

# Calore Latente di Fusione



www.lepla.eu



## Obiettivo

Con questa attività ci si propone di studiare il processo di trasferimento di calore all'interno di un sistema termodinamico mentre avviene la fusione di un pezzo di ghiaccio immerso in acqua.

L'esperimento consiste nell'osservare il grafico della temperatura dell'acqua durante il passaggio di stato di una determinata massa di ghiaccio. I dati raccolti con una calcolatrice grafica vengono analizzati usando la curva esponenziale della legge del raffreddamento ed il modello per il trasferimento di calore durante i passaggi di stato. Viene anche stimato il valore del calore latente di fusione dell'acqua.

## Contenuti

Aspetti Teorici

Apparato Sperimentale

Acquisizione Dati (TI83)

Analisi Dati (TI83)

Analisi Dati (Excel)



## Aspetti Teorici

### Passaggi di stato dovuti al trasferimento di energia termica

Il trasferimento di energia termica può causare variazioni molto significative nella struttura interna di un materiale e può portare al passaggio ad un differente stato di aggregazione della materia. Il passaggio da una fase all'altra è detto **transizione di fase**. Esempi di transizione di fase sono i passaggi di stato liquido-gassoso, liquido-solido, solido-gas. Per una data sostanza ogni passaggio di stato (ad una data pressione) avviene ad una ben definita temperatura, in cui si ha la coesistenza delle due fasi differenti. Lo scambio di calore non provoca variazioni di temperatura finché la transizione di fase non è conclusa.

La quantità di energia termica necessaria per la transizione di fase solido-liquido per unità di massa di una data sostanza è detta **calore latente di fusione** di quella sostanza e si indica con  $L$  [J/kg].

Il calore di fusione di un materiale dipende anche dalla pressione.

La quantità di energia termica (calore)  $Q_m$  necessaria per fondere una massa  $m$  di una data sostanza è data dall'equazione 1:

$$Q_m = m \cdot L$$

(1)

La figura 1 mostra l'andamento della temperatura e lo stato fisico di una sostanza quando viene fornita in modo continuo dell'energia termica.

Si parte dallo stato solido: la temperatura aumenta sino ad arrivare ad una temperatura ben definita, detta "temperatura di fusione"; a questo punto l'energia assorbita non provoca un ulteriore aumento di temperatura, ma un passaggio di fase da solido-liquido. Quando tutta la massa è passata allo stato liquido la temperatura riprende ad aumentare. Quindi il liquido aumenta di temperatura sino ad arrivare ad un'altra temperatura caratteristica (punto di ebollizione) alla quale inizia la transizione di fase liquido-gas.

Di nuovo si osserva che un trasferimento continuo di energia termica non provoca ulteriori aumenti di temperatura ma un passaggio di fase.

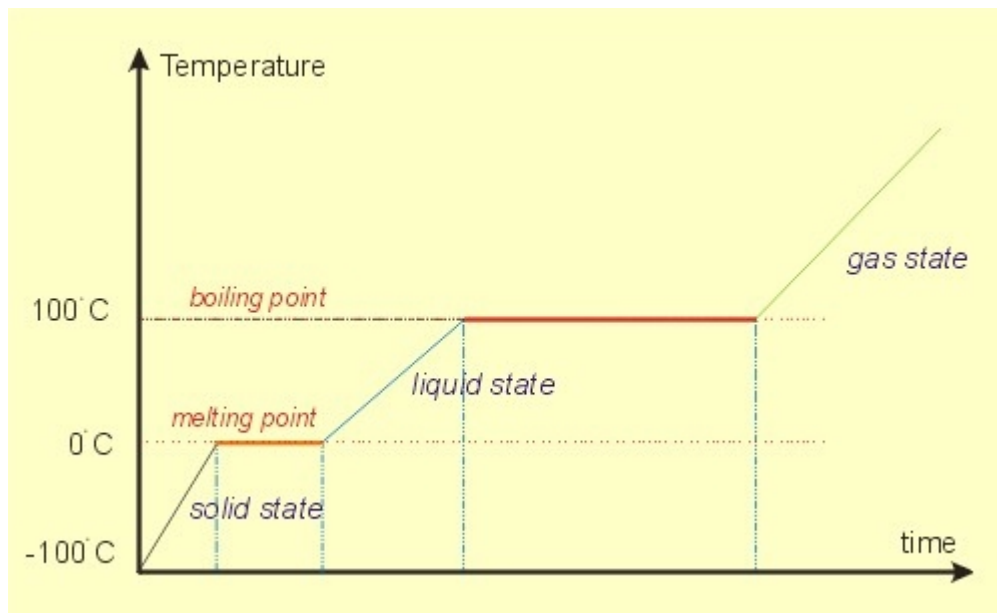


Fig.1. Variazioni di temperatura di un campione d'acqua sottoposto a riscaldamento.

Quando oggetti di temperatura diversa sono posti in contatto (per esempio mischiati) scambiano energia termica. Il corpo caldo cede calore a quello freddo. Il processo continua sino al raggiungimento dell'equilibrio termico (puoi vedere anche il modulo [Equilibrio termico tra due corpi](#)).

Se il sistema è isolato termicamente e non scambia calore con l'ambiente circostante la quantità di calore persa dal corpo caldo  $Q_c$  eguaglia quella acquisita dal corpo freddo  $Q_f$ .

Questa è una situazione ideale molto difficile da realizzare nella pratica. Anche usando appositi strumenti da laboratorio (calorimetri) si verifica comunque un piccolo scambio di calore con l'ambiente.

La temperatura del contenuto del calorimetro tende comunque a raggiungere la temperatura ambiente. Se inizialmente è più alta tende a diminuire seguendo un andamento esponenziale (puoi vedere anche il modulo sulla [Legge del Raffreddamento di Newton](#)).

Se si vuol fare una misura calorimetrica accurata occorre tener conto di questi scambi di calore.

## Metodi calorimetrici per la determinazione del Calore Latente di Fusione

Il calore latente di fusione dell'acqua (o meglio del ghiaccio)  $L$  può essere misurato immergendo alcuni pezzi di ghiaccio (che si trovano esattamente alla temperatura di fusione,  $0^\circ\text{C}$ ) all'interno di un calorimetro che contiene una quantità nota di acqua alla temperatura iniziale  $T_1$ . Il calore fluisce dall'acqua al ghiaccio ed il ghiaccio inizia a sciogliersi. Al termine del processo la miscela raggiunge la temperatura finale  $T_2$ .

Tutte le parti del calorimetro prendono parte a questo processo di trasferimento di calore. Perciò dobbiamo includere la quantità di calore perso  $Q_C$  nel bilancio energetico.

L'energia totale ceduta  $Q_1$  può essere espressa come la somma di due parti:

- il calore perso dall'acqua  $Q_w$ , la cui quantità è data dall'equazione 2:

$$Q_w = m_w \cdot c_w \cdot (T_1 - T_2) \quad (2)$$

dove:

$m_w$  è la massa dell'acqua contenuta inizialmente nel calorimetro

$c_w$  è il calore specifico dell'acqua

$T_1$  è la temperatura iniziale del calorimetro con dentro l'acqua

$T_2$  è la temperatura finale all'interno del calorimetro

- il calore perduto dal calorimetro  $Q_c$ , che è dato da:

$$Q_c = m_c \cdot c_c \cdot (T_1 - T_2) \quad (3)$$

dove:

$m_c$  è la massa del contenitore e del supporto isolante del calorimetro

$c_c$  è il calore specifico del materiale del quale è fatto il calorimetro

$T_1$  è la temperatura iniziale del calorimetro con l'acqua

$T_2$  è la temperatura finale all'interno del calorimetro

L'energia termica totale assorbita  $Q_g$  consiste di:

- il calore assorbito dal ghiaccio ed utilizzato per la transizione di fase  $Q_m$ , che è dato dall'equazione 5:

$$Q_m = m_i \cdot L \quad (5)$$

dove:

$m_i$  è la massa del ghiaccio

$L$  è il calore latente di fusione

- il calore assorbito dall'acqua generata dalla fusione del ghiaccio  $Q_i$ , che è dato dall'equazione 6:

$$Q_i = m_i \cdot c_w \cdot (T_2 - T_0) \quad (6)$$

dove:

$m_i$  è la massa di ghiaccio

$c_w$  è il calore latente di fusione dell'acqua

$T_0$  è la temperatura del punto di fusione dell'acqua

$T_2$  è la temperatura finale del contenuto del calorimetro

Perciò l'energia totale assorbita è data dall'equazione 7:

$$Q_g = m_i \cdot L + m_i \cdot c_w \cdot (T_2 - T_0)$$

(7)

Assumendo che il contenuto del calorimetro si trovi termicamente isolato, l'energia termica ceduta  $Q_i$  eguaglia l'energia termica assorbita  $Q_g$ :

$$Q_i = Q_g$$

(8)

e:

$$m_w \cdot c_w \cdot (T_1 - T_2) + m_c \cdot c_c \cdot (T_1 - T_2) = m_i \cdot L + m_i \cdot c_w \cdot (T_2 - T_0)$$

(9)

Il Calore Latente di Fusione  $L$  può essere ricavato dall'equazione 9 come:

$$L = \frac{(m_w \cdot c_w + m_c \cdot c_c) \cdot (T_1 - T_2)}{m_i} - m_i \cdot c_w \cdot (T_2 - T_0)$$

(10)

Quindi misurando la temperatura del contenuto di un calorimetro di massa nota riempito con una quantità nota di acqua, conoscendo la quantità di ghiaccio che viene immessa, si può calcolare il calore latente di fusione del ghiaccio.

La figura 2 mostra l'andamento teorico previsto. Il ghiaccio viene immerso nell'acqua all'istante  $t_0$ . Prima del momento  $t_0$  la temperatura è costante.

Quando si immerge il ghiaccio dell'energia termica viene impiegata per sciogliere il ghiaccio e l'acqua viene raffreddata dal ghiaccio fuso. Così la temperatura della miscela diminuisce. Lo scambio di calore cessa quando la temperatura assume un valore ben definito.

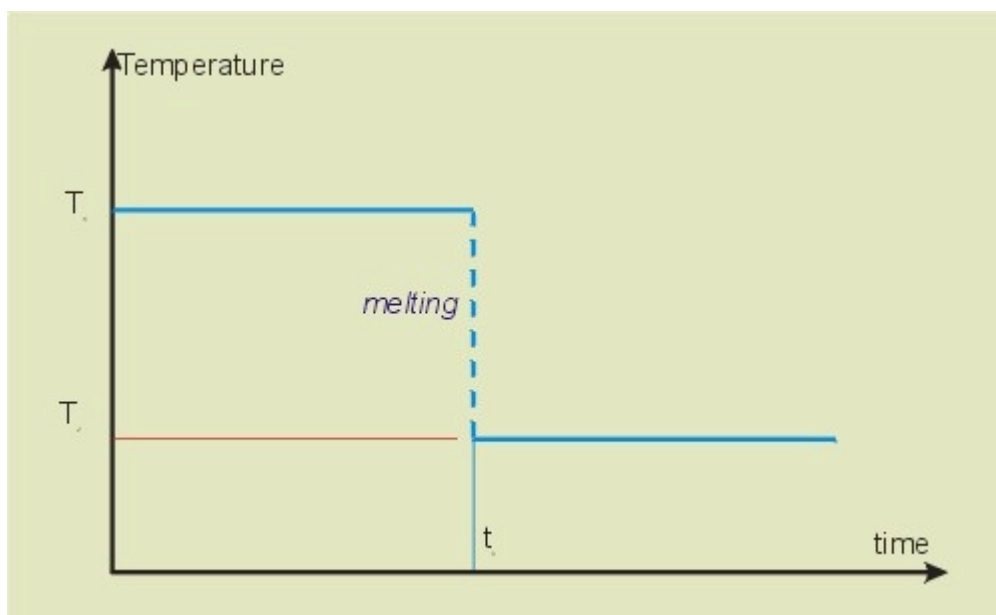


Fig.2. Variazioni di temperatura durante la fusione. Caso ideale senza raffreddamento.

In pratica però non si ottiene mai questo andamento perché il calorimetro partecipa agli scambi di calore; il grafico della temperatura è diverso da quello ideale.

Prima dell'immersione del ghiaccio la temperatura comunque diminuisce seguendo la legge esponenziale del raffreddamento. Dell'energia termica viene trasferita all'ambiente in modo continuo sia durante la fusione del ghiaccio che successivamente. Il grafico che si ottiene è mostrato in figura 3.

L'equazione 10 richiede due valori della temperatura: quella iniziale  $T_1$  e quella finale  $T_2$  dopo che il ghiaccio è fuso e l'intero contenuto del calorimetro è ad una temperatura uniforme.

Questi valori possono essere stimati con una costruzione geometrica. Si possono estrapolare le due parti e si può tracciare una linea verticale in modo da bilanciare le due aree definite dal grafico. I punti di intersezione con le linee estrapolate ci danno i valori della temperatura ricercati per l'equazione precedente.

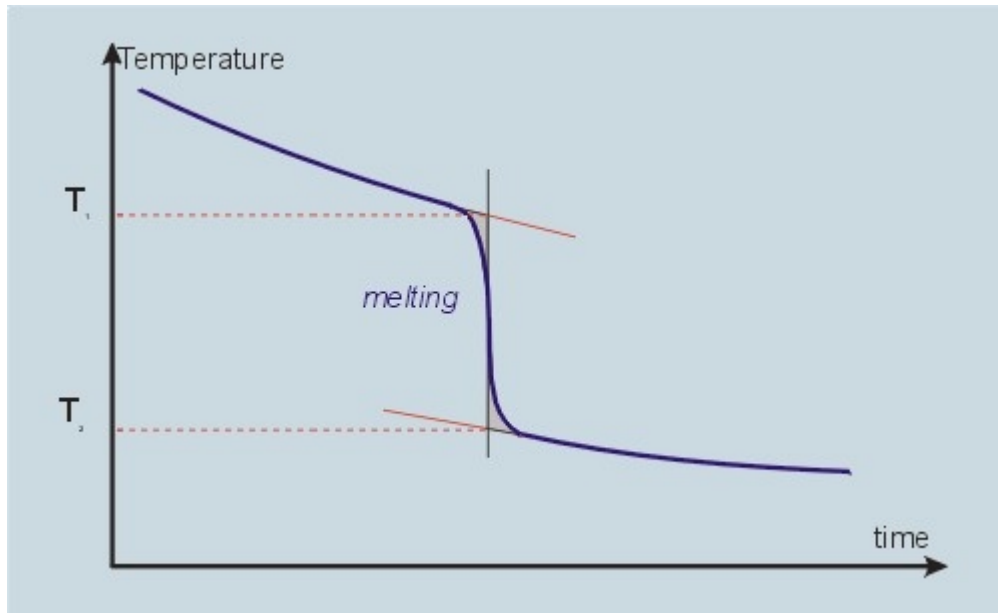


Fig.3. Variazione della temperatura durante la fusione. Caso reale con raffreddamento.

## Apparato Sperimentale

L'apparato sperimentale è mostrato nella foto della prima pagina.

I valori della temperatura sono stati acquisiti facendo uso di un apparato sperimentale molto semplice che consiste di un calorimetro di alluminio ed di un agitatore elettromagnetico, come mostrato in figura 4. La sonda che abbiamo usato è un semplice sensore a semiconduttore che immerso nel contenitore del calorimetro, misura i valori della temperatura. Il calorimetro minimizza gli scambi di calore con l'esterno, mentre l'agitatore serve per rendere uniforme la temperatura del contenuto del calorimetro. La bilancia da laboratorio serve per determinare la massa del calorimetro, dell'acqua e del ghiaccio.

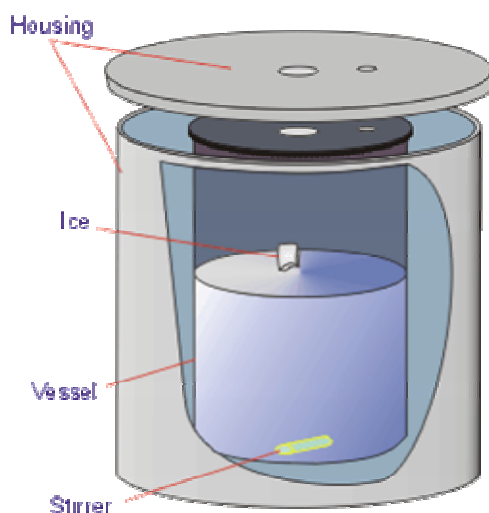


Fig.4. Calorimeter.

I materiali e gli strumenti necessari sono:

- un calorimetro di alluminio con un alloggiamento per la sonda, [vedi foto](#).
- un agitatore elettromagnetico, [vedi foto](#)
- bilancia di laboratorio (portata 200 gr), [vedi foto](#)
- acqua calda (100 gr)
- alcuni pezzi di ghiaccio (circa 20 gr)
- una interfaccia [CBL](#) o [CBL2](#), [vedi foto](#)
- una sonda di temperatura ([sonda standard in dotazione col CBL](#)), [vedi foto](#).
- una calcolatrice grafica [TI83 Plus](#), [TI83 Plus SE](#), [TI89](#), [TI92](#), [TI92 Plus](#), [TI Voyage 200](#)
- un cavo di collegamento standard, [vedi foto](#).
- il programma LHEATF – disponibile qui: [LHEATF](#)
- un cavo [TI-GGRAPH LINK™](#) (opzionale) e il [programma](#)
- un PC con il programma TI Connect™ software (opzionale) - description: <http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/features/software.html>  
download: <http://education.ti.com/us/product/accessory/connectivity/down/download.html>

### Note pratiche sulla predisposizione dell'apparato

- La sonda di temperatura deve essere collegata al canale CH1 del CBL.
- La temperatura iniziale dell'acqua deve essere di circa 10 - 20 gradi superiore alla temperatura ambiente.
- Il ghiaccio deve essere tenuto per un po' di tempo fuori dal freezer per raggiungere la temperatura di fusione.
- La sonda di temperatura deve stare sempre immersa nell'acqua contenuta nel calorimetro.
- E' bene che il coperchio del calorimetro sia isolato termicamente.
- L'agitatore elettromagnetico deve stare sempre in azione per tutto l'esperimento per avere una temperatura uniforme della miscela contenuta nel calorimetro.

## Acquisizione Dati (TI 83)

L'esperimento consiste nella misura della temperatura in funzione del tempo dell'acqua contenuta in un calorimetro. Le variazioni di temperatura sono dovute sia alla perdita di calore nell'ambiente circostante che, soprattutto, all'assorbimento di calore da parte del ghiaccio che assorbe energia termica durante il passaggio di stato. E' necessario inoltre misurare la masse del contenitore del calorimetro, dell'acqua e del ghiaccio.

L'acquisizione dati è controllata dal programma **LHEATF** che deve essere trasferito sulla calcolatrice prima di iniziare l'esperimento.

Se hai bisogno di informazioni per compiere questa operazione, trovi sul CD o sul sito una finestra di aiuto.

### Operazioni preliminari:

- Pesa, utilizzando una bilancia da laboratorio, il contenitore del calorimetro con la barretta dell'agitatore. Annota il valore della massa  $m_c$ . Accerta di che materiale è fatto il contenitore del calorimetro.
  - Riempi il contenitore del calorimetro per circa metà del suo volume con dell'acqua, possibilmente distillata.
  - Pesa nuovamente il contenitore, con dentro l'acqua e la barretta dell'agitatore.
  - Calcola la massa d'acqua -  $m_w$ .
  - Scalda il contenitore con l'acqua sino a raggiungere una temperatura tra 40 e 50 °C. Puoi usare un riscaldatore elettrico oppure riempire direttamente il contenitore con acqua calda.
  - Inserisci il contenitore nel calorimetro e coprilo con l'apposito coperchio.
  - Inserisci la sonda di temperatura, facendo attenzione che sia immersa nell'acqua.
  - Connetti la sonda al CBL e il CBL alla calcolatrice.
- Con questo video puoi vedere i dettagli della fase di preparazione.

### Raccolta Dati

- Avvia il programma **LHEATF** selezionandolo dal menù **PRGM**.
- Scegli l'opzione **1: COLLECT DATA** dal menù principale.
- Imposta i valori della temperatura minima e massima per il grafico della temperatura. Questi valori non influiscono sull'acquisizione dei dati ma solo sulla visualizzazione durante la misura.
- Imposta la durata dell'esperimento espressa in secondi. Occorre considerare un tempo di 5-15 minuti prima e dopo la transizione di fase.
- Imposta l'intervallo di campionamento in secondi quando il programma lo richiede. Poiché la temperatura dell'acqua varia rapidamente durante la transizione di fase, suggeriamo di campionare ogni 5 secondi.
- Introduci la velocità di riferimento della variazione di temperatura **R**, quando il programma lo richiede. Il valore di riferimento non deve essere superiore a 0.02.

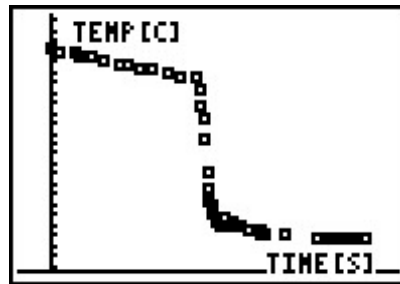
**R** è definito dall'equazione 11.

$$R = \frac{|T_{n+1} - T_n|}{T_n} \quad (11)$$

Il valore **R** è usato dal programma LHEATF per registrare o escludere i punti sperimentali. Verranno registrati solo quei punti per i quali **R** è superiore al valore di riferimento, ossia quelli per i quali c'è una significativa variazione della temperatura. Questa procedura è utile per occupare meno memoria sulla calcolatrice, ma non è indispensabile.

- Sistema il calorimetro sull'agitatore elettromagnetico ed accendilo. L'agitatore serve perchè il liquido all'interno del contenitore abbia una temperatura uniforme.
- Controlla la posizione della sonda di temperatura ed inizia la raccolta dati premendo [ENTER].
- Osserva il grafico sullo schermo della calcolatrice per qualche minuto. Il grafico viene aggiornato man mano che la temperatura diminuisce a causa degli scambi termici con l'esterno ([Fig.](#)).
- Prepara alcuni pezzi di ghiaccio di grandezza opportuna per le dimensioni del calorimetro. Lasciali fuori dal freezer.

- Dopo qualche minuto (da 3 a 5) immergi il ghiaccio nel calorimetro. Osserverai una rapida variazione di temperatura. (Fig.).
- Prosegui con la raccolta dati sino al termine del tempo stabilito per l'osservazione, al termine del quale il grafico finale verrà visualizzato sullo schermo.



Temperature vs time

- 
- Quindi scegli **Quit** dal menù principale per uscire dal programma.
- Pesa nuovamente il contenitore. Calcola la massa del ghiaccio –  $m_i$ .



Sul CD o sul sito puoi trovare un video che mostra le varie fasi dell'esperimento. I dati sono registrati nella memoria della calcolatrice.



## Dati Campione (TI 83)

### Parametri per la Raccolta e l'Elaborazione Dati:

- massa del calorimetro  $m_C=0.07626\text{kg}$
- massa d'acqua  $m_W = 0.08965\text{kg}$
- massa del ghiaccio  $m_i= 0.0185\text{kg}$
- calore latente per l'acqua  $c_W= 4190 \text{ J/kgK}$
- calore latente per l'alluminio  $c_C= 910 \text{ J/kgK}$
- durata totale della misura: **800 sec**
- intervallo di campionamento: **5 sec**
- velocità di riferimento per la variazione di temperatura  **$R= 0.005$**
- temperatura massima attesa:  $T_{\max}=50 \text{ }^\circ\text{C}$
- temperatura minima attesa:  $T_{\min}=20 \text{ }^\circ\text{C}$

### Dati Campione

- Istanti di tempo  $t$ , in secondi - Lista  $L_1$
- Valori della Temperatura  $T$  in  $[\text{ }^\circ\text{C}]$  - Lista  $L_2$

IL programma LHEATF crea delle copie delle liste e le registra in due coppie liste ausiliarie:

- I : istanti di tempo in secondi - Lista  $L_3$  ; valori della temperatura  $T$  in  $[\text{ }^\circ\text{C}]$  - Lista  $L_4$
- II pair: istanti di tempo in secondi - Lista  $L_5$  ; valori della temperatura  $T$  in  $[\text{ }^\circ\text{C}]$  - Lista  $L_6$

Queste liste possono essere usate per graficare ed analizzare i dati lasciando inalterate le liste dati originali  $L_1$  e  $L_2$ .

I dati sperimentali sono disponibili sul CD o sul sito anche in formato Excel

## Analisi Dati (TI 83)

I dati sono registrati nelle liste della calcolatrice:

- Istanti di tempo t, in secondi - Lista L<sub>1</sub>
- Valori della Temperatura T in [°C] - Lista L<sub>2</sub>

Il programma LHEATF crea delle coppie di liste ausiliarie:

- I: Istanti di tempo t, in secondi L<sub>3</sub> ; Valori della Temperatura T in [°C] - List L<sub>4</sub>
- II: Istanti di tempo t, in secondi - List L<sub>5</sub> ; Valori della Temperatura T in [°C] - List L<sub>6</sub>

Queste liste possono essere usate per l'analisi grafica senza modificare i dati originali contenuti nelle liste L1 e L2. Un set di dati campione è disponibile sul CD e sul sito.

### Come trovare il valore delle temperature.

Per calcolare il valore del calore latente di fusione con l'equazione 10 abbiamo bisogno dei valori della temperatura dell'acqua prima e dopo la transizione di fase, rispettivamente T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub>.

$$L = \frac{(m_w \cdot c_w + m_c \cdot c_c) \cdot (T_1 - T_2)}{m_i} - m_i \cdot c_w \cdot (T_2 - T_0) \quad (10)$$

A causa del continuo processo di scambio di calore con l'esterno il grafico reale differisce da quello teorico. Le temperature T<sub>1</sub> e T<sub>2</sub> possono essere determinate dal grafico sperimentale col metodo della interpolazione geometrica.

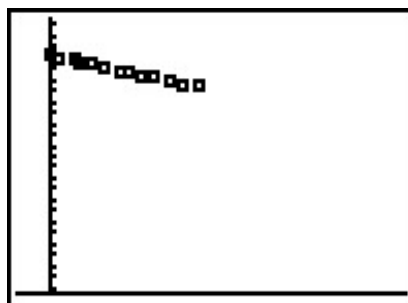
Il grafico può essere diviso in tre parti: prima, durante e dopo il cambiamento di fase nella transizione ghiaccio-acqua.

Nella calcolatrice TI83 tale divisione può essere fatta selezionando i dati a partire dal grafico. Per far ciò conviene usare le liste ausiliarie L<sub>3</sub>, L<sub>4</sub>, L<sub>5</sub>, L<sub>6</sub>.

Sul sito o sul CD puoi trovare altre figure che mostrano le schermate della calcolatrice nei vari passaggi.

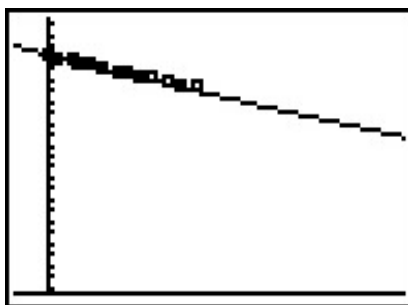
### Per separare la parte iniziale della curva di raffreddamento.

- Definisci il **Plot2** graficando L<sub>3</sub> in funzione di L<sub>4</sub> ([Fig.](#)).
- Usa la funzione **Select** dal **[2nd] [LIST]** menù ([Fig.](#)) e digita il nome delle liste ([Fig.](#)).
- Evidenzia il primo e l'ultimo punto del grafico ([Fig.](#))
- Con questa operazione i dati nelle liste saranno sostituiti con i soli dati selezionati sul grafico.

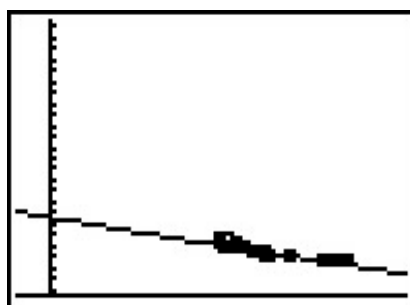


### Estrapolazione della parte iniziale.

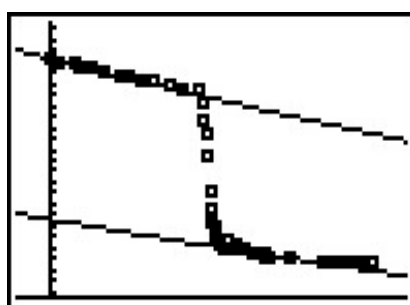
- Assumendo che il raffreddamento abbia un andamento esponenziale, effettuiamo una regressione esponenziale scegliendola dal menù [STAT] [CALC].
- Dobbiamo digitare i nomi delle liste come argomenti della funzione **ExpReg**, insieme al nome della variabile nella quale vogliamo registrare l'equazione della regressione **Y<sub>1</sub>**.  
Sullo schermo vengono mostrati i valori dei parametri della funzione di regressione.
- Si possono sovrapporre ai dati sperimentali.



In modo simile si possono isolare ed estrapolare i valori della parte finale usando le liste **L<sub>5</sub>** ed **L<sub>6</sub>**. La seconda funzione di regressione viene registrata nella variabile **Y<sub>2</sub>** e graficata sul **Plot3**.



Adesso si possono vedere insieme i dati originali e le funzioni di regressione (activate all plots ).

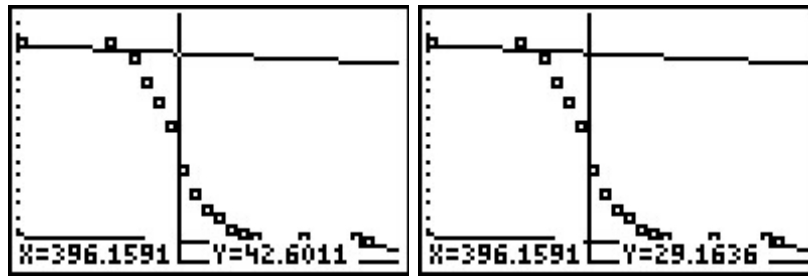


### Interpolazione delle temperature

Le temperature **T<sub>1</sub>** e **T<sub>2</sub>** possono essere determinate dal grafico tracciando una linea verticale tale da bilanciare le due aree definite dalle curve di interpolazione.

- Seleziona la parte centrale del grafico con l'opzione **ZBox** del menù **ZOOM** ([Fig.](#)).  
Seleziona parte del grafico ([Fig.](#)).
- Usa l'opzione **Vertical** dal menù **[DRAW]** per tracciare la linea verticale ([Fig.](#)).
- Aggiusta la posizione della linea sino ad ottenere il bilanciamento delle aree ([Fig.](#)).
- Muovi il cursore sulla linea verticale per trovare il punto di intersezione con la prima parte della curva di raffreddamento, che potrai leggere sulla parte inferiore dello schermo. Registra il valore della temperatura **T<sub>1</sub>** come mostrato in figura.

- Muovi il cursore sulla linea verticale per trovare il punto di intersezione con la parte finale della curva di raffreddamento. Annota il valore della temperatura  $T_2$ .



Temperatura Iniziale  $T_1$

Temperatura Finale  $T_2$

### Calcolo del Calore Latente di Fusione.

Il valore del Calore di Fusione si può calcolare con l'equazione 10.

- Cerca il valore del calore specifico dell'acqua  $c_w$  ( 4190 [J/kgK] ) e del materiale di cui è fatto il calorimetro  $c_c$  (alluminio: 910 [J/kgK] ) sulle tavole.
- Usa i valori delle masse  $m_w$ ,  $m_c$ ,  $m_i$  e dei calori specifici  $c_w$  e  $c_c$  nell'equazione 10.

Il valore del calore latente di fusione ottenuto con i nostri dati sperimentali è pari a  $L = 321 \times 10^3$  [J/kg].  
Questo valore è vicino al valore tabulato:  $334 \times 10^3$  [J/kg] .

## Analisi Dati (Excel)

Il documento MS Excel con i dati campione è disponibile sul CD o sul sito.

### Trasferimento dei dati sperimentali al computer

I dati possono essere trasferiti dalla calcolatrice al PC usando il cavo TI GRAPH LINK ed il programma TI Connect™ che permette di visualizzare il contenuto della calcolatrice (TI DEVICE EXPLORER) e di editare i dati (TI DATA EDITOR).

I dati sperimentali sono registrati sulla calcolatrice:

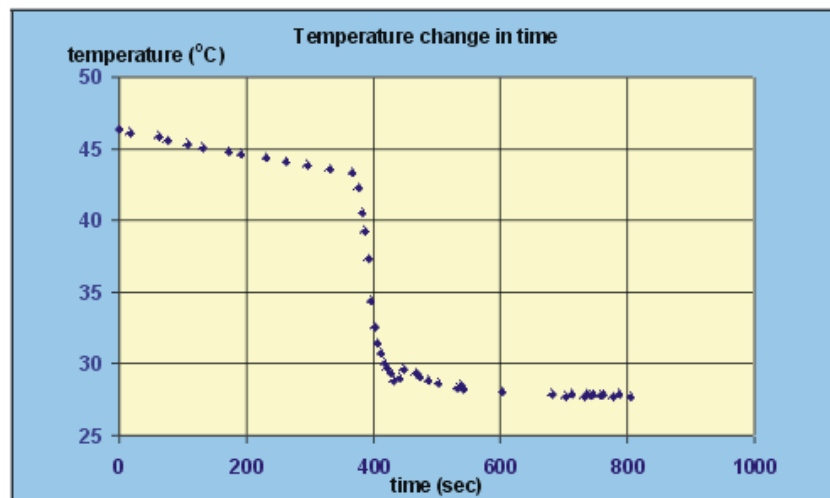
- il tempo  $t$  in secondi è nella lista  $L_1$
- la temperatura  $T$  nella  $[^{\circ}\text{C}]$  - lista  $L_2$

I dettagli della procedura di trasferimento sono disponibili sul CD o sul sito.

All'interno del programma TI Connect™ program - all'interno del menù TI DEVICE EXPLORER - si possono salvare le liste sul PC ed aprirle con TI DATA EDITOR.

### Analisi del grafico

- Crea un foglio di calcolo ed importa le liste.
- Costruisci il grafico a dispersione  $T(t)$ , se hai bisogno è disponibile una finestra di aiuto [qui](#).



Temperatura in funzione del tempo: dati sperimentali.

### Determinazione delle temperature.

Per calcolare il valore del calore latente di fusione con l'equazione 10 abbiamo bisogno dei valori della temperatura dell'acqua prima e dopo la transizione di fase, rispettivamente  $T_1$  e  $T_2$

$$L = \frac{(m_w \cdot c_w + m_c \cdot c_c) \cdot (T_1 - T_2)}{m_i} - m_i \cdot c_w \cdot (T_2 - T_0) \quad (10)$$

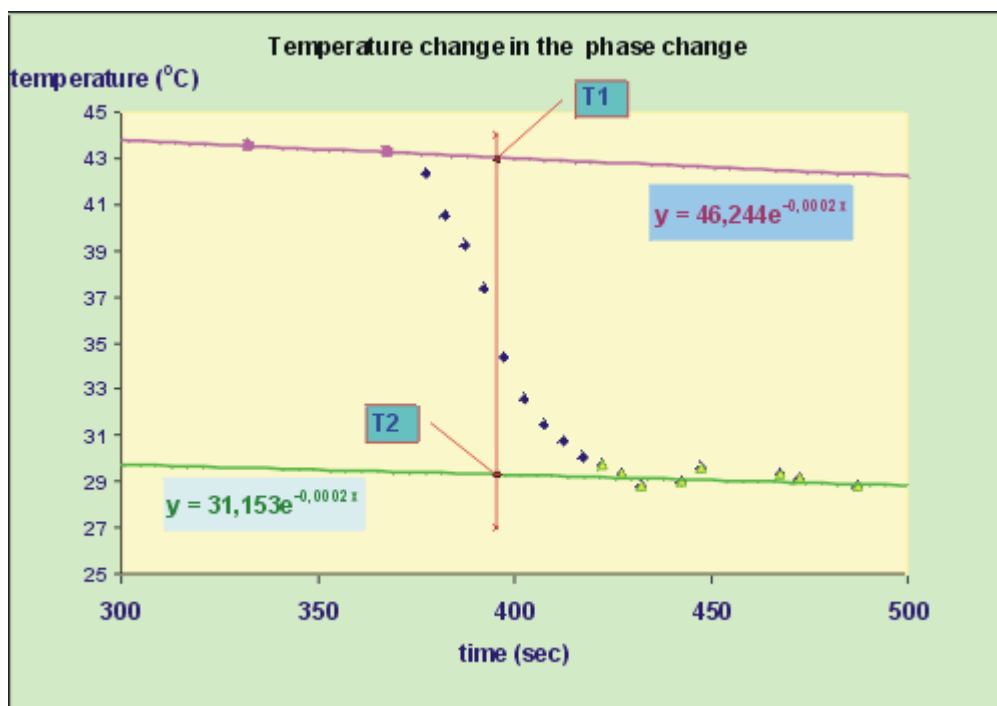
A causa del continuo processo di scambio di calore con l'esterno il grafico reale differisce da quello teorico (Fig.). Le temperature  $T_1$  e  $T_2$  possono essere determinate dal grafico sperimentale col metodo della interpolazione geometrica come mostrato in figura (Fig.).

Il grafico può essere diviso in tre parti: prima, durante e dopo il cambiamento di fase nella transizione ghiaccio-acqua.

Nel foglio di calcolo MS Excel tale separazione si fa semplicemente selezionando parte di dati.

### Estrapolazione della parte iniziale e finale della curva di raffreddamento.

- Imposta un nuovo grafico a dispersione con i dati iniziali della curva.
- I punti possono essere interpolati con una curva esponenziale; applichiamo quindi un modello di regressione esponenziale aggiungendo ai dati sperimentali una linea di tendenza esponenziale. Sul grafico può essere mostrata la linea di tendenze e l'equazione.
- In modo simile possiamo agire sull'ultima parte dei dati.
- La parte centrale dei dati verrà usata per definire la terza parte del grafico.



Interpolazione delle temperature.

### Interpolazione della temperatura

Le temperature  $T_1$  e  $T_2$  possono essere determinate tracciando una linea verticale in modo da bilanciare le due aree, come mostrato in figura

- Stima dal grafico la coordinata x per tracciare correttamente la linea verticale e annota questo valore in una delle celle del foglio di calcolo.
- Definisci una linea verticale  $T(t)$  con una coppia di coordinate. Definisci una colonna che rappresenta i valori del tempo copiando il contenuto della cella di riferimento.
- Aggiungi al grafico una quarta serie di dati, in modo da visualizzare la linea verticale - in rosso nel nostro grafico.
- Aggiusta la posizione della linea verticale sino ad ottenere il bilanciamento delle aree.
- In questo modo, utilizzando la funzione esponenziale si individuano le due temperature  $T_1$  e  $T_2$ .

## Calcolo del calore latente di fusione.

Il calore latente di fusione si ottiene alla equazione [eq.10](#).

- Cerca il valore del calore specifico dell'acqua  $c_w$  ( 4190 [J/kgK] ) e del materiale di cui è costituito il calorimetro  $c_c$  (nel nostro caso alluminio 910 [J/kgK] ) su un manuale.
- Sostituisci i valori della massa  $m_w$ ,  $m_c$ ,  $m_i$  e del calore specifico  $c_w$   $c_c$  nell'[equazione10](#).

CALCULATIONS			
calorimeter mass		[kg]	0,07626
calorimeter + water		[kg]	0,16591
water		[kg]	0,08965
calorimeter+water+ice		[kg]	0,18441
ice mass		[kg]	0,0185
latent heat of water		[J/kgK]	4190
latent heat of aluminium		[J/kgK]	910
initial temp T1		[C]	42,72703
final temp T2		[C]	28,78374
latent heat of fusion		[J/kg]	333184

Risultati del calcolo

Il valore del calore latente di fusione dell'acqua così come risulta dai dati sperimentali risulta quindi:  $L = 333 \times 10^3 \text{ [J/kg]}$ .

Questo valore è molto vicino a quello riportato in letteratura pari a :  $334 \times 10^3 \text{ [J/kg]}$  .

### Note:

L'analisi numerica completa è disponibile all'interno del [foglio Excel](#).