

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**LA LEGGE DEI GAS PERFETTI E IL PRIMO
PRINCIPIO DELLA TERMODINAMICA IN UNA
CLASSE III DI LICEO SCIENTIFICO: UNO
STUDIO SULLE DIFFICOLTÀ DEGLI STUDENTI**

Relatrice:

Prof.ssa Olivia Levrini

Correlatrici:

Prof.ssa Tiziana Minarelli

Prof.ssa Sara Satanassi

Presentata da:

Sofia Gaspari

Alla mia famiglia e ai miei amici

ABSTRACT

Oggetto della tesi è un'indagine sulla comprensione di studenti di scuola secondaria di II grado della legge dei gas perfetti e del primo principio della termodinamica. Particolare attenzione è posta all'analisi dell'efficacia dei lavori di gruppo come metodo per un apprendimento attivo. Lo studio si è svolto in una classe terza del Liceo Scientifico E. Fermi a Bologna. Dopo un periodo di osservazione delle lezioni, l'intervento didattico è consistito nella progettazione di un questionario per indagare la comprensione di alcuni concetti di termodinamica a seguito della visione del filmato del PSSC "Energia meccanica e termica" e nella realizzazione di un'attività in cui gli studenti sono stati invitati a confrontarsi e riflettere tra loro utilizzando i tutorial elaborati dal gruppo di ricerca dell'Università di Washington. Per valutare l'efficacia e l'impatto dell'attività atta a promuovere un apprendimento attivo, è stato somministrato un test prima e dopo l'intervento didattico.

L'analisi delle risposte del pre-test e del post-test ha evidenziato un miglioramento complessivo della comprensione degli studenti. Nel post-test la maggioranza degli studenti supera visioni intuitive di pressione e temperatura e riesce a mettere in relazione il concetto di pressione come variabile di stato termodinamica con il concetto di pressione introdotto in meccanica. Invece molti studenti non sono riusciti a superare la forte correlazione intuitiva tra temperatura e calore che li porta, per esempio, a pensare che nei processi isotermi non siano presenti trasferimenti di calore e li spinge a non considerare gli effetti del lavoro sulla temperatura di un corpo. Rimane anche la difficoltà nel determinare il segno del lavoro, fortemente legata alle difficoltà sulle forze in meccanica, e permangono difficoltà a considerare calore e lavoro come funzioni di processo.

Indice

Introduzione	2
1. Stato dell'arte	3
1.1. La termodinamica nella ricerca in Didattica della fisica.....	3
1.1.1. La legge dei gas perfetti.....	3
1.1.2. Il primo principio della termodinamica	9
1.1.3. Il concetto di calore	10
1.1.4. Il lavoro in termodinamica	12
1.2. Materiali didattici basati sulla ricerca	14
1.2.1. I tutorial come strumento per l'apprendimento attivo	14
1.2.2. I Concept Inventory come strumento di indagine	19
2. Lo studio	22
2.1. Il contesto scolastico	22
2.2. Il percorso in classe.....	22
2.3. Descrizione dell'attività svolta in classe.....	24
3. Risultati e commenti	28
3.1. Risultati del questionario sul filmato "Energia meccanica e termica"	28
3.2. Risultati dei test e dell'attività.....	31
3.2.1. Confronto risultati del pre-test e del post-test	31
3.2.2. Definizione di calore	40
3.2.3. Difficoltà con la legge dei gas perfetti.....	41
3.2.4. Difficoltà con il primo principio della termodinamica	44
3.3. Riflessione sul manuale di fisica	47
4. Conclusioni	50
Appendice A	51
Bibliografia	52

Introduzione

Questo elaborato presenta un'indagine sull'apprendimento di concetti di termodinamica da parte di studenti di una classe terza del Liceo Scientifico E. Fermi di Bologna. In seguito ad un'analisi della letteratura riguardante le principali difficoltà degli allievi in termodinamica e a un periodo di osservazione della didattica proposta dall'insegnante, è stato somministrato un test agli studenti per raccogliere informazioni circa lo stato del loro apprendimento prima di un'attività di gruppo (pre-test). Dopo aver fatto svolgere un'attività di gruppo tratta da risorse didattiche elaborate dalla ricerca in Didattica della Fisica, è stato consegnato il post-test.

L'obiettivo principale dello studio è controllare se e come particolari attività di gruppo condotte con tutorial basati sulla ricerca possano essere un metodo attivo capace di innescare processi di cambiamento concettuale dalle concezioni comuni alla conoscenza scientifica. Nello specifico le attività di gruppo sono state condotte utilizzando tutorial elaborati dall'Università di Washington. I tutorial consistono in una serie di domande, mirate a guidare ragionamenti e riflessioni tra pari, sui nodi concettuali noti in letteratura di ricerca, senza un rigido controllo e direzione sulla discussione da parte dell'insegnante di classe. Si è inoltre proposto un questionario aggiuntivo, da compilare come compito a casa dopo la visione del filmato "Energia meccanica e termica" del PSSC, scelto in accordo con l'insegnante.

Nel Capitolo 1 si presentano i risultati della ricerca in didattica della fisica sulla legge dei gas perfetti, sul primo principio della termodinamica, sui concetti di calore e di lavoro. Inoltre, si descrivono esempi di materiali didattici progettati sulla base dei risultati di ricerca che saranno utilizzati nello studio: i tutorial come strumento didattico di apprendimento attivo e i Concept Inventory come strumento di indagine dell'apprendimento.

Nel Capitolo 2 viene descritto il percorso in classe. Inizialmente viene descritto il contesto scolastico e le attività extracurricolari degli studenti. Dai dati raccolti nel diario di bordo dal periodo di osservazione si riportano le strategie di insegnamento utilizzate dalla docente di classe, l'esperienza in laboratorio, la partecipazione e il comportamento degli studenti. Si descrive quindi l'intervento in classe, nello specifico l'attività dei tutorial sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica.

Nel Capitolo 3 si mostrano i risultati ottenuti dal questionario sul filmato del PSSC, vengono riportati e confrontati i risultati ottenuti nel pre-test e nel post-test, svolti rispettivamente prima e dopo l'attività di gruppo coi tutorial. Si espone inoltre una riflessione sul manuale di fisica a disposizione degli studenti alla luce dei risultati dell'indagine.

Nelle Conclusioni si riportano i principali risultati ottenuti e qualche riflessione a riguardo.

1. Stato dell'arte

1.1. La termodinamica nella ricerca in Didattica della fisica

Molte indagini negli anni hanno evidenziato l'esistenza tra gli studenti di difficoltà sulla termodinamica, provenienti sia dalle esperienze quotidiane comuni sia dall'ambiguità del linguaggio scientifico (Besson, 2015).

In questo capitolo ci si concentra sui quattro temi della termodinamica sui quali è stato costruito l'intervento didattico: la legge dei gas perfetti, il primo principio della termodinamica, il calore e il lavoro.

1.1.1. La legge dei gas perfetti

La legge dei gas perfetti $pV = nRT$ definisce empiricamente un modello di gas ideale, individuando le variabili macroscopiche che lo caratterizzano, le loro correlazioni e le condizioni in cui queste ultime valgono. Venne introdotta nel 1834 da Émile Clapeyron, come sintesi delle relazioni empiriche di Avogadro, Boyle, Charles e Gay-Lussac ed è una delle equazioni su cui si basa l'insegnamento della termodinamica a tutti i livelli e sulla quale si confrontano l'approccio macroscopico e la modellizzazione microscopica della teoria cinetica dei gas.

I principali riferimenti usati per riflettere sulle difficoltà degli studenti sulla legge dei gas perfetti sono gli studi del gruppo di ricerca in Didattica della Fisica dell'Università di Washington (Seattle). I lavori di Kautz e colleghi (2005a; 2005b) sono stati di particolare importanza perché riportano lo stato della ricerca all'epoca e indagano l'abilità degli studenti nell'interpretare e nell'applicare la legge dei gas perfetti. La motivazione di approfondire il tema da una prospettiva didattica è dovuta a risultati di studi precedenti (Loverude et al., 2002). Era infatti emersa una tendenza diffusa da parte degli studenti di applicare la legge dei gas perfetti in modo inappropriato per risolvere quesiti che richiedevano invece l'utilizzo del primo principio della termodinamica.

La ricerca di Kautz e colleghi è stata svolta con oltre 1000 studenti di quattro università, frequentanti corsi diversi: *algebra-based physics*, *sophomore-level thermal physics*, *calculus-based physics* e *introductory chemistry*. Tutti questi corsi hanno trattato la legge dei gas perfetti, il primo principio della termodinamica e la relazione tra temperatura ed energia interna di un gas ideale. L'indagine è stata strutturata in più fasi. Inizialmente si sono svolte delle interviste individuali con alcuni studenti. Basandosi sulle difficoltà che ne uscivano, sono stati costruiti problemi qualitativi aperti che chiedevano di esplicitare il ragionamento seguito per risolverli. Le risposte aperte sono state la base per costruire questionari a risposta multipla (pre-test e post-test), da somministrare a larga scala e valutare globalmente l'apprendimento degli studenti.

L'indagine ha mostrato che le difficoltà incontrate dagli studenti sulla legge dei gas perfetti emergono sia che si tratti la legge con un approccio macroscopico sia che la si tratti con un approccio microscopico. Le problematiche relative all'approccio macroscopico riguardano sia la comprensione dei singoli concetti coinvolti (pressione, volume, temperatura assoluta), sia la loro relazione (Kautz et al., 2005a). Si riportano tre esempi dei quesiti proposti e si analizzano le difficoltà incontrate dagli studenti nell'approccio macroscopico (Kautz et al., 2005a).

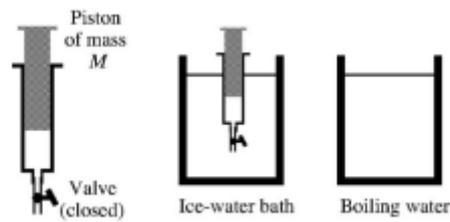


Figura 1.1: Problema della siringa verticale, utilizzato nella ricerca di Kautz et al. 2005a.

Nella Fig.1.1 è mostrata una siringa contenente un gas ideale, sigillata da un pistone di massa M che può muoversi senza attrito, inizialmente all'equilibrio termico con un bagno di acqua ghiacciata. La siringa viene quindi inserita in un contenitore con acqua bollente in cui raggiunge nuovamente l'equilibrio termico. Agli studenti viene chiesto di paragonare pressione e volume nei due stadi. Per rispondere correttamente devono riconoscere che le forze in gioco sul pistone, dovute all'atmosfera e alla gravità, sono le stesse nello stato iniziale e finale. Ne consegue che, se il pistone nei due stati si trova all'equilibrio meccanico, la pressione deve essere la stessa. Applicando, a questo punto, la legge dei gas perfetti, si inferisce che, aumentando la temperatura, deve aumentare anche il volume. In tutti i corsi la risposta più frequente è stata assumere la pressione finale maggiore di quella iniziale. Si riportano in Tab.1.1 i risultati ottenuti (Kautz et al., 2005a, p.1056).

	Introductory physics ($N > 1000$)	Introductory chemistry ($N = 95$)	Thermal physics ($N = 35$)
$P_f = P_i$	30%	15%	45%
$P_f > P_i$	60%	70%	40%
Altro o nessuna risposta	10%	15%	20%

Tabella 1.1: Risultati del problema della siringa verticale (Fig.1.1), in verde la risposta corretta e in rosso la risposta più frequente.

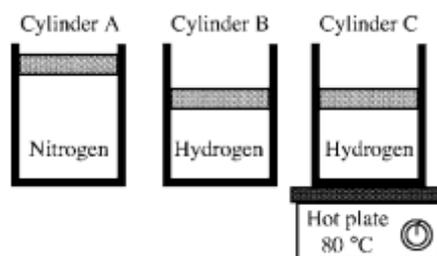


Figura 1.2: Problema dei tre cilindri, utilizzato nella ricerca di Kautz et al. 2005a.

Risultati analoghi sono stati ottenuti con il problema di figura 1.2 e con quello di figura 1.3.

Nella Fig.1.2 sono mostrati tre cilindri identici (A, B e C) contenenti quantità di gas ideale non specificate. Tutti e tre sono sigillati con un pistone identico che può muoversi senza attrito. A e B si trovano alla stessa temperatura ma contengono un diverso tipo di gas e i loro pistoni sono ad altezze diverse. B e C contengono lo stesso gas ma si trovano a temperature diverse. Viene chiesto agli studenti di paragonare le pressioni di A e B e di B e C. Per rispondere correttamente gli studenti devono riconoscere che la pressione atmosferica e il peso del pistone sono uguali in tutti e tre i casi e di conseguenza, applicando l'equilibrio meccanico, si trova che i gas nei cilindri hanno la stessa pressione. Si riportano in Tab.1.2 i risultati ottenuti (Kautz et al., 2005a, p.1057).

	Introductory physics (N=250)	Thermal physics (N=65)
Pistoni ad altezze diverse		
$P_A = P_B$	30%	45%
$P_A > P_B$	35%	30%
$P_A < P_B$	30%	15%
Indeciso o nessuna risposta	5%	10%
Gas a diverse temperature		
$P_B = P_C$	40%	70%
$P_B > P_C$	0%	0%
$P_B < P_C$	55%	30%
Indeciso o nessuna risposta	5%	0%
Tutti e tre i cilindri		
$P_A = P_B = P_C$	15%	40%

Tabella 1.2: Risultati del problema dei tre cilindri (Fig.1.2), in verde la risposta corretta e in rosso la risposta più frequente.

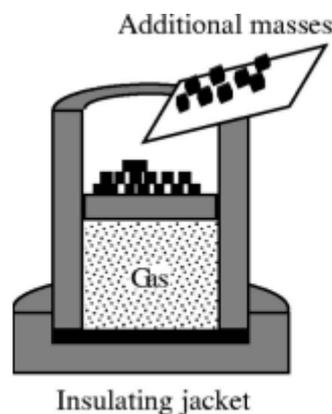


Figura 1.3: Problema del cilindro isolato, utilizzato nella ricerca di Kautz et al. 2005a.

Nella Fig.1.3 si trova un cilindro, con uno strato isolante, sigillato da un pistone senza attrito. Dei piccoli pesetti vengono aggiunti gradualmente sul pistone. Viene chiesto agli studenti come cambiano pressione, temperatura e volume. Per rispondere correttamente si deve riconoscere che sul gas è compiuto lavoro positivo in quanto il pistone si abbassa. Applicando il primo principio della termodinamica, si inferisce che, anche se non ci sono trasferimenti di energia sotto forma di calore (il sistema è isolato), l'energia interna aumenta e di conseguenza aumenta la temperatura. La posizione finale del pistone è più bassa di quella iniziale e quindi il volume diminuisce e visto che le masse aggiuntive aumentano il peso del pistone la pressione del gas aumenta. Questo problema è stato

consegnato a 180 studenti del corso *algebra-based*. Circa il 70% ha riconosciuto che il volume diminuisce ma solo il 10% ha risposto correttamente circa la temperatura.

L'alta frequenza delle risposte non corrette ottenute da questa ricerca indica che, a seguito di corsi introduttivi di fisica e di chimica ma anche di corsi più specializzati in *thermal physics*, molti studenti non vedono la legge dei gas perfetti come un'equazione a più variabili e tendono ad applicare spiegazioni causali lineari tra due sole variabili, assumendo le altre costanti. Analizzando i risultati ottenuti nel problema dei tre cilindri, emerge la tendenza degli studenti di assumere la pressione sempre inversamente proporzionale al volume, non solo quando temperatura e numero di moli sono costanti. Infatti, alcuni studenti sostengono che la pressione nel cilindro A è minore della pressione nel cilindro B, perché il pistone in A ha un'altezza maggiore. Molti studenti possono anche considerare la pressione sempre direttamente proporzionale alla temperatura, come mostra il problema della siringa verticale. Visto che la temperatura della siringa aumenta, passando da un contenitore con acqua ghiacciata a un contenitore con acqua bollente, per alcuni studenti ne consegue che anche la pressione aumenta. Nuovamente questa affermazione è valida solo se il volume rimane costante, non vero in questo caso specifico. Questa problematica si ritrova anche nell'esercizio dei tre cilindri, in cui molti studenti sostengono che la pressione in C è maggiore di quella in B perché il cilindro C si trova ad una temperatura maggiore (si veda la Fig.1.2). Questi risultati, oltre a mostrare difficoltà nell'utilizzo di equazioni a più variabili, fanno anche emergere difficoltà nell'interpretare fenomeni fisici e a mettere in relazione il formalismo matematico al mondo reale.

Le difficoltà riscontrate dagli studenti sull'approccio macroscopico sulla pressione sono riconducibili a una mancata comprensione dell'equilibrio meccanico. Gli studenti non riescono infatti a collegare l'equilibrio meccanico delle forze agenti sul pistone nel problema della siringa verticale (si veda Fig.1.1) con la pressione del gas all'interno del cilindro, nonostante sappiano la definizione di pressione $P = F/A$. Gli studenti che hanno considerato condizioni meccaniche si sono però concentrati sull'altezza del pistone e non sul suo peso, come per coloro che sostengono che la pressione nel cilindro A sia maggiore di quella in B perché il pistone si trova ad una altezza maggiore, nel problema dei tre cilindri (si veda Fig.1.2).

Come già sottolineato, le difficoltà riscontrate dagli studenti nel confrontare la temperatura iniziale e finale del gas nel problema del cilindro isolato (si veda Fig.1.3) riguardano la confusione tra calore, temperatura ed energia interna. Si trova la tendenza comune di sostenere che la temperatura non cambi in una trasformazione adiabatica, attivando l'idea intuitiva che un isolamento termico coincida con l'aver la temperatura costante. Alcuni studenti sembrano così interpretare un isolamento termico come un meccanismo che attivamente si oppone alle variazioni di temperatura piuttosto che evitare trasferimenti di calore. La confusione tra i concetti di temperatura, calore ed energia termica porta gli studenti a riferirsi al calore come una quantità piuttosto che a un processo.

Dai risultati ottenuti (Kautz et al., 2005a) si nota che anche il concetto di volume risulta confuso per gli studenti, tendono infatti a non distinguere dalla quantità di gas, sia intesa come massa sia intesa come numero di particelle. Nel problema della siringa verticale qualche studente sostiene che il volume del gas non cambia spostando la siringa dall'acqua ghiacciata all'acqua bollente così come il volume del gas non cambia nel problema del cilindro isolato dopo aver appoggiato le masse sul pistone, perché non né entrato né fuoriuscito del gas dal pistone. Per alcuni studenti il volume e il numero delle particelle risultano sinonimi, sostengono infatti che il volume in una trasformazione non cambia anche se la posizione del pistone varia, perché anche se varia la forma del gas il numero di moli rimane sempre quello.

In complesso, i risultati della ricerca hanno mostrato che le principali difficoltà degli studenti riguardo le grandezze macroscopiche sono spesso legate a un modello microscopico ingenuo o incompleto. Per verificare questa visione si sono aggiunte delle interviste mirate ai processi microscopici. Ad esempio,

agli studenti è stato chiesto di confrontare il numero di molecole in tre palloncini identici, ognuno contenente un gas ideale diverso, ma tutti con lo stesso volume e temperatura. Meno della metà degli studenti si è resa conto che, essendo la pressione uguale in tutti e tre i palloncini, il numero di moli deve essere uguale. La maggior parte invece ha pensato che il valore della pressione e del numero di moli dipendesse dalle dimensioni, dalla massa e dalla struttura delle particelle dei gas. L'analisi delle risposte dell'intervista ha mostrato che gli studenti tendono a sviluppare dei modelli, spesso così parziali e locali, che ostacolano lo sviluppo di una comprensione dei concetti di termodinamica, tra cui le definizioni di pressione e temperatura, la conservazione dell'energia espressa dal primo principio della termodinamica e l'indipendenza dalla sostanza della legge dei gas perfetti. Dai risultati delle interviste individuali si sono prodotti tre tipologie di problemi per indagare la legge dei gas perfetti da un punto di vista microscopico: problemi di espansione o compressione isobara, problema sul rimbalzo di una particella e il cosiddetto "problema dei due serbatoi" (Kautz et al., 2005b).

Nei problemi sui processi isobari si ha una certa quantità di gas ideale che subisce una determinata variazione di volume a pressione costante e viene chiesto agli studenti di confrontare gli stati di equilibrio iniziale e finale. Quando si chiede agli studenti di disegnare il processo in un diagramma P-V, la maggior parte non incontra grandi difficoltà. Più difficile è interrogarsi su come varia l'energia cinetica media per molecola in una espansione isobara. Per poter rispondere correttamente gli studenti devono riconoscere che l'aumento di volume, a pressione costante, porta a un aumento della temperatura. Successivamente si deve riconoscere che l'energia cinetica media per molecola è proporzionale alla temperatura e di conseguenza aumenta anch'essa. In alternativa, gli studenti potrebbero rendersi conto che, in un'espansione del gas, la densità del numero di moli diminuisce e, perciò, la velocità media delle particelle del gas deve aumentare per mantenere la stessa pressione, arrivando così a inferire che l'energia cinetica media aumenta. Circa il 70% degli studenti dei corsi introduttivi e circa l'80% degli studenti di *thermal physics* ha riconosciuto che l'energia cinetica media aumenta, ma molti hanno giustificato la risposta con argomenti non corretti, che discuteremo dopo aver presentato gli altri risultati dello studio. Si chiede poi se la variazione media della quantità di moto di una singola particella, in seguito a una collisione con una parete, risulta diversa dopo l'espansione isobara. Infine, viene chiesto come varia il numero di particelle incidenti su una parete del contenitore per unità di tempo per unità di area (flusso di particelle), sempre in un'espansione isobara. Per poter rispondere correttamente gli studenti devono riconoscere che l'urto tra particella e parete è un urto elastico e perciò, la variazione media della quantità di moto di una particella in una singola collisione è proporzionale alla quantità di moto iniziale media della particella, che a sua volta è funzione della temperatura. Ne consegue in questo caso che la variazione media della quantità di moto aumenta visto che aumenta la temperatura. Dato che, in un'espansione isobara, la pressione rimane costante e la variazione della quantità di moto aumenta, il flusso delle particelle deve diminuire. Alla domanda sulla variazione della quantità di moto il 35% e il 65% degli studenti ha risposto correttamente, rispettivamente del corso introduttivo e del corso di *thermal physics*, mentre alla domanda sul flusso solo il 10% e il 20%. I risultati ottenuti sulla domanda della variazione della quantità di moto mostrano delle difficoltà sui concetti di meccanica, per poter separare queste difficoltà da quelle sui modelli microscopici si è proposto un problema in cui una particella in movimento urta contro una parete immobile, con velocità finale che rimane, in modulo, uguale a quella iniziale, e viene chiesto quanto vale la variazione della quantità di moto in termini della massa e della velocità iniziale. La risposta corretta $\Delta p = -2mv_i$ si può trovare sia algebricamente sia rappresentando i vettori delle quantità di moto iniziale e finale.

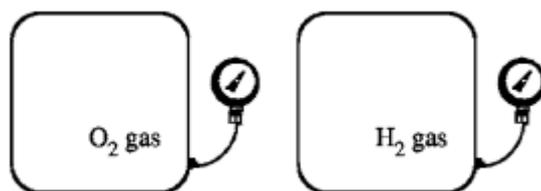


Figura 1.4: Problema dei due serbatoi, utilizzato nella ricerca di Kautz et al. 2005b.

Nella Fig.1.4 si trovano due serbatoi rigidi identici, stessa forma e dimensione e alla stessa temperatura, contenenti uno ossigeno e uno idrogeno. Viene detto agli studenti di trattare i gas come ideali e si chiede di confrontare il numero delle moli nei due serbatoi. I due gas, avendo lo stesso volume, la stessa pressione e la stessa temperatura devono avere lo stesso numero di moli. Solo circa la metà degli studenti introduttivi si è resa conto che il numero di moli doveva essere uguale, mentre nel corso di *thermal physics*, circa il 75% ha risposto correttamente. I risultati ottenuti in questi problemi suggeriscono che in seguito a un corso introduttivo standard non si sviluppa un corretto modello microscopico per un gas ideale. Le maggiori difficoltà si possono raggruppare in macrocategorie: pressione, temperatura e numero di moli.

Si nota una tendenza tra gli studenti ad associare la pressione direttamente al trasferimento di quantità di moto media, senza considerare il flusso di particelle. Nel problema dell'espansione isobara, circa il 25% degli studenti introduttivi che hanno individuato correttamente un aumento dell'energia cinetica media delle particelle del gas sostiene che la variazione media della quantità di moto rimane la stessa prima e dopo l'espansione. Circa il 25% degli studenti del corso introduttivo e circa il 40% nel corso di *thermal physics* ha risposto che il flusso di particelle rimane lo stesso prima e dopo l'espansione isobara. Più della metà di questi studenti spiega che ciò è dovuto al fatto che la pressione rimane costante. Questi studenti non riconoscono quindi che il flusso di particelle incidenti da solo non determina la pressione.

Spesso non viene presa in considerazione la dimensione vettoriale della quantità di moto, il che porta gli studenti a pensare erroneamente che la variazione di quantità di moto di una particella dopo un urto elastico con la parete sia nulla. Ne consegue che qualche studente sostiene che la variazione media della quantità di moto non cambi in un'espansione, perché rimane sempre nulla trattandosi di urti elastici. Questa difficoltà risulta ancora più evidente nel problema del rimbalzo di una particella. Circa il 30% degli studenti introduttivi e il 25% degli studenti del corso di *thermal physics* afferma che il cambiamento di quantità di moto è nullo. Molti studenti sommano le quantità di moto iniziali e finali invece di sottrarre oppure sottraggono le grandezze senza riguardo al segno o alla direzione.

Inoltre, l'indagine evidenzia una confusione di fondo sul concetto di energia e di quantità di moto e su quale quantità si conserva in un urto elastico. Circa il 15% degli studenti del corso introduttivo giustifica il non cambiamento della quantità di moto della palla o della particella invocando il principio di conservazione della quantità di moto oppure quello di conservazione dell'energia.

Risulta confuso anche il concetto di flusso di particelle, che dipende non solo dal numero di particelle ma anche dalla loro velocità.

Per quanto riguarda la temperatura a livello microscopico si sono individuate due difficoltà principali. Gli studenti ritengono che una densità di particelle più bassa implichi una temperatura più bassa. Nella domanda sull'energia cinetica circa il 20% degli studenti del corso introduttivo afferma che l'energia cinetica media delle molecole di un gas diminuisce in un'espansione a pressione costante, visto che il volume aumenta e così "le particelle avranno più libertà di movimento, quindi si muoveranno di meno". Alcuni studenti sostengono che, nei casi in cui la densità delle particelle è più alta, la frequenza delle

collisioni tra particelle di gas aumenta e questo determina un aumento della temperatura, ritenendo che le collisioni producano calore. La variazione dell'energia interna viene così attribuita a un processo all'interno del sistema piuttosto che a un'interazione con l'ambiente circostante e il ruolo del lavoro e del calore nel trasferimento di energia tra un sistema e l'ambiente circostante non viene preso in considerazione.

Analizzando le risposte non corrette sul numero delle moli risulta che molti studenti non riconoscono che la legge dei gas perfetti valga per sostanze diverse. Nel problema dei due serbatoi la maggior parte degli studenti sostiene che il serbatoio che contiene il gas con la massa molare più piccola deve contenere anche un numero maggiore di particelle. Si va così a pensare che serva un numero maggiore di particelle "più piccole" per riempire una certa quantità di volume rispetto al numero che servirebbe con particelle più grandi, nonostante nel modello microscopico di gas ideale si sottolinei sempre che il volume occupato dal gas è trascurabile rispetto al volume del recipiente. Allo stesso modo gli studenti pensano che serva un numero maggiore di "particelle leggere" per creare una certa pressione rispetto a "particelle pesanti".

1.1.2. Il primo principio della termodinamica

La termodinamica nasce con l'intento di spiegare il funzionamento e le proprietà delle macchine termiche, sviluppatesi nel XVIII secolo (Besson, 2015, p.158). Questo inizio particolare ha influenzato in vari modi le definizioni dei concetti e le loro spiegazioni, tra tanti l'enunciato del primo principio della termodinamica.

In molti libri di testo, il primo principio della termodinamica viene introdotto come:

$$\Delta U = Q - L.$$

Per cui la variazione dell'energia interna di un sistema (ΔU) è data dalla somma degli scambi energetici con l'esterno mediante calore (Q) e lavoro (L). In questa notazione il L è convenzionalmente assunto come positivo quando è il lavoro compiuto dal sistema sull'esterno. La scelta risulta improntata a spiegare il funzionamento delle macchine termiche, il cui scopo è di produrre lavoro verso l'esterno, assorbendo calore (bruciando combustibile). Secondo questa convenzione, Q risulta positivo se assorbito dal sistema e negativo se ceduto.

Tuttavia, se non si esplicita l'origine della convenzione sui segni, la forma $\Delta U = Q - L$ può risultare artificiosa e confusa per chi la apprende. Per questo motivo, nei libri più recenti, si sceglie di scrivere il primo principio della termodinamica nella forma:

$$\Delta U = Q + L.$$

In questo caso, sia calore sia lavoro sono positivi se portano ad un aumento dell'energia interna.

Sono state svolte diverse ricerche mirate ad indagare le difficoltà degli studenti sul primo principio della termodinamica. In questa tesi si utilizzano principalmente i risultati di Loverude et al. (2002) e Meltzer (2004), incentrati sul capire il significato che gli studenti attribuiscono a energia interna, calore e lavoro e a come li differenziano. Dai risultati emerge che molti studenti non capiscono perché si debba fare una distinzione tra le tre quantità. Durante un'intervista svolta da Meltzer (2004), uno studente chiede:

"Come è possibile che sia accettabile che qualcosa chiamato 'lavoro' abbia la stessa unità di misura di qualcosa chiamato 'calore' e di qualcosa chiamato 'energia'?"

Parte di questa difficoltà è dovuta a non distinguere, prima di tutto tra variabili di stato e variabili di processo. Molti studenti non riescono ad apprendere che il trasferimento di calore e il lavoro rappresentano entrambi modalità con cui un sistema può interagire con l'ambiente per scambiare energia e, dunque, modificare l'energia interna (variabile di stato). In quanto variabili di processo, dipendono dalle modalità con cui un sistema passa da uno stato iniziale a uno stato finale. Questa

problematica è dovuta all'uso nel linguaggio comune del termine "calore", discusso nel paragrafo 1.1.3, e al concetto di lavoro in meccanica e termodinamica, discusso nel paragrafo 1.1.4. Nella ricerca di Loverude e colleghi (2002) risulta evidente che gli studenti tendano a non applicare principi generali per la risoluzione dei problemi. Gli studenti spesso non scelgono, o addirittura non considerano, il primo principio della termodinamica come il principio pertinente per la risoluzione. La maggior parte degli studenti, come molti fisici, davanti a un problema che richiede l'utilizzo del primo principio della termodinamica, tentano di risolverlo con la sola legge dei gas perfetti. I fisici riconoscono rapidamente la mancanza di informazioni e si rivolgono al primo principio, al contrario gli studenti tendono a ritenere che, in un problema, ci sia una sola formula risolutiva. Sebbene nella didattica venga posta notevole enfasi sul primo principio, l'importanza di questo principio generale non viene recepita dalla maggioranza degli studenti nella soluzione di problemi. Per molti studenti, la legge dei gas perfetti è l'equazione più "utile" del corso per fare gli esercizi.

Rimane molto forte l'idea che si possa aumentare o diminuire la temperatura di un oggetto esclusivamente fornendo o togliendo energia in modalità calore (Loverude et al., 2002). Molti studenti che comprendono come vi sia un aumento di temperatura, ad esempio, in una compressione adiabatica, basano la loro spiegazione sull'equazione di stato dei gas perfetti, che non è sufficiente per spiegare in modo completo ed efficace l'aumento di temperatura, non andando a considerare il lavoro. Infine, molti studenti non trattano il primo principio della termodinamica come rapporto di causa-effetto in cui il lavoro può portare a un cambiamento dell'energia interna di un sistema fisico così come per il calore, ma esclusivamente come una relazione matematica.

1.1.3. Il concetto di calore

I principali riferimenti usati per riflettere sul concetto di calore sono gli studi di Besson (2015) che riporta lo stato di ricerca al 2015 e la ricerca di Brookes & Etkina (2015) che indaga la relazione tra il linguaggio e le difficoltà degli studenti in termodinamica.

In fisica, il calore è una variabile dipendente dal processo e rappresenta un trasferimento di una certa quantità di energia tra i sistemi indotto da una differenza di temperatura. La temperatura, invece, è una variabile di stato definibile a partire dal riconoscimento di stati d'equilibrio e misurabile individuando proprietà estensive termometriche, influenzabili dal contesto e applicando il principio 0 della termodinamica per costruire classi di equivalenza. Besson (2015, p.145) evidenzia come tra gli studenti, a tutti i livelli scolari, temperatura e calore vengono confusi, se non, a volte, considerati sinonimi. Il calore spesso viene interpretato come una specifica quantità di energia posseduta da un corpo e la temperatura dell'oggetto come una misura di quella quantità. Oggetti realizzati con materiali che sono buoni conduttori termici sono ritenuti dagli studenti più caldi o più freddi di altri oggetti alla stessa temperatura, a causa delle sensazioni che si provano quando gli oggetti vengono toccati.

Secondo Chiou e Anderson (2010) le concezioni comuni sul calore si sviluppano passando progressivamente attraverso quattro modelli:

- Calore come proprietà intrinseca di una sostanza (es. il legno è caldo e il metallo è freddo).
- Caldo e freddo come sostanze materiali in grado di spostarsi da una sostanza all'altra.
- Calore come flusso calorico, ovvero un'entità materiale o non materiale, che si propaga da oggetti a temperature più alte a temperature più basse.
- Calore come modalità di trasferimento di energia dovuto a differenza di temperatura.

Brookes & Etkina (2015) mostrano come il concetto di calore presenti difficoltà per il significato differente che assume nel linguaggio comune e in fisica. Lakoff e Johnson (1980) considerano gran parte del linguaggio e del pensiero umano come metaforici. Il linguaggio consiste infatti in molte espressioni che inizialmente non sembrano figurative, ma che ad un'attenta analisi riflettono una metafora concettuale sottostante. Ad esempio, consultando qualsiasi manuale su come isolare termicamente la propria abitazione si troveranno frasi come "*nella stagione calda, il calore invade dall'esterno*" o "*un isolamento migliore mantiene più calore durante la stagione fredda*". Frasi come

queste suggeriscono che il calore sia una sostanza (a volte un fluido) che si muove, scorre o viene trasferita da una posizione a un'altra e che oggetti/luoghi (come la propria casa o l'esterno) siano contenitori di calore.

Sutton (1993) spiega la presenza di metafore concettuali in fisica in funzione della loro origine analogica. Ad esempio, la metafora del calore come sostanza è entrata nel linguaggio della fisica dopo l'adozione del modello calorico del calore. Con la metafora del calore come sostanza, scelte diverse di verbi possono associare significati diversi al calore. “*Fluire*” può suggerire che il calore sia un fluido, mentre “è *trasferito*” lascia la natura del calore un po' ambigua. Eppure, alla base di tutte queste frasi c'è una struttura grammaticale comune: il calore che funziona come un sostantivo e un verbo che implica una sorta di movimento di calore seguito da una o più strutture di localizzazione grammaticale.

Secondo Brookes & Etkina (2015) oltre al linguaggio di tutti i giorni anche nei manuali di fisica si trovano delle incongruenze. Non esiste una definizione di calore sulla quale tutti i fisici sono d'accordo. Si può dire tuttavia che ci sia un'opinione condivisa su ciò che il calore non è. Anche se viene misurato in Joules, oggi si tende a sostenere che il calore non sia una “forma” di energia nello stesso senso in cui si pensa all'energia cinetica o all'energia potenziale, bensì una modalità di trasferire energia. Molti manuali di fisica e chimica negli anni Sessanta e Settanta definivano il calore come l'energia cinetica associata al movimento molecolare e quindi come una proprietà del sistema, oppure come una forma di energia disordinata e degradata. La maggior parte dei manuali di fisica moderni vedono il calore come grandezza di interazione e di conseguenza la definiscono come energia in transito o come processo di trasferimento di energia. Tuttavia, la sintassi dei manuali didattici continua a portare gli studenti a pensare al calore come sostanza. Si parla infatti di lavoro fatto o compiuto, ma di calore ceduto o fornito, spingendo gli studenti a pensare che il calore sia effettivamente qualcosa posseduto dall'oggetto. Si tratta di “fossili terminologici” (Besson, 2015) di vecchie teorie abbandonate, come quella del flusso calorico. Inoltre, l'idea del calore come variabile di stato, che dipende dal sistema e non dall'interazione, è favorita da come viene trattata la calorimetria e dal significato che si associa all'equazione

$$Q = mc\Delta T.$$

Si ipotizzano due possibili motivazioni alla scelta molto comune del linguaggio di utilizzare la metafora del calore come sostanza: una storica e una cognitiva. Come ha sottolineato Sutton (1993), i modelli storici sembrano continuare a vivere nel linguaggio degli scienziati moderni come metafore concettuali. Le metafore concettuali possono codificare modalità di ragionamento. Ci sono molti casi in cui è produttivo pensare al calore come a una funzione di stato. La motivazione cognitiva consiste nel fatto che è presente un'inevitabile tensione ontologica tra il processo di riscaldamento e la quantità di energia aggiunta da tale processo di riscaldamento. Anche gli esperti possono tendere a parlare del calore come di una sostanza perché c'è una necessità pratica di essere in grado di parlare della grandezza fisica Q nell'equazione del primo principio della termodinamica. Questa quantità è indicata come “calore” e rappresenta la quantità di energia che è trasferita in un particolare processo di riscaldamento.

Oggi, molti ricercatori (ad esempio Baierlein, 1994; Bauman, 1992; Heath, 1974, 1976; Hobson, 1995; Pushkin, 1997; Romer, 2001) suggeriscono che, per evitare confusione, il “calore” dovrebbe essere definito esclusivamente come un processo, un mezzo attraverso il quale l'energia viene trasferita da un posto ad un altro. L'unico modo accettabile per parlare grammaticalmente del calore è come verbo (*il fuoco riscaldava la stanza*) o come modo grammaticale (*l'energia fluiva nella camera mediante riscaldamento*). Besson (2015) propone di abolire entrambe le parole “calore” e “lavoro” e sostituirle con espressioni concettualmente più limpide, come *trasferimento termico* e *trasferimento meccanico* di energia. Il dibattito sulla migliore definizione di calore a livello didattico è lontano dall'essere concluso.

1.1.4. Il lavoro in termodinamica

Un'indagine molto rilevante sul concetto di lavoro in termodinamica è stata svolta da Loverude e colleghi nel 2002. La ricerca riguarda la comprensione da parte degli studenti del primo principio della termodinamica, l'enfasi viene posta su una compressione adiabatica di un gas ideale. La scelta di concentrarsi sui processi adiabatici è dovuta all'obiettivo di analizzare principalmente il concetto di lavoro.

Gli studenti coinvolti nella ricerca provengono dall'Università of Washington (UW), sia dal corso introduttivo *algebra-based* sia dal secondo anno del corso di *thermal physics*. Entrambi i corsi utilizzano una didattica tradizionale, con lezioni frontali. Il primo principio della termodinamica è stato espresso in modo diverso nei due corsi, seguendo i rispettivi libri di testo. Nel corso di *thermal physics*, è stato espresso con la convenzione $\Delta U = Q + L$, mentre nel corso introduttivo è stato espresso come $\Delta U = Q - L$. In entrambi i corsi si studia l'applicazione del primo principio esclusivamente ai gas perfetti e ai processi quasi-statici. Tutti gli studenti conoscono la definizione di lavoro, quelli introduttivi solo nella forma di prodotto scalare tra grandezze finite mentre quelli di *thermal physics* conoscono anche la forma integrale.

Si sono utilizzati due metodi principali di indagine: interviste individuali, dove si è posta l'attenzione su oggetti ed eventi reali per sondare la capacità degli studenti di mettere in relazione i concetti fisici con il mondo reale, e poi domande scritte somministrate a gruppi numerosi di studenti che permettono di stimare la prevalenza di specifiche difficoltà. Tra i quesiti scritti proposti agli studenti è stato inserito un problema su un processo adiabatico chiedendo informazioni sulla temperatura e l'energia interna del sistema. Viene riportato in figura (Fig. 1.5).

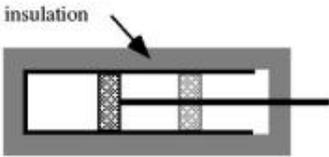
<p>A cylindrical pump contains one mole of an ideal gas. The piston fits tightly so that no gas escapes, but friction is negligible between the piston and the cylinder walls.</p>  <p>The diagram shows a cross-section of a cylindrical pump. A piston is positioned in the center of the cylinder. The cylinder walls are shaded to represent insulation. An arrow points to the insulation with the label 'insulation'. The piston is shown with a rod extending to the right.</p>	
<p>a. Version A</p> <p>The pump is thermally isolated from its surroundings. The piston is quickly pressed inward as shown.</p> <p><i>What will happen to the temperature of the gas? Explain your reasoning.</i></p>	<p>b. Version B</p> <p>The piston is quickly pressed inward as shown. A sensor in the pump records an increase in temperature.</p> <p><i>How can you account for the increase in internal energy of the gas? Explain your reasoning.</i></p>

Figura 1.5: Quesito proposto nelle due versioni, A e B, agli studenti nell'indagine di Loverude et al. 2002.

È stato scelto intenzionalmente un compito che non poteva essere risolto senza il primo principio della termodinamica. Nella versione A, agli studenti viene chiesto come varia la temperatura del gas quando il pistone viene spinto rapidamente verso l'interno e di giustificare la loro previsione. Nella versione B, il testo afferma che la temperatura del gas aumenta in seguito a una compressione rapida e viene chiesto agli studenti di spiegarne il motivo. Nel complesso circa il 75% degli studenti intervistati afferma correttamente che la temperatura del gas nella pompa aumenta, ma analizzando le spiegazioni fornite risultano due caratteristiche principali e interdipendenti:

- Fallimento nel considerare il concetto di lavoro;

- Errata applicazione del concetto di gas ideali.

In questo paragrafo ci concentriamo solo sul primo punto. Circa il 30% degli studenti nelle interviste riesce a rispondere correttamente che la temperatura aumenta ma non è in grado di darne una spiegazione, mentre il 25% utilizza il primo principio e/o la legge dei gas perfetti ma non riesce comunque a fornire una spiegazione. Pochi studenti spontaneamente citano il lavoro e anche se viene menzionato loro esplicitamente il primo principio per aiutarli, non sono in grado di arrivare a una conclusione. I dialoghi dimostrano che l'incapacità degli studenti di menzionare il lavoro spontaneamente è dovuta a difficoltà nel decidere quando e come applicare il concetto. Non si tratta dunque di un fallimento nel ricordarlo o enunciarlo. Dalle interviste risulta evidente che molti studenti non trattano il primo principio della termodinamica come un rapporto di causa-effetto in cui il lavoro può portare a un cambiamento nell'energia interna di un sistema fisico, ma esclusivamente come una relazione matematica che non attiva ragionamenti di tipo fisico. Le difficoltà che si riscontrano in questa indagine nell'applicare la definizione di lavoro ad un gas ideale sottoposto ad un processo termodinamico sono:

1. Incapacità di riconoscere che il segno del lavoro è determinato dalle convenzioni circa l'interazione tra sistema e ambiente e non dalla scelta di un sistema di coordinate;
2. Incapacità di riconoscere che il lavoro svolto sul e quello svolto dal sistema coincidono in valore assoluto;
3. Incapacità di riconoscere che il lavoro dipende dal percorso in generale.

Alcuni studenti sembrano applicare una definizione semplificata di lavoro, in cui considerano o la direzione di una forza o la direzione dello spostamento. Alcuni parlano di "direzione del lavoro", come se fosse una quantità vettoriale. Altri esplicitamente sostengono che il segno del lavoro svolto dipende dalla scelta del sistema di coordinate. In alcuni dialoghi si richiedono delle informazioni sul lavoro svolto sul gas se si espande e diversi studenti rispondono che non esiste. I commenti degli studenti risultano coerenti con la convinzione che nessun lavoro sia svolto *da un gas in compressione o su un gas in espansione*. Un altro studente, riferendosi alla compressione dell'aria nella pompa della bicicletta sostiene che essendo la mano che provoca il movimento, e non il sistema, il lavoro viene svolto dalla mano non dal gas. Altri studenti affermano che sia la mano sia il gas compiono un lavoro, ma con valori assoluti diversi, non riconoscendo il terzo principio della dinamica. Queste argomentazioni sono coerenti con la convinzione che un oggetto passivo (il gas) non lavora, o fa meno lavoro di un oggetto attivo (la mano). Inoltre, sia il pistone sia il gas sono pensati o come attivi o come passivi, a seconda della direzione dello spostamento. Durante le interviste e le conversazioni informali, alcuni studenti tendono a mettere in relazione il lavoro svolto su un sistema alla variazione netta di volume. Per sondare la comprensione da parte degli studenti della dipendenza dal percorso del lavoro, sono stati progettati diversi problemi in cui sono raffigurati su un diagramma P-V due percorsi diversi, con lo stesso stato iniziale e lo stesso stato finale. Per determinare qual è il lavoro maggiore, bisogna comparare le aree sottese dai percorsi. Invece si nota la tendenza comune degli studenti nel concentrarsi sugli stati iniziale e finale, portandoli alla risposta scorretta più frequente per cui il lavoro è nullo in entrambi i casi, visto che stato iniziale e finale hanno lo stesso volume. Altri sostengono che il lavoro è uguale nei due casi, visto che hanno lo stesso stato iniziale e finale. Questi studenti che considerano il lavoro come indipendentemente dal processo stanno generalizzando probabilmente il concetto di lavoro delle forze conservative. Ciò li porta anche a sostenere che il lavoro nei processi ciclici è nullo.

Da questa indagine si evidenzia che molte difficoltà legate al lavoro ricordano le misconcezioni sulle forze, come la tendenza a ignorare le forze esercitate da oggetti "passivi" sostenendo che l'oggetto passivo è semplicemente "d'intralcio". Inoltre, molti studenti suppongono che una forza esercitata nella direzione del moto sia maggiore della corrispondente forza di attrito, anche nel caso di un oggetto che si muove di moto rettilineo uniforme. Dunque, sembra che alcune delle difficoltà incontrate dagli studenti nell'applicare il concetto di lavoro ai processi dei gas ideali siano radicate nelle difficoltà con la meccanica.

Alla luce di queste constatazioni, Loverude e colleghi hanno introdotto quesiti esclusivamente di meccanica nelle interviste, con oggetti trattabili come punti materiali, un esempio è raffigurato nella seguente figura (Fig. 1.6).

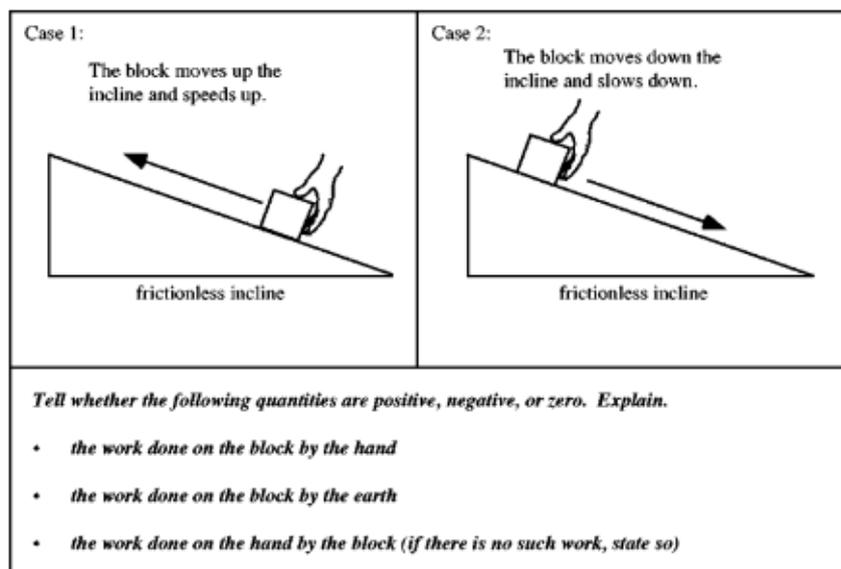


Figura 1.6: Quesito sulla meccanica inserito nelle interviste di Loverude et al. 2002 per indagare la connessione delle difficoltà sul lavoro tra meccanica e termodinamica.

Nel problema viene chiesto agli studenti di determinare il segno del lavoro svolto sul blocco dalla mano, dalla Terra e il lavoro svolto dal blocco sulla mano. Per rispondere correttamente gli studenti devono confrontare le direzioni delle forze con la direzione dello spostamento, e nello specifico per determinare il lavoro svolto dal blocco sulla mano devono applicare il terzo principio di Newton e riconoscere che il lavoro svolto dal blocco sulla mano è uguale e opposto a quello svolto dalla mano sul blocco.

Quasi tutti gli studenti hanno individuato correttamente il segno del lavoro svolto sul blocco dalla mano. Tuttavia, le spiegazioni corrette sono state fornite solo da circa il 10% nel corso *algebra-based* UW, circa il 20% nel corso *calculus-based* UMCP e circa il 45% nella UW corso di *thermal physics* del secondo anno. Tra il 5% e il 15% di ogni classe considera il lavoro come prodotto della forza per lo spostamento, ma non tiene conto della natura vettoriale di tali grandezze. Si è scoperto così che alcune difficoltà specifiche con il lavoro meccanico rispecchiano effettivamente quelle che si ritrovano in contesti termodinamici:

- Associazione del segno del lavoro con la scelta del sistema di coordinate.
- Difficoltà nel mettere in relazione il lavoro *svolto su* e quello *svolto da* un sistema.

Entrambe le difficoltà riflettono la mancata applicazione corretta della definizione di lavoro. Alcuni dei problemi che erano sorti in contesti termici, come i riferimenti alle convenzioni dei segni, non compaiono però nelle risposte al problema del lavoro meccanico.

1.2. Materiali didattici basati sulla ricerca

1.2.1. I tutorial come strumento per l'apprendimento attivo

L'insegnamento viene spesso visto come un'arte e non come una scienza. Questo punto di vista tradizionale fu espresso nel 1933 nel primo articolo sulla prima rivista pubblicata dall'American Association of Physics Teachers. In *Physics is Physics*, F. K. Richtmyer cita R. A. Millikan caratterizzando la scienza *come*:

“un insieme di conoscenza accettata come corretta da tutti i lavoratori del settore.”

Il professor Richtmyer continua poi sostenendo:

“Senza un ragionevole fondamento di fatti accettati, nessun soggetto può rivendicare la denominazione di 'scienza'. Se questa definizione di scienza è accettata, e mi sembra molto valida, allora credo che si debba ammettere che in nessun senso si può considerare l'insegnamento una scienza.”

Il Physics Education Group (PEG) (McDermott, 2001) invece tratta l'insegnamento e l'apprendimento della fisica come una vera e propria scienza. Seguendo le regole tipiche della fisica sperimentale, vengono documentate le procedure e i risultati in modo che possano essere replicati. I risultati ottenuti dalla ricerca sulle difficoltà degli studenti vengono, nello specifico, utilizzati per guidare lo sviluppo di materiali didattici e valutare la loro efficacia sulla base di ciò che gli studenti hanno appreso. I risultati della ricerca del PEG evidenziano come effettivamente l'insegnamento possa essere considerato una scienza: reazioni degli studenti a sollecitazioni simili sono confrontabili anche al variare del contesto, del livello scolare, dei libri di testo e dei laboratori; è riscontrabile un numero limitato di difficoltà concettuali e di ragionamento che gli studenti incontrano nello studio di un determinato argomento e, dunque, è studiabile e affrontabile. Dunque, secondo i ricercatori del gruppo di Seattle e alla loro scelta molto forte di focalizzarsi solo su alcuni aspetti dell'apprendimento, sebbene gli studenti varino nel modo in cui imparano meglio, l'apprendimento ha regolarità che si possono indagare. Una illusione da cui il gruppo di Seattle parte per progettare i propri materiali didattici è che docenti si aspettano che gli alunni, comprendendo come risolvere i problemi standard di fisica, riescano a sviluppare i concetti importanti, a sistemarli in un quadro concettuale coerente e a sviluppare le capacità di ragionamento necessarie per applicare tali concetti in altre situazioni semplici. Ciò raramente avviene. Per determinare il livello di comprensione degli studenti sono fondamentali delle domande qualitative che richiedano una spiegazione verbale del ragionamento seguito, poiché gli studenti spesso eccellono nelle domande quantitative di risoluzione dei problemi grazie ad algoritmi matematici semplicemente memorizzati. Le lezioni frontali, in cui il docente illustra i vari argomenti, risultano inefficaci per la maggior parte degli studenti. Con questo approccio all'insegnamento vengono a mancare le connessioni tra i vari concetti e il collegamento tra rappresentazioni formali e il mondo reale. Molte difficoltà concettuali non vengono superate, non si sviluppano né un quadro concettuale coerente né l'abilità di ragionamento.

Dalle regolarità che si sono osservate nell'indagare l'apprendimento degli studenti, il gruppo ha costruito alcuni principi guida per la costruzione di attività di insegnamento:

1. Le domande che richiedono un ragionamento qualitativo e una spiegazione verbale sono essenziali per valutare l'apprendimento degli studenti e sono una strategia efficace per aiutare gli studenti a imparare.
2. Gli studenti hanno bisogno di esercitarsi ripetutamente nell'interpretazione del formalismo della fisica e nel metterlo in relazione con il mondo reale.
3. Le difficoltà concettuali persistenti devono essere affrontate in modo esplicito in più contesti.
4. Gli studenti devono partecipare al processo di costruzione di modelli qualitativi e nell'applicazione di questi modelli per prevedere e spiegare i fenomeni del mondo reale.
5. Le capacità di ragionamento scientifico devono essere espressamente coltivate.
6. Gli studenti devono essere intellettualmente attivi per sviluppare una comprensione funzionale.

Una tipologia di attività didattica ideata per soddisfare questi criteri sono i loro tutorial, descritta da McDermott e colleghi in *Introductory Physics* (2002). I tutorial proposti promuovono un atteggiamento attivo degli studenti nel processo di apprendimento della fisica. L'enfasi nelle esercitazioni è sulla costruzione di concetti, sullo sviluppo delle capacità di ragionamento e sul relazionare il formalismo della fisica al mondo reale. Ogni esercitazione è costituita da quattro componenti: pre-test, foglio di lavoro, compiti a casa e post-test. I pre-test servono ad attivare l'attenzione degli studenti su ciò che

dovranno imparare e, dunque, servono per preparare il terreno all'esercitazione. Per i docenti del corso, i pre-test, invece, sono uno strumento per costruire uno stato iniziale circa le conoscenze degli studenti. I test preliminari non vengono restituiti agli studenti. Durante l'esercitazione gli studenti vengono divisi in gruppi e seguono dei fogli di lavoro, che consistono in compiti e domande da svolgere nell'ordine prestabilito. Le domande guidano gli studenti attraverso il ragionamento necessario per costruire concetti e applicarli in situazioni reali, fanno emergere difficoltà note e li aiutano ad affrontarle attraverso un dialogo socratico tra pari. Gli istruttori non fanno lezione, ma svolgono il ruolo di guida, pongono domande volte ad aiutare gli studenti a trovare la propria risposta. Un possibile aspetto negativo dei tutorial è che essi affrontando le intuizioni ingenuie degli studenti, possono dare loro la sensazione che la loro intuizione sia sempre sbagliata, riducendo la loro fiducia e il loro piacere per la fisica. Dopo l'esercitazione, gli studenti sono invitati a svolgere i compiti a casa per rinforzare ciò che è stato appreso durante l'esercitazione e il post-test serve per la valutazione finale.

Andando ora a descrivere le attività proposte agli studenti in questo progetto di tesi, si sono svolti due tutorial, uno sulla legge dei gas perfetti e uno sul primo principio della termodinamica.

Il primo tutorial, sulla legge dei gas perfetti, si suddivide in quattro fasi intitolate: "pressione", "pressione e temperatura", "diagrammi PV" e "numero di Avogadro". Ciascuna fase propone una serie di quesiti.

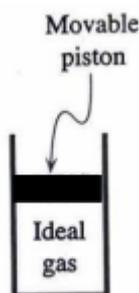


Figura 1.7: Immagine del cilindro del primo quesito della prima fase del tutorial sulla legge dei gas perfetti.

Nella prima fase lo studente considera un cilindro contenente del gas ideale chiuso con un pistone massivo, scorrevole ma senza attrito, vedi Fig.1.7. Nel primo quesito gli viene chiesto di disegnare il diagramma del corpo libero del pistone e di determinare la forza netta agente sul pistone. Gli viene poi chiesto di determinare il valore della pressione del gas nel cilindro utilizzando le quantità fisiche date dal problema (la massa, l'area di sezione del pistone e la pressione atmosferica).

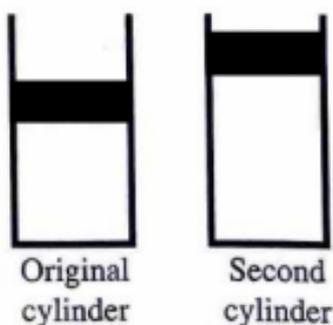


Figura 1.8: Immagine dei due cilindri del secondo quesito della prima fase del tutorial sulla legge dei gas perfetti.

Il quesito successivo va a intaccare l'idea comune che diverse posizioni del pistone corrispondono a valori diversi di pressione del gas, confrontando due cilindri identici con lo stesso pistone ma ad altezze differenti, vedi Fig.1.8. Questo quesito vuole far riflettere gli studenti sulla pressione e guidarli alla conclusione che i due gas presentano la stessa pressione.

Nella seconda fase lo studente deve riconoscere che un aumento di temperatura non implica necessariamente un aumento di pressione, in quanto sono presenti anche altri fattori, come il volume e il numero di moli. Si considera lo stesso tipo di cilindro della prima fase, vedi Fig.1.7, prima inserito in dell'acqua con ghiaccio e poi spostato in acqua bollente. Allo studente viene chiesto di confrontare il volume, la temperatura e la pressione nello stato iniziale e finale e di verificare i risultati con la legge dei gas perfetti. Gli studenti sono così guidati a comprendere che una variazione di temperatura a pressione costante può avvenire con conseguente aumento di volume, ovvero con spostamento del pistone. L'ultima parte di questa fase presenta un breve dialogo tra due ipotetici studenti costruito sulla base dei risultati di ricerca rispetto alle misconcezioni della relazione tra pressione e temperatura, e viene chiesto agli alunni di leggere il dialogo e capire se il tipo di ragionamento proposto è corretto o sbagliato e perché.

La terza fase guida gli studenti a disegnare e interpretare i diagrammi PV, fondamentali per la rappresentazione degli stati e dei processi termodinamici dei gas perfetti. Viene chiesto loro di rappresentare il processo descritto nella seconda fase in un diagramma PV.

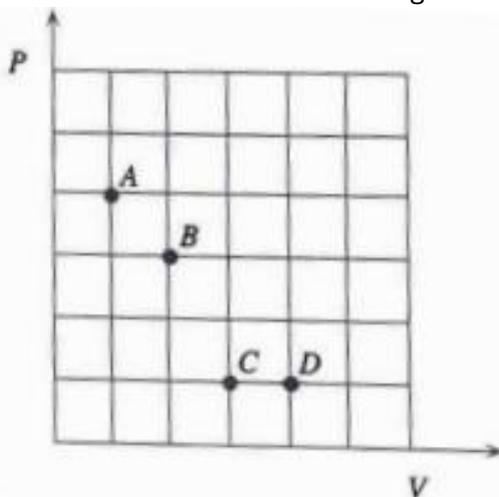


Figura 1.9: Grafico dell'esperimento nella terza fase del tutorial sulla legge dei gas perfetti.

Il quesito successivo presenta un diagramma PV riportato in Fig.1.9, e viene chiesto agli studenti di classificare le temperature dei punti riportati nel grafico in ordine crescente.

Si evidenzia così che pressione, volume e temperatura sono dipendenti e che si possono ottenere informazioni implicite sulla temperatura da un diagramma PV applicando la legge dei gas perfetti.

Nella quarta fase si vuole fare riflettere gli studenti sull'indipendenza dalla sostanza della legge dei gas perfetti. Vengono confrontati due cilindri identici, con lo stesso volume e la stessa temperatura, contenenti due gas differenti. Lo studente, analizzando le condizioni esterne identiche, è guidato a concludere che anche la pressione è la stessa. Viene poi confrontato il numero delle moli, trattando anche il concetto di massa molare. È presente nuovamente un breve dialogo fittizio tra due studenti costruito sulla base dei risultati di ricerca rispetto alle misconcezioni, e viene chiesto agli alunni di leggere il dialogo e capire se il tipo di ragionamento proposto è corretto o sbagliato e perché.

Anche il secondo tutorial sulla prima legge della termodinamica è suddiviso in quattro fasi intitolate: "lavoro", "lavoro ed energia interna", "calore" e "calore, lavoro ed energia interna".

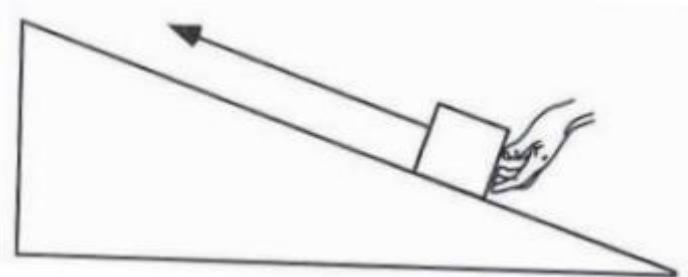


Figura 1.10: Immagine del piano inclinato della prima fase del tutorial sul primo principio della termodinamica.

Nella prima parte, viene chiesto agli studenti di richiamare la definizione di lavoro compiuto su un oggetto da parte di un agente esterno e di riflettere su quando il lavoro è positivo, negativo e nullo. Nel quesito successivo si richiede agli studenti di disegnare il diagramma del corpo libero e di applicare la definizione del lavoro meccanico a un blocco che si muove su un piano inclinato (vedi Fig.1.10) richiamando anche il teorema delle forze vive.



Figura 1.11: Immagine del cilindro della prima fase del tutorial sul primo principio della termodinamica.

Successivamente, gli viene chiesto di considerare un gas all'interno di un cilindro con un pistone mobile ma senza attrito (vedi Fig.1.11) e di descrivere come dovrebbe muoversi il pistone per produrre un lavoro negativo e positivo. Infine, viene chiesto agli studenti se anche il gas compie un lavoro sul pistone.

Nella seconda parte gli studenti vengono guidati a riconoscere che una variazione dell'energia interna di un gas in un sistema termicamente isolato è uguale al lavoro compiuto sul gas. Si considera il cilindro della fase precedente (vedi Fig.1.11), questa volta termicamente isolato, in cui il pistone viene premuto verso l'interno e si chiede agli studenti di individuare il lavoro fatto sul gas dal pistone e come variano energia interna e temperatura. Infine, è presentato un breve dialogo fittizio tra due studenti costruito sulla base dei risultati di ricerca rispetto alle misconcezioni, e viene chiesto agli alunni di leggere il dialogo e capire se il tipo di ragionamento proposto è corretto o sbagliato e perché.

Nella terza parte si considera lo stesso cilindro di Fig.1.11, a temperatura ambiente. Il pistone viene ora bloccato e lo strato isolante rimosso. Il contenitore viene poi inserito in acqua bollente e il gas è libero di raggiungere l'equilibrio termico. Allo studente viene chiesto come variano la temperatura, l'energia interna, la pressione e il volume del gas e di rappresentare il processo graficamente in un diagramma PV. Gli viene anche chiesto se viene compiuto un lavoro sul gas e viene introdotto il termine di trasferimento di calore ("heat transfer" originariamente) per spiegare la variazione di energia interna.

Nell'ultima parte si analizza la variazione di energia interna dovuta sia al lavoro sia al trasferimento di calore, introducendo il primo principio della termodinamica $\Delta U = Q - L$. Gli studenti sono guidati a riflettere sulla definizione del primo principio e sulla distinzione tra le due possibili definizioni, se si utilizza il lavoro compiuto dalle forze esterne o quello compiuto dal gas. Successivamente, devono considerare un contenitore non isolato termicamente con un pistone libero di muoversi. Il contenitore viene inserito all'interno di acqua con ghiaccio e il pistone viene premuto molto lentamente verso l'interno in modo tale da permettere al gas di essere sempre in equilibrio termico con l'ambiente. Viene chiesto agli studenti come variano volume, temperatura, energia interna e pressione del gas e di disegnare il grafico del processo in un diagramma PV. Gli viene chiesto poi di determinare se il lavoro

fatto sul gas e il calore trasferito al gas sono positivi, negativi o nulli. Analogamente alle fasi precedenti, è presente un'affermazione fittizia di uno studente costruita sulla base della confusione tra i concetti di calore e temperatura nota in letteratura, e viene chiesto agli studenti di evidenziare i difetti di questa affermazione.

1.2.2. I Concept Inventory come strumento di indagine

I Concept Inventory (CI) sono strumenti di valutazione basati sulla ricerca in Didattica della fisica che indagano la comprensione da parte degli studenti di particolari concetti di fisica. Possono essere sia a scelta multipla sia a risposta aperta. Il CI più rinomato è il Force Concept Inventory (FCI), ideato per indagare la conoscenza di senso comune sul concetto di forza (Hestenes et al., 1992). Ci sono tuttavia oltre sessanta CI per diversi argomenti introduttivi e avanzati, sia di fisica che di astronomia. I CI vengono solitamente forniti all'inizio di un corso (pre-test) per avere un'idea delle conoscenze pregresse degli studenti e alla fine del corso (post-test) per valutare i cambiamenti nella loro comprensione. Hanno lo scopo di misurare l'efficacia dell'insegnamento valutando come la didattica sia riuscita o meno a intaccare le conoscenze di senso comune. Nelle opzioni a scelta multipla vengono inserite appositamente risposte costruite sulle idee di senso comune degli studenti, indagate precedentemente con delle interviste. Le domande dei CI possono risultare molto più difficili per gli studenti rispetto ai tipici problemi di fine capitolo, perché obbligano ragionamenti inusuali e, soprattutto, attivano la conoscenza di senso comune. I CI sono costruiti, congetturando possibilità di confrontare risultati ottenuti da professori, istituzioni e tecniche di insegnamento differenti. I CI non vanno però a sostituire altre valutazioni come gli esami e i compiti, ma devono essere usati in concomitanza a queste per ottenere un quadro più articolato dell'apprendimento degli studenti e dell'efficacia dell'insegnamento. Infatti, vanno a indagare soltanto aspetti molto specifici riguardo alla concettualizzazione, mentre non indagano aspetti fondamentali dell'apprendimento come le abilità matematiche, abilità di ragionamento epistemologico, processi di problem solving e sensemaking e, più in generale, i processi di cambiamento concettuale. Per questo motivo non devono essere usati come metodi di ammissione o per l'assegnazione di voti. Il test va somministrato in classe; infatti, molti ricercatori sconsigliano vivamente di fornire CI in modo non supervisionato perché gli studenti potrebbero utilizzare risorse esterne o condividere il test, alterando l'efficacia del test di valutazione. Inoltre, l'aula fornisce un ambiente standardizzato che di solito si traduce in un tasso di completamento più elevato rispetto a quando gli studenti sostengono il test al di fuori della classe. Esistono vari CI riguardanti la termodinamica che variano per gli argomenti trattati, per la fascia scolastica, per il livello di attendibilità (quanto è stato testato) e per lo scopo. Alcuni esempi sono elencati nella seguente tabella (*Tab. 1.3*).

Titolo	Argomenti	Fascia scolastica	Livello di attendibilità	Scopo
Thermodynamics Conceptual Survey (TCS)	Temperatura, trasferimenti di calore, legge dei gas perfetti, primo principio della termodinamica	Intro college, intermediate	Argento	Valutare la comprensione da parte degli studenti sul calore, sulla temperatura, sulla legge dei gas perfetti, sul primo principio della termodinamica e sui processi termodinamici
Thermal Concept Evaluation (TCE)	Calore, temperatura e trasferimenti di calore	Intro college, high school	Argento	Valutare la comprensione e l'applicazione dei concetti di termodinamica da parte degli studenti del terzo anno di scuola superiore utilizzando contesti comuni che riflettano le concezioni degli studenti.
Survey of Thermodynamic Processes and First and Second Laws (STPFaSL)	Primo e secondo principio della termodinamica e processi termodinamici	Intro college, upper-level graduate	Argento	Misurare l'efficacia delle tecniche tradizionali e/o di ricerca per l'insegnamento del primo e del secondo principio della termodinamica e dei processi termodinamici.
Heat and Temperature Conceptual Evaluation (HTCE)	Calore, temperatura, calore specifico, cambiamenti di fase	Intro college	Bronzo	Valutare la comprensione da parte degli studenti dei concetti di calore e temperatura.

Tabella 1.3: Diversi Concept Inventory riguardanti la termodinamica, classificati per argomenti trattati, fascia scolastica, livello di attendibilità e scopo.

Per la scelta del test da svolgere in classe si è scelto il Thermodynamics Conceptual Survey (TCS), volendo studiare le difficoltà degli studenti sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica e per poter verificare l'efficacia dei tutorial come metodo didattico.

Il TCS è stato costruito sulla base di risultati precedentemente ottenuti dalla ricerca sul calore, temperatura, legge dei gas perfetti e primo principio della termodinamica. Di nostro interesse sono la legge dei gas perfetti e il primo principio della termodinamica, i quesiti riguardo a questi argomenti sono stati ideati seguendo i risultati delle ricerche di Loverude et al. (2002), Kautz et al. (2005) e Meltzer (2004).

L'ultima versione, la versione 2, pubblicata nel 2011, ha sia una versione inglese sia una thailandese ed è divisa in due parti: la parte I indaga la temperatura, i trasferimenti di calore e la legge dei gas perfetti, la parte II il primo principio della termodinamica. L'attendibilità del questionario si è ottenuta studiando oltre 2000 risposte di studenti sia dall'Australia sia dalla Thailandia. I risultati statistici mostrano che il questionario è attendibile e valido (Wattanakasiwich et al., 2013).

In questo studio è stata utilizzata una versione personalizzata del Thermodynamics Conceptual Survey (TCS) (Wattanakasiwich et al., 2013).

Il test è suddiviso in due parti, I e II, come descritto nella seguente tabella (Tab.1.4).

	Argomento	Numero domanda	
Parte I	Temperatura e trasferimenti di calore	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	
	Legge dei gas perfetti	Processi isobari Processi adiabatici	8, 9, 10, 11, 12 13, 14, 15, 16
Parte II	Primo principio della termodinamica	Processi adiabatici	17, 18, 19
		Processi isobari	20, 21
		Processi isotermi	22, 23
		Processi isocori	24
		Processi ciclici	25, 26, 27, 28, 29, 30, 31
	Diagrammi P-V	32, 33, 34, 35	

Tabella 1.4: Argomenti concettuali e rispettivi quesiti del TCS.

Della prima parte sono state selezionate solo le domande sulla legge dei gas perfetti, quindi dal quesito numero 8, e sono state ignorate quelle riguardanti la temperatura e i trasferimenti di calore, mentre della seconda parte sul primo principio della termodinamica sono state selezionate tutte le domande. Successivamente i quesiti sono stati tradotti in lingua italiana. Delle 35 domande iniziali nel test ne sono state inserite 28. Inoltre, esclusivamente nel pre-test è stata inserita una domanda iniziale sul calore, “Come definiresti il calore a parole tue?”, per poter indagare il legame tra alcune concezioni errate degli studenti e il linguaggio da loro usato.

Per quanto riguarda il tempo fornito per completare il test, bisognerebbe seguire le indicazioni consigliate dal costruttore della prova, per il TCS si tratta di 35 minuti. Si è scelto di fornire agli studenti, visto il numero inferiore di domande e l’aggiunta di una domanda aperta, 30 minuti per completare ciascun test.

Il test è stato denominato con un nome abbastanza generico, “Questionario sulla termodinamica”, per evitare che gli studenti si documentassero appositamente prima di fare il test oppure che cercassero delle soluzioni durante.

Il pre-test è stato somministrato agli studenti dopo che hanno trattato la legge dei gas perfetti e il primo principio della termodinamica ma prima dell’attività col tutorial. Dopo l’attività è stato somministrato il post-test, per poter controllare l’efficacia dell’attività.

2. Lo studio

2.1. Il contesto scolastico

La classe in cui è stata svolta l'indagine è al terzo anno del percorso quinquennale del Liceo Scientifico E. Fermi di Bologna, con potenziamento scientifico. La professoressa della classe insegna matematica e fisica, per un totale di otto ore, suddivise in cinque di matematica e tre di fisica. La classe è composta da 20 studenti, 4 ragazze e 16 ragazzi.

Il potenziamento scientifico si basa sul quadro orario del liceo scientifico tradizionale, con il potenziamento di alcune materie scientifiche. Il percorso prevede, rispetto a quello istituzionale, una maggior frequenza dei laboratori scientifici secondo un metodo sperimentale e la trattazione di programmi più approfonditi, in scienze, fisica e matematica. Inoltre, nel quinquennio vengono approfonditi argomenti di scienze e fisica in inglese, in particolare al quarto anno.

Gli obiettivi specifici di apprendimento per il Liceo scientifico sono contenuti nel Decreto Ministeriale 211 del 7 ottobre 2010 "Indicazioni Nazionali", allegato F (Gazzetta Ufficiale, 2010). Al suo interno sono specificate le seguenti richieste per il secondo biennio riguardanti la termodinamica:

"Si completerà lo studio dei fenomeni termici con le leggi dei gas, familiarizzando con la semplificazione concettuale del gas perfetto e con la relativa teoria cinetica; lo studente potrà così vedere come il paradigma newtoniano sia in grado di connettere l'ambito microscopico a quello macroscopico. Lo studio dei principi della termodinamica permetterà allo studente di generalizzare la legge di conservazione dell'energia e di comprendere i limiti intrinseci alle trasformazioni tra forme di energia, anche nelle loro implicazioni tecnologiche, in termini quantitativi e matematicamente formalizzati."

Per quanto riguarda il materiale didattico gli studenti hanno a disposizione le presentazioni PowerPoint presentate a lezione dalla professoressa e il libro di testo Amaldi "Il Nuovo Amaldi per i Licei Scientifici. Blu" Ed Zanichelli, Vol. 1.

Gli studenti hanno la possibilità di aderire anche ad attività didattiche al di fuori dell'orario scolastico. L'intera classe, come attività di PCTO (Percorsi per le Competenze Trasversali e per l'Orientamento), partecipa al progetto "Premio Asimov" che consiste nella lettura critica di opere di divulgazione scientifica in lingua italiana e nella loro recensione e valutazione, con l'obiettivo di avvicinare le giovani generazioni alla cultura scientifica. Inoltre, cinque studenti hanno partecipato ai Campionati di Fisica a Squadre mentre due ragazzi hanno partecipato anche a quelle individuali, due sono andati in gita al CERN, quattro hanno partecipato a un'attività di PCTO sul telescopio a muoni e un ragazzo a un'attività di PCTO sull'ElettroArduino.

2.2. Il percorso in classe

Durante l'anno scolastico 2023/2024 il programma di fisica della classe è stato strutturato su 5 nuclei fondanti: introduzione alla dinamica, conservazione dell'energia meccanica, conservazione della quantità di moto, gravitazione, **teoria cinetica dei gas e principi della termodinamica**.

L'indagine si è svolta tra marzo e maggio del 2024. La professoressa ha dedicato alla termodinamica circa 23 ore applicando diverse modalità di insegnamento. Gran parte delle lezioni sono state svolte frontalmente: la professoressa ha spiegato gli argomenti attraverso presentazioni PowerPoint e ha illustrato sulla lavagna elettronica i vari passaggi importanti. Questa tipologia di insegnamento, per mantenere attiva la concentrazione degli studenti e per renderli partecipi, è stata intervallata da discussioni collettive stimolate dall'insegnante stessa. Gli studenti partecipano attivamente e pongono per primi molte domande. La maggior parte di essi prende appunti sul quaderno, qualcuno segue anche dal libro di testo. Come compiti per casa la professoressa assegna agli studenti degli esercizi, presi dal libro di testo, propone la visione di filmati e fornisce degli articoli da leggere. Le

presentazioni PowerPoint presentate a lezione, vengono poi lasciate a disposizione per essere consultate e studiate. Gli argomenti trattati a lezione sono sinteticamente riportati all'interno della seguente tabella (Tab.2.1).

Tematica trattata	Argomenti
La temperatura e i gas	La temperatura assoluta; Modello del gas perfetto; Equazione generale dei gas perfetti; La teoria cinetica dei gas: pressione e temperatura dal punto di vista microscopico; Distribuzione di Maxwell: velocità quadratica media.
Il calore e il primo principio della termodinamica	Sistemi termodinamici: le variabili macroscopiche e lo stato termodinamico; Equilibrio termodinamico: principio zero della termodinamica; Fondamentali tipi di trasformazioni: quasi-statiche, non quasi-statiche, isocora, isobara e isoterma; Principio di equivalenza: il calore come fonte di energia; Lavoro in una trasformazione: lavoro in una trasformazione isobara, lavoro come area sottesa nel piano PV; Energia interna: funzione di stato, dipendenza dalla temperatura; Calore: ripasso della legge fondamentale della calorimetria; Il primo principio della termodinamica: enunciato e applicazioni nelle varie trasformazioni; Calore specifico: a volume e a pressione costante, relazione di Mayer; Trasformazione adiabatica.
Il secondo principio	Macchina termica: bilancio energetico e il rendimento; Il secondo principio della termodinamica: enunciati di Kelvin e di Clausius e l'equivalenza dei due enunciati.

Tabella 2.1: Riassunto degli argomenti trattati durante le ore di lezione, raggruppati per tematiche.

Molte ore, delle 23 totali, sono state dedicate allo svolgimento degli esercizi, sia precedentemente assegnati come compiti per casa, sia per presentare esempi durante l'orario curriculare. La maggior parte degli esercizi viene scelta dalla professoressa dal libro di testo e a volte, per permettere agli studenti di esercitarsi il più possibile, i quesiti sono stati selezionati da un ulteriore libro di riferimento per la professoressa, il "Quantum 1 Fabbri, Masini, Baccaglini". Queste ore dedicate agli esercizi si sono svolte in tre modalità differenti:

- Esercizi svolti dall'insegnante alla lavagna elettronica collettivamente discussi e risolti con gli studenti;
- Esercizi svolti da uno studente alla lavagna elettronica;
- Esercizi svolti dagli studenti divisi in gruppi e successiva discussione dei risultati;

La professoressa ha dedicato qualche ora del percorso di termodinamica ad altri tipi di attività. In particolare, ha dedicato 1 ora alla visione in classe di un filmato proposto dallo stesso libro di testo sulle macchine termiche e 1 ora ad un lavoro di gruppo sul tema delle macchine termiche con conseguente restituzione finale. La classe ha seguito inoltre due esperienze nei laboratori di fisica dell'Istituto, in due giorni separati. Nella prima giornata hanno eseguito un'attività per determinare l'equivalente meccanico della caloria per mezzo del mulinello di Joule, ma è stata svolta prima

dell'inizio del mio periodo di osservazione. Durante la seconda esperienza, in cui invece ero presente, un professore esterno al corpo docente della classe ha svolto un esperimento sulle macchine termiche. Durante lo svolgimento dell'esperimento, il professore ha reso partecipi gli studenti, ponendo domande e spronandoli a osservare e dare una spiegazione dei fenomeni incontrati. L'esperimento ha riprodotto la prima macchina termica a vapore, la macchina di Savery, in una adattamento scolastica, nelle seguenti figure (Fig.2.1 e Fig.2.2) vengono riportati gli strumenti utilizzati e lo schema alla lavagna per calcolare il lavoro prodotto dalla macchina.



Figura 2.1: Strumenti e materiali utilizzati per la costruzione di una macchina di Savery in laboratorio.

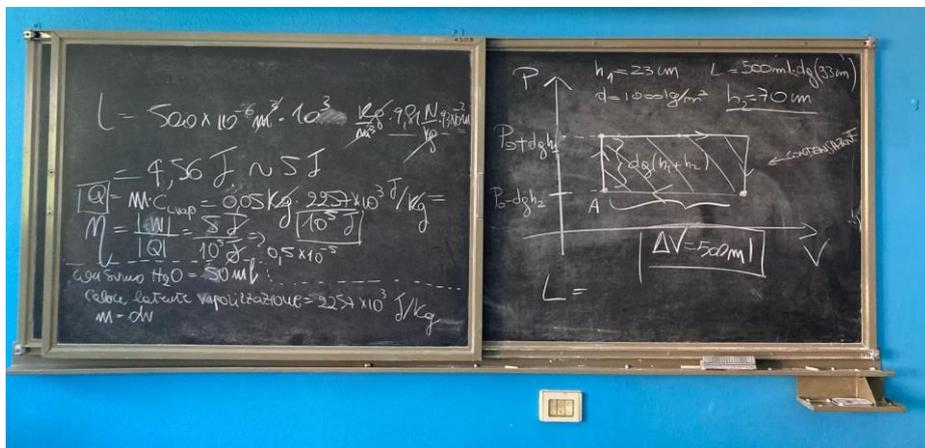


Figura 2.2: Schema e calcoli riassuntivi sul lavoro svolto dalla macchina di Savery in laboratorio.

2.3. Descrizione dell'attività svolta in classe

Lo studio argomento della tesi si è svolto da marzo a maggio 2024. Il lavoro è consistito in un periodo di osservazione della classe e nella progettazione di un intervento didattico basato su due tutorial proposti da McDermott e colleghi (2001), e nella somministrazione di un test prima e dopo l'intervento. In Tab.2.2 si riporta una scaletta temporale delle attività svolte.

Attività	Durata
Osservazione delle lezioni e dei laboratori	Tra marzo e maggio 2024, circa 19 ore
Progettazione e consegna del questionario sul filmato “Energia meccanica e termica” del PSSC come compito a casa	Gli studenti hanno avuto un fine settimana per poter visionare il filmato e compilare il rispettivo questionario (9 Maggio)
Somministrazione del pre-test	1 ora (13 Maggio)
Svolgimento dell’attività di gruppo con i tutorial	2 ore (15 Maggio)
Somministrazione del post-test	1 ora (17 Maggio)

Tabella 2.2: Scaletta temporale delle attività svolte per il progetto della tesi.

Per quanto riguarda l’osservazione in aula e in laboratorio, ho tenuto un diario di bordo, segnando giornata per giornata gli argomenti trattati, le tecniche di insegnamento adottate dalla professoressa e le risposte degli studenti ai diversi stimoli. Il periodo di osservazione in classe si è concluso a maggio 2024, quando gli studenti hanno seguito un laboratorio sulle macchine termiche.

L’intervento didattico proposto a scuola si articola come segue. Prima di introdurre il primo principio della termodinamica, la prof.ssa ha proposto agli studenti la visione del filmato del PSSC “Energia meccanica e termica”. Per ragioni di tempistica non si è riusciti a discuterne in classe nella lezione successiva, allora si è riproposta la visione alla fine della trattazione del primo principio come compito per casa.

Il video è stato scelto perché introduce i concetti di conservazione dell’energia e il modello meccanico di gas. Nel filmato vengono mostrati due fenomeni: una giostra con delle navicelle che ruotano e una pallina che cade e rimbalza su un tavolo. Il docente nel filmato inizia una riflessione sulla conservazione dell’energia nei due casi. Per la navicella l’energia si conserva, trasformandosi da energia cinetica in energia potenziale e viceversa; invece, la pallina sembra perdere energia a causa degli urti con il piano e dell’attrito dell’aria. Per poter spiegare il fenomeno della perdita di energia della pallina si introduce il modello meccanico di gas, dove le particelle sono modellizzate come palline in moto all’interno di un contenitore. Il gas così modellizzato viene descritto dalle grandezze medie di pressione e temperatura. La pressione viene introdotta in relazione ai rimbalzi delle molecole di un gas contro la parete e la temperatura in relazione all’energia cinetica media del moto di traslazione delle molecole. Il video vuole poi mostrare che la pressione risulta direttamente proporzionale alla temperatura. Per far ciò il docente utilizza due gas diversi, l’ossigeno e l’elio, all’interno di due contenitori, con volume e numero di moli costanti. Misura la pressione a diverse temperature, ottenendo una scala delle temperature.

Ritornando poi al problema della pallina che rimbalza, si introduce un nuovo modello: un disco che scivola su un piano inclinato senza attrito. Quando si introducono palline sul piano, il disco urta con esse e l’energia cinetica del disco si trasforma in energia disordinata delle palline. Questo modello descrive quello che succede nel caso della pallina che cade attraverso l’aria e che urta con il tavolo. Si arriva così alla conclusione che l’energia si conserva e si introduce il fenomeno della conduzione termica, utilizzando sempre il modello del gas con le palline.

Agli studenti è stato chiesto di visionare a casa il video e di rispondere ad un questionario che ho personalmente progettato, riportato in Appendice A, per indagare la comprensione degli studenti dei concetti introdotti nel filmato, in particolare la conservazione dell’energia nei due fenomeni proposti e i due modelli, e per capire quanto il video sia stato utile per la loro comprensione.

La seconda parte del mio intervento è consistita nella somministrazione di un questionario (pre e post) e nello svolgimento di un tutorial sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica.

Il pre-test è stato somministrato in classe per indagare se e in che modo la didattica tradizionale intacca le idee di senso comune degli studenti.

In classe ho fatto poi svolgere il tutorial sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica, proposti da McDermott e colleghi in "Tutorial in Introductory Physics" (2002).

I due tutorial si articolano ciascuno in quattro fasi, contenenti più quesiti. La classe è stata divisa in 5 gruppi da 4 persone. Ho somministrato due copie dei fogli di lavoro contenenti le istruzioni per i tutorial a ciascun gruppo; alla fine delle attività ho lasciato una copia agli studenti mentre ho ritirato la seconda per poter analizzare i loro ragionamenti. Durante l'esercitazione gli studenti hanno discusso tra loro cercando di rispondere alle domande proposte nei fogli e alla fine di ogni fase mi hanno mostrato i loro ragionamenti. I due tutorial si sono svolti, uno successivamente all'altro, in due ore consecutive di lezione. Tutti e i 5 gruppi sono riusciti a completare l'attività sulla legge dei gas perfetti, solo 3 sono riusciti a finire anche l'attività sul primo principio della termodinamica.



Figura 2.3: Svolgimento dell'attività dei tutorial.

A seguito dello svolgimento del tutorial, è stato somministrato il post-test, per verificare l'efficacia delle attività proposte. Le date dei test erano state precedentemente concordate con la professoressa.

I dati nel pre e post-test sono stati raccolti in maniera non anonima con l'obiettivo di analizzare anche i miglioramenti dei singoli studenti oltre all'andamento complessivo della classe. I dati sono stati poi successivamente anonimizzati secondo il regolamento di Ateneo per l'analisi proposta nel capitolo successivo. Prima del pre-test si sono tranquillizzati gli studenti sull'assenza di valutazione da parte della professoressa, ma è stato richiesto impegno spiegando l'importanza di questi test per poter indagare l'apprendimento della classe.

Sul sito di PhysPort si trovano varie piccole accortezze che si possono utilizzare per rendere il più efficace possibile un'attività basata sui tutorial. Gli studenti di solito apprezzano attività di apprendimento attivo, come quella che abbiamo proposto, sia perché sono una modalità con cui si sentono di imparare maggiormente sia perché apprezzano le interazioni tra pari. Tuttavia, possono partecipare alle attività proposte svogliatamente e passivamente, l'obiettivo dunque del professore è quello di coinvolgere maggiormente gli studenti. Questo tipo di attività richiede più tempo e sforzo da parte degli studenti, e ciò rappresenta una delle maggiori lamentele anche se in questo caso gli studenti mi sono sembrati ben propensi nello svolgimento di questa attività.

La motivazione degli studenti è fondamentale per rendere il loro apprendimento efficace; perciò, per aumentare la loro motivazione ho lasciato che formassero loro i gruppi per dargli un senso di autonomia e controllo. Inoltre, ho deciso di suddividerli in 5 gruppi da 4 per poter evitare il "social loafing". Suddividendo infatti gli studenti in gruppi poco numerosi è più probabile che tutti i componenti del gruppo contribuiscano all'attività.

Seguendo la teoria dello "scaffolding" di Vygotskij il docente deve fornire supporto allo sviluppo degli studenti mentre attraversano il processo di apprendimento. Dunque, per facilitare l'attività io e la professoressa abbiamo girato tra i gruppi e abbiamo interagito con gli studenti. In questo modo è stato possibile ascoltare le loro discussioni e fornire chiarimenti quando necessari. Inoltre, circolare nella stanza aiuta a mantenere gli studenti concentrati e permette di avvicinarsi agli studenti che hanno difficoltà nel procedere con il ragionamento.

Infine, affinché un'attività di apprendimento attivo sia fruttuosa gli studenti devono sentirsi a proprio agio in classe, nell'interagire tra loro e con l'insegnante. Nella classe in questione questo ambiente si ritrova molto chiaramente: avendo la stessa professoressa di matematica e fisica dalla prima superiore, gli studenti si sentono apprezzati e a loro agio, rispondono e pongono svariate domande quotidianamente. Inoltre, la mia figura di tutor non è completamente estranea ai ragazzi, avendo seguito con loro le lezioni fino a quel momento.

3. Risultati e commenti

3.1. Risultati del questionario sul filmato “Energia meccanica e termica”

Finite le lezioni frontali sul primo principio della termodinamica agli studenti è stato chiesto di guardare a casa il filmato “Energia meccanica e termica” del PSSC e di compilare un questionario (Appendice A). 19 studenti su 20 hanno compilato il questionario.

Nella parte iniziale del questionario è stato chiesto agli studenti se, nel caso dei due fenomeni presentati nel video, ovvero della giostra con delle navicelle che ruotano e della pallina che cade, l’energia si conserva. Dall’analisi delle risposte si nota che per tutti gli studenti risulta chiaro il concetto di conservazione dell’energia. Si riportano di seguito alcuni esempi delle risposte degli studenti.

Alla domanda “Nella giostra con le navicelle che ruotano l’energia si conserva? Spiega brevemente”, particolarmente significative sono le risposte di:

S14: *“Sì, l’energia **cinetica** in basso si è **convertita** in energia **potenziale gravitazionale** e viceversa l’energia potenziale in alto si converte tutta in cinetica in basso (trascurando gli attriti)”*

S17: *“Sì perché, **trascurando gli attriti**, si può applicare il **principio di conservazione dell’energia meccanica**. In particolare nel punto più alto l’energia è solo **potenziale gravitazionale** e nel punto più basso è solo energia **cinetica**.”*

S7: *“In teoria sì, poiché inizialmente la navicella ha **energia cinetica** che si **converte** interamente in **energia potenziale**, per poi essere ritrasformata in cinetica lungo la discesa e così via...In realtà ciò non avviene per l’attrito.”*

Alla domanda “Nella pallina che cade attraverso l’aria l’energia si conserva?”, particolarmente significative sono le risposte di:

S14: *“Sì considerando **il sistema complessivo** anche se da un rimbalzo all’altro la pallina perde energia, causa l’**attrito** con l’aria e la perdita di energia per **urto**, quindi considerando la sola pallina no”*

S17: *“No perché un po’ di **energia si disperde** nell’**attrito** con l’aria e nell’**urto** con la superficie.”*

S7: *“Dato che cade appunto attraverso l’aria la pallina è sottoposta all’ **attrito del fluido**, e poi anche del tavolo su cui rimbalza. Perciò in un’approssimazione sufficiente grande, come con la navicella, l’energia si dovrebbe conservare, ma in questo caso non è così per l’attrito.”*

Nel questionario è presente anche una domanda per indagare il concetto di modello in fisica e della sua utilità, si riportano le risposte più significative.

S9: *“Per modello si intende la **semplificazione** di un meccanismo complesso in modo da rappresentare le caratteristiche più importanti di quest’ultimo. Bisogna utilizzare modelli per descrivere i gas perché sono altrimenti difficili da visualizzare.”*

S12: *“Il modello di gas con le palline in movimento si riferisce a una **rappresentazione semplificata** del comportamento dei gas, in cui si considerano le palline come particelle puntiformi che si muovono liberamente e urtano tra di loro e con le pareti del contenitore. Questo modello è utile perché permette di descrivere e prevedere il comportamento dei gas in maniera **più semplice** rispetto alla realtà molecolare complessa.”*

S19: *“Un modello è uno **schema** per definire un fenomeno, è utilizzato per assegnare grandezze fisiche e studiare i fenomeni.”*

Dall'analisi delle risposte alle domande sulle definizioni di pressione e temperatura (vedi Fig.3.1 e Fig.3.2) risulta che qualche studente non padroneggia i concetti di pressione e temperatura, rispettivamente il 26,3% e il 21,1%, nonostante siano state introdotte sia in classe dalla professoressa sia nel filmato come due grandezze macroscopiche legate rispettivamente agli urti delle molecole con le pareti e all'energia cinetica media delle molecole.

La pressione P viene introdotta per considerare che cosa?

19 risposte

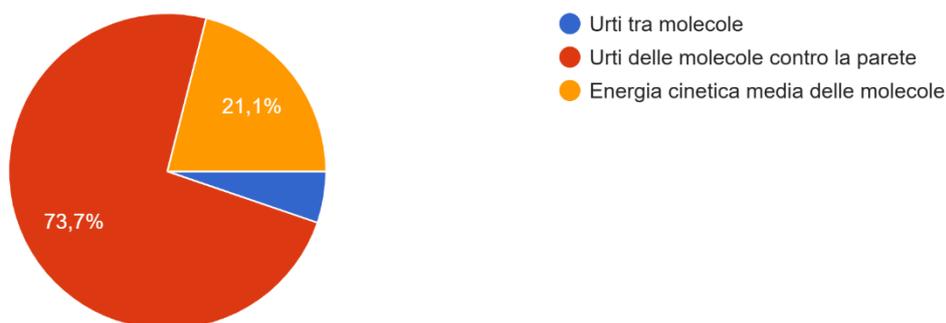


Figura 3.1: Grafico a torta delle risposte riguardo la domanda sulla definizione di pressione.

La temperatura T viene introdotta per considerare che cosa?

19 risposte

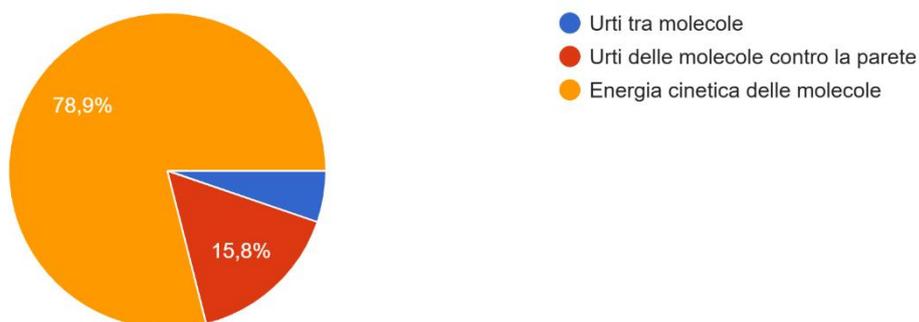


Figura 3.2: Grafico a torta delle risposte riguardo la domanda sulla definizione di temperatura.

Si è chiesto poi agli studenti di riflettere sull'esperimento con l'elio e con l'ossigeno, nello specifico come mai le pressioni dei due gas differiscono quando vengono immersi nell'azoto liquido e come mai in questo esperimento si possa affermare che la pressione è direttamente proporzionale alla temperatura. L'84,2% degli studenti riconosce che la differenza di pressione che i due gas hanno quando immersi nell'azoto liquido è dovuta al fatto che non siano abbastanza rarefatti per essere considerati gas perfetti, mentre il 15,8% sostiene che essendo gas diversi le loro pressioni variano in modo diverso. Questa percentuale di studenti non riconosce dunque l'indipendenza dalla sostanza della legge dei gas perfetti. Inoltre, solo il 42,1% ha capito che la proporzionalità diretta tra temperatura e pressione che compare nell'esperimento è dovuta al fatto che volume e numero di moli sono costanti, mentre il 57,9% afferma che ciò è sempre vero per la legge dei gas perfetti. Si riportano i grafici (Fig.3.3, Fig.3.4).

Come mai le pressioni dell'elio e dell'ossigeno differiscono quando vengono immersi nell'azoto liquido?

19 risposte

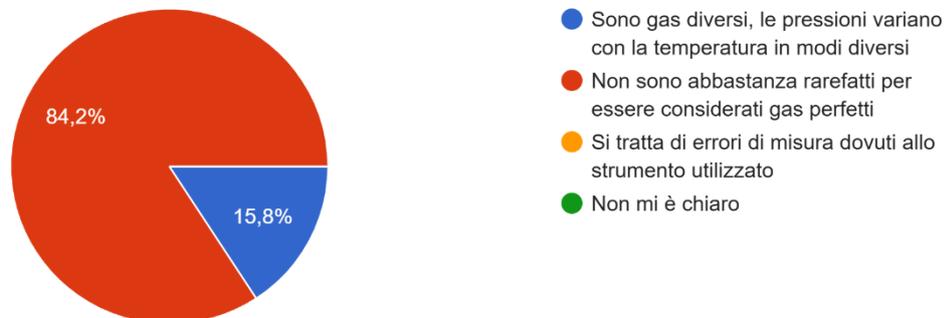


Figura 3.3: Grafico a torta delle risposte riguardo la domanda sulle pressioni dei due gas utilizzati nell'esperimento.

L'uomo, dopo aver eseguito l'esperimento con l'elio e l'ossigeno, afferma che la pressione è direttamente proporzionale alla temperatura. Perché può affermarlo?

19 risposte



Figura 3.4: Grafico a torta delle risposte riguardo la domanda sulla proporzionalità diretta di pressione e temperatura nell'esperimento

L'ultima domanda del questionario relativa ai contenuti riguarda la conduzione termica e su come essa avviene. Dall'analisi delle risposte risulta chiaro agli studenti, si riportano le risposte più significative degli studenti.

S19: "È un **processo** tramite il quale l'energia passa da un corpo più caldo a uno più freddo. Le molecole della sorgente di calore trasferiscono **energia termica disordinata** all'oggetto che si sta riscaldando, aumentandone l'energia delle molecole, e di conseguenza la temperatura."

S5: "La conduzione termica è la **trasmissione di calore** da una zona a temperatura maggiore a una zona a temperatura minore. Essa, quindi, avviene per contatto (di particelle, corpi...)"

Nella parte finale del questionario è stato chiesto agli studenti di valutare l'utilità del filmato nel suo complesso, quali aspetti sono risultati più chiari e quali più confusi. Per quanto riguarda l'utilità del filmato nel suo complesso, agli studenti è stato chiesto di esprimere un punteggio da 1 (inutile) a 6

(molto utile). In figura 3.5 è riportato l'istogramma con le votazioni degli studenti.

Hai trovato utile la visione del filmato? (poco utile 1, molto utile 6)

19 risposte

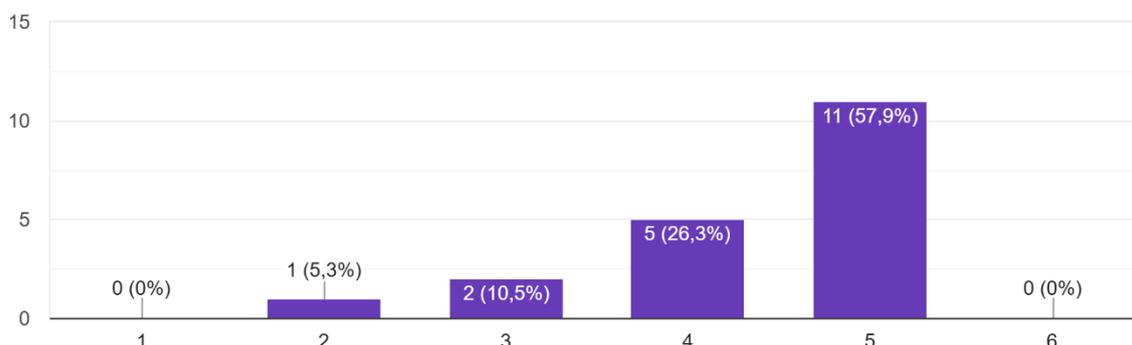


Figura 3.5: Istogramma delle risposte degli studenti riguardo la domanda sull'utilità del filmato.

Come si nota dalla figura 3.5, per gran parte degli studenti il filmato è risultato utile; infatti, 11 studenti su 19 lo considerano utile e 4 abbastanza utile. 3 studenti su 19, invece, si sono espressi negativamente.

In particolare, dalle domande aperte successive, rispettivamente sugli aspetti più chiari e più confusi, emerge che l'esperimento con l'ossigeno e con l'elio per alcuni è stato particolarmente utile mentre per altri non è risultato chiaro. Questo risultato è in accordo anche con le risposte a scelta multipla su questo esperimento riportate sopra (Fig.3.3 e Fig.3.4).

3.2. Risultati dei test e dell'attività

Si riportano di seguito i risultati ottenuti dal campione di studenti, 19 su 20, un ragazzo è stato assente durante l'intervento didattico. Per la visione completa dei test è necessario richiedere l'autorizzazione al costruttore su PhysPort. Nel presente capitolo si fa riferimento principalmente ad alcuni quesiti pubblici e particolarmente emblematici.

3.2.1. Confronto risultati del pre-test e del post-test

Le risposte corrette alle domande a scelta multipla del pre-test sono risultate il 59%. Nello specifico, le risposte corrette alle domande sulla legge dei gas perfetti sono il 57% mentre quelle sul primo principio della termodinamica il 61%.

Come atteso, i risultati sono molto diversificati: il voto minimo ottenuto da uno studente è 29% e il voto massimo è 79%. In figura (Fig.3.6) si rappresenta graficamente la situazione osservata; si distribuiscono le percentuali delle risposte corrette in 10 bin di larghezza 10% e si confronta l'istogramma così ottenuto con una gaussiana parametrizzata al valore medio e deviazione standard pari a $(59 \pm 13)\%$.

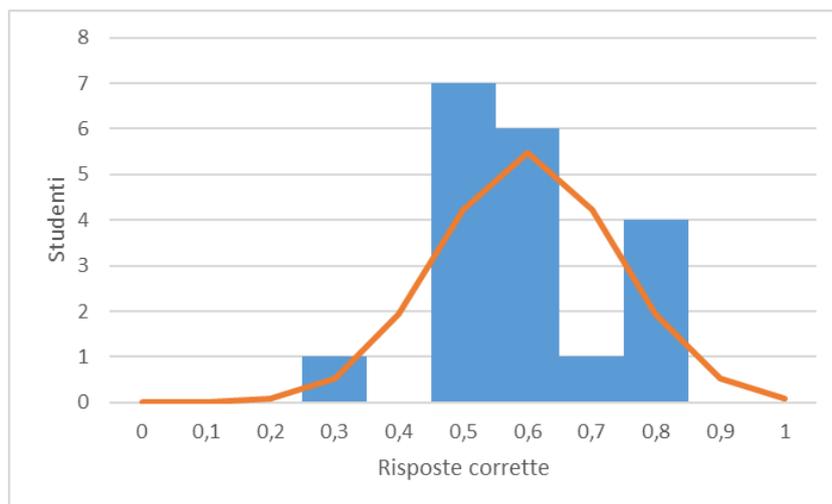


Figura 3.6: Distribuzione dei risultati nel pre-test degli studenti (istogramma blu) paragonata a una distribuzione gaussiana (funzione arancione).

Si riportano anche gli istogrammi delle parti separate sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica del pre-test, confrontati con una gaussiana parametrizzata al valore medio e deviazione standard rispettivamente pari a $(57 \pm 14)\%$ e $(61 \pm 17)\%$, vedi Fig.3.7.

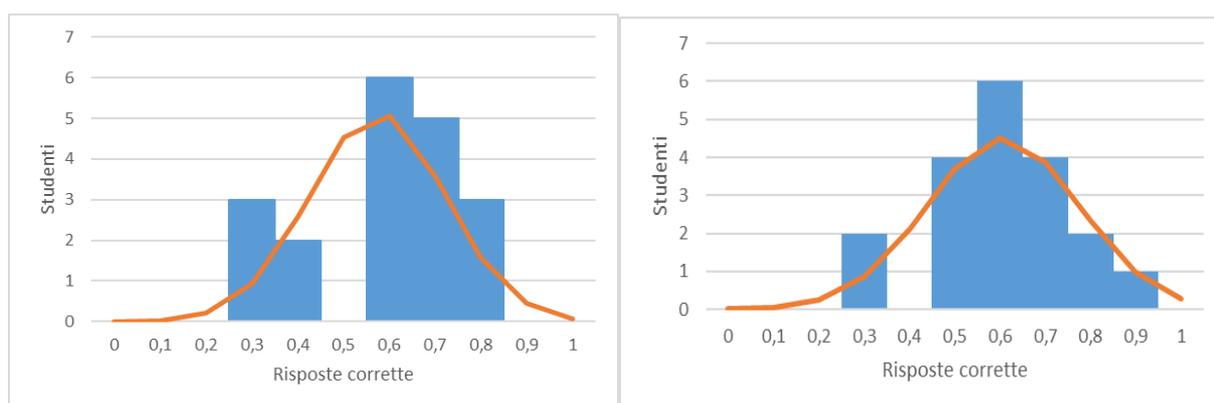


Figura 3.7: A sinistra distribuzione dei risultati sulla legge dei gas perfetti nel pre-test (istogramma blu) paragonata a una distribuzione gaussiana (funzione arancione). A destra sul primo principio della termodinamica.

Le risposte corrette alle domande a scelta multipla del post-test sono risultate invece il 69%. Nello specifico le risposte corrette alle domande sulla legge dei gas perfetti hanno ottenuto il 73% mentre quelle sul primo principio della termodinamica il 66%.

Anche nel post-test i risultati sono diversificati: il voto minimo è 39% e il voto massimo è 86%. In figura (Fig.2.8) si rappresenta graficamente la situazione osservata; si distribuiscono le percentuali delle risposte corrette in 10 bin di larghezza 10% e si confronta l'istogramma così ottenuto con una gaussiana parametrizzata al valore medio e deviazione standard pari a $(69 \pm 14)\%$.

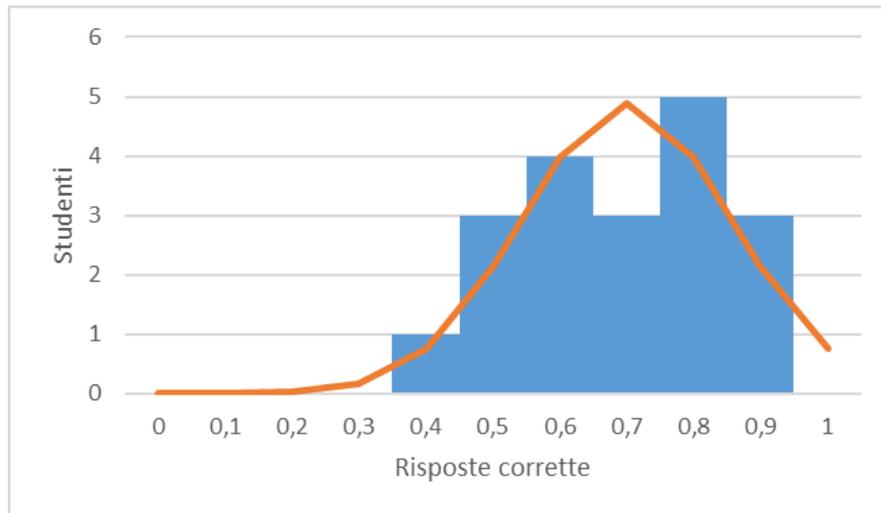


Figura 3.8: Distribuzione dei risultati nel post-test degli studenti (istogramma blu) paragonata a una distribuzione gaussiana (funzione arancione).

Si riportano anche i grafici delle parti separate sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica del post-test, confrontati con una gaussiana parametrizzata al valore medio e deviazione standard rispettivamente pari a $(73 \pm 17)\%$ e $(66 \pm 14)\%$, vedi Fig.3.9.

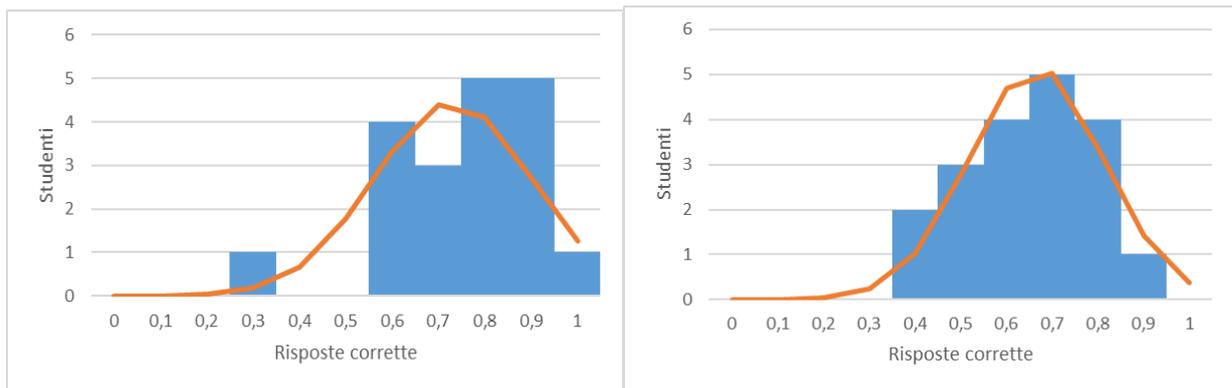


Figura 3.9: A sinistra distribuzione dei risultati sulla legge dei gas perfetti nel post-test (istogramma blu) paragonata a una distribuzione gaussiana (funzione arancione). A destra sul primo principio della termodinamica.

Si nota quindi una maggiore uniformità dei voti ottenuti nel post-test, con un innalzamento delle fasce intermedie e del voto medio.

Per descrivere l'andamento complessivo dei due test, in Fig.3.10 si riporta la frequenza delle risposte corrette per ogni domanda, mettendo a confronto i risultati ottenuti nel pre-test (in blu) e nel post-test (in rosso).

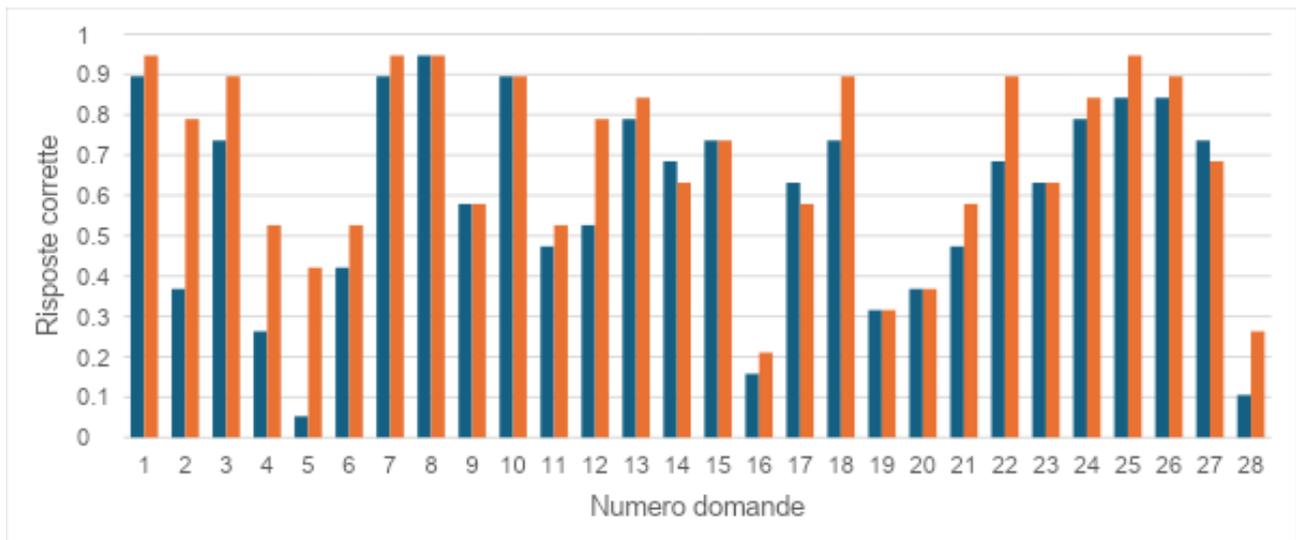


Figura 3.10: Istogramma che raffigura la percentuale di risposte corrette per ciascuna domanda. In blu sono riportati i valori del pre-test e in arancione quelli del post-test.

Come si nota dalla figura 4.10 nei quesiti 8, 9, 10, 15, 19, 20 e 23 la frequenza delle risposte corrette è la stessa nel pre e nel post-test. Nei quesiti 14, 17 e 27 si ha un peggioramento nel post-test mentre in tutte le altre domande si nota un miglioramento.

Per analizzare ora l'andamento specifico di ogni singolo studente si riportano di seguito due tabelle (Tab.3.1, Tab.3.2) che descrivono le risposte ad ogni domanda del pre-test, una per la parte dedicata alla legge dei gas perfetti e una per la seconda parte dedicata al primo principio della termodinamica. Ogni riga rappresenta il test svolto da uno studente, mentre ogni colonna una domanda.

Numero domanda	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S1	c	c	c	b	b	c	a	b	c
S2	a	b	a	b	b	a	a	b	a
S3	a	c	a	b	b	c	a	b	c
S4	a	a	c	b	b	c	a	b	c
S5	a	a	a	c	b	a	a	b	a
S6	a	c	a	c	b	a	a	b	a
S7	a	b	a	c	b	c	a	b	c
S8	a	a	a	b	b	b	b	b	b
S9	a	a	a	b	b	c	a	b	c
S10	a	c	b	b	c	a	a	b	a
S11	a	c	a	b	b	c	a	b	X
S12	a	c	a	c	a	c	a	b	c
S13	a	c	a	b	b	c	a	b	a
S14	a	a	a	b	b	a	a	b	a
S15	a	a	c	b	a	a	a	b	a
S16	a	a	a	c	b	a	a	b	a
S17	c	c	c	b	b	a	a	b	a
S18	a	b	a	b	b	a	a	b	a
S19	a	b	a	b	b	c	a	b	a
S20	a	b	a	c	b	c	c	c	a

Tabella 3.1: Prospetto delle scelte di ciascuno studente per ogni domanda della parte I del pre-test, in verde le risposte corrette.

Numero domanda	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
S1	b	b	a	b	c	c	c	e	d	a	c	d	a	a	c	a	c	b	a
S2	c	a	a	b	c	c	c	b	b	c	c	c	a	a	c	a	c	a	c
S3	b	b	c	b	c	c	c	f	b	b	b	c	a	b	c	a	c	a	c
S4	c	b	c	a	b	b	c	f	b	c	a	d	c	a	a	c	a	a	c
S5	b	a	a	a	b	a	a	f	b	a	c	d	c	a	b	a	c	c	a
S6	a	a	a	b	b	c	c	f	b	c	c	c	c	b	c	a	a	a	a
S7	b	c	b	b	c	b	c	e	b	c	b	c	b	c	c	c	c	c	b
S8	b	X	b	b	b	b	c	f	b	c	c	d	a	a	c	a	c	a	a
S9	b	a	a	a	c	c	c	f	b	b	b	c	a	a	c	a	c	a	a
S10	b	a	c	a	e	c	b	g	b	a	a	d	c	X	X	a	b	a	c
S11	b	a	a	b	c	c	a	e	c	c	b	b	b	b	c	a	c	b	a
S12	b	c	b	b	c	c	c	g	X	c	b	d	a	a	a	a	c	a	a
S13	b	c	c	b	b	c	c	f	b	c	a	c	a	b	c	c	a	a	a
S14	b	c	a	b	c	c	c	f	b	c	c	d	a	a	c	a	c	a	a
S15	b	c	a	b	c	c	a	f	b	c	c	d	a	a	c	a	c	a	a
S16	b	c	a	b	c	c	c	f	b	c	c	X	a	a	c	a	c	a	a
S17	b	c	a	b	c	c	b	f	b	b	b	d	a	a	c	a	c	a	a
S18	b	c	a	b	c	c	c	c	b	b	c	c	a	b	c	a	c	a	b
S19	b	c	b	b	b	c	c	f	d	b	a	c	a	a	c	a	c	a	c
S20	b	a	b	b	c	b	c	f	c	b	b	c	b	b	c	a	c	b	a

Tabella 3.2: Prospetto delle scelte di ciascuno studente per ogni domanda della parte II del pre-test, in verde le risposte corrette.

Analogamente vengono riportate altre due tabelle (*Tab.3.3, Tab.3.4*) con i risultati del post-test, divise in prima parte e seconda parte.

Numero domanda	1	2	3	4	5	6	7	8	9
S1	a	a	a	b	b	a	a	b	a
S2	a	c	a	b	b	a	a	b	a
S3	a	c	a	c	c	a	a	b	c
S4	a	c	a	b	b	c	a	b	c
S5	a	a	a	c	b	c	a	b	a
S6									
S7	a	c	a	c	c	c	a	b	c
S8	a	c	a	b	b	c	a	b	c
S9	a	c	a	c	c	c	a	b	a
S10	a	a	c	b	b	a	c	b	c
S11	a	c	a	b	b	c	a	b	c
S12	a	c	a	c	c	c	a	b	c
S13	a	c	a	c	c	c	a	b	c
S14	a	c	a	c	c	a	a	b	a
S15	a	c	a	c	c	a	a	c	a
S16	a	c	a	a	c	a	a	b	a
S17	c	c	c	b	b	a	a	b	a
S18	a	c	a	c	b	a	a	b	a
S19	a	b	a	b	b	a	a	b	a
S20	a	c	a	c	a	c	a	b	a

Tabella 3.3: Prospetto delle scelte di ciascuno studente per ogni domanda della parte I del post-test, in verde le risposte corrette.

Numero domanda	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
S1	b	a	a	b	c	a	c	e	c	a	c	b	a	a	c	a	c	a	a
S2	b	c	a	b	c	c	c	e	b	c	c	d	a	a	c	a	c	a	a
S3	b	b	c	b	c	c	a	f	b	b	b	c	a	a	c	a	c	a	a
S4	c	c	a	b	a	b	c	g	b	c	b	d	c	c	c	c	a	a	a
S5	b	c	a	a	a	a	c	e	b	c	c	d	a	X	c	a	c	c	b
S6																			
S7	a	c	c	b	c	a	c	f	b	c	a	d	a	b	c	a	c	b	b
S8	b	a	b	a	b	c	c	f	b	c	c	d	a	a	c	a	c	b	a
S9	b	c	a	b	c	c	c	f	b	b	b	c	a	a	c	a	c	a	a
S10	b	a	a	b	b	c	b	X	b	a	X	d	b	c	a	a	c	X	c
S11	b	c	a	b	c	c	c	e	c	b	b	c	a	b	c	a	c	b	a
S12	b	c	a	b	c	c	c	g	b	c	c	d	a	b	c	a	c	b	a
S13	b	X	a	b	c	c	c	f	b	a	a	d	a	c	c	a	c	a	c
S14	b	c	a	b	c	c	c	f	b	c	c	c	a	a	c	a	c	a	a
S15	b	b	a	b	c	c	a	f	b	b	b	c	a	a	c	a	c	a	a
S16	b	c	a	b	b	c	c	f	b	a	c	d	a	a	a	a	c	a	b
S17	b	c	a	b	c	c	a	f	b	b	b	c	a	a	c	a	c	a	a
S18	b	c	a	b	b	c	c	f	b	b	b	c	a	a	c	a	c	a	b
S19	b	b	a	a	b	a	a	f	b	c	a	d	a	a	a	a	a	a	a
S20	b	b	a	b	c	c	c	e	b	c	a	d	a	a	c	a	c	a	b

Tabella 3.4: Prospetto delle scelte di ciascuno studente per ogni domanda della parte II del post-test, in verde le risposte corrette.

Nella seguente tabella (Tab.3.5) vengono messe a confronto le percentuali delle risposte corrette di ogni singolo studente ottenute nel pre-test e nel post-test.

Studente	Pre-test	Post-test	Delta
S1	50%	54%	4%
S2	61%	71%	10%
S3	64%	82%	18%
S4	29%	46%	17%
S5	57%	57%	0%
S6	54%		
S7	50%	64%	14%
S8	50%	54%	4%
S9	64%	86%	22%
S10	46%	39%	-7%
S11	54%	61%	5%
S12	64%	68%	4%
S13	54%	71%	17%
S14	75%	82%	7%
S15	75%	86%	11%
S16	75%	79%	4%
S17	79%	79%	0%
S18	71%	86%	15%
S19	61%	57%	-4%
S20	46%	75%	29%

Tabella 3.5: Confronto dei risultati dei due test per ciascuno studente.

Dai dati forniti in Tab.3.5 si nota una maggior uniformità dei risultati nel post-test rispetto al pre-test. Inoltre, nonostante S5, S17 siano rimasti invariati e S10 e S19 siano leggermente peggiorati, per la maggior parte degli studenti è evidente un miglioramento. In particolare:

- 5 studenti mostrano un incremento delle risposte corrette inferiore al 5%
- 2 studenti mostrano un incremento delle risposte corrette tra il 5% e il 10%
- 3 studenti mostrano un incremento delle risposte corrette tra il 10% e il 15%
- 3 studenti mostrano un incremento delle risposte corrette tra il 15% e il 20%
- 2 studenti mostrano un incremento delle risposte corrette superiore al 20%

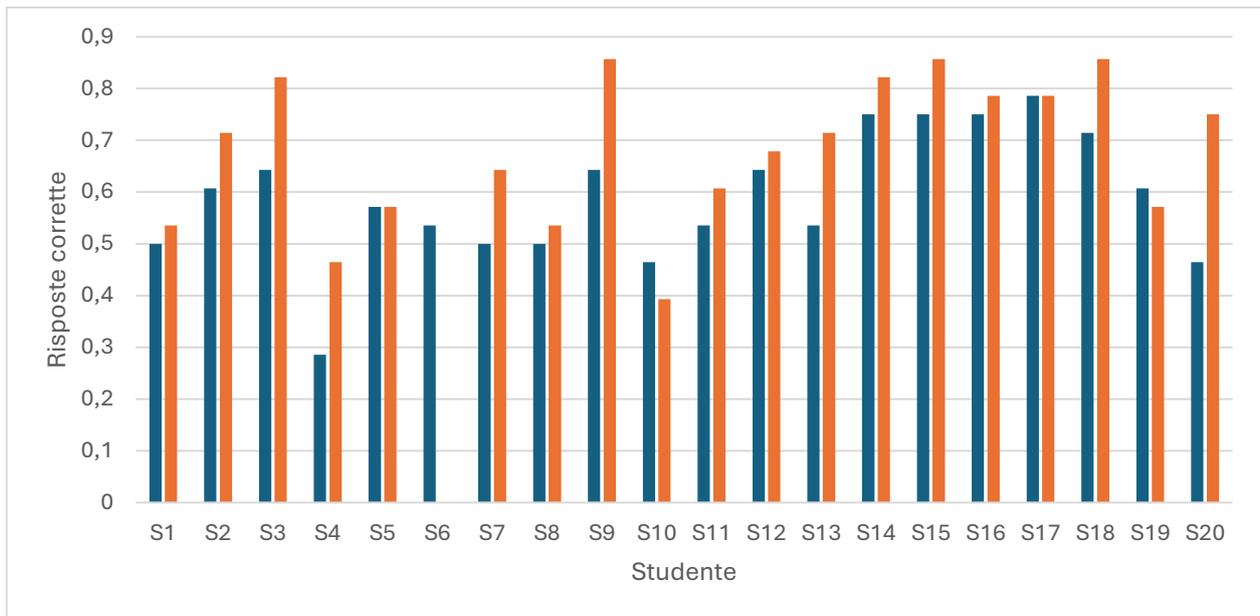


Figura 3.11: Istogramma che raffigura la percentuale di risposte corrette per ciascuno studente. In blu sono riportati i valori del pre-test e in arancione quelli del post-test.

Si analizzano ora nello specifico le difficoltà riscontrate dagli studenti nello svolgimento di questi test.

3.2.2. Definizione di calore

Nel pre-test è stata inserita una prima domanda aperta per indagare come gli studenti descrivono il concetto di calore. In particolare, è stato chiesto: “Come definiresti il calore a parole tue?”.

Dall’analisi delle risposte aperte, si sono ritrovate le stesse definizioni individuate da Brookes ed Etkina (2015), ovvero la definizione calorica, la definizione operativa e la definizione di processo.

Dall’analisi è emersa una nuova definizione che utilizza il primo principio della termodinamica. Nel grafico sottostante vengono analizzate le frequenze di queste definizioni (Fig.3.12).



Figura 3.12: Grafico a barre con il numero delle risposte degli studenti sulla definizione di calore.

Come si può notare dal grafico in figura 3.12, gran parte degli studenti (9 su 19) fornisce una definizione operativa di calore. Seguendo quanto riportato da Etkina e Brookes (2015), nella definizione operativa il calore è descritto come energia in transito.

Per esempio:

S2: “Il calore Q è la quantità di energia che un corpo **acquista o perde** in una determinata trasformazione termodinamica o processo fisico. L'unità di misura del SI è J.”

S3: “Il calore è una forma di energia termica **scambiata spontaneamente e naturalmente** tra un corpo più caldo a uno più freddo.”

S11: “Il calore è la quantità di energia termica **ceduta o acquisita** da un corpo all'ambiente o a un altro corpo.”

S16: “Il calore è l'energia termica contenuta in un corpo che può essere **ceduta o assorbita** in base alla differenza di calore tra due corpi.”

7 studenti su 19 danno una definizione calorica. Seguendo quanto riportato da Etkina e Brookes (2015), nella definizione calorica il calore è descritto come un ente a sé stante oppure come una forma di energia, senza citare in nessuno modo un processo o un trasferimento. Spesso questi studenti creano un legame molto stretto tra calore ed energia termica, data dalla temperatura. Alcune delle risposte più significative sono riportate di seguito

S1: “Il calore è un **tipo di energia** che provoca un cambiamento di temperatura in un oggetto/ente”

S6: “Il calore è una **forma di energia**, quindi la capacità di un corpo di compiere un lavoro.”

S8: “Il calore è la **quantità di energia termica** delle particelle che compongono il sistema.”

S14: “Il calore è **l'energia cinetica traslazionale** media dovuta al movimento caotico delle particelle.”

S18: “Il calore è una **forma di energia assimilabile all'energia termica**, a livello macroscopico il suo valore influenza la **temperatura** di un corpo, a livello microscopico influenza invece **l'energia cinetica delle particelle**, in ambedue i casi con proporzionalità diretta.”

Seguendo Etkina e Brookes (2015), la definizione di calore come un processo è una definizione che non fa riferimento al calore come forma di energia, ma come un trasferimento di energia. Si è trovata una sola risposta:

S8: “Il calore consiste in un **flusso** attraverso cui è possibile **scambiare energia termica**.”

Due studenti su 19 hanno fornito una definizione di calore che utilizza proprio il primo principio della termodinamica:

S4: “Il calore è un tipo di energia termica che si può ottenere **sommando la variazione di energia interna e il lavoro**.”

S9: “Il calore è l'energia termica di un sistema definita come la **somma algebrica fra la variazione di energia interna di un sistema e il lavoro compiuto da esso**.”

3.2.3. Difficoltà con la legge dei gas perfetti

Confrontando i risultati del pre e del post-test sulla prima parte riguardante la legge dei gas perfetti, si nota un miglioramento netto grazie allo svolgimento dell'attività. Contando le risposte corrette totali di tutti gli studenti si passa da una percentuale del 57% nel pre-test a una percentuale di 73% nel post-test. In seguito, si presentano le principali difficoltà incontrate dagli studenti, messe in evidenza anche da altri studi come, per esempio, quello di Kautz e colleghi (2002).

Pressione direttamente proporzionale alla temperatura

La letteratura riporta che una delle difficoltà maggiori incontrate dagli studenti è la tendenza a considerare una proporzionalità diretta tra temperatura e pressione. Questa visione è stata indagata attraverso il primo quesito, costituito da tre domande, riportato in figura (Fig.3.13).

Usa le seguenti informazioni per risolvere i quesiti 1-3.

Una siringa che contiene un gas ideale e ha un pistone di massa M senza attrito viene spostata da un contenitore con acqua fredda a un contenitore con acqua calda. Rispondi alle seguenti domande considerando che la siringa raggiunge l'equilibrio termico con l'acqua calda.

1. Come cambia la temperatura del gas?
 - a) Aumenta
 - b) Diminuisce
 - c) Non cambia
2. Come cambia la pressione del gas?
 - a) Aumenta
 - b) Diminuisce
 - c) Non cambia
3. Come cambia il volume del gas?
 - a) Aumenta
 - b) Diminuisce
 - c) Non cambia

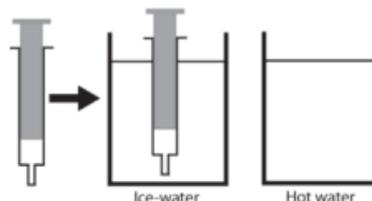


Figura 3.13: Primo problema proposto nei test riguardo la concezione di proporzionalità diretta tra pressione e temperatura.

Il processo descritto nel quesito è un processo isobaro: una siringa contenente un certo quantitativo di gas ideale, con un pistone libero di muoversi senza attrito, viene spostata da un contenitore con acqua fredda a un contenitore con acqua calda. Viene chiesto allo studente come variano temperatura, pressione e volume. La maggior parte degli studenti non ha difficoltà nel capire che la temperatura e il volume aumentano, ma non riescono a comprendere che la pressione rimane costante. Vi è infatti l'idea fondata che per la legge dei gas perfetti, la pressione è direttamente proporzionale alla temperatura, di conseguenza visto che la temperatura aumenta deve aumentare anche la pressione. È una concezione molto diffusa tra gli studenti che, anche se la legge dei gas perfetti è un'equazione a più variabili, tendono a considerare solo le due variabili di loro interesse, andando a ignorare l'andamento delle altre arrivando così a una conclusione errata. L'attività proposta è riuscita a migliorare nettamente questa visione. Infatti, la percentuale di studenti che riconosce che la pressione rimane effettivamente costante passa dal 37% nel pre-test al 79% nel post-test. In tabella (Tab.3.6) si riportano le percentuali delle risposte degli studenti. Vengono evidenziate di verde le risposte corrette e in rosso ci sono quelle scelte dalla maggior parte degli studenti.

	A		B		C		Omesse	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
1	0,89	0,95	0	0	0,11	0,05	0	0
2	0,45	0,16	0,18	0,05	0,37	0,79	0	0
3	0,74	0,89	0,05	0	0,21	0,11	0	0

Tabella 3.6: Percentuali delle risposte degli studenti ai primi tre quesiti dei test, in verde le risposte corrette, in rosso quelle più frequenti.

Equilibrio meccanico

In letteratura vengono riportate diverse difficoltà che gli studenti incontrano nell'apprendimento dell'equilibrio meccanico. Nel pre e post-test queste difficoltà sono state indagate nei quesiti 4 e 5, riportati in figura 3.14.

Usa le seguenti informazioni per risolvere i quesiti 4-5.

Tre cilindri identici sono riempiti con quantità sconosciute di gas ideale. I cilindri sono chiusi con pistoni identici di massa M senza attrito. I contenitori A e B sono in equilibrio termico con la stanza a 20°C e il contenitore C viene mantenuto a una temperatura di 80°C . Il pistone di ciascun cilindro è in equilibrio meccanico con l'ambiente.

4. La pressione dell'azoto nel cilindro A com'è rispetto a quella dell'idrogeno nel cilindro B?
- a) Maggiore
 - b) Minore
 - c) Uguale
5. La pressione dell'idrogeno nel cilindro B com'è rispetto a quella dell'idrogeno nel cilindro C?
- a) Maggiore
 - b) Minore
 - c) Uguale

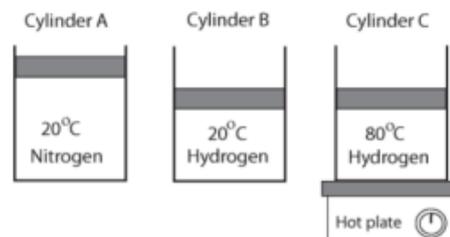


Figura 3.14: Secondo problema proposto nei test riguardo la concezione di equilibrio meccanico.

Nelle domande 4 e 5 si hanno tre contenitori cilindrici identici, A, B e C, con tre pistoni identici in equilibrio meccanico. Nei contenitori ci sono quantità sconosciute di gas ideale, in A è presente azoto e in B e C idrogeno. A e B sono in equilibrio termico con l'ambiente a 20°C mentre C è mantenuto a una temperatura costante di 80°C . Viene chiesto agli studenti nella domanda 4 di paragonare la pressione di A e B, e nella domanda 5 di confrontare la pressione di B e C. La maggior parte degli studenti nel pre-test ha risposto in maniera scorretta a entrambe le domande, sostenendo che la pressione in B è maggiore di quella in A e che la pressione in C è maggiore della pressione in B. Gli studenti non hanno infatti applicato il concetto di equilibrio meccanico, evidenziando come in tutti e tre i casi le forze in gioco sono le stesse e di conseguenza la pressione deve essere uguale in tutti e tre i cilindri. Per confrontare la pressione in A e B si sono fatti influenzare dalla figura, in cui viene mostrata una altezza del pistone più elevata in A rispetto all'altezza in B. Hanno così dedotto che il volume è maggiore in A e di conseguenza la sua pressione deve essere minore rispetto a quella di B, applicando la legge dei gas perfetti e non notando l'assenza di informazioni sul numero di moli.

Per il secondo quesito si è riscontrata la stessa difficoltà del problema precedente, ovvero la concezione di proporzionalità diretta tra pressione e temperatura. L'attività proposta in classe sulla legge dei gas perfetti ha permesso agli studenti di riflettere sul concetto di equilibrio meccanico e sulla definizione di pressione come forza applicata su una determinata area. Durante lo svolgimento di questa parte del tutorial più ragazzi sono rimasti sorpresi di poter ragionare sul concetto di pressione in termodinamica utilizzando le forze, ammettendo di non averci mai pensato prima. Si nota un miglioramento in seguito all'attività: le risposte corrette alla domanda 4 e alla domanda 5 passano rispettivamente dal 26% e dal 5% nel pre-test al 52% e al 42% nel post-test. Nonostante il miglioramento, una parte cospicua di studenti fa ancora fatica a ragionare in termini di equilibrio meccanico per la pressione e a riuscire a eliminare questa concezione forte di proporzionalità diretta tra pressione e temperatura. In tabella (Tab.3.7) si riportano le percentuali delle risposte degli studenti, confrontando pre-test e post-test. Vengono evidenziate di verde le risposte corrette e in rosso ci sono quelle scelte dalla maggior parte degli studenti.

	A		B		C		Omesse	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
4	0	0,05	0,74	0,42	0,26	0,53	0	0
5	0,11	0,05	0,84	0,53	0,05	0,42	0	0

Tabella 3.7: Percentuali delle risposte degli studenti ai quesiti 4 e 5 dei test, in verde le risposte corrette, in rosso quelle più frequenti.

Relazione temperatura e calore

Un'altra difficoltà, riportata in letteratura, che viene spesso incontrata dagli studenti è la forte correlazione tra temperatura e calore. Nel pre e post test, sono dedicate a questa correlazione le domande 6,7 e 8. In queste viene descritto un processo adiabatico, in cui non vi è trasferimento di calore, ma su cui viene svolto un lavoro. Si tratta di un cilindro circondato da uno strato isolante e dotato di un pistone libero di muoversi, su cui vengono appoggiati dei pesetti. Viene chiesto agli studenti come variano temperatura, pressione e volume. La maggior parte degli studenti in entrambi i test non ha mostrato difficoltà nel capire che la pressione aumenta e il volume diminuisce. Invece nel pre-test il 53% degli studenti afferma che la temperatura rimane costante, essendo infatti presente uno strato isolante non vi possono essere dei trasferimenti di calore e di conseguenza la temperatura non può cambiare. Questi studenti non considerano il fatto che il lavoro che i pesetti svolgono sul gas possa cambiare la temperatura del gas. In seguito all'attività, nel post-test la maggior parte degli studenti, il 53%, riconosce che il lavoro esercitato dai pesetti porta a una variazione di temperatura, anche se rimane sempre presente una grande percentuale, il 47%, che continua ad affermare che la temperatura non varia. Questa difficoltà è riconducibile alla teoria del flusso calorico, che concepisce il calore come una quantità contenuta in un oggetto che ne influenza la temperatura oppure anche alla definizione del calore nella calorimetria $Q = mc\Delta T$, in entrambi i casi gli studenti legano i concetti di calore e di temperatura così strettamente che non tengono conto del lavoro e dei suoi effetti sulla temperatura di un gas.

3.2.4. Difficoltà con il primo principio della termodinamica

Confrontando i risultati del pre e del post-test sulla parte riguardante il primo principio della termodinamica, si nota un miglioramento grazie allo svolgimento dell'attività. Contando le risposte corrette totali si passa da una percentuale del 61% nel pre-test a una percentuale di 66% nel post-test. Il miglioramento inferiore rispetto alla parte dedicata alla legge dei gas perfetti potrebbe essere dovuto al fatto che solo tre dei cinque gruppi sono riusciti effettivamente a completare l'attività proposta sul primo principio, mentre tutti i gruppi sono riusciti a completare quella sui gas perfetti. Le principali difficoltà riscontrate e riportate di seguito sono state messe in evidenza anche da altri studi come, per esempio, quello di Loverude e colleghi (2002) e di Meltzer (2004).

Processi adiabatici

In letteratura vengono riportate diverse difficoltà che gli studenti incontrano nell'apprendimento dei processi adiabatici. Nel pre e post-test queste difficoltà sono state indagate nei quesiti 9,10,11 e 12, riportati in figura 3.15.

Usa le seguenti informazioni per risolvere i quesiti 9-12.

Una pompa cilindrica contiene una mole di gas ideale. Il pistone non permette la fuoriuscita del gas e l'attrito tra il pistone e le pareti del cilindro è trascurabile. Il pistone viene premuto velocemente verso l'interno, il volume così si riduce istantaneamente.

9. Come cambia la temperatura del gas?
 - a) Aumenta
 - b) Diminuisce
 - c) Non cambia
10. Come cambia il lavoro fatto dal sistema (gas)?
 - a) Aumenta
 - b) Diminuisce
 - c) Non cambia
11. Come cambia il calore trasferito nel sistema (gas)?
 - a) Aumenta
 - b) Diminuisce
 - c) Non cambia
12. Come cambia l'energia interna del gas?
 - a) Aumenta
 - b) Diminuisce
 - c) Non cambia



Figura 3.15: Quarto problema proposto nei test riguardo i processi adiabatici.

Per risolvere le domande 9,10,11 e 12 gli studenti devono applicare il primo principio della termodinamica nel caso di una compressione adiabatica. La situazione descritta nei quesiti è la seguente: si considera un cilindro con un pistone senza attrito che viene premuto velocemente verso l'interno, comprimendo il gas. L'informazione sul tipo di trasformazione, adiabatica ovvero senza trasferimenti di calore, si ricava dal fatto che la compressione è molto rapida. Qualche studente, sia durante il pre-test sia durante il post-test non era sicuro si trattasse di una compressione adiabatica, mi è stato chiesto più volte se si dovessero trattare le pareti come adiabatiche o se fosse presente o meno trasferimento di calore. Nei quattro quesiti viene chiesto agli studenti come variano la temperatura, il lavoro fatto dal gas, il calore trasferito al gas e l'energia interna. La maggior parte degli studenti ha risposto correttamente a tutte e quattro le domande, sia nel pre-test sia nel post-test, riconoscendo che la temperatura aumenta, il lavoro fatto dal gas diminuisce, il calore trasferito al gas è nullo e che l'energia interna aumenta. Le maggiori difficoltà degli studenti si riscontrano sulla domanda relativa al calore; infatti, il 32% degli studenti non riconosce che il calore trasferito al gas durante la compressione non cambia e dunque non riconosce la trasformazione come adiabatica. Altri invece, il 32%, riconoscendo l'assenza di trasferimento di calore hanno risposto che anche la temperatura non cambia, ritrovando le difficoltà legate alla forte correlazione tra temperatura e calore. In tabella (Tab.3.8) si riportano le percentuali delle risposte degli studenti, confrontando pre-test e post-test. Vengono evidenziate di verde le risposte corrette e in rosso ci sono quelle scelte dalla maggior parte degli studenti.

	A		B		C		Omessa	
	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post	Pre	Post
9	0,58	0,58	0,37	0	0,32	0,42	0,05	0
10	0	0	0,89	0,89	0,11	0,11	0	0
11	0,32	0,21	0,16	0,21	0,47	0,53	0,05	0,05
12	0,53	0,79	0,26	0,05	0,21	0,16	0	0

Tabella 3.8: Percentuali delle risposte degli studenti ai quesiti 9,10,11 e 12 dei test, in verde le risposte corrette, in rosso quelle più frequenti.

Processi isotermi

Nei quesiti 15 e 16 viene chiesto agli studenti di ragionare su una trasformazione isoterma applicando il primo principio della termodinamica. Si tratta di un cilindro, circondato da un contenitore di acqua, chiuso da un pistone libero di muoversi, su cui vengono inseriti dei pesetti. Mentre il pistone scende lentamente la temperatura del gas rimane costante. La maggior parte dei ragazzi, il 74%, sia nel pre-test sia nel post-test riconosce che l'energia interna del gas in questi tipi di processi non varia, essendo direttamente proporzionale alla temperatura. Il 16% degli studenti riconosce la presenza di trasferimento di calore; si tratta infatti di una concezione molto comune quella di pensare che nei processi a temperatura costante non vi siano trasferimenti di calore, difficoltà legata sempre alla forte correlazione tra temperatura e calore. Anche nel post-test, nonostante si riscontri un piccolo miglioramento, solo il 21% riconosce la presenza di trasferimento di calore. Dunque, sia la didattica tradizionale sia l'attività dei tutorial non sono riuscite ad intaccare questa visione, per i processi isotermi gli studenti non utilizzano il primo principio della termodinamica, fallendo nel riconoscere che il lavoro esercitato sul sistema può produrre un trasferimento di calore anche se la temperatura è costante.

Processi isocori

Nella domanda 17 viene chiesto agli studenti come varia l'energia cinetica totale delle particelle in una trasformazione isocora. La situazione presentata nel problema è quella dei quesiti 15 e 16 per i processi isotermi, ma in questo caso il pistone è bloccato e il gas viene lasciato a riposo per molte ore raggiungendo l'equilibrio termico con l'acqua che lo circonda. La maggior parte degli studenti, nel pre-test con il 63% e nel post-test con il 58%, è stata in grado di riconoscere l'assenza di lavoro nei processi a volume costante, e di intuire quindi che, se il gas cede una certa quantità di calore all'acqua la sua energia cinetica media diminuisce della stessa quantità.

Processi ciclici

La parte finale del questionario è dedicata ai processi ciclici, in particolare i quesiti fanno riflettere su come varia il calore, il lavoro e l'energia interna in questi tipi di trasformazioni. Studi mostrano che gli studenti hanno diverse difficoltà a riguardo, in particolare tendono a percepire il calore e il lavoro come delle funzioni di stato indipendenti dal processo oppure nella scelta dei segni. Nei quesiti 19 e 20 viene rispettivamente chiesto agli studenti quanto valgono il lavoro compiuto dal gas e il trasferimento di calore al gas, nel processo ciclico descritto. Sia nel pre-test sia nel post-test solo il 32% e il 37% hanno risposto correttamente alle domande sul lavoro e sul calore, riconoscendo che il lavoro compiuto dal gas e il calore trasferito dal gas hanno segno negativo. Il 53% sia nel pre-test sia nel post-test ha risposto che il lavoro netto esercitato dal gas è positivo mentre il 15% nullo. Il 37% vede il trasferimento di calore come una quantità positiva e il 26% come nullo. Le risposte degli studenti che hanno scelto il lavoro e/o il calore come nulli in un processo ciclico, sono riconducibili all'idea di lavoro e calore come funzioni di stato, confondendosi con l'energia interna. Questa difficoltà è stata espressa esplicitamente anche durante il pre-test, in cui uno studente ha chiesto *“Ma il calore è una funzione di stato, giusto?” (S1)*.

Per quanto riguarda il lavoro, l'associare al lavoro un segno positivo è legato alla difficoltà degli studenti di ragionare sul segno del lavoro, presente anche in meccanica. Durante l'attività, si è svolta una parte dedicata al concetto di lavoro prima in meccanica e poi in termodinamica. La situazione descritta nel quesito dell'attività è quella di un blocco posto su un piano inclinato e spinto verso l'alto da una mano. Viene chiesto agli studenti di riflettere sui segni del lavoro compiuto dalle singole forze. La principale difficoltà incontrata durante lo svolgimento dell'attività riguarda il lavoro compiuto dal blocco sulla mano. Molti studenti non avevano chiaro che il blocco esercitava una forza uguale e opposta sulla mano, rispetto alla forza che la mano esercitava sul blocco. Qualche studente ha pensato che il lavoro fatto dal blocco sulla mano fosse quello fatto dalla componente parallela del peso. Un'altra difficoltà emersa durante l'attività è il lavoro compiuto dal piano inclinato sul blocco. Qualche studente ha

risposto che il lavoro è nullo, non perché la forza vincolare e lo spostamento sono perpendicolari, ma perché la forza vincolare è bilanciata dalla forza peso perpendicolare e quindi non compie lavoro.

Invece la percentuale di studenti che ha risposto che il calore trasferito dal gas è positivo, probabilmente si è fatta influenzare dal trasferimento di calore positivo nella prima fase del ciclo, ignorando le fasi successive.

Diagrammi P-V

Nei test sono presenti quesiti che richiedono l'analisi o la realizzazione di diagrammi P-V. La professoressa in classe ha posto molta attenzione sull'analisi di grafici sia durante le spiegazioni di teoria sia durante la correzione di esercizi. Infatti, già nel pre-test gli studenti hanno risposto correttamente a queste domande. In particolare, gli studenti sono andati meglio nei quesiti di processi ciclici in cui erano presenti i diagrammi P-V (22, 23, 24, 25, 26, 27 e 28) rispetto a quelli con solo la descrizione testuale (19 e 20). In questi quesiti gli studenti vengono fatti ragionare sul come estrapolare informazioni sul lavoro dai grafici PV e molti studenti hanno riconosciuto il lavoro come l'area sottesa di un grafico.

Nei quesiti 22, 23 e 24 viene fornito un grafico di un ciclo e viene chiesto agli studenti il valore del lavoro compiuto dal gas, del trasferimento di calore fatto dal gas e dell'energia interna del gas. A queste domande la maggior parte degli studenti ha risposto correttamente già nel pre-test, rispettivamente il 68% ha riconosciuto il lavoro come positivo e il 63% il calore come positivo, passando nel post-test rispettivamente al 90% e al 63%. Inoltre, ben il 79% nel pre-test e l'84% nel post-test ha riconosciuto la variazione di energia interna come nulla.

Nei quesiti 25, 26 e 27 viene fornito un diagramma P-V con due processi diversi, di cui sono noti lo stesso stato iniziale e finale, e viene chiesto agli studenti di confrontare il lavoro compiuto dai due sistemi, le variazioni di energia e i due trasferimenti di calore. La maggior parte degli studenti non ha riscontrato difficoltà. Infatti, alla domanda 25 sul lavoro l'84% ha risposto correttamente nel pre-test e il 95% nel post-test, alla domanda 26 sulla variazione di energia interna prima l'84% e poi l'89% e alla domanda 27 sul calore si è passati dal 74% al 68% delle risposte corrette.

Infine, l'ultimo quesito, il 28, in cui viene fornito un diagramma P-V con due processi diversi di cui sono noti lo stesso stato iniziale e finale, è risultato il più complicato per gli studenti. Infatti, solo l'11% nel pre-test e il 26% nel post test ha risposto correttamente. Risulta così che molti studenti hanno difficoltà nel riconoscere il lavoro fatto dal sistema come l'area sottesa e l'importanza del verso di percorrenza del processo per determinare il segno del lavoro.

3.3. Riflessione sul manuale di fisica

Il libro di testo a disposizione degli studenti è l'Amaldi "Il Nuovo Amaldi per i Licei Scientifici. Blu" Ed Zanichelli, Vol. 1. I vari manuali di fisica odierni utilizzano approcci diversi, cercando di intrecciare un punto di vista macroscopico alla termodinamica con un punto di vista microscopico. Il libro in questione è composto da 11 capitoli, di cui il 9, 10 e 11 sono dedicati alla termodinamica. Nella tabella che segue si riassumono gli argomenti trattati in questi ultimi capitoli (Tab.3.9).

Capitolo	Titolo	Argomenti
9	La temperatura e i gas	Temperatura, pressione e volume di un gas, misura della quantità di sostanza, gas perfetto, modello microscopico della materia, pressione e temperatura dal punto di vista microscopico, gas reali.
10	Il calore e il primo principio della termodinamica	Calore e cambiamenti di stato, evaporazione, equilibrio liquido-vapore, propagazione del calore, energia interna, trasformazioni termodinamiche, lavoro termodinamico, primo principio della termodinamica, calori specifici di un gas perfetto, trasformazioni adiabatiche.
11	Il secondo principio	Macchine termiche, secondo principio dal punto di vista macroscopico, macchine termiche reversibili e rendimento massimo, ciclo di Carnot, altri cicli termodinamici, entropia, conservazione e non conservazione dell'entropia, interpretazione microscopica del secondo principio della termodinamica.

Tabella 3.9: Elenco dei capitoli riguardanti la termodinamica del manuale di fisica in dotazione agli studenti.

La professoressa nelle lezioni frontali propone delle presentazioni seguendo principalmente il libro di testo. È partita introducendo le variabili termodinamiche macroscopiche per poi presentare subito il modello microscopico del gas, la legge dei gas perfetti e la teoria cinetica dei gas. Per creare il ponte tra l'approccio microscopico e l'approccio macroscopico sono state definite la temperatura e la pressione attraverso un'interpretazione microscopica. La pressione viene legata agli urti delle molecole con le pareti del recipiente e la temperatura assoluta all'energia cinetica media delle particelle. Viene introdotta anche la distribuzione di Maxwell delle velocità molecolari, per completare il quadro microscopico, ma agli studenti non viene richiesto di saperne la formula. Nell'Amaldi, dunque, si trova un ottimo intreccio tra i due approcci, cercando di soddisfare al meglio le esigenze degli studenti di terza superiore.

Un particolare aspetto problematico del libro di testo che ho notato durante il periodo di osservazione delle lezioni riguarda gli esercizi di testo. Spesso, infatti, gli esercizi di fine capitolo presentano sia una descrizione testuale sia una rappresentazione grafica del fenomeno, ma queste tendono a non combaciare. Infatti, in alcuni esercizi utilizzando approcci di risoluzioni distinti, seguendo il testo oppure seguendo il grafico, si ottengono risultati differenti. Questo tipo di problematica, di disconnessione tra rappresentazione grafica e descrizione testuale di un problema fisico si riscontra in più manuali, anche in "Quantum 1 Fabbri, Masini, Baccaglini", non a disposizione degli studenti ma da cui la professoressa prende esercizi aggiuntivi da proporre. Si riporta un esempio in Fig.3.16 in cui la disconnessione riguarda il grafico e la tabella associata al grafico.

Completa la tabella relativa al ciclo termodinamico mostrato nella figura:

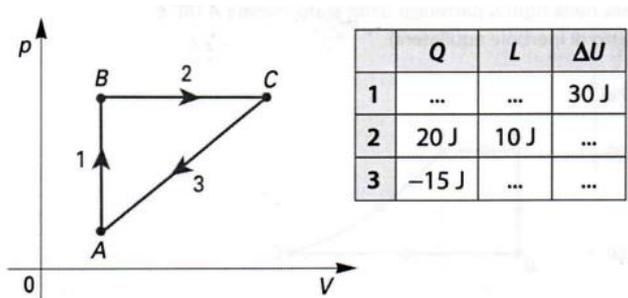


Figura 3.16: Esempio di problema con testo e rappresentazione grafica disconnessi.

Nell'esempio riportato se lo studente utilizza i dati della tabella e prende in considerazione il grafico esclusivamente per determinare le tipologie di trasformazioni coinvolte, ottiene $L_1 = 0J$ essendo AB una trasformazione isobara, $Q_1 = 30J$ e $\Delta U_2 = 10J$ per il primo principio. Trattandosi di una trasformazione ciclica, si ottiene poi $\Delta U_3 = -40J$ perché la variazione di energia deve essere nulla, essendo una funzione di stato, ma così per il primo principio il lavoro della trasformazione CA risulta di $L_3 = 25J$. I dati così trovati non sono però compatibili con il grafico. Analizzando nello specifico il diagramma P-V fornito, lo studente capisce che il lavoro fatto dalla trasformazione CA è negativo e che in valore assoluto deve essere minore di quello svolto dalla trasformazione BC, trattando il lavoro come area sottesa. Dai dati si ottiene però l'opposto, il lavoro della trasformazione CA risulta positivo e maggiore in valore assoluto rispetto alla trasformazione BC. Questo esercizio è stato proposto appositamente dalla professoressa agli studenti durante l'ora di lavoro di gruppo per renderli consapevoli della presenza di questi esercizi nei libri di testo.

4. Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi era analizzare l'apprendimento degli studenti e l'efficacia dei tutorial come metodo didattico attivo.

L'indagine si è svolta con una classe terza del Liceo Scientifico E. Fermi durante le ore di insegnamento della termodinamica. Nello specifico il mio intervento si è concentrato sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica. Lo studio proposto è consistito in una fase di osservazione della classe, nella progettazione di un questionario per indagare l'utilità della visione del filmato "Energia meccanica e termica" del PSSC e nella realizzazione di un intervento in classe in cui gli studenti hanno lavorato in gruppo per completare un tutorial sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica proposto da McDermott e colleghi (2002). Inoltre, lo studio è consistito anche nella somministrazione di un pre e post-test per indagare se e in quale misura il tutorial ha contribuito ad affrontare le difficoltà sulla legge dei gas perfetti e sul primo principio della termodinamica note anche in letteratura.

L'analisi dei risultati ottenuti nel pre-test, nel post-test e anche nel questionario proposto dopo la presa visione del filmato "Energia meccanica e termica" del PSSC, ha ritrovato le difficoltà note già dalla ricerca, alcune sono state superate attraverso l'attività dei tutorial altre invece più resistenti neanche l'apprendimento attivo è riuscito a intaccare. La maggioranza degli studenti supera visioni semplicistiche tra pressione e temperatura e riesce a mettere in relazione il concetto di pressione come variabile di stato termodinamica con il concetto di pressione introdotto in meccanica. Una concezione comune fortemente rimasta anche in seguito al lavoro di gruppo è quella della correlazione tra temperatura e calore, che impedisce agli studenti di utilizzare il primo principio della termodinamica nei processi isotermi portandoli a ignorare gli effetti del lavoro sulla variazione di temperatura di un corpo. Anche la visione del calore e del lavoro come funzioni di stato e la conseguente confusione con il concetto di energia interna non ha avuto un miglioramento netto, così come le difficoltà nell'individuare il segno del lavoro, riconducibili alle difficoltà che gli studenti incontrano anche in meccanica. In modo più quantitativo si è ottenuto il 59% delle risposte corrette nel pre-test e il 68% nel post-test, in particolare si è passati dal 57% nella prima parte sulla legge dei gas perfetti al 73% e per la seconda parte sul primo principio della termodinamica si è passati dal 61% e al 66%. La piccola variazione tra la percentuale di risposte corrette nel pre e post-test nella parte relativa al primo principio è dovuta probabilmente al fatto che solo tre gruppi su cinque sono riusciti a completare l'attività, mentre la parte relativa alla legge dei gas perfetti è stata completata da tutti i gruppi. Si può comunque concludere che i tutorial favoriscono una partecipazione e un apprendimento attivo. Gli studenti sono liberi di discutere tra loro senza la guida rigida del professore. Attraverso i quesiti del tutorial gli studenti sono posti davanti alle loro concezioni comuni e possono riflettere su come esse non siano adatte e sufficienti a spiegare certi fenomeni. I tutorial, dunque, guidano gli studenti ad affinare i concetti termodinamici facendoli propri e supportando la trasformazione delle loro concezioni comuni in conoscenza scientifica e accreditata. Oltre ai risultati statistici si è ottenuto un riscontro positivo da parte dei ragazzi durante lo svolgimento delle attività, sono rimasti sorpresi di poter ragionare in maniera diversa da quella a cui erano stati abituati, in particolare per l'equilibrio meccanico. Inoltre, durante lo svolgimento dei tutorial, tutti gli allievi hanno partecipato attivamente e con interesse mantenendo anche una concentrazione superiore rispetto alle lezioni frontali.

Appendice A

Riportiamo in appendice il questionario proposto come compito a casa agli studenti, dopo la visione del filmato “Energia meccanica e termica” del PSSC.

1. Nella giostra con le navicelle che ruotano l'energia si conserva? Spiega brevemente.
2. Nella pallina che cade attraverso l'aria l'energia si conserva? Spiega brevemente.
3. Nel video viene introdotto il modello di gas con delle palline in moto. Cosa si intende per modello? Perché bisogna utilizzare un modello per descrivere il gas?
4. La pressione P viene introdotta per considerare che cosa?
 - Urti tra molecole
 - Urti delle molecole contro la parete
 - Energia cinetica media delle molecole
 - Altro
5. La temperatura T viene introdotta per considerare che cosa?
 - Urti tra molecole
 - Urti delle molecole contro la parete
 - Energia cinetica medie delle particelle
 - Altro
6. Come mai le pressioni dell'elio e dell'ossigeno differiscono quando vengono immersi nell'azoto liquido?
 - Sono gas diversi, le pressioni variano con la temperatura in modi diversi
 - Non sono abbastanza rarefatti per essere considerati gas perfetti
 - Si tratta di errori di misura dovuti allo strumento utilizzato
 - Non mi è chiaro
7. L'uomo, dopo aver eseguito l'esperimento con l'elio e l'ossigeno, afferma che la pressione è direttamente proporzionale alla temperatura. Perché può affermarlo?
 - Nel modello di gas perfetti la pressione è, per definizione, direttamente proporzionale alla temperatura.
 - Nelle condizioni sperimentali costruite, volume e numero di moli sono costanti; quindi, la pressione cresce all'aumentare della temperatura.
 - Non mi è chiaro
8. Spiega cosa si intende per conduzione termica e come essa avviene.
9. Hai trovato utile la visione del filmato? (poco utile 1, molto utile 6)
 - 1
 - 2
 - 3
 - 4
 - 5
 - 6
10. Quale parte del filmato ti è sembrata più chiara e più utile?
11. Quale parte invece non ti è chiara e ti ha creato confusione?

Bibliografia

Anderson, O. R. & Chiou Guo-li (2010). A Study of Undergraduate Physics Students's Understanding of Heat Conduction Based on Mental Model Theory and an Ontology Process Analysis. *Science Education*.

Baierlein, R. (1994). Entropy and the second law: A pedagogical alternative. *American Journal of Physics*.

Bauman, R. P. (1992). Physics that textbook writers usually get wrong: II. Heat and energy. *The Physics Teacher*.

Besson, U. (2015) *Didattica della fisica*. Carocci.

Brookes, D. T. & Etkina, E. (2015). The Importance of Language in Students' Reasoning About Heat in Thermodynamic Processes. *International Journal of Science Education*.

Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana. Schema di regolamento recante Indicazioni nazionali riguardanti gli obiettivi specifici di apprendimento concernenti le attività e gli insegnamenti compresi nei piani degli studi previsti per i percorsi liceali di cui all'articolo 10, comma 3, del decreto del Presidente della Repubblica 15 marzo 2010, n. 89, in relazione all'articolo 2, commi 1 e 3, del medesimo regolamento. Decreto Ministeriale 211 del 7 ottobre 2010 "Indicazioni Nazionali", allegato F. Retrieved 23 March, 2024.

Heath, N. E. (1974). Heating. *Physics Education*.

Heath, N. E. (1976). Heating. *Physics Education*.

Hestenes, D., Wells, M. M. & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher* 30.

Hobson, A. (1995). Heat is not a noun. *The Physics Teacher*.

Johnson, M. & Lakoff, G. (1980). *Metaphors we live by*. The University of Chicago Press.

Kautz, C. H., Heron, P. R. L., Loverude, M. E. & McDermott, L. C. (2005a). Student understanding of the ideal gas law, Part I: A macroscopic perspective. *American Journal of Physics*.

Kautz, C. H., Heron, P. R. L., Loverude, M. E. & McDermott, L. C. (2005b). Student understanding of the ideal gas law, Part II: A microscopic perspective. *American Journal of Physics*.

Lovedure, M. E., Kautz, C. H. & Heron, P. R. L. (2002). Student understanding of the first law of thermodynamics: Relating work to the adiabatic compression of an ideal gas. *American Journal of Physics*.

McDermott, L. C. (2001). *Physics Education Research—The Key to Student Learning*. *American Journal of Physics*.

McDermott, L. C., Shaffer, P. S., & Group, P. E. (2002). *Tutorials in Introductory Physics*. Washington: Department of Physics University of Washington.

Meltzer, D. E. (2004). Investigation of students' reasoning regarding heat, work, and the first law of thermodynamics in an introductory calculus-based general physics course. *American Journal of Physics*.

PhysPort. (2024, Marzo 13). PhysPort - Supporting physics teaching with research-based resources. Tratto da PhysPort: <https://www.physport.org>

Pushkin, D. B. (1997). Scientific terminology and context: How broad or narrow are our meanings? *Journal of Research in Science Teaching*.

Richtmyer, F. K. (1933). Physics is Physics. *American Journal of Physics*.

Romer, R. H. (2001). Heat is not a noun. *American Journal of Physics*.

Sutton, C. R. (1993). Figuring out a scientific understanding. *Journal of Research in Science Teaching*.

Wattanakasiwich, P., Taleab, P., Sharma, M. D. & Johnston, I. D. (2013). Development and Implementation of a Conceptual Survey in Thermodynamics. *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education*.