Note di laboratorio

"Vedere" il calore

(Pervenuto il 13.4.2016, approvato il 27.5.2016)

Alessandro Foschi
Liceo "F.P. di Calboli", Forlì
alessandrofoschi161@gmail.com

Sara Orsola Parolin
Liceo "Torricelli-Ballardini", Faenza
saraoparolin@gmail.com

Giovanni Pezzi
Palestra della Scienza, Faenza
gpezzi@racine.ra.it

ABSTRACT
The availability of low-cost thermal imaging cameras connected to smartphones opens up interesting opportunities in schools. It is now easy to take infrared images and explore phenomena where heating is involved; it is now possible to "see" heat. This article describes some activities carried out in the classroom with a "smart" thermographic camera.

Introduzione

L'uso diffuso di *smartphone* e il rapido sviluppo della microelettronica hanno implicazioni interessanti per coloro che svolgono attività didattiche: è possibile ottenere, a costi più bassi, attrezzature e strumenti, precedentemente considerati troppo elevati per i bilanci scolastici. Ad esempio, le termocamere, piuttosto costose come strumenti professionali, sono ora disponibili a prezzi accessibili come accessori per *smartphone*, collegati tramite le porte USB. Attività didattiche (vedi bibliografia) svolte finora con termocamere tradizionali e costose sono adesso alla portata di tutti.

Ora gli studenti possono produrre essi stessi immagini nell'infrarosso ed esplorare direttamente un mondo finora inaccessibile. Essi possono ora "vedere" il calore.

Utilizzando uno *smartphone Android* e una termocamera *Flir One* per *Android*[1], abbiamo realizzato una serie di esperimenti. Si tratta di esperienze qualitative che riteniamo interessanti in quanto permettono una prima esplorazione di fenomeni in cui è coinvolto il calore.

Figura 1.

Prima vediamo quali sono le caratteristiche delle termocamere.

Radiazione infrarossa e termocamere

La radiazione infrarossa, come è noto, è prodotta dai movimenti vibratori e rotatori delle molecole e degli atomi di una sostanza e copre la gamma di lunghezze d'onda (frequenza) tra 1 mm e 700 nm (300 GHz – 430 THz). Esistono varie suddivisioni della banda dell'infrarosso, a seconda dell'utilizzo [2]; tra le più comuni: FAR, MID, NEAR. La parte FAR è vicina alla banda a microonde e quella NEAR è vicina alla luce visibile. Circa il 50% della radiazione solare viene emesso nella regione infrarossa NEAR, il resto nel visibile e, in piccola parte, nell'ultravioletto.

I corpi di animali e gli esseri umani, a temperatura ambiente, emettono radiazione infrarossa di circa 10 micrometri di lunghezza d'onda. Misurando la radiazione emessa da un corpo, si può ricavare la temperatura senza contatto. Le termocamere però non misurano direttamente la temperatura; questa viene calcolata tenendo conto della emissività del corpo, come più avanti descritto. Le differenze di temperatura sono evidenziate nelle immagini in colori diversi (Fig. 2).

Figura 2.

Le termocamere possono essere caratterizzate in base al loro spettro di utilizzo.

Il tipo di sensore influisce direttamente sulle caratteristiche della termocamera. Per applicazioni comuni è normalmente utilizzato un sensore a matrice di punti, in grado di assorbire la radiazione infrarossa (microbolometro): l'energia infrarossa che arriva su ogni singolo elemento del sensore viene convertita in una grandezza fisica misurabile. In particolare, il sensore varia la sua resistenza elettrica in funzione dell'energia infrarossa che assorbe e di conseguenza la temperatura dell'oggetto viene misurata.

Una termocamera per uso professionale è caratterizzata anche dai seguenti parametri [3]:

- La risoluzione geometrica, che va da 4×4 *pixel* di semplici pirometri ottici a 500×500 *pixel* di strumenti ad alta risoluzione. Un maggior numero di *pixel* consente misurazioni su oggetti molto più piccoli.
- La risoluzione termica NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference*), che indica la variazione di temperatura minima misurata dalla fotocamera.
- La frequenza di acquisizione, che è un parametro importante: se non è sufficientemente alta, l'immagine risulta strisciata e di conseguenza è difficile ottenere un valore preciso della temperatura. Ciò può accadere inquadrando un oggetto in movimento o muovendo la termocamera durante la misura.
- La risoluzione spaziale del campo visivo (FOV) che rappresenta il dettaglio più piccolo che può essere misurato "singolarmente" con accuratezza.

La radiazione rivelata dalla termocamera non dipende soltanto dalla temperatura degli oggetti, ma anche da parametri quali: riflessioni delle superfici, umidità, temperatura ambiente, emissività della superficie misurata. Alcuni di questi parametri possono influenzare in modo significativo i risultati.

L'emissività dei materiali

L'emissività ε è un indicatore della capacità di un materiale di emettere raggi infrarossi e varia a seconda del tipo di materiale, delle sue proprietà superficiali e, in alcuni casi, anche in base alla temperatura dell'oggetto da misurare.

Normalmente l'emissività varia da circa 0,1 a 0,95. L'emissività massima ideale (corpo nero) è $\varepsilon = 1$ (100%); per i corpi reali è $\varepsilon < 1$, perché non solo emettono, ma anche riflettono ed eventualmente trasmettono radiazioni. Molti materiali non metallici (ad esempio PVC, cemento, sostanze organiche) hanno un'elevata emissività nel campo di infrarossi a onde lunghe che non dipende dalla temperatura ($\varepsilon \approx$ da 0,8 a 0,95). I metalli, in particolare quelli con una superficie lucida, hanno una bassa emissività, che varia con la temperatura. Per alcuni valori di riferimento vedere [4]. Selezionare sulla termocamera il valore corretto della emissività della superficie di un oggetto influisce notevolmente sulla misura della temperatura. Le seguenti immagini mostrano lo stesso oggetto ripreso in luce visibile (Fig. 3) e in due immagini termiche con valori di emissività diversi, a parità delle altre condizioni; nel caso di Fig. 4 ($\varepsilon \geq 0{,}8$; parametro: superficie opaca) la temperatura indicata dalla termocamera è 25,4 °C, nel caso di Fig. 5 ($\varepsilon \leq 0{,}6$; parametro: superficie lucida) risulta 36,4 °C.

Figura 3.

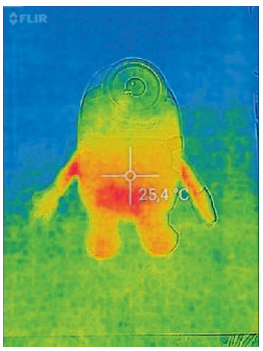

Figura 4.

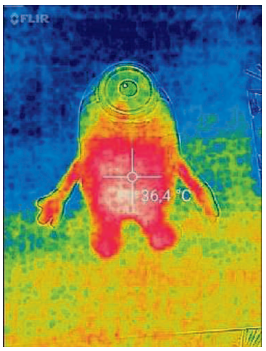

Figura 5.

Per ulteriori informazioni sull'uso delle termocamere e sulle loro applicazioni professionali, si veda [5].

Le caratteristiche della termocamera utilizzata

Abbiamo usato una termocamera *Flir One* (Fig. 6): si tratta di un dispositivo *entry level*, che, per un costo ragionevole (circa 250 euro presso i grandi rivenditori *online*), è in grado di trasformare uno *smartphone* (*Android* o *iOS*) in una termocamera pronta all'uso. Leggera (30 g), si connette allo *smartphone* tramite la porta micro USB e, utilizzando un'applicazione proprietaria, è possibile controllare le impostazioni e la visualizzazione delle immagini [6].
Il sensore a infrarossi è accoppiato ad una fotocamera VGA (640×480 *pixel*); in questo modo, sovrapponendo all'immagine termica quella nel campo del visibile, la capacità di interpretare l'immagine termica aumenta notevolmente.

Figura 6.

Il software comprende funzioni di cattura immagini e video, che possono essere condivisi sui canali di *social network*. Non è però possibile impostare i parametri di riflettività ed emissività, si può solo scegliere tra i parametri *opaco*, *semi-opaco*, *semilucido* e *lucido*.

Anche se questa termocamera non ha tutte le caratteristiche tipiche di quelle professionali, è però sufficiente per attività didattiche: nel nostro caso, ci interessava mettere in luce le trasformazioni di energia da meccanica a termica, gli aumenti di temperatura che si verificano in alcuni fenomeni e i diversi comportamenti di alcuni materiali dal punto di vista della conducibilità termica.

Gli esperimenti con la termocamera

Trasformazioni di energia meccanica in energia termica possono verificarsi in seguito a un urto tra corpi: ad esempio, ci aspettiamo il riscaldamento di una superficie colpita da un oggetto in caduta.

Abbiamo lasciato cadere una sfera d'acciaio (massa = 130,3 g) da pochi metri (2-4 m) di altezza sopra una superficie di legno. Per evitare di riscaldare la sfera tenendola in mano prima della caduta, abbiamo utilizzato un dispositivo elettromagnetico per il rilascio. Le immagini sono state estratte da un video, disponibile al seguente link [7].

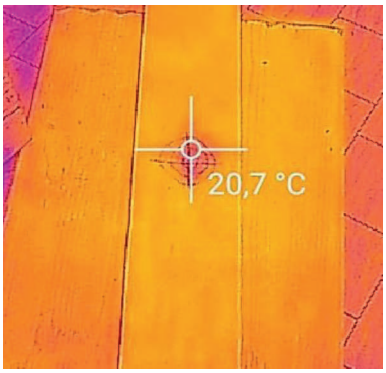

Figura 7.

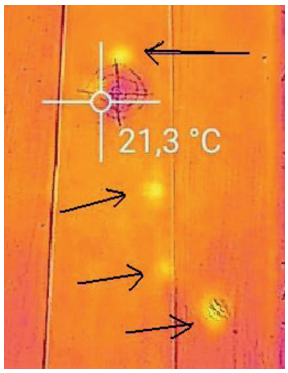

Figura 8.

Nella Figura 7, il "bersaglio" sul quale viene lasciata cadere la sfera era una tavola di legno, alla temperatura di 20,7 °C nella zona indicata dal mirino; nella Figura 8, la palla ha colpito il bersaglio e ha rimbalzato sul piano nei punti indicati dalle frecce; la temperatura nella zona del primo impatto è leggermente aumentata (21,3 °C) rispetto al valore prima dell'urto.

Ripetendo la caduta da un'altezza maggiore, si può notare (Figg. 9, 10) che la collisione ha prodotto un maggiore innalzamento di temperatura nella zona di impatto (da 21,2 °C a 22,4 °C).

Figura 9.

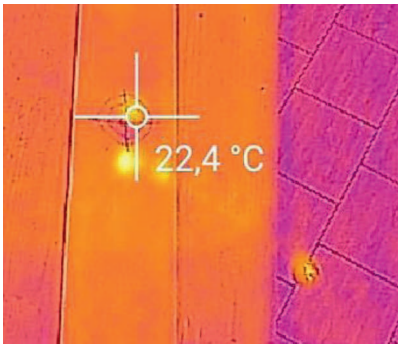

Figura 10.

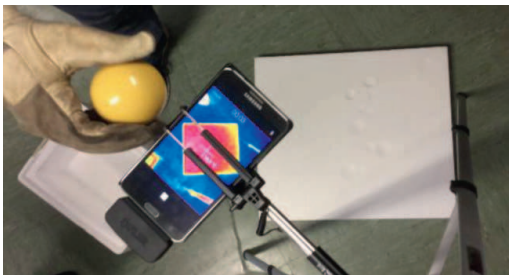

Figura 11.

Abbiamo poi lasciato cadere una palla da biliardo, di massa 250 g, da un'altezza di circa 145 cm, su una superficie di polistirolo, tenendo ferma la palla, con guanti spessi, prima della caduta (Fig. 11).

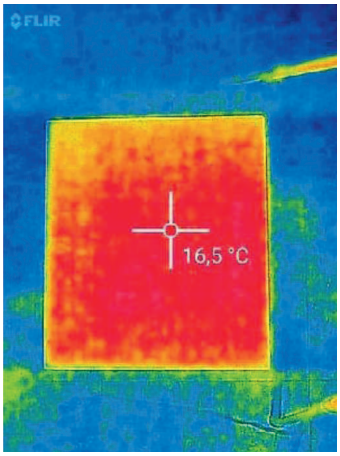

Figura 12.

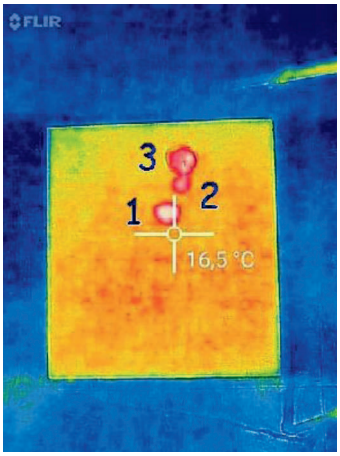

Figura 13.

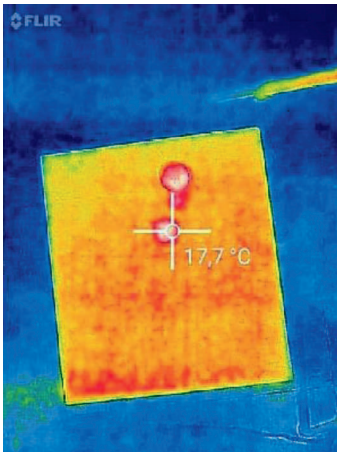

Figura 14.

La Figura 12 mostra la superficie del bersaglio, ad una temperatura iniziale di 16,5 °C; in Figura 13 il numero 1 indica il primo punto di impatto, il numero 2 un punto di rimbalzo e il numero 3 la posizione finale. In Figura 14 la termocamera inquadra il punto del primo impatto, ora a temperatura più elevata (17,7 °C) rispetto al valore iniziale.

Conducibilità termica

La conducibilità termica dei materiali ha un ampio spettro di valori [8]. È più efficace confrontare immagini invece che numeri, così abbiamo appoggiato il palmo della mano, per qualche istante, su una sottile lastra di alluminio (Fig. 15). Le immagini sono state scattate prima del contatto (Fig. 16), durante il contatto della mano (Fig. 17) e pochi secondi dopo l'allontanamento della mano (Fig. 18). Come si può notare, tra le figure 16 e 18 non c'è una grande differenza. Infatti la conducibilità termica dei metalli è molto alta e il calore trasferito dalla mano viene immediatamente distribuito su tutta la superficie.

Figura 15.

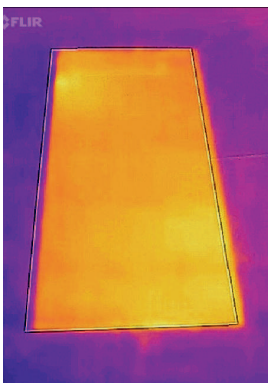

Figura 16.

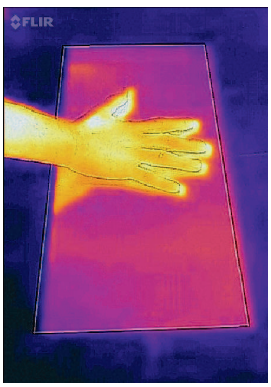

Figura 17.

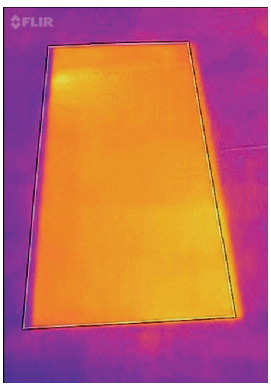

Figura 18.

Ripetendo lo stesso procedimento su una tavola di polistirolo (Fig. 19), i risultati sono molto diversi: in Figura 20 una mano viene appoggiata sul piano

e la sua impronta termica è ancora visibile dopo 9 secondi (Fig. 21); abbiamo dovuto aspettare altri venti secondi prima che fosse praticamente scomparsa (Fig. 22). In effetti, il polistirene ha un bassissimo coefficiente di conducibilità termica.

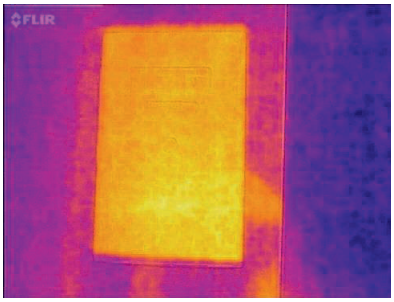

Figura 19.

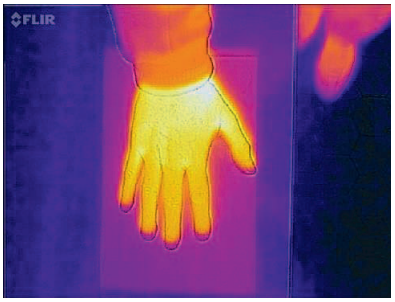

Figura 20.

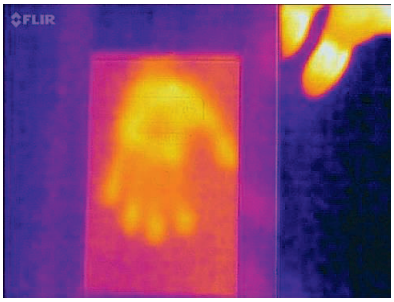

Figura 21.

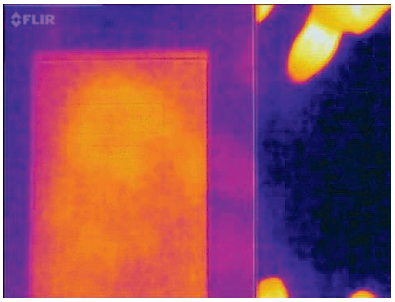

Figura 22.

È divertente "scrivere con gli infrarossi": le Figure 23 e 24 mostrano una scritta ottenuta semplicemente muovendo un dito su un pezzo di carta.

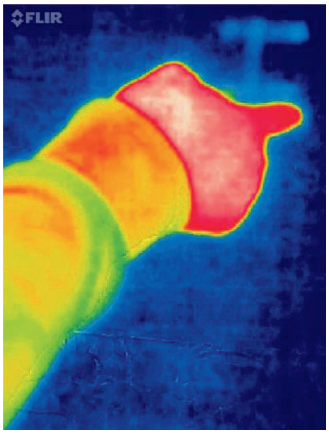

Figura 23.

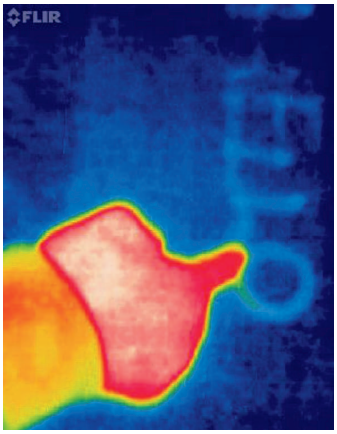

Figura 24.

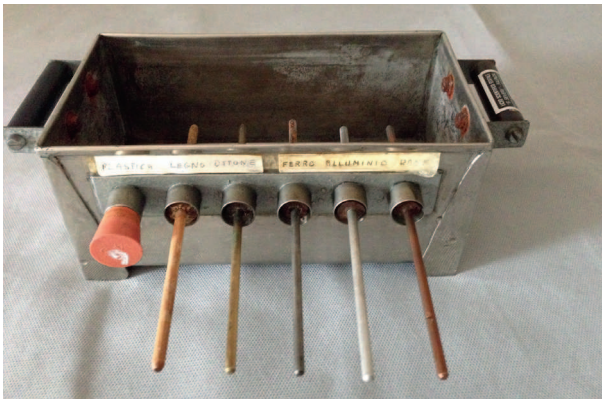

Figura 25.

La cassetta di Ingenhousz è un dispositivo tradizionale usato nei laboratori scolastici per dimostrazioni sulla conducibilità termica dei materiali (Fig. 25). Si tratta di un contenitore metallico in cui sono inserite barrette delle stesse dimensioni, ma di materiali diversi; in questo caso, da sinistra a destra: legno, ottone, ferro, alluminio e rame.

Negli esperimenti tradizionali, le parti esterne delle barrette vengono ricoperte con un sottile strato di cera; versando acqua bollente nella vaschetta, la cera si scioglie più o meno rapidamente a seconda del materiale della barretta. Nel nostro caso le barrette non sono state ricoperte, ma le abbiamo riprese con la termocamera subito dopo aver versato l'acqua bollente (Fig. 26).

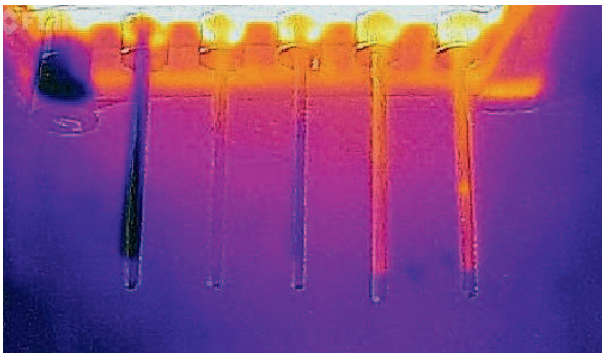

Figura 26.

Si può notare che nella barretta di legno in pratica non c'è stata propagazione del calore, che invece si è verificata con le barrette di rame e alluminio e, in misura minore, con quelle di ottone e di ferro. Questi risultati sono in accordo con i valori standard della conduttività termica.

Altre caratteristiche dei materiali: la trasparenza

È esperienza comune guardare attraverso il vetro di una finestra e osservare il panorama al di là del vetro; la foto di Figura 27 ne è un esempio. Rifacendo la foto, con la stessa inquadratura, ma con la termocamera (Fig. 28), notiamo che il vetro non è trasparente agli infrarossi, bensì risulta opaco; vediamo invece sia l'immagi-

ne infrarossa del fotografo, riflessa dal vetro, che gli alberi oltre la finestra, ripresi dalla fotocamera VGA nel visibile e sovrapposti all'immagine termica.

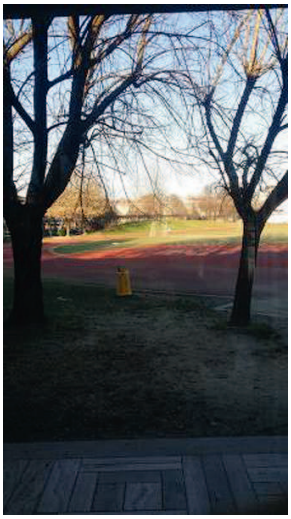

Figura 27.

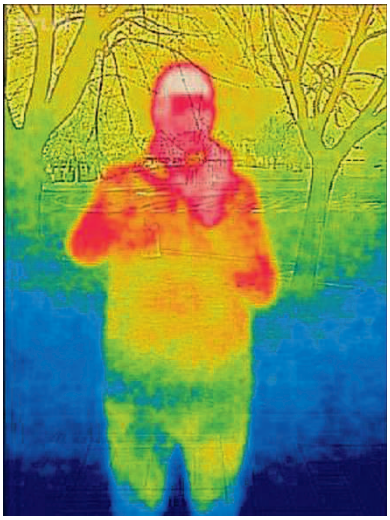

Figura 28.

Attrito e calore sul pavimento

È divertente seguire con una termocamera un aspirapolvere *robot* al lavoro (Fig. 29): oltre al calore prodotto dal dispositivo, si nota la "scia di calore" originata dall'attrito dell'aspirapolvere sul pavimento.

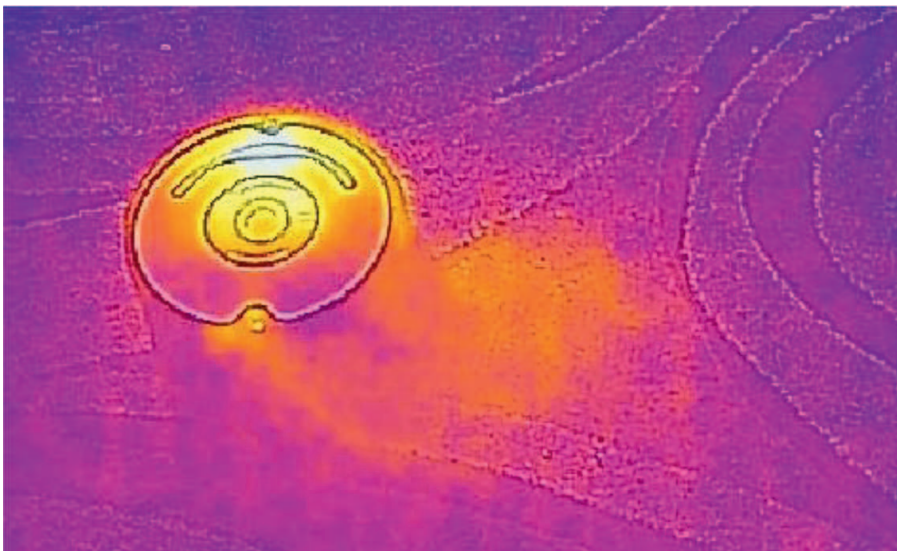

Figura 29.

Conclusioni

Gli esperimenti che si possono fare con questo tipo di termocamera sono prevalentemente qualitativi, ma ugualmente utili dal punto di vista didattico poiché permettono di "visualizzare" in modo efficace le trasformazioni di energia termica in alcuni fenomeni. L'attrezzatura è stata utilizzata senza calibrazione, per cui non è possibile quantificare l'energia meccanica trasformata in energia termica, almeno negli esperimenti sopra descritti, ma è comunque importante offrire la possibilità di "vedere" le orme del calore prodotto.

Bibliografia

M. Vollmer, K. Möllmann, F. Pinno, D. Karstädt, "There is more to see than eyes can detect", *The Physics Teacher*, 39, (2001), 371-376.

C. Xie, E. Hazzard, "Infrared Imagining for Inquiry-Based Learning", *The Physics Teacher*, 49, (2011), 368.

J. Haglund, F. Jeppsson, D. Hedberg, K. J. Schönborn, "Thermal cameras in school laboratory activities", *Physics Education*, 50, 4, (2015), 424-430 (http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-9120/50/4/424/pdf).

Note

[1] http://www.flir.it/flirone/content/?id=62910

[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Infrared

[3] http://www.termografia-ir.com/la-termografia-appunti-di-tecnica.html

[4] http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html
http://testoitalia.it/wp-content/uploads/2013/06/GuidaTermografia.pdf

[5] http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820264/T820264_EN.pdf
http://www.builditsolar.com/Experimental/IRCamera/IRCamera.htm
https://www.grainger.com/content/qt-thermal-imaging-applications-uses-features-345

[6] Flir One è dotata di un sensore bolometro non raffreddato (Lepton), con una risoluzione di 160x120 pixel e un frame rate di 9,0 Hz. La fotocamera ha una lunghezza focale fissa, con un angolo di visualizzazione di 46°×35°, portata 30 m e sensibilità di 0,1 °C. Consente la misurazione precisa della temperatura in un intervallo da –20 °C a 120 °C.

[7] https://youtu.be/UotuZCyKuYE

[8] http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html