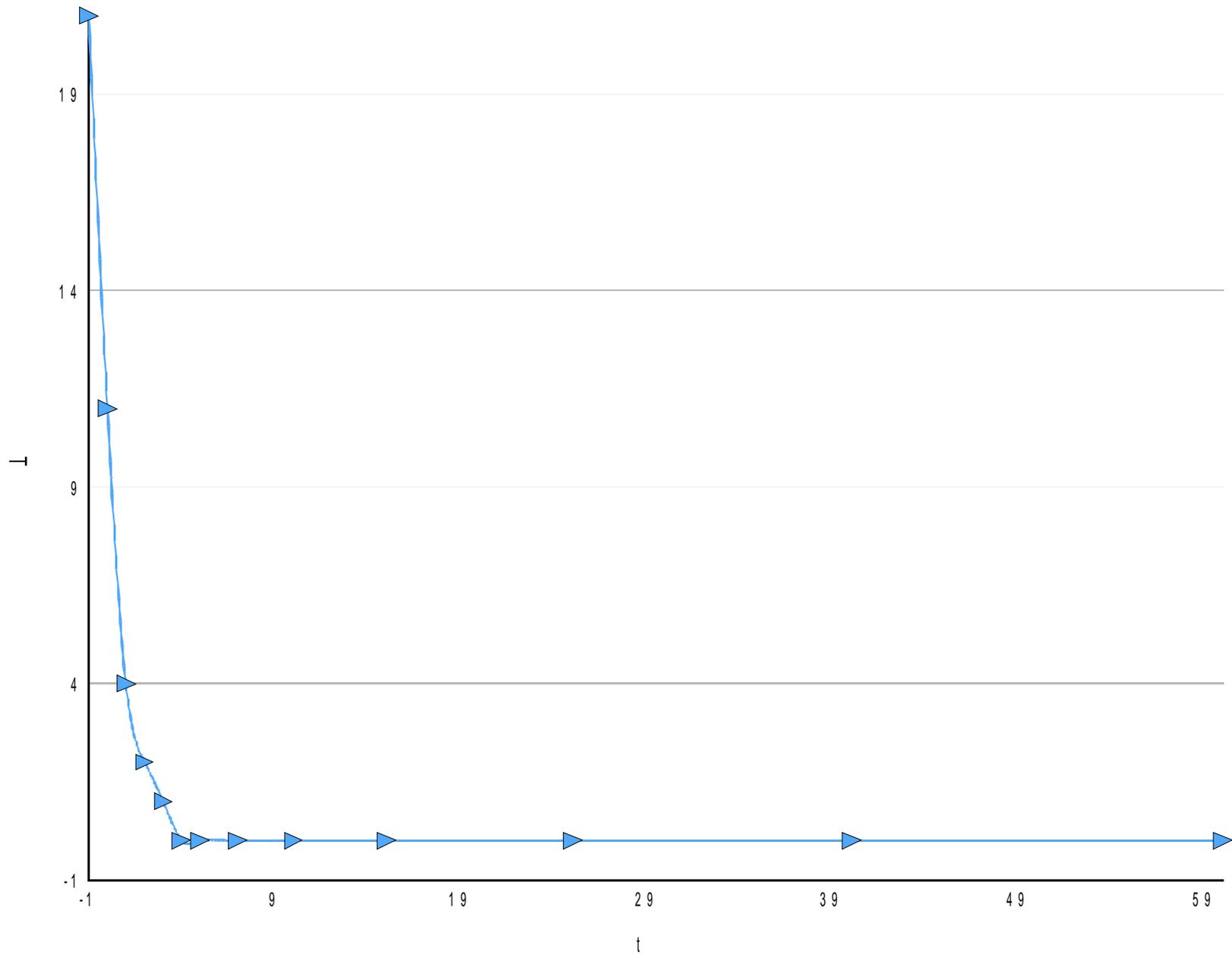
Temperatura



...la temperatura scende rapidamente, si stabilizza intorno a un valore inequivocabilmente maggiore di zero per poi riprendere a crescere lentamente dopo un certo tempo. L'analisi di questo risultato ci porta ad acquisire un concetto importantissimo, quello di **equilibrio dinamico**, o stato stazionario (*steady state*). È importante osservare che questa “scoperta” è stata accidentale, in quanto l'obiettivo primario dell'esperienza era un altro.

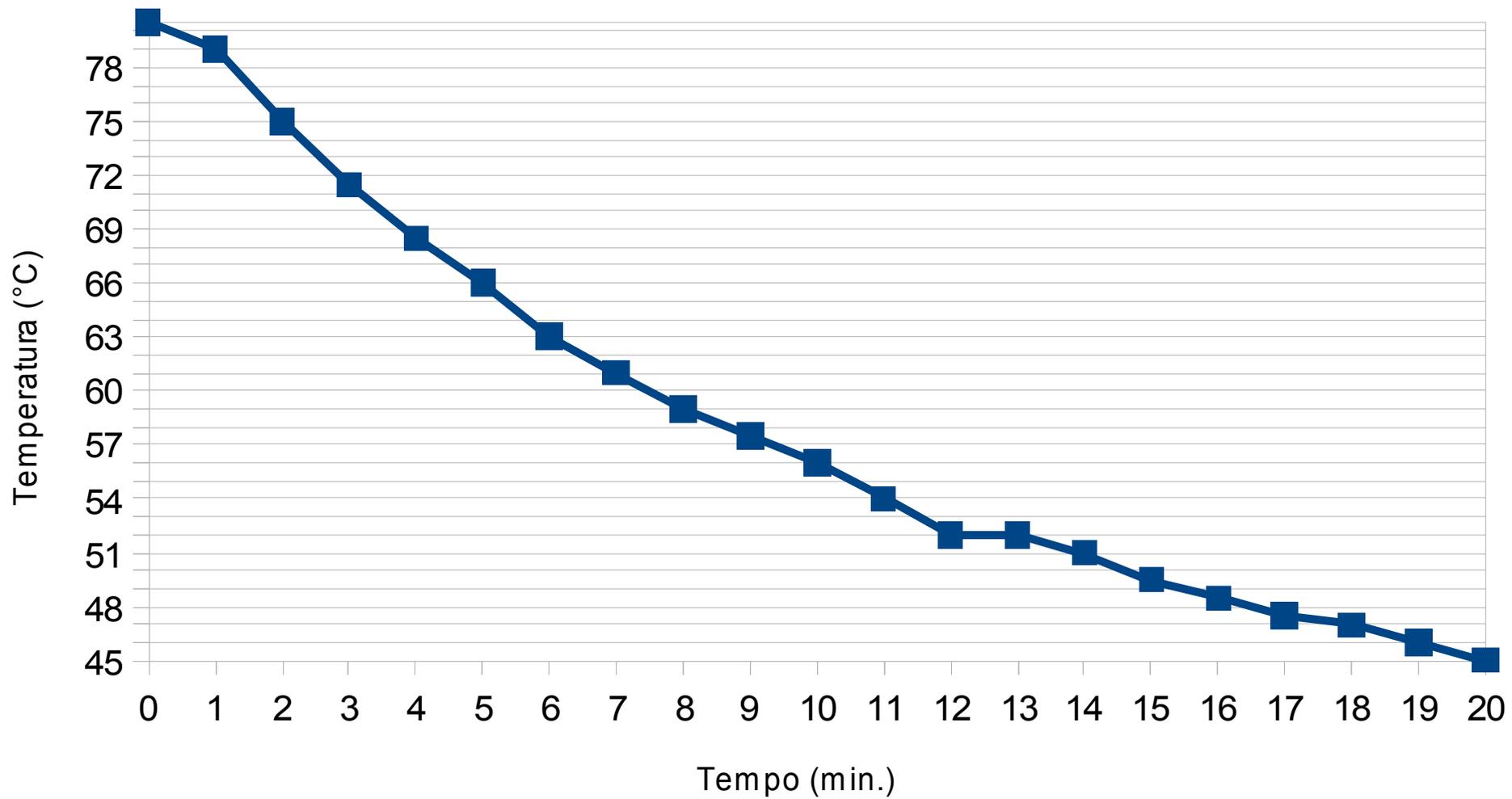
Nell'equilibrio dinamico una certa grandezza fisica rimane costante nel tempo perché, pur essendovi diversi contributi alla sua variazione, questi si annullano esattamente. Nel nostro caso la temperatura dell'acqua si stabilizza su quel valore tale che la velocità con cui viene ceduto calore al ghiaccio è uguale a quella con cui viene assorbito calore dall'ambiente.

Per approfondire l'analisi dell'ipotesi che il valore della temperatura costante dell'acqua sia il frutto dei due passaggi di calore: ghiaccio-acqua e acqua-ambiente, si decide di ripetere l'esperimento mettendo ora la miscela in un thermos. In questo caso manca il passaggio di calore acqua-ambiente, l'acqua arriva rapidamente a zero gradi e poi si realizza uno stato di equilibrio (dopo un giorno nel thermos c'è ancora acqua e ghiaccio a zero gradi...). Nel grafico che segue il tempo è in minuti e la temperatura in gradi celsius.



Con la “scoperta” dell'equilibrio dinamico, e l'ovvia domanda sul perché la temperatura di equilibrio – se non è zero – sia proprio un determinato valore, diverso da un'esperienza all'altra, ecco che si apre all'interno di un solido contesto di senso la questione della velocità degli scambi di calore e dei fattori che la influenzano. Nella discussione che segue l'esperienza, si giunge infatti a formulare l'ipotesi che la differenza di temperatura giochi un ruolo importante nel processo e che se la differenza di temperatura è maggiore tale è anche la velocità di raffreddamento/riscaldamento. In questo modo si spiegherebbe la temperatura costante della miscela acqua/ghiaccio: si stabilizza su quel valore per cui la velocità di riscaldamento e quella di raffreddamento sono esattamente uguali.

L'esperienza successiva è pertanto quella delle curve di raffreddamento: l'acqua in un recipiente viene riscaldata fino ad una certa temperatura e poi lasciata raffreddare misurando la temperatura a intervalli regolari. La ricerca di una precisa legge matematica è resa problematica dall'azione di altri fattori (quali ad esempio l'evaporazione) ma soprattutto dalla limitata precisione del termometro. Infatti i termometri utilizzati hanno la precisione di un grado, e la discesa della temperatura è così lenta che la corrispondente incertezza sul tempo risulta essere dell'ordine del minuto o più.



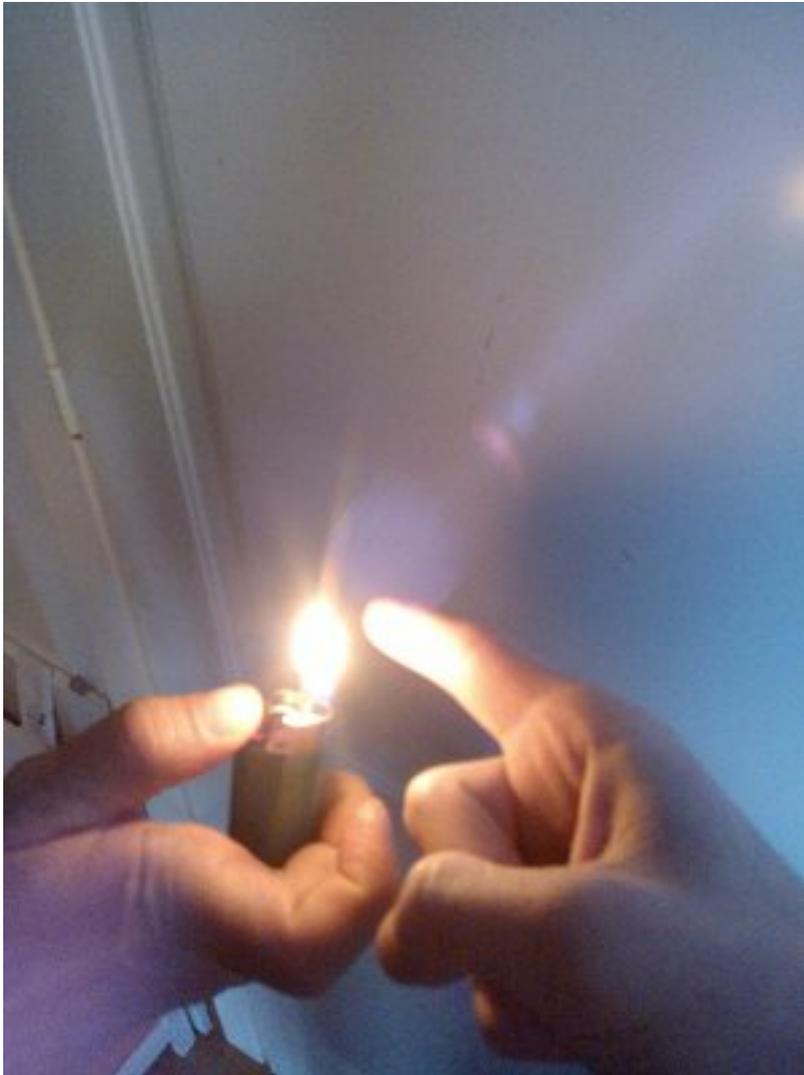
Comunque, analizzando i dati come quelli della figura, si riconosce abbastanza bene una proporzionalità diretta tra la velocità di raffreddamento (pendenza della curva di raffreddamento) e la differenza di temperatura tra l'acqua e quella dell'ambiente..

Ad esempio (assumendo la temperatura ambiente pari a circa 20°), quando la temperatura dell'acqua è intorno a 80° ci sono circa 60° di differenza tra la temperatura dell'acqua e quella ambiente: la temperatura dell'acqua scende di circa 4° ogni 3 minuti. Quando la temperatura dell'acqua vale 60° (circa 40° di differenza con l'ambiente) la pendenza è scesa a 3° ogni 3 minuti, mentre con 30° gradi di differenza la pendenza è circa 2° ogni 3 minuti. Abbiamo cioè con buona approssimazione che la pendenza della curva di raffreddamento aumenta di circa 1 grado ogni 3 minuti per ogni 15 gradi di differenza tra la temperatura dell'acqua e quella dell'ambiente.

Il gap che separa l'osservazione della proporzionalità tra differenza di temperatura e pendenza della curva di raffreddamento dalla legge di Fourier sulla conduzione del calore (che – lo ricordiamo – stabilisce che la velocità con cui il calore fluisce attraverso una parete è direttamente proporzionale alla differenza di temperatura tra i due ambienti separati dalla parete, alla superficie della parete, e inversamente al suo spessore) viene colmato con una attività di... “laboratorialità senza il laboratorio”.

Si ragiona su quelli che possono essere verosimilmente gli altri fattori che influenzano il passaggio di calore attraverso una parete e si prendono in considerazione le osservazioni sui dettagli costruttivi delle abitazioni. Quale effetto hanno le maggiori o minori dimensioni delle finestre sulla dispersione termica? Come mai le case di una volta avevano i muri molto spessi? ecc...

Tramite il semplice esperimento di provare ad avvicinare un dito alla fiamma di un accendino dall'alto o lateralmente, viene evidenziata l'esistenza di un meccanismo di trasmissione del calore differente dalla conduzione e che dipende dalla direzione di propagazione.



È importante osservare che fino a questo punto tutte le osservazioni effettuate sono compatibili con una spiegazione del calore basata sul concetto di fluido calorico e, sebbene nessuna di esse sia ovviamente in contraddizione con l'interpretazione del calore come forma di energia, neppure la richiede.

Il calore come una “sostanza” (priva di massa) risulta un concetto “in continuità” con l'esperienza quotidiana. Non stupisce quindi che dal *Timeo* di Platone fino a Lavoisier – passando per Sthal – questa sia stata la concezione dominante.

Per passare dal fluido calorico al calore come forma di energia non basta evidenziare una proporzionalità tra energia meccanica e quantità di calore nell'esperienza di Joule (l'effetto dell'attrito potrebbe infatti essere spiegato in termini di calorico latente).

L'osservazione chiave è quella del conte Rumford, ministro della guerra del del duca di Baviera, mentre sovrintendeva personalmente alla costruzione dei cannoni. Questa avveniva mediante l'azione di un trapano che scavava dei grossi cilindri di bronzo. Naturalmente i trucioli prodotti erano incandescenti.

Ora, secondo la concezione comunemente accettata alla fine del 700, l'effetto dell'attrito produce calore perché libera una certa quantità di fluido calorico che è "imprigionato" nella materia (calorico latente). Ciò implicherebbe che continuando a frizionare un corpo per un tempo molto lungo alla fine il calorico latente si esaurirebbe e non si dovrebbe più avere l'effetto dell'aumento di temperatura.

Ma, osserva Rumford, la trapanazione degli affusti può andare avanti anche tutto il giorno, e i trucioli della sera non sono meno incandescenti di quelli del mattino.

Naturalmente non è possibile ripetere le osservazioni di Rumford, quindi ci “fidiamo” di lui, accettando il resoconto che ne fa nei suoi scritti.

Se l'energia cinetica di un corpo “scompare” in presenza dell'attrito, ma contestualmente aumenta la temperatura del corpo, è ragionevole che tra l'energia e il calore vi sia un legame stretto. In questa fase della discussione emerge – in maniera ancora un po' confusa – il concetto di energia interna, che gli studenti chiamano “energia termica”.

A questo punto entrano in gioco le trasformazioni di lavoro in calore e viceversa, e diventa problematico continuare con semplici esperimenti da realizzare in casa. Di fatto, ci stiamo avviando alla fine del percorso, che ci ha portato dalla fenomenologia più elementare del calore fino alla soglia del primo principio.

Viene proposta anche una esperienza equivalente a quella di Joule. L'esperienza è più sofisticata di quelle finora eseguite dagli studenti in autonomia a casa, quindi viene realizzata a scuola in laboratorio. Dei pallini di piombo sono messi dentro un lungo tubo di vetro; una delle estremità del tubo è chiusa con un tappo di gomma forato al cui interno è inserito un termometro digitale. Il tubo viene capovolto varie volte e poi si misura l'incremento di temperatura dei pallini.



Le misure non sono molto precise; in particolare la proporzionalità tra il numero di cadute e l'aumento di temperatura dei pallini è ben soddisfatta all'inizio, un po' meno quando ci si discosta di più dalla temperatura ambiente.

Tuttavia nella regione in cui l'accordo è migliore si ottiene un valore per il rapporto tra joule e caloria di circa 4,2. Una osservazione importante è che, a causa delle numerose perdite di calore, l'esperienza di Joule – che pure non presenta grosse difficoltà concettuali – è tutt'altro che semplice nella sua realizzazione.

Una esperienza per evidenziare la perdita di energia meccanica dovuta all'attrito è quella di far rotolare due bottiglie identiche lungo lo stesso piano inclinato; una delle bottiglie è vuota, l'altra contiene acqua. L'esperimento è mostrato in questi due brevi filmati ([bottiglia piena](#), [bottiglia vuota](#)); nel secondo il traguardo raggiunto dalla bottiglia piena è segnato con un astuccio. Come previsto, l'attrito dell'acqua sulla superficie interna della bottiglia fa sì che la bottiglia piena si fermi prima. Tuttavia, provando a calcolare l'aumento di temperatura dell'acqua dovuta a questa perdita di energia ci si accorge che essa non è praticamente apprezzabile.

Riassumendo, a partire dalle preconoscenze del senso comune sulle sensazioni di caldo e freddo, gli studenti sono stati in grado di definire i concetti di calore e temperatura e – passando dal qualitativo al quantitativo – di costruire un modello matematico per una varietà di fenomeni termici. Due sono i fatti più rilevanti emersi nello sviluppo di questo percorso:

- nello studio della prima parte della termodinamica anche esperimenti realizzati con dotazioni “povere” e di limitata precisione possono portare a una comprensione di buon livello;
- un cammino induttivo e laboratoriale ricalca fedelmente quello che è stato lo sviluppo storico della scienza del calore, per cui all’inizio è ragionevole abbracciare la concezione del fluido calorico, e solo di fronte a un panorama fenomenologico vasto sorge l’esigenza di considerare il calore una forma di energia

Verifiche degli apprendimenti

La valutazione si è svolta secondo tre modalità:

- valutazione orale, tenendo conto degli interventi e dei contributi alla discussione e anche – ma non sempre – della tradizionale interrogazione;
- valutazione del lavoro svolto a casa, della qualità delle esperienze effettuate e della loro documentazione;
- test di fine unità in modalità ibrida: sia domande a risposta chiusa che domande a risposta aperta.

Esempi di domande chiuse

Quale tra le seguenti affermazioni riguardanti il passaggio di calore tra due corpi non è necessariamente vera?

- a) se un corpo riceve calore la sua temperatura aumenta
- b) se la temperatura di un corpo diminuisce esso non ha ricevuto calore
- c) se la temperatura di un corpo aumenta esso ha ricevuto calore
- d) se i due corpi hanno la stessa temperatura non c'è passaggio di calore tra di essi
- e) nessuna delle precedenti

Due corpi a diversa temperatura sono posti a contatto; la quantità di calore persa dal più caldo e quella ricevuta dal più freddo sono uguali

- a) se i due corpi hanno la stessa massa
- b) se i due corpi hanno lo stesso calore specifico
- c) se per i due corpi il prodotto della massa per il calore specifico è lo stesso
- d) in ogni caso
- e) nessuna delle precedenti

Esempio di domanda aperta

Per raffreddare una tazza di caffè bollente posso rovesciarvi dentro una certa quantità di latte freddo, o aspettare due minuti. Decido di fare entrambe le cose. In quale caso la temperatura finale sarà più bassa: prima verso il latte freddo e poi aspetto due minuti, oppure prima aspetto due minuti e poi verso il latte freddo? Giustifica la tua risposta in massimo 5 righe.

Analisi dei risultati ottenuti

Il principale risultato di questo percorso didattico è, a giudizio dell'insegnante, quello ottenuto in termini di partecipazione e coinvolgimento. Naturalmente ci sono state varie sfumature (alcuni studenti si sono buttati con entusiasmo nell'attività di ricerca, altri – fortunatamente pochi – non hanno saputo o voluto accettare il fatto di procedere senza la guida delle spiegazioni).

Dal punto di vista più strettamente legato all'apprendimento, è da sottolineare il dato della sua significatività, come si è manifestato nelle discussioni in classe. Sono stati infatti molteplici i riferimenti a situazioni di vita reale venuti spontaneamente dagli studenti: dagli impianti di riscaldamento alla termoregolazione degli animali, dal clima al contenuto energetico degli alimenti.

Vi è infine stata una importante ricaduta sulla successiva unità didattica riguardante le trasformazioni di calore in lavoro, il secondo principio della termodinamica, l'entropia.

Avendo bene introiettato i concetti base relativi al calore e alla sua dinamica, gli studenti si sono trovati a proprio agio anche con gli aspetti intellettualmente più impegnativi, necessari per comprendere trasformazioni e irreversibilità

Valutazione dell'efficacia del percorso: considerazioni del gruppo di ricerca LSS

Questo percorso, a lungo meditato e discusso, rappresenta per certi versi una situazione ideale per applicare la didattica costruttivista. Infatti le esperienze proposte agli studenti non presentano particolari difficoltà di realizzazione e tuttavia forniscono materia per approfondire concetti tutt'altro che banali.

Il fatto di riservare la maggior parte degli esperimenti al lavoro domestico pomeridiano ha reso possibile la realizzazione in classe di molte discussioni plenarie – autentici momenti di creazione della conoscenza – in cui agli studenti è stato dato modo di riflettere in piena libertà su una gran quantità di dati e osservazioni e di avanzare ipotesi anche poco verosimili ma non per questo non degne di una analisi. Da queste analisi sono spesso scaturiti insospettiti spunti e proposte per altri esperimenti, nonché originali proposte per i successivi sviluppi del percorso di ricerca.