



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
SUOR ORSOLA
BENINCASA

DIPARTIMENTO DI
SCIENZE FORMATIVE, PSICOLOGICHE
E DELLA COMUNICAZIONE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE
IN
SCIENZE DELLA FORMAZIONE PRIMARIA

TESI DI LAUREA
IN
ELEMENTI DI FISICA

INTERVENTO DI CONTRASTO ALLA
POVERTA' EDUCATIVA:
Progetto MusEdu per la scoperta dei fenomeni fisici
nella Scuola Primaria

Relatori
Prof. Emilio Balzano
Prof.ssa Roberta Viscardi

Candidata Gaia Rossetti
Matricola 208007088

Anno Accademico 2025/2026

*Ai bambini e alle bambine delle mie classi.
Siamo entrati in aula con le stesse paure: io di non avere le risposte giuste, voi di sbagliare e
deludere le aspettative.
Ne siamo usciti insieme, mettendoci in gioco, scoprendo che la Scienza non è nei libri lontani,
ma nelle nostre stesse vite.
A voi dedico questo lavoro, con l'augurio di essere sempre cittadini liberi, critici e
infinitamente curiosi.*

*E a tutti i bambini del mondo.
Affinché il diritto allo stupore, alla conoscenza e a un futuro libero non sia mai un privilegio di
pochi, ma una promessa garantita a tutti.*

Indice

Introduzione.....	6
Capitolo 1 - Fondamenti teorici e metodologici nell'applicazione del progetto MusEdu	8
1.1 I due pilastri del <i>framework</i> : l'epistemologia di Ogborn e la cornice di " <i>How People Learn</i> "	8
1.2 Oltre la <i>tabula rasa</i> : senso comune e preconcezioni	8
1.3 Dalla superficie alla struttura profonda: "zoo ontologico" ed <i>expertise</i>	9
1.4 Plasticità cerebrale, metacognizione e <i>transfer</i>	10
1.5 La declinazione dei principi nel <i>framework</i> di MusEdu	11
1.5.1 Il conflitto cognitivo e l'intransigenza della realtà (il laboratorio sui barattoli)	11
1.5.2 Metacognizione in azione e validazione sociale	12
1.5.3 L'errore come risorsa	12
1.6 L'ecologia dell'apprendimento: dalle preconoscenze all'azione didattica sul campo	13
1.7 L'insegnante come ricercatore: una postura riflessiva per il successo formativo	13
Capitolo 2-La Fisica alla base degli esperimenti	15
2. Dal fenomeno al modello: riflessioni metodologiche sul percorso di ricerca e sperimentazione.....	15
2.1 Il moto di traslazione e la traiettoria del baricentro	17
2.2 Il moto di rotazione	18
2.3 Introduzione e definizione di corpo rigido	19
2.4 Confronto tra punto materiale e corpo rigido.....	19
2.5 Il concetto di equilibrio e il baricentro	20
2.6 L'equilibrio sul piano inclinato	22
2.7 L'equilibrio del corpo rigido	23
2.8 Il moto del barattolo: l'odometro e il rotolamento puro	23
2.9 Energia nel moto di rotolamento.....	28
2.10 Dinamica sul piano inclinato (ruolo dell'attrito)	29
2.11 Esperimenti in laboratorio sul piano inclinato	30
2.12 Oltre il corpo rigido: dinamica dei fluidi e dei materiali granulari	40
2.13 Analisi dei diversi materiali	41
2.14 Definizione di moto armonico	45
2.15 Il pendolo semplice	47
2.16 Il pendolo fisico (o composto)	48

2.17 Fenomeni ondulatori: oscillazioni forzate e risonanza	48
2.18 Applicazione pratica: il metronomo	52
Capitolo 3 – La sperimentazione in classe: quando il senso comune incontra la Fisica	55
3.1 Introduzione al percorso laboratoriale	55
3.1.1 La selezione	56
3.1.2 La formazione	58
3.2 Le Metodologie didattiche: costruire il Sapere attraverso l'inchiesta	66
3.2.1 L'approccio IBSE (<i>Inquiry-Based Science Education</i>) e il ciclo delle "5E"	66
3.2.2 Il Costruzionismo di Papert e gli "oggetti per pensare"	67
3.2.3 Il <i>Role-Playing</i> e la trasfigurazione dell'identità: "essere" scienziati per apprendere la scienza	68
3.2.4 Scaffolding Sociale e Cooperative Learning	71
3.3 Traguardi per lo Sviluppo delle Competenze	71
3.3.1 Esplorare i fenomeni con un approccio scientifico	72
3.3.2 Utilizzo di strumenti, misure e linguaggi specifici	73
3.3.3 Sviluppo di un atteggiamento di curiosità e rigore	73
3.3.4 Cittadinanza e Inclusione sociale attraverso la Scienza	73
3.3.5 Sviluppo dell'identità e dell'autonomia	74
3.4 I mediatori didattici: dai supporti fisici alla concettualizzazione	74
3.4.1 Mediatori attivi: l'esperienza diretta come motore della scoperta	75
3.4.2 Mediatori analogici: il <i>Role-Playing</i> e la simulazione	75
3.4.3 Mediatori iconici: la rappresentazione grafica	75
3.4.4 Mediatori simbolici: il linguaggio e la misura	76
3.5 L'identità dello scienziato e l'esplorazione del senso comune	76
3.5.1 Il primo conflitto cognitivo: il sasso, la piuma e la gravità	78
3.6 Il laboratorio sui barattoli rotolanti e la destrutturazione dell'ovvio	79
3.6.1 Primo test: barattolo vuoto vs. barattolo con acqua	80
3.6.2 Secondo test: barattolo con acqua vs. barattolo con fagioli	81
3.6.3 La sperimentazione autonoma in piccolo gruppo	81
3.6.4 L'analisi fisica e la restituzione collettiva	85
3.6.5 La restituzione grafica e la paralisi creativa	86
3.7 Il laboratorio sull'oscillazione e il pendolo	88
3.7.1 Il concetto di ritmo e la costruzione dello strumento	88
3.7.2 La scoperta dell'isocronismo	93
3.7.3 Sincronizzazione, metronomo e validazione matematica	94
3.8 Le biglie di Newton	97
3.10 Il culmine dell'esperienza MusEdu: la visita immersiva alla mostra "SensAzioni" presso Città della Scienza	98

3.11 Riflessioni conclusive: la Scienza come lente per leggere il mondo quotidiano.....	112
Conclusione	113
Bibliografia.....	116
Sitografia	117
Ringraziamenti	118

Introduzione

Il presente lavoro di tesi si colloca all'interno di un'urgenza pedagogica contemporanea: il contrasto alla disparità educativa. Come evidenziato dai recenti rapporti di Save the Children, la povertà educativa non è soltanto una carenza di risorse materiali, ma rappresenta l'impossibilità per i minori di *«apprendere, sperimentare e far fiorire liberamente capacità, talenti e aspirazioni»*. In contesti territoriali complessi, questa privazione di stimoli culturali segna profondamente lo sviluppo del bambino, destinandolo spesso a un futuro di marginalizzazione sociale.

La fondazione De Agostini si impegna da diversi anni per combattere questa disparità e per avvicinare i bambini alla cultura sia scientifica che artistica, attraverso il finanziamento di iniziative mirate a portare nelle aule la cultura e la bellezza. Tra queste, grazie anche al finanziamento della Banca Popolare di Milano e al patrocinio del Comune di Milano, nel 2023 è nato a Milano il progetto biennale “MusEdu - Arte e Scienza tra scuola e museo¹” che ha visto fino al 2026 il coinvolgimento di 76 classi milanesi tra terze e quarte della scuola primaria, per un totale di 1.500 alunni e 300 insegnanti. Nel corrente anno scolastico 2025/2026, il progetto ha esteso la sua area di applicazione raggiungendo la città di Napoli grazie all'associazione partenopea Progetto Museo e al coinvolgimento dell'Università degli Studi Suor Orsola Benincasa di Napoli. La cooperazione tra soggetti pubblici e terzo settore mira alla condivisione di risorse, idee e professionalità per il bene della comunità educante e ha lo scopo di abbattere il divario socioculturale in cui vivono i bambini.

L'intento di questa iniziativa è quello di “educare al bello”, accompagnando i bambini in luoghi culturali di eccellenza in cui difficilmente accederebbero diversamente, spesso vittime di una provenienza socioculturale che limita i loro orizzonti di conoscenza, adottando un approccio che li coinvolga in prima persona e che lasci ampio spazio alla creatività e allo spirito cooperativo. Infatti, durante le attività proposte, gli alunni sono protagonisti,

¹ https://www.fondazioneagostini.it/sala-stampa/musedu-arte-e-scienza-tra-scuola-e-museo/?_gl=1*_1rch6qi*_up*MQ..*_ga*MTA4NjYzOTYyNy4xNzc0MTEzNzQy*_ga_ZM73JHMZRF*_czE3NzQxMTM3NDIkbzEkZzEkdDE3NzQxMTUzNDckajE2JGwwJGgw

operano e sperimentano concretamente in prima persona; sono chiamati a lavorare insieme, mettendo in gioco la propria capacità sociale e collaborativa; sono stimolati al pensiero critico nell'affrontare la risoluzione di un problema; imparano dall'errore, considerato parte integrante del processo conoscitivo e non un fallimento.

Aver partecipato al progetto MusEdu nel ruolo di operatrice del percorso scientifico mi ha spinto a interrogarmi sui fenomeni fisici coinvolti nelle attività didattiche proposte e su come tali concetti scientifici sfidino o aderiscano all'intuitività dei bambini. Pertanto, ho scelto di incentrare la mia Tesi sull'analisi di tale iniziativa, a partire dall'esperienza vissuta in prima persona e passando per l'approfondimento dal punto di vista fisico delle sperimentazioni proposte in classe. Partecipare attivamente a questi laboratori mi ha fatto capire quanto sia fondamentale, per chi progetta e conduce un intervento didattico, conoscere a fondo la Fisica che vi è alla base. Questa conoscenza non serve solo a far funzionare gli esperimenti, ma è indispensabile per saper rispondere in modo chiaro, corretto e stimolante alle tantissime domande spontanee dei bambini. Nel fare questo ci si interfaccia con il "senso comune", ovvero con quelle idee intuitive, ma spesso scientificamente errate, con cui tutti noi cerchiamo di spiegare la realtà che ci circonda.

Per ripercorrere questo percorso tra teoria, Scienza e pratica sul campo, il presente lavoro si struttura in tre capitoli:

- il Capitolo 1 esplora i costrutti teorici del senso comune nei bambini e i principi pedagogici dell'approccio investigativo basati sulle ricerche di *"How People Learn"*²;
- il Capitolo 2 entra nel vivo della disciplina scientifica, analizzando nel dettaglio la Fisica che si cela dietro le attività didattiche;
- il Capitolo 3, infine, è dedicato al racconto e all'analisi critica del mio percorso laboratoriale vissuto direttamente nelle classi, a partire dalle mie riflessioni personali accompagnate dalle citazioni dei bambini e dalle sfide didattiche che sono nate durante il percorso.

² John D. Bransford, Ann L. Brown, Rodney R. Cocking (a cura di), *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School. Expanded Edition*, Washington (DC), National Academy Press, 2000.

Capitolo 1 - Fondamenti teorici e metodologici nell'applicazione del progetto MusEdu

1.1 I due pilastri del *framework*: l'epistemologia di Ogborn e la cornice di "*How People Learn*"

I risultati e le dinamiche emersi durante le sessioni laboratoriali del progetto MusEdu evidenziano con chiarezza come un apprendimento scientifico autentico non possa prescindere da un'attenta considerazione delle modalità specifiche con cui i soggetti in età evolutiva strutturano la propria conoscenza e dalla capacità degli insegnanti di saper cogliere il densissimo bagaglio di intuizioni, ipotesi e teorie ingenue sul funzionamento del mondo fisico, elaborate attraverso l'interazione quotidiana con la realtà circostante. Nell'attuazione delle attività laboratoriali del progetto MusEdu che mi hanno coinvolta, ho cercato di rintracciare l'integrazione tra due prospettive complementari: l'ancoraggio epistemologico fornito da Jon Ogborn nel suo saggio "Scienze e senso comune"³, e la validazione psicocognitiva e neurodidattica offerta dal volume "*How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School*"⁴ (HPL). Se il primo saggio decostruisce la dicotomia tra il pensiero scientifico formalizzato e la conoscenza quotidiana, il secondo volume segna il passaggio storico dal comportamentismo alle scienze cognitive, indagando i processi mentali profondi e le basi neurobiologiche della costruzione del significato.

1.2 Oltre la *tabula rasa*: senso comune e preconcezioni

Il punto di convergenza fondamentale tra i due testi risiede nella demolizione del mito degli studenti come "*tabulae rasae*". Come evidenzia il primo principio cardine di HPL (avvalorato dal Capitolo 4 sullo sviluppo infantile), i bambini sono apprendisti straordinariamente attivi fin dai primissimi

³ Jon Ogborn, *Science and Commonsense*, in M. Vicentini, E. Sassi (a cura di), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, Singapore, International Commission on Physics Education, 2008.

⁴ John D. Bransford, Ann L. Brown, Rodney R. Cocking (a cura di), *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School. Expanded Edition*, Washington (DC), National Academy Press, 2000.

mesi di vita, dotati di "domini privilegiati" di conoscenza e teorie ingenue sul funzionamento del mondo fisico.

Ogborn definisce questo bagaglio preesistente "senso comune": una modalità di pensiero pragmatica e orientata all'azione immediata, che utilizza metafore e analogie per rendere il mondo "ovvio". Entrambi gli approcci avvertono che, se l'insegnante ignora queste preconcezioni offrendo una mera trasmissione nozionistica, l'apprendimento rimarrà superficiale, inerte e destinato a dissolversi fuori dal contesto scolastico.

L'insegnamento delle Scienze non deve quindi "cancellare" queste intuizioni per sostituirle con dogmi, ma utilizzarle come materia prima per innescare un conflitto cognitivo strutturato.

1.3 Dalla superficie alla struttura profonda: "zoo ontologico" ed *expertise*

Nel suo articolo, Ogborn considera la Scienza come un universo popolato da entità astratte (forze, molecole, campi gravitazionali) che formano un vero e proprio "zoo ontologico", un ecosistema di saperi. Egli continua affermando che tali costrutti, pur sembrando inizialmente fantasie teoriche, smettono di essere astrazioni quando vengono validati sperimentalmente, diventando capaci di agire sulla materia in modi spesso controintuitivi.

Questa transizione dall'ovvio al complesso trova una perfetta spiegazione nel Capitolo 2 di *HPL*, che analizza le differenze tra principianti (novizi) ed esperti. Qui, difatti, si afferma che lo sviluppo di una competenza autentica non coincide con l'accumulo mnemonico di fatti isolati, ma richiede la capacità di organizzare le informazioni attorno ai principi fondamentali (le "grandi idee") della disciplina.

Sussistono, pertanto, alcune differenze nel modo di pensare e costruire conoscenze da parte dei soggetti novizi ed esperti, di cui offro una schematizzazione nella seguente tabella:

Tabella 1: confronto tra novizio ed esperto

Il Novizio (Senso Comune)	L'Esperto (Pensiero Scientifico)
Categorizza i problemi in base a caratteristiche superficiali (es. colore, aspetto estetico, peso apparente).	Categorizza i problemi in base a strutture profonde e principi (es. interazione di forze, dinamiche interne).
Possiede conoscenze frammentate, ancorate a contesti singoli (rischio di conoscenza "inerte").	Riconosce pattern significativi (<i>chunking</i>) e possiede una conoscenza "condizionalizzata" (sa quando e perché applicarla).
Cerca rassicurazioni funzionali e soluzioni immediate nel "qui e ora".	È capace di decontestualizzare, isolare le variabili e innovare di fronte a situazioni inedite (<i>expertise</i> adattiva).

Ritengo, inoltre, importante focalizzare l'attenzione sul "punto cieco dell'esperto" (*expert blind spot*), ovvero quel costrutto secondo il quale chi possiede una conoscenza altamente automatizzata spesso dimentica gli ostacoli cognitivi affrontati dal principiante: per questo, un'efficace didattica delle Scienze richiede una specifica "conoscenza pedagogica del contenuto", capace di offrire strade di trasposizione didattica realmente efficaci e orientate al successo formativo.

1.4 Plasticità cerebrale, metacognizione e *transfer*

Essere realmente competenti, interiorizzare e consolidare le conoscenze apprese significa, dunque, saperle utilizzare anche in contesti diversi rispetto all'ambito specifico di apprendimento.

L'apprendimento profondo, che *HPL* indica come l'unico in grado di favorire il *transfer* cognitivo, ossia l'applicazione di competenze a scenari nuovi,

non è un evento meramente astratto, ma un processo con profonde implicazioni neurobiologiche (*HPL*, Capitolo 5). Il cervello umano è un organo plastico, capace di riorganizzarsi costantemente (sinaptogenesi e *pruning*) in risposta a stimoli ambientali (*experience-dependent*): pertanto fornire ai bambini ambienti ricchi e sfidanti significa agire direttamente sulla loro architettura neurale.

Perché questo avvenga, è cruciale che nella loro progettazione didattica i docenti valorizzino anche lo sviluppo della metacognizione (Terzo principio di *HPL*): la capacità dello studente di monitorare, valutare e regolare attivamente le proprie strategie di pensiero, imparando a "disimparare" i modelli obsoleti e trasformandosi in un apprendista autonomo.

1.5 La declinazione dei principi nel *framework* di MusEdu

Grazie all'opportunità offertami dal progetto MusEdu di operare in molteplici realtà scolastiche, ho avuto la possibilità di osservare e riconoscere i principi teorici fin qui esposti applicati praticamente dai bambini nei laboratori, strutturati secondo il mio giudizio, sulla metodologia *Inquiry-Based Science Education* (IBSE) e il concetto vygotskiano di *scaffolding* (apprendimento guidato).

Le esperienze laboratoriali proposte nelle classi quarte in cui ho operato, si sono poste come possibilità alternative di consentire ai bambini di accedere a concetti scientifici e fisici complessi come il rotolamento di barattoli sul piano inclinato e i fenomeni periodici, attraverso l'osservazione empirica e la costruzione del pensiero investigativo.

1.5.1 Il conflitto cognitivo e l'intransigenza della realtà (il laboratorio sui barattoli)

Nel laboratorio sul moto lungo il piano inclinato, l'esplicitazione delle preconcezioni è stata la mossa d'apertura. Alla domanda «*Chi arriva prima? Il barattolo leggero o quello pesante?*», il senso comune muscolare dei bambini ha generato l'ipotesi ovvia: «*Arriva prima quello pesante, perché è la gravità che spinge!*».

Il successivo inserimento di variabili di disturbo (barattoli riempiti con acqua, riso e fagioli) ha innescato il conflitto cognitivo. L'acqua (più leggera dei fagioli, come dimostrato dal peso sulla bilancia) continuava ad arrivare prima. I bambini si sono scontrati con quella che Ogborn definisce l'"intransigenza della realtà": la mente umana può immaginare qualsiasi regola, ma non può piegare la realtà fisica ai propri desideri. Di fronte a barattoli troppo leggeri che scivolavano anziché rotolare, gli alunni non si sono arresi a routine inefficaci, ma hanno dimostrato un'acerba *expertise* adattiva, esclamando: «*Scivola, aumentiamo i fagioli!*». In questo momento, i barattoli sono stati categorizzati non più per l'aspetto esterno (approccio da novizio), ma per la dinamica del contenuto interno (approccio da esperto).

1.5.2 Metacognizione in azione e validazione sociale

Con il progredire delle sperimentazioni, l'emergere di dinamiche metacognitive è stato affascinante. Riflessioni spontanee come «*Ho chiuso bene il barattolo?*» o «*Non è che poi mentre scende si apre? È troppo pieno*» testimoniano il controllo riflessivo sulla validità dell'impianto sperimentale.

Inoltre, il processo scientifico è stato vissuto come un'impresa profondamente sociale, rifiutando l'isolamento per prediligere un orientamento collaborativo. L'invito di un alunno a un compagno: «*Vieni a vedere dalla mia visuale*» rappresenta l'apice della metacognizione applicata al contesto collettivo, il riconoscimento che la propria prospettiva necessita di validazione intersoggettiva.

L'espressione emblematica «*Aspetta, sto scientizzando!*» racchiude il successo di questo ribaltamento di prospettiva: il passaggio da un *locus of control* esterno (il giudizio dell'insegnante) a uno interno, regolato dal faticoso confronto con le evidenze.

1.5.3 L'errore come risorsa

Infine, l'approccio utilizzato in questo impianto laboratoriale ha offerto l'importante opportunità di decostruire la "paura di sbagliare", tipica dei contesti scolastici tradizionali. Promuovendo l'errore non come fallimento, ma come passaggio obbligato e risorsa strategica per l'eliminazione delle ipotesi deboli,

l'aula si è trasformata in una reale comunità di pratica. Il progetto documenta così come sia possibile educare il senso comune alla bellezza del rigore, dotando i futuri cittadini degli strumenti critici per guardare la realtà con la lente indagatrice dello scienziato e non con l'occhio passivo del pregiudizio.

1.6 L'ecologia dell'apprendimento: dalle preconoscenze all'azione didattica sul campo

Nell'orizzonte della mia ricerca-azione, ho inteso valorizzare il patrimonio cognitivo pregresso di ciascun bambino, non come un insieme di errori da correggere, ma come la materia prima fondamentale e imprescindibile su cui innestare la costruzione del sapere scientifico. Consentire agli studenti di esplicitare le proprie preconoscenze, come l'idea intuitiva che un oggetto più pesante debba necessariamente cadere o rotolare più velocemente, significa riconoscere dignità al loro pensiero e, al contempo, offrire una base su cui riflettere criticamente. Mettere in atto queste pratiche laboratoriali in aula e approfondire l'assunto della neuropsicologia secondo il quale l'intelligenza non risiede solo nel cervello, ma in tutto il corpo, mi ha permesso di comprendere concretamente che ciascun atto cognitivo, per trasformarsi in un'acquisizione stabile e duratura, richiede il coinvolgimento attivo e corporeo del discente, il quale deve poter manipolare, esplorare e interrogare i fenomeni in prima persona. L'esperienza pratica e diretta si configura così come il vero motore della trasposizione pedagogica anche di concetti complessi, quali la gravità e i fenomeni periodici, poiché solo scontrandosi con l'intransigenza dei fatti, il bambino è stimolato a mettere in discussione i propri modelli mentali, riorganizzando la propria architettura cognitiva verso interpretazioni più mature e formali scientificamente.

1.7 L'insegnante come ricercatore: una postura riflessiva per il successo formativo

Questo radicale mutamento di prospettiva pedagogica impone una profonda ridefinizione dell'identità professionale del docente, il quale è chiamato a spogliarsi dei panni del trasmettitore passivo di nozioni per assumere la postura

di un ricercatore attivo all'interno del contesto scolastico. Sviluppare una simile postura di ricerca significa abitare l'aula con uno sguardo costantemente riflessivo, interpretando ogni dialogo, intuizione, ogni domanda e persino ogni errore degli alunni come un dato d'indagine utile per la costruzione di conoscenze. Nel corso delle mie esperienze di progettazione e attuazione dei laboratori, ho potuto, inoltre, sperimentare in prima persona la complessità e la bellezza di questo ruolo, che richiede non solo una solida sensibilità pedagogica, ma anche la capacità di presidiare i contenuti disciplinari con rigore e flessibilità. Pertanto, nutro la profonda speranza che il presente lavoro di Tesi possa offrire un valido spunto di riflessione per i docenti e per la comunità educativa, delineando un modello in cui la teoria pedagogica e la pratica didattica si alimentino a vicenda in un continuum virtuoso. Valorizzare la ricerca in classe significa credere fermamente che il successo formativo scientifico e non solo, sia il frutto di un processo la cui qualità non risiede nelle risposte, ma nella capacità che noi docenti abbiamo di cogliere e generare domande e nello spazio di autentica esplorazione che sappiamo garantire ai nostri studenti.

La scelta di dedicare un'ampia e dettagliata sezione di questo lavoro all'approfondimento dei principi teorici della Fisica risponde a un'esigenza che ritengo cruciale per il profilo professionale di un insegnante della scuola primaria. Nel proporre questa trattazione, lungi da me la pretesa di ergermi a formatrice dei docenti in servizio o di offrire un pacchetto preconfezionato di competenze. Il mio intento si radica, piuttosto, nella sincera volontà di condividere uno spunto di lettura critico e ragionato su quanto ho operato e sperimentato in prima persona. Desidero che queste pagine non vengano lette come un semplice repertorio di buone pratiche o come una raccolta di idee per accattivanti proposte didattiche estemporanee, ma come un vero e proprio contributo di riflessione metodologica. Credo fermamente, infatti, che per innescare percorsi di apprendimento scientifico che siano realmente efficaci e di successo per i bambini, non sia sufficiente la progettazione di un laboratorio divertente; è necessario, a monte, un investimento serio sulla formazione profonda dell'insegnante stesso, stimolando una reale padronanza dei concetti scientifici che sottendono la pratica quotidiana; e poter offrire un piccolo

contribuito alla comunità di ricerca nell'ambito della Didattica, rappresenta per me un'opportunità molto importante.

Troppo spesso, nella Scuola dell'Infanzia e Primaria, l'insegnamento delle Scienze viene penalizzato da insicurezze metodologiche o dal timore di non saper maneggiare la complessità formale delle discipline matematiche e fisiche, col rischio di scivolare in un "attivismo ludico" fine a sé stesso o, al contrario, in una semplificazione eccessiva che distorce la realtà. Attraverso la descrizione della mia esperienza sul campo, sento l'esigenza di proporre un modello formativo più integrato e consapevole, in cui l'azione didattica sia costantemente illuminata dal rigore della teoria. Solo se il docente possiede una mappa concettuale solida e interiorizzata (nel caso specifico, che sappia esattamente cosa accade in termini di massa, di forze o di scambi energetici mentre un barattolo rotola o un pendolo oscilla) egli sarà in grado di guidare con successo il processo di scoperta dei discenti. Sarà capace di accogliere le loro domande inaspettate, di rilanciare le loro ipotesi intuitive senza timore e di orientare l'esplorazione fenomenologica verso una concettualizzazione autentica, evitando il dogmatismo ma presidiando il rigore scientifico.

È proprio con questo spirito, volto a valorizzare la cultura scientifica del docente come prerequisito per una didattica di qualità, che mi accingo a presentare il capitolo successivo. In esso ho voluto tracciare l'impalcatura teorica fondamentale che ha sostenuto ogni singolo passo della mia ricerca, offrendo un quadro dettagliato dei principi fisici che governano i nostri esperimenti, affinché la trasposizione didattica diventi uno strumento di emancipazione cognitiva sia per chi insegna che per chi impara.

Capitolo 2-La Fisica alla base degli esperimenti

2. Dal fenomeno al modello: riflessioni metodologiche sul percorso di ricerca e sperimentazione

Nel seguente capitolo cercherò di fornire alcuni elementi che abbiamo condiviso nel laboratorio di Fisica con le altre colleghe coinvolte nel progetto, sia nella fase di progettazione che in quella di rivisitazione delle esperienze

svolte nelle scuole. Le attività sono state guidate dalla professoressa Viscardi e dal professor Balzano con l'obiettivo di condividere alcuni concetti chiave di Fisica e approcci utili nell'interazione con bambini e insegnanti. L'approccio a cui abbiamo fatto riferimento è quello fenomenologico, che si basa sull'esplorazione della fenomenologia con analisi qualitative e quantitative e sulla costruzione di modelli interpretativi da condividere in classe in attività di piccolo e grande gruppo.

Le esperienze che hanno coinvolto i bambini sono sinteticamente raggruppate in due parti:

1. "corsa in discesa nel rotolamento di barattoli con granaglie lungo piani inclinati"
2. "oscillazioni di pendoli e metronomi".

Nell'approccio seguito nella sperimentazione in classe e che vorremmo mettere al centro della formazione degli insegnanti che intendono riprodurre queste esperienze, si cerca di insistere sul principio secondo il quale quando si esplora un fenomeno o si costruiscono interpretazioni e modelli è fondamentale offrire ai bambini la possibilità di mettere alla prova ipotesi e soluzioni, dando loro l'opportunità di modificare la configurazione degli esperimenti e di dare spazio alle argomentazioni e al modo di comunicarle e rappresentarle.

Per questo motivo il ruolo dell'insegnante è particolarmente impegnativo: guidare la classe nella ricerca di regolarità, variando configurazioni e condizioni iniziali, identificando sistemi interagenti e variabili ("Guardare per Sistemi, guardare per variabili"⁵) richiede da un lato la conoscenza di concetti di base, dall'altro la flessibilità e l'adattamento a situazioni non sempre previste. Il modo di operare dipende dal contesto e dagli stili di insegnamento, ma nel seguito cercheremo di fornire elementi per un possibile lavoro di progettazione e/o di sistematizzazione.

Per il primo blocco di esperienze proponiamo:

⁵ Arcà, Maria, Guidoni, Paolo, *Guardare per sistemi, guardare per variabili. Un approccio alla Fisica e alla Biologia per la scuola dell'obbligo*, Torino, Emme Edizioni, 1987.

- un esperimento con l'odometro, per cogliere il significato del rotolamento e della relazione tra traslazione e rotazione in una situazione controllata e facilmente riproducibile;
- la videoregistrazione del rotolamento di una “ruota” lungo una guida inclinata;
- il moto in tempo reale di un carrello con respingente lungo una guida inclinata con il supporto di un sonar;
- il moto in tempo reale di cilindri pieni, anelli, lattine di alimenti, barattoli con riempimenti parziali e diversi di fagioli secchi, con la stessa guida inclinata e la stessa inclinazione;
- delle simulazioni con *Interactive Physics* del rotolamento di cilindri pieni lungo piani inclinati al variare dell'inclinazione e a parità dell'inclinazione quando si conserva la forma.

Per il secondo blocco di esperienze abbiamo realizzato esperimenti su:

- pendoli semplici e composti, e in particolare con il metronomo;
- oscillazioni forzate e risonanza con pendoli accoppiati;
- risonanza con diapason;
- sincronizzazione con metronomi.

Nel seguito saranno riprese alcune definizioni utili ad orientarsi nelle esperienze proposte, in modo da inquadrare concetti chiave delle teorie fisiche esposte ad esempio nei testi della Scuola Secondaria di II grado.

2.1 Il moto di traslazione e la traiettoria del baricentro

Si definisce moto di traslazione pura il movimento di un corpo in cui ogni suo punto compie, nello stesso intervallo di tempo, lo stesso spostamento lungo traiettorie tra loro parallele. In questo tipo di moto, l'orientamento del corpo nello spazio rimane invariato.

Quando studiamo il moto di oggetti estesi in cui l'interesse principale è focalizzato sulla loro traslazione nello spazio, un ruolo cruciale è svolto dal baricentro (o centro di massa).

Se su un corpo rigido agisce solo la forza di gravità (forza peso), in qualunque modo l'oggetto venga lanciato o muova le sue parti, il suo baricentro

si muoverà sempre seguendo una traiettoria parabolica. E i due moti componenti sono con accelerazione costante lungo la verticale e con velocità costante lungo l'orizzontale.

Mentre il corpo si sposta, tutti gli altri punti si muovono insieme al baricentro, ruotando eventualmente attorno ad esso, e il moto del baricentro dipende dalla forza così come descritto dai principi della Dinamica.

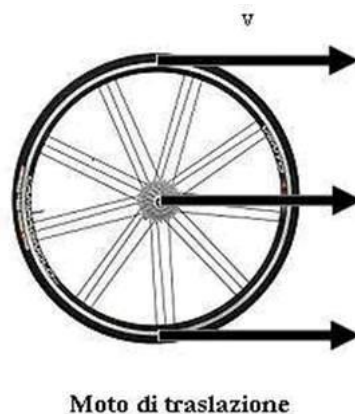


Figura 1: moto di traslazione, tutti i punti si muovono con traiettorie parallele

2.2 Il moto di rotazione

Nel moto di rotazione pura tutti i punti del corpo rigido compiono dei moti circolari i cui centri appartengono a una stessa retta, definita asse di rotazione.

In questo caso, a differenza della traslazione, i diversi punti del corpo non compiono lo stesso spostamento lineare: i punti più lontani dall'asse avranno una velocità lineare maggiore rispetto a quelli più vicini, pur avendo tutti la stessa velocità angolare (ω).

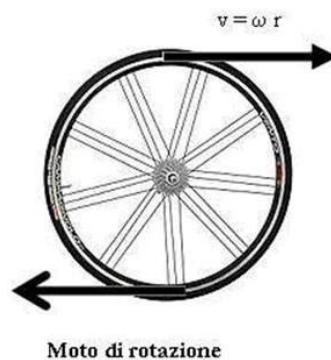


Figura 2: moto di rotazione con asse perpendicolare, nel centro, al piano della figura

2.3 Introduzione e definizione di corpo rigido

Fin tanto che ci interessa studiare solo la traslazione di un corpo, possiamo considerare tutta la sua massa concentrata nel centro di massa. Questa schematizzazione porta alla definizione di punto materiale. Si tratta di una schematizzazione molto utile che va intesa bene e andrebbe discusso quando essa è aderente al problema che vogliamo trattare: ad esempio una nave è nell'oceano un punto materiale, ma diventa un corpo rigido quando manovra (trasla e ruota) nel porto per attraccare.

Se vogliamo analizzare il moto di una ruota, di una sfera o di un cilindro che rotolano su un piano inclinato possiamo considerare il moto di traslazione del baricentro e quello di rotazione intorno al baricentro di tutti gli altri punti; diventa pertanto necessario introdurre il concetto di corpo rigido:

un corpo rigido è un modello ideale che rappresenta un oggetto solido formato da un sistema di punti materiali le cui mutue distanze si mantengono costanti nel tempo, indipendentemente dalle eventuali sollecitazioni o forze esterne applicate.

Questo significa che il corpo, durante il suo moto, non subisce alcuna deformazione (flessione, compressione o trazione): si tratta quindi di un oggetto che nella nostra schematizzazione non si deforma, o per meglio dire le eventuali deformazioni sono irrilevanti ai fini della nostra analisi. Il barattolo utilizzato nelle nostre esperienze è ben schematizzato come corpo rigido quando è vuoto, ma vuole anche dire che non si prende in considerazione, ad esempio, l'attrito volvente; il sistema costituito dal barattolo e dal suo contenuto (liquido o granulare) non è più schematizzabile, invece, come un corpo rigido.

2.4 Confronto tra punto materiale e corpo rigido

Il passaggio dallo studio del punto materiale a quello del corpo rigido introduce nuove variabili cinetiche e dinamiche. Ecco le differenze principali:

- il movimento di un punto materiale nello spazio richiede che si analizzino le leggi orarie delle tre coordinate spaziali (i tre gradi di libertà); il movimento del corpo rigido richiede l'aggiunta delle

rotazioni (i gradi di libertà diventano sei, cioè tre per le traslazioni e tre per le rotazioni);

- un punto materiale ha massa, velocità, può essere sottoposto ad una forza etc.; per un corpo rigido (è un corpo esteso) oltre alla massa diventa importante vedere come sia distribuita, per definire il momento di inerzia.

Il momento di inerzia (o inerzia rotazionale) è

una grandezza fisica che misura la resistenza di un corpo a modificare il proprio stato di quiete o di moto rotatorio. Rappresenta l'equivalente della massa nei moti lineari, ma dipende da come la massa è distribuita rispetto all'asse di rotazione.

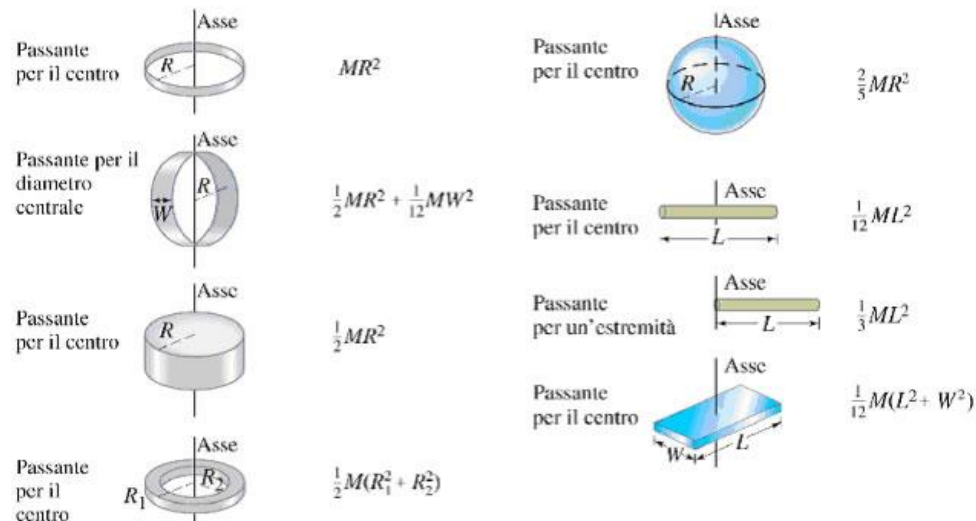


Figura 3: vari momenti di inerzia

Se trattassimo il barattolo come un punto materiale, saremmo interessati solo al suo moto di traslazione ma dobbiamo notare che la sua estensione gli permette di interagire con il piano e generare il moto di rotolamento.

2.5 Il concetto di equilibrio e il baricentro

In Fisica, l'equilibrio è “lo stato in cui il corpo non è soggetto a forze (o momenti) in grado di modificarne lo stato cinetico”. Nel modello semplificato del punto materiale, l'equilibrio si verifica quando la risultante delle forze agenti su di esso è rigorosamente nulla. In tali condizioni, per il Primo Principio della Dinamica, il corpo permane nel suo stato di quiete (equilibrio statico) o si muove

di moto rettilineo uniforme (equilibrio dinamico). L'equilibrio statico può classificarsi in tre tipologie a seconda del comportamento del corpo a seguito di una piccola perturbazione:

- stabile: un corpo dopo un piccolo spostamento tende a ritornare nella sua posizione di equilibrio;
- instabile: un corpo non torna più nella posizione di equilibrio iniziale;
- indifferente: ad ogni posizione il corpo è in equilibrio.



Figura 4: diversi tipi di equilibrio

Nello studio dei corpi estesi, assume un ruolo fondamentale il baricentro (o centro di gravità), definito come il punto di applicazione della forza peso totale del sistema. Se un corpo è omogeneo e presenta un centro di simmetria (come un barattolo vuoto o pieno di un blocco solido geometricamente perfetto) il baricentro coincide con esso. Per corpi irregolari o con densità variabile, il baricentro può trovarsi in posizioni asimmetriche e anche all'esterno del corpo stesso.

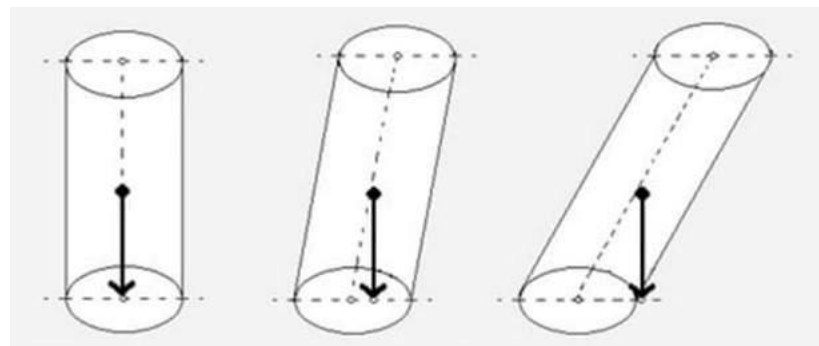


Figura 5: filo a piombo dal baricentro alla base di appoggio

2.6 L'equilibrio sul piano inclinato

Per comprendere il moto del nostro barattolo, è prima necessario analizzare le condizioni in cui un corpo permane in equilibrio su un piano inclinato. Su di esso agiscono tre forze fondamentali:

- la forza peso (F_P) proporzionale alla massa del corpo e diretta verticalmente verso il basso;
- la forza vincolare (F_v) esercitata dalla superficie del piano e sempre ad essa perpendicolare;
- la forza equilibrante (F_E) ovvero la forza necessaria per mantenere il corpo in quiete, applicata parallelamente alla superficie del piano inclinato.

La condizione affinché il corpo resti in equilibrio statico sul piano inclinato è data dalla relazione:

$$F_E = F_P \frac{h}{l}$$

Questa equazione mostra che l'intensità della forza equilibrante è direttamente proporzionale ad h/l definito come il seno dell'angolo θ in figura. Come è evidente il moto di traslazione è con accelerazione costante e l'accelerazione è direttamente proporzionale a $\sin(h/l)$ per diventare $g=9,8 \text{ m/s}^2$ con $\theta=90^\circ$

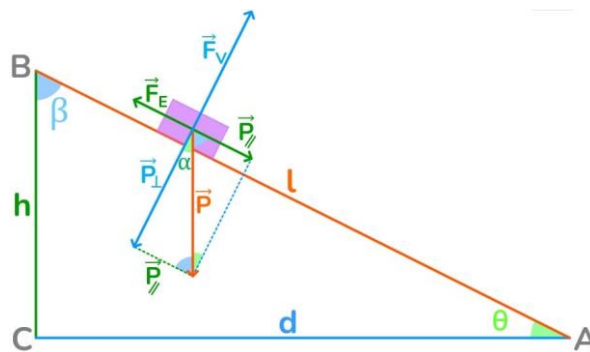


Figura 6: equilibrio sul piano inclinato

2.7 L'equilibrio del corpo rigido

Il passaggio dal punto materiale al modello di corpo rigido introduce nuovi gradi di libertà legati alla rotazione. Pertanto, affinché un corpo rigido sia in equilibrio non basta che non trasli ma è necessario anche che non ruoti. Devono quindi verificarsi due equazioni cardinali simultanee:

1. equilibrio traslazionale: la somma vettoriale di tutte le forze esterne applicate deve essere nulla:

$$\vec{F}_{tot} = 0$$

2. equilibrio rotazionale: la somma dei momenti di tutte le forze esterne rispetto a un qualsiasi polo deve essere nulla:

$$\vec{M}_{tot} = 0$$

Il momento meccanico è la grandezza fisica vettoriale che descrive l'attitudine di una forza a imprimere una rotazione a un corpo rigido vincolato in un punto o attorno a un asse.

Come vedremo nel capitolo successivo, quando l'equilibrio viene rotto sul piano inclinato l'oggetto si mette in movimento e può scivolare o rotolare in dipendenza della sua forma, dell'inclinazione e degli attriti (statico, dinamico, volvente).

2.8 Il moto del barattolo: l'odometro e il rotolamento puro

Per un cilindro che rotola lungo il piano inclinato, si può analizzare il moto come sovrapposizione di due moti:

1. traslazione del suo centro di massa;
2. rotazione attorno ad un asse passante per il centro di massa.

Per introdurre il moto di rotolamento e coglierne il significato geometrico, possiamo realizzare delle attività con l'odometro (o ruota metrica), uno strumento utilizzato per misurare distanze.

Il nostro odometro ha la ruota del diametro di 318 mm e la circonferenza pari a 999 mm (è stato progettato in modo che un giro completo della ruota corrisponda a circa 1 metro). Quando l'odometro viene fatto avanzare senza strisciare è come se la sua circonferenza si "srotolasse" in linea retta lungo il piano: questo ci permette di stabilire una relazione matematica precisa e possiamo contare quante rotazioni corrispondono ad uno spazio percorso (e il lavoro che fa il contagiri che converte giri e frazioni di giri in metri con la precisione al decimetro). Ho misurato a terra una linea lunga 1 metro, poi ho usato l'odometro per misurare lo stesso tratto: come si vede nelle fotografie l'odometro indica che la distanza percorsa è stata 10 decimetri, cioè 1 metro e 0 decimetri.



Figura 7-8: verifica del principio di funzionamento dell'odometro

La precisione della misura con l'odometro è ovviamente minore di quella della rotella metrica che permette di realizzare misure con l'incertezza di 1 millimetro, ma se ne coglie l'utilità se si pensa di utilizzarlo per misurare grandi distanze, ad esempio a scuola, in palestra o all'aperto. Dal punto di vista didattico ci sembra importante evidenziare il principio di funzionamento e in generale la relazione tra traslazione e rotazione presente in molte macchine e meccanismi di uso comune.

Inoltre, segnalando con un pezzo di scotch un punto della ruota iniziale, nelle foto è evidente come ad un metro percorso corrisponda un giro esatto della ruota dell'odometro.

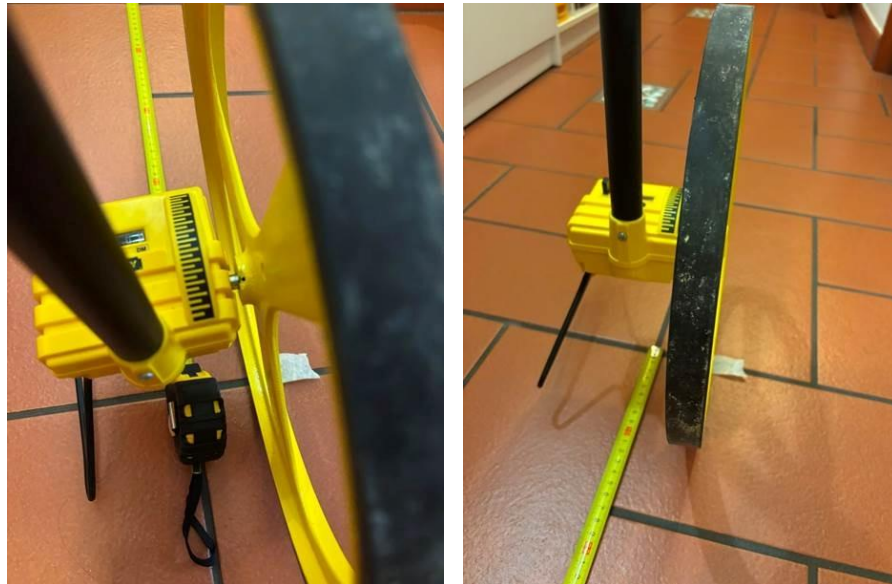


Figura 8-10: odometro sullo zero del metro per indicare l'inizio della rotazione (a sinistra) e alla fine di una rotazione completa (a destra)

Focalizzando la nostra attenzione su un unico punto specifico posizionato sulla circonferenza noteremo che questo punto descrive una traiettoria molto particolare, chiamata cicloide il cui studio è molto interessante anche dal punto di vista storico.

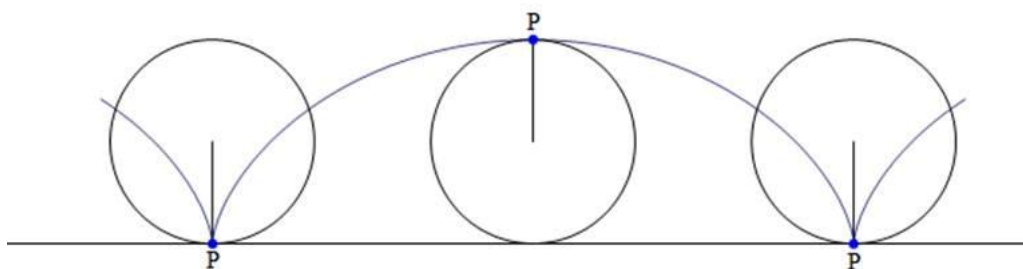


Figura 9: cicloide

Alcune caratteristiche della cicloide sono: l'altezza è pari al diametro, la lunghezza dell'arco è pari a quattro volte il diametro, il segmento di base coincide con la circonferenza, l'area del cerchio è $\frac{1}{3}$ dell'intera area sottesa. Ci sembra interessante sottolineare che le prime tre caratteristiche sono immediatamente ricavate dalla figura e riconducibili al movimento di una ruota e ad animazioni diffuse in rete⁶.

In laboratorio abbiamo eseguito un esperimento facendo rotolare una ruota avente un diametro di 39 cm lungo un piano inclinato. Il video e le immagini “istantanee” in figura permettono di ricostruire con i bambini la geometria del rotolamento.



Figura 10: rotolamento ruota con cicloide fase 1

⁶ <https://it.wikipedia.org/wiki/Cicloide>



Figura 11: rotolamento ruota con cicloide fase 2



Figura 12: rotolamento ruota con cicloide fase 3

Se un cilindro rotola senza slittare, ci troviamo in una condizione definita di rotolamento puro. In questo caso, il punto che si trova istantaneamente a contatto con il piano ha velocità nulla. La velocità tangenziale è $v = \omega R$, dove ω è la velocità angolare e R è il raggio.

Un aspetto fondamentale riguarda il ruolo dell'attrito statico. Affinché ci sia rotazione, l'attrito statico tra il cilindro e il piano è indispensabile, tuttavia il lavoro compiuto dalla forza di attrito è nullo: il punto di contatto è, istante per istante, fermo. Non essendoci uno spostamento del punto di applicazione lungo la direzione della forza, la forza non compie lavoro. L'unica forza che compie

un lavoro utile sul cilindro per farlo scendere è la forza peso, calcolabile come la forza moltiplicata per lo spostamento verticale:

$$W = mg\Delta h$$

2.9 Energia nel moto di rotolamento

Poiché l'attrito statico non compie lavoro e non si dissipa energia, per analizzare il moto dal punto di vista energetico, ricorriamo all'applicazione del Teorema di König.

Questo teorema stabilisce che l'energia cinetica totale (K_{tot}) di un corpo rigido è la somma dell'energia cinetica di traslazione del centro di massa ($K_{traslazione}$) e dell'energia cinetica di rotazione rispetto al centro di massa ($K_{rotazione}$):

$$K_{tot} = K_{traslazione} + K_{rotazione} = \frac{1}{2}mv_{cm}^2 + \frac{1}{2}I\omega^2$$

Mentre il cilindro scende da un'altezza h , la sua energia potenziale gravitazionale ($U = mgh$) si trasforma in energia cinetica. A differenza del punto materiale, dove tutta l'energia diventa velocità di traslazione e quindi $mgh = \frac{1}{2}mv^2$, nel corpo rigido che rotola una parte dell'energia viene "spesa" per metterlo in rotazione ($\frac{1}{2}I\omega^2$). Di conseguenza, un cilindro che rotola scenderà più lentamente rispetto a un corpo assimilabile ad un punto materiale che si muova senza attrito.

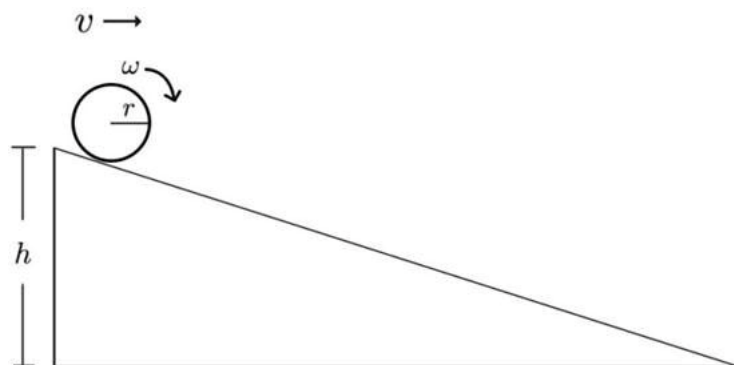


Figura 13: schema rotolamento sul piano inclinato

2.10 Dinamica sul piano inclinato (ruolo dell'attrito)

Nel momento in cui il cilindro viene rilasciato sul piano inclinato, agiscono su di esso tre forze:

1. La forza peso (mg) applicata nel suo baricentro;
2. La reazione vincolare normale (N) che è sempre perpendicolare al piano;
3. La forza di attrito statico (f_s), che è fondamentale per il rotolamento:
 - Perché attrito statico e non dinamico? Perché il punto di contatto, istante per istante, è fermo rispetto al piano; opponendosi allo scivolamento del cilindro verso il basso, fornisce il momento torcente (τ) necessario per la rotazione.

Le equazioni cardinali della dinamica per il barattolo (di massa m e raggio R) su un piano inclinato di un angolo θ sono:

1. traslazione (II legge di Newton lungo il piano):

$$mg \sin \theta - f_s = ma_{cm}$$

2. rotazione (equazione dei momenti rispetto al centro di massa):

$$f_s R = I\alpha$$

(dove I è il momento di inerzia del cilindro rispetto al suo asse centrale e α è l'accelerazione angolare. Quindi l'accelerazione lineare del cilindro è strettamente dipendente dalla distribuzione della sua massa (dal momento di inerzia).

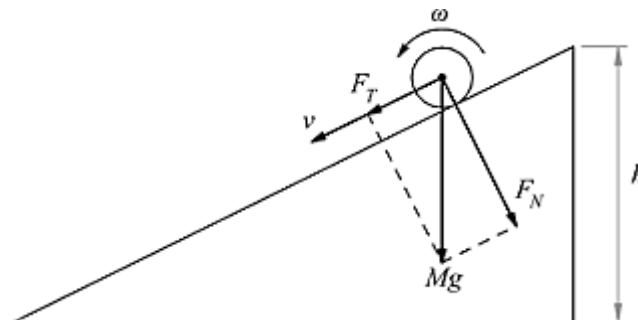


Figura 14: dinamica sul piano inclinato

2.11 Esperimenti in laboratorio sul piano inclinato

Per verificare sperimentalmente i concetti di cinematica e dinamica del rotolamento, abbiamo utilizzato in laboratorio un piano inclinato costituito da un binario di metallo, avente h in figura pari a 19,6 cm e l'ipotenusa (l) di 119,8 cm.

Per la misurazione cinematica, abbiamo posizionato un sensore sonar alla sommità del binario in grado di registrare la posizione, la velocità e l'accelerazione lineare del cilindro a intervalli di tempo molto piccoli, pari a 0,05s. Dalle tabelle e dai grafici registrati emerge che il moto è con accelerazione costante.



Figura 15: setup del piano inclinato con sonar

Prima di esplorare i casi dei cilindri, abbiamo condotto un esperimento utilizzando un carrello con ruote di massa trascurabile, con l'obiettivo di analizzarne i grafici cinematici.

Alla base del binario abbiamo posizionato un pesante blocco di piombo, così che una volta arrivato in fondo, il carrello urtasse con il suo respingente contro il blocco e rimbalzando invertisse la sua marcia.



Figura 16: carrello sul binario al termine della sua discesa

Il sistema di acquisizione dati è stato configurato posizionando l'origine del vettore posizione in corrispondenza del sonar (in cima alla guida), con direzione parallela all'ipotenusa e verso orientato verso il basso.

In figura 19 la configurazione dell'esperimento e in figura 20 i grafici cinematici registrati dal sistema di acquisizione in tempo reale.

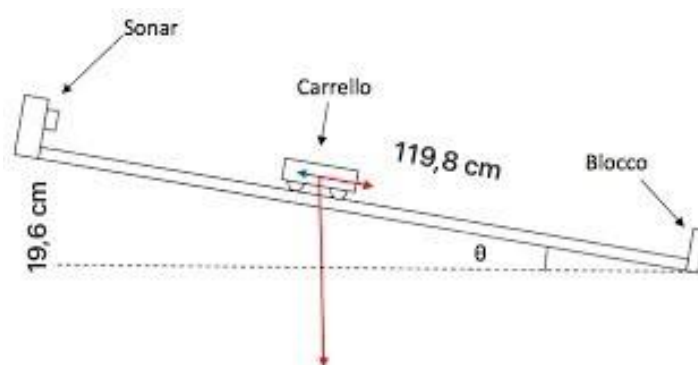


Figura 17: disegno grafico del nostro setup con misure reali

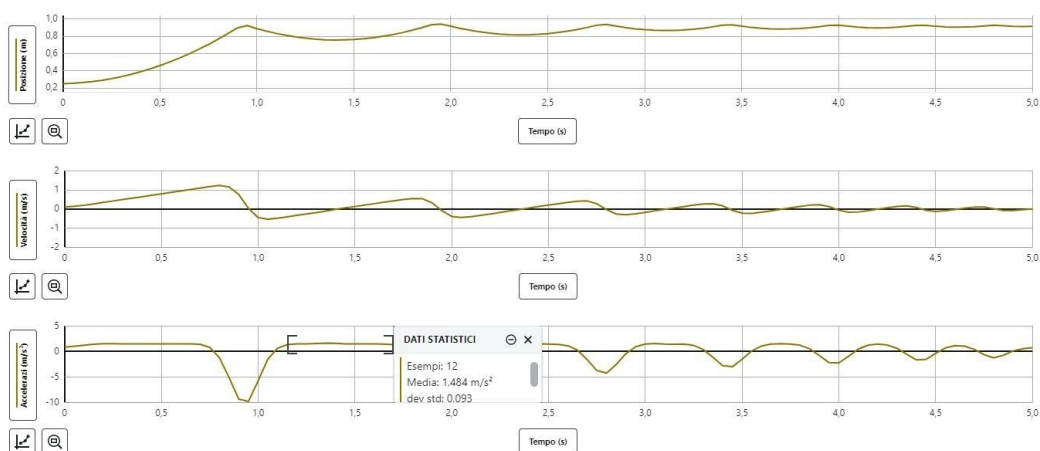


Figura 18: grafici rispetto al tempo della posizione, velocità e accelerazione del carrello in moto lungo il piano inclinato con software del sonar

Un video dell'esperimento è nel sito LES⁷. I tre grafici correlati di posizione, velocità e accelerazione in funzione del tempo mostrano che il carrello partito da fermo (velocità nulla) dall'alto (più vicino al sonar) urta ripetutamente contro il blocco in basso risalendo a quote via via decrescenti in funzione della non perfetta elasticità dell'urto. Nei tratti di salita e discesa la posizione ha l'andamento di una parabola, la velocità è crescente e lineare e l'accelerazione è costante. Gli urti sono ben visibili nei grafici dell'accelerazione come picchi rivolti verso il basso. Per il confronto con gli esperimenti successivi che abbiamo realizzato con cilindri e barattoli in rotolamento sullo stesso binario con la stessa inclinazione ci interessa qui evidenziare che, nei limiti degli errori sperimentali, l'accelerazione del carrello è nelle fasi non impulsive (urti) pari a quella del punto materiale che si muove senza attrito lungo il piano inclinato

$$a = g \sin(\theta)$$

Trattandosi di un moto rettilineo uniformemente accelerato, la legge oraria che descrive la posizione del carrello nel tempo è data dalla formula:

$$x(t) = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

In questa configurazione, il valore di $\sin(\theta)$ può essere calcolato con estrema facilità misurando direttamente le dimensioni fisiche del nostro piano inclinato (l'altezza h del rialzo e la lunghezza totale l), applicando la seguente formula:

$$\sin(\theta) = \frac{h}{l}$$

Sostituendo con i valori misurati in laboratorio, abbiamo calcolato il seno dell'angolo di inclinazione:

$$\sin(\theta) = \frac{19,6 \text{ (cm)}}{119,8 \text{ (cm)}} \approx 0,16$$

⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=64MNAq5R9t0>

Conoscendo l'accelerazione di gravità standard ($g \approx 9,81 m/s^2$), abbiamo quindi ricavato l'accelerazione teorica a cui dovrebbe essere soggetto il carrello in assenza totale di attrito:

$$\alpha = 9,81 \cdot 0,16 \approx 1,60 m/s^2$$

Abbiamo interpretato questo risultato evidenziando che la piccola massa delle ruote del carrello è legata ad una irrilevante energia rotazionale del sistema.

Dopo aver analizzato il moto del carrello, siamo passati allo studio del rotolamento dei cilindri.

Per riflettere sui modelli adottati abbiamo lavorato con il sistema *software Interactive Physics (IP)*, che permette di costruire modelli e analizzare la simulazione di sistemi molto interessanti per la didattica dei sistemi dinamici. A differenza delle *applet* oggi largamente diffuse, *IP* richiede che sia l'utente (uno studente, un insegnante) a costruire il mondo con le leggi (i modelli e le teorie) che lo governano. In figura un'immagine della simulazione di uno stesso cilindro pieno che rotola lungo due piani con inclinazioni diverse, mantenendo costante l'intervallo di "registrazione" dei dati.

Dalla simulazione è emerso chiaramente che il baricentro del cilindro si muove di moto uniformemente accelerato e che, come prevedibile, l'accelerazione aumenta al crescere della pendenza. Si può osservare come un singolo punto sul bordo del cilindro traccia una traiettoria, la cicloide, le cui caratteristiche (altezza e larghezza) dipendono esclusivamente dal raggio del cilindro. Un aspetto fisico che abbiamo verificato è che in questo moto la forza di attrito statico, ciò che "aggrappa" il cilindro al piano permettendogli di rotolare anziché scivolare, non compie lavoro. Di conseguenza, il sistema è conservativo: la somma dell'energia cinetica traslazionale (il movimento in avanti) e di quella rotazionale (il giro su sé stesso) è costante ed è esattamente pari all'energia potenziale di gravità iniziale.

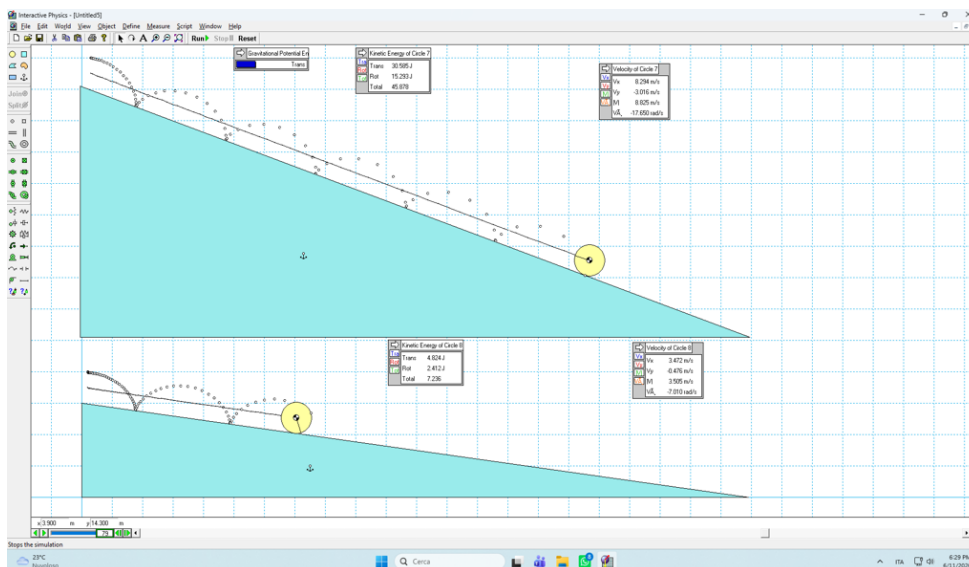


Figura 19: studio su Interactive Physics del caso ideale di un cilindro pieno che rotola da fermo senza strisciare su due piani di diverse inclinazioni

Successivamente, abbiamo simulato una “gara in discesa” tra due cilindri pieni di dimensioni diverse per analizzare come la geometria influenzi il moto. Il risultato, che spesso non ci si aspetta, è che il moto di traslazione è identico: l’accelerazione del baricentro è costante ed è la stessa per entrambi i cilindri. Se li lasciassimo andare insieme, arriverebbero alla base del piano nello stesso identico istante. L’unica differenza risiede nell’ accelerazione angolare, maggiore per il cilindro più piccolo il quale compirà un numero maggiore di giri per coprire la stessa distanza.

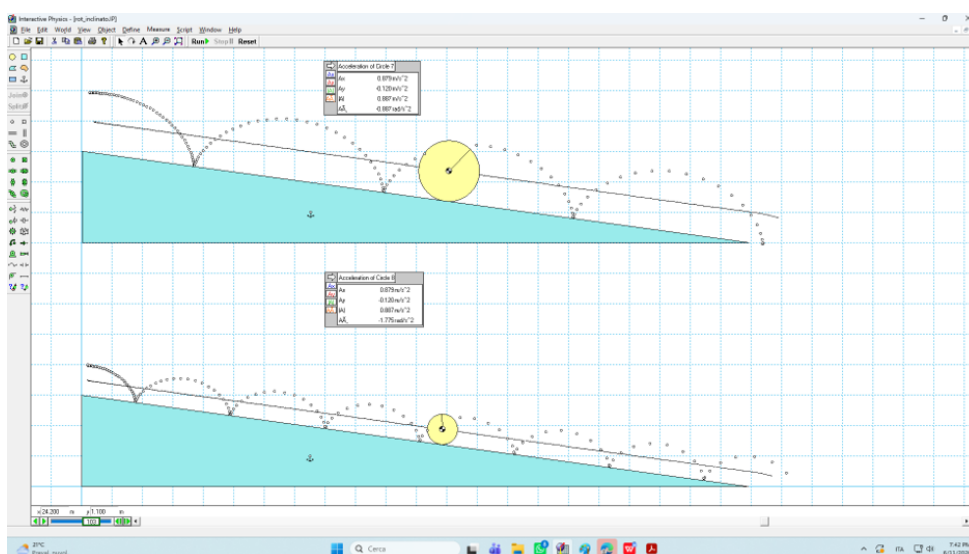


Figura 20: "gara in discesa" tra due cilindri pieni di dimensioni diverse

A questo punto, l'indagine si è spostata di nuovo sulla registrazione con il sonar del moto sul binario inclinato (stessa inclinazione del precedente esperimento con il carrello). Una prima "gara" ha coinvolto un cilindro pieno e uno cavo (un anello): è risultato che il cilindro pieno scende con un'accelerazione lineare maggiore. La chiave di tutto sta nel momento di inerzia, una grandezza fisica che potremmo tradurre intuitivamente come la "pigrizia" di un corpo a variare il proprio stato rotatorio. Il cilindro cavo, avendo tutta la sua massa lontana dall'asse di rotazione (sull'anello esterno); possiede un momento di inerzia maggiore rispetto al cilindro pieno, dove la massa è distribuita uniformemente al centro. Questa maggiore "pigrizia rotazionale" fa sì che il cilindro cavo richieda più energia per iniziare a girare. Di conseguenza, il cilindro pieno, essendo meno "pigro" nell'acquistare velocità angolare, rotolerà con un'accelerazione traslazionale maggiore, vincendo la gara.

Importante sapere che questa è una regola universale: qualsiasi cilindro pieno scenderà sempre più velocemente di qualsiasi cilindro cavo, indipendentemente dal loro peso o dal loro diametro. Questo principio conferma una legge della meccanica: corpi che hanno la stessa identica forma ma dimensioni diverse (due sfere, due dischi o due anelli) sono soggetti alla stessa accelerazione e pareggiano sempre la gara, ma non appena cambia la distribuzione interna della massa, la "pigrizia" del corpo si modifica, cambiando l'esito della discesa.

Abbiamo preso un cilindro di legno pieno, avente una massa di 188 g, un diametro di 8 cm e un'altezza di 7,5 cm: facendolo scendere lungo il binario e registrandone la posizione e la velocità nel tempo attraverso il sonar, abbiamo ottenuto i grafici in figura.

Con l'ausilio del *software* abbiamo ottenuto l'accelerazione pari a $0,97 \text{ m/s}^2$.

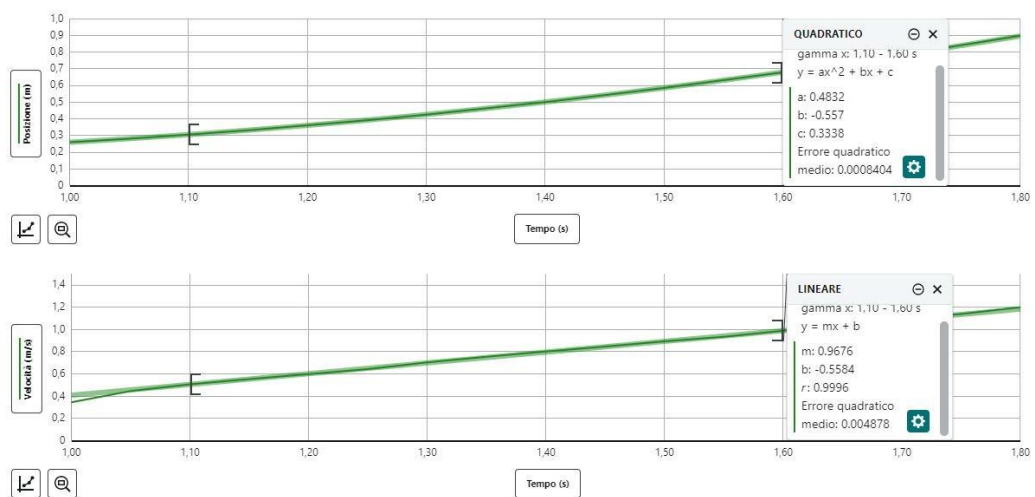


Figura 21: grafico posizione e velocità del cilindro di legno pieno

Con la stessa configurazione (stesso binario e stessa inclinazione) abbiamo analizzato il moto di cilindri e di barattoli con contenuti diversi. La tabella riassume i risultati ottenuti

Tabella 2: risultati sperimentazioni vari cilindri su piano inclinato

Esperimento n.	Oggetto testato	Massa (g)	Diametro (cm)	Accelerazione (m/s ²)	Note
1	Carrellino (ruote di massa trascurabile)	-	-	1,50	Approssima il punto materiale
2 (A)	Cilindro di legno pieno	188	8,0	0,97	Rotolamento puro ideale
3 (B)	Cilindro vuoto (scotch)	127	9,5	0,80	Massa lontana dall'asse
4 (C)	Lattina con polpa di pomodoro	400	7,5	0,98	Fluido denso, simil-solido
5 (D)	Lattina con mais	326	8,5	0,92	Fluido con particolato
6 (E)	Barattolo con fagioli	163	6	0,00	Fermo, non rotola
7 (F)	Barattolo con fagioli	230	6	0,10	Contenuto frana internamente
8 (G)	Barattolo con fagioli	267	6	0,42	Franamento ridotto
9 (H)	Barattolo con fagioli	294	6	0,70	Rotolamento rallentato

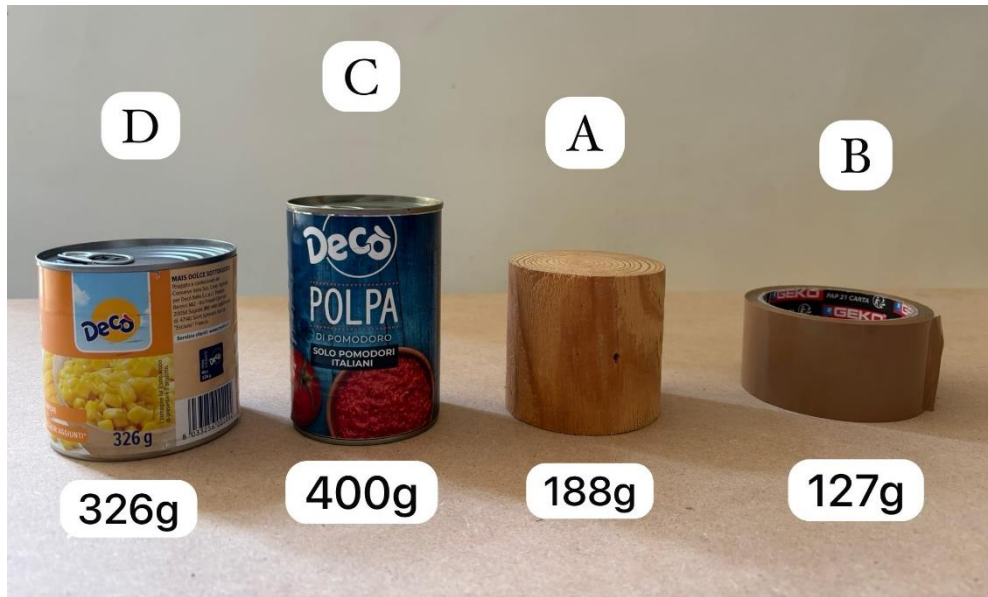


Figura 22: cilindri utilizzati nelle sperimentazioni

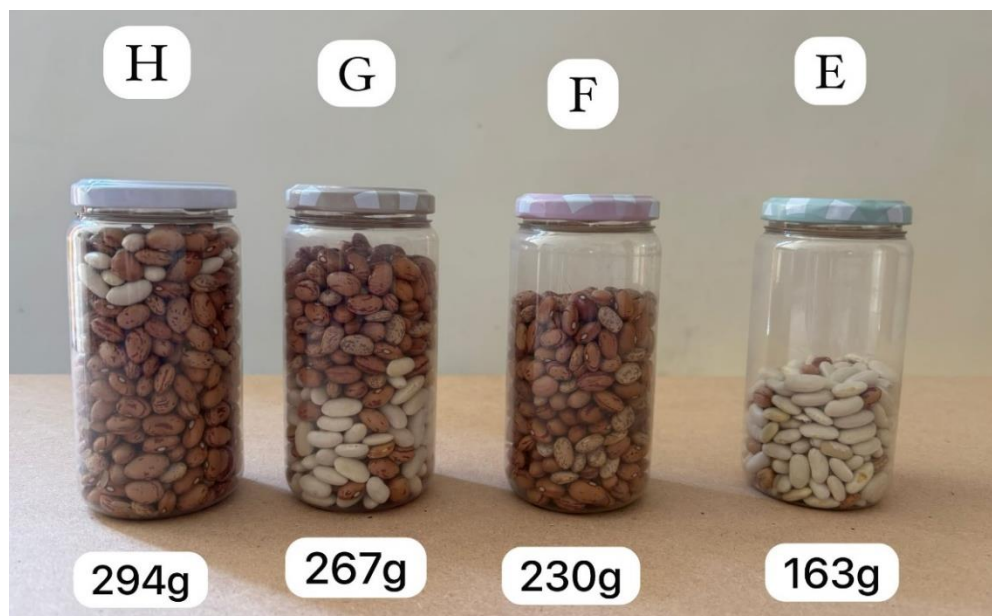


Figura 23: barattoli con fagioli a diverso riempimento

I dati raccolti mostrano come la distribuzione della massa e la struttura interna di un corpo influenzino il suo moto su un piano inclinato. Nello specifico possiamo notare:

- punto materiale vs corpo rigido (esperimento 1): il carrellino registra l'accelerazione maggiore ($1,5 \text{ m/s}^2$). Avendo ruote di massa

trascurabile, quasi tutta l'energia potenziale gravitazionale si converte in energia cinetica di traslazione. Il carrello approssima il modello del punto materiale scivolante senza attrito.

- Distribuzione della massa e momento d'inerzia (esperimento 2 vs esperimento 3): il cilindro di legno pieno scende più velocemente ($1,0 \text{ m/s}^2$) rispetto al cilindro vuoto di scotch ($0,8 \text{ m/s}^2$). Questo evidenzia il significato del momento di inerzia. Nel cilindro vuoto, la massa è distribuita tutta sull'anello esterno, lontano dall'asse di rotazione: questo richiede una maggiore quota di energia per innescare la rotazione, sottraendola alla traslazione e rallentando la discesa.
- Fluidi viscosi e masse solidali (esperimento 4 e 5): i barattoli di polpa e di mais presentano accelerazioni molto simili a quelle del cilindro di legno pieno. Questo accade perché i fluidi al loro interno sono densi (o riempiono quasi totalmente il contenitore); durante la discesa ruotano quasi in modo solidale con il contenitore in latta, approssimando il comportamento di un corpo rigido omogeneo.
- Sistemi complessi e attrito interno (esperimenti 6-7-8-9): i risultati più sorprendenti emergono con i barattoli di fagioli, che si comportano come mezzi granulari immersi in fluido:
 - il barattolo fermo (esperimento 7) essendo riempito solo a metà, i fagioli si posizionano sul fondo del barattolo, abbassando drasticamente il baricentro del sistema. La componente parallela della forza peso non riesce a fornire un momento torcente sufficiente a "sollevare" la massa dei fagioli necessaria per compiere il giro. Il barattolo resta in equilibrio stabile;
 - il franamento e la dissipazione (esperimento 8) quando il barattolo è parzialmente riempito, riesce a scendere ma con un'accelerazione minima ($0,1 \text{ m/s}^2$). L'energia potenziale non si trasforma solo in energia cinetica, ma viene fortemente dissipata dall'attrito interno dei fagioli che "franano" scivolando l'uno sull'altro all'interno della latta;
 - man mano che si riduce lo spazio vuoto (esperimento 9 ed esperimento 6), il franamento interno diminuisce, il sistema tende a comportarsi come

un corpo rigido e l'accelerazione torna progressivamente a salire (da $0,42 \text{ m/s}^2$ fino a $0,70 \text{ m/s}^2$).

2.12 Oltre il corpo rigido: dinamica dei fluidi e dei materiali granulari

Come abbiamo visto, durante la discesa l'energia potenziale gravitazionale si divide in energia cinetica di traslazione (responsabile della velocità effettiva del barattolo) e in energia cinetica di rotazione. È fondamentale sottolineare, però, che l'ipotesi teorica del corpo rigido (invarianza delle distanze tra i punti materiali che lo compongono) vale rigorosamente solo se considerassimo un barattolo riempito con un materiale solidificato, come la cera o il ghiaccio, in cui l'intera massa ruotasse insieme al contenitore. Quando all'interno si trovano fluidi o materiali granulari, la distribuzione dell'energia cambia radicalmente: se il contenuto non ruota insieme alle pareti del barattolo, l'energia potenziale non viene "spesa" per metterlo in rotazione; di conseguenza, una quota maggiore di energia si trasforma in pura traslazione, facendo scendere l'oggetto più velocemente. Al contrario, se il materiale interno si muove, sfrega o si rimescola, il moto subisce un forte rallentamento. Nei sistemi reali, infatti, l'attrito interno che si manifesta come viscosità (per i liquidi) o come attrito radente e urti (per i chicchi e i materiali granulari), agisce a tutti gli effetti come una forza dissipativa non conservativa (W_{nc}). Questa forza sottrae continuamente energia cinetica utile al sistema dissipandola sotto forma di calore ($\Delta E_{termica}$) e frenando così la discesa del barattolo che diminuisce la sua velocità (v_{cm}).

L'equazione del bilancio energetico è data da:

$$mgh = \frac{1}{2} m_{tot} v_{cm}^2 + \frac{1}{2} I_{plastica} \omega^2 + K_{interno} + |W_{nc}|$$

Dove:

- $K_{interno}$ rappresenta l'energia cinetica associata al moto caotico del materiale interno;
- $|W_{nc}|$ è l'energia dissipata.

2.13 Analisi dei diversi materiali

Ecco cosa succede nello specifico con i materiali che abbiamo osservato in laboratorio:

- Acqua (liquido a bassa viscosità) il più veloce

L'acqua ha una viscosità molto bassa: quando il barattolo rotola, essendoci poco attrito, l'acqua al suo interno tende a scivolare contro le pareti senza essere trascinata nella rotazione. Di conseguenza, l'acqua trasla verso il basso ma non ruota (o ruota pochissimo). Poiché pochissima energia potenziale viene usata per la rotazione del liquido, quasi tutta l'energia si trasforma in velocità di traslazione. Per questo motivo un barattolo d'acqua scenderà molto più rapidamente di uno ghiacciato (che si comporta da corpo rigido).

- Sapone per piatti (liquido ad alta viscosità) lento e frenato

Il sapone per piatti è un fluido molto viscoso: in questo caso, lo strato di sapone a contatto con le pareti del barattolo viene trascinato e costretto a ruotare. Questo crea un forte attrito interno (forze di taglio viscoso) tra i vari strati di liquido. Questa "resistenza" interna dissipa molta energia meccanica ($|W_{nc}|$ elevato) sotto forma di calore, rallentando notevolmente il barattolo che avrà una discesa più lenta rispetto al barattolo contenente acqua.

- Riso o Fagioli (materiali granulari⁸) molto lenti e irregolari

I materiali granulari come le sementi (riso o fagioli) non si comportano né come solidi né come liquidi perfetti e non seguono le loro leggi. Il rallentamento del barattolo riempito con questi materiali è riconducibile a comportamenti fisici complessi che annullano l'ipotesi della rigidità:

1. Attrito radente interno e urti anelastici: le particelle granulari sfregano e sbattono tra loro (urti anelastici), dissipando enormi quantità di energia meccanica che si trasforma in calore.
2. Fenomeno dell'*arching* e fluttuazioni di forza: a causa della disposizione casuale dei grani all'interno del barattolo si formano spontaneamente

⁸ Marini Bettolo, Umberto, Puglisi, Andrea, Vulpiani, Angelo, *La forza dei granelli*, in *Le Scienze*, n. 408, agosto 2002.

strutture dette “archi”. “L’ effetto arco” è la causa principale delle grandi fluttuazioni delle forze che agiscono all’interno del materiale granulare: gli archi scaricano gran parte del peso del materiale direttamente sulle pareti laterali del contenitore creando al di sotto delle “zone d’ombra” dove la pressione è minima o nulla.

Questo spiega, ad esempio, perché il barattolo pieno di riso appaia “più rigido” e frenato: l’attrito laterale generato agisce come una forza frenante costante che si oppone alla fluidità del moto.

3. Spostamento del baricentro e valanghe: il materiale granulare durante la rotazione tende ad accumularsi sul lato "in salita" del barattolo, spostando il baricentro del sistema all’indietro rispetto al centro geometrico e creando un momento torcente che si oppone al rotolamento. Diminuendo l’accelerazione angolare il moto potrebbe risultare più lento e irregolare o addirittura a scatti.

Nel disegno il cilindro orizzontale, libero di ruotare intorno al suo asse, riempito parzialmente di materiale granulare rappresenta il barattolo del nostro esperimento. Come vediamo nel disegno qui sotto, i grani che all’inizio si trovano nella metà sinistra (colorati in rosso) e quelli nella metà destra (in blu), quando ruota il contenitore tendono a muoversi e sovrapporsi. Il grado del mescolamento dipende dalla quantità di materiale all’interno: in un cilindro molto pieno grande parte del materiale al centro, cioè vicino all’asse di rotazione, resta ben separata; nelle regioni periferiche, invece, si ha un mescolamento solo parziale. Se riduciamo il livello di riempimento la quantità non mescolata si riduce e la miscela diventa più omogenea.

Questo spiega perché, come abbiamo potuto osservare durante l’esperimento, un barattolo riempito a metà di un materiale possa avere un moto diverso e più caotico rispetto a uno riempito quasi fino all’orlo sempre con lo stesso materiale.

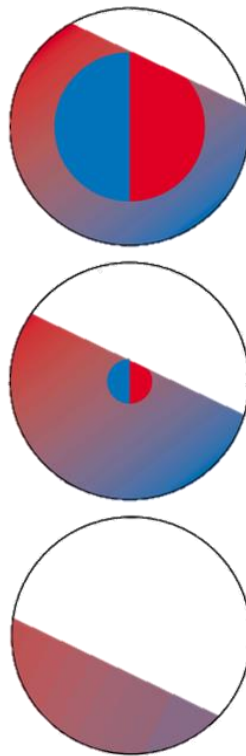


Figura 24:mescolamento di mezzi granulari

Questo comportamento è legato alle frane interne al contenitore. Il materiale all'interno del cilindro a causa della rotazione viene trascinato verso l'alto e si inclina raggiungendo un angolo critico di θ_i oltre il quale l'attrito tra i grani non è più sufficiente a sostenere l'inclinazione. A questo punto si innesca una piccola valanga che fa scivolare i grani riducendo l'angolo fino a un valore inferiore θ_f : il materiale che si trova nel "cuneo" in alto scivola e si rimescola nel cuneo in basso. Il grado di mescolamento finale e la stabilità del rotolamento stesso dipende, quindi, dalla quantità di intersezione tra questi vari cunei durante le ripetute valanghe.

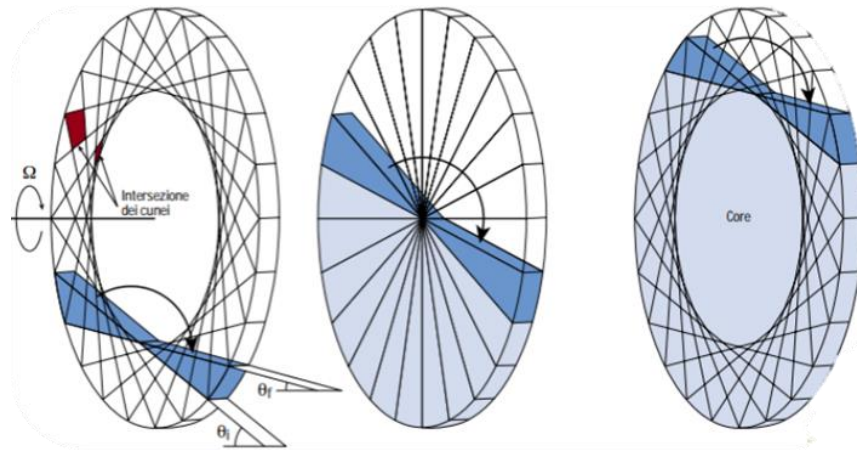


Figura 25:livello di riempimento nel cilindro e il suo mescolamento

- Farina (fluido granulare): comportamento intermedio

Essendo costituita da granelli di dimensioni microscopiche (dell'ordine dei micrometri) nella farina le interazioni macroscopiche subiscono l'influenza di forze a corto raggio: le forze di Van der Waals o la tensione superficiale dovuta all'umidità residua. Queste forze generano una forte coesione tra le particelle facendo sì che la farina tenda a “compattarsi”.

La dinamica del moto interno del barattolo è caratterizzata da due aspetti fondamentali:

1. Fluidità apparente e moti a blocchi: mentre i materiali granulari franano con valanghe continue, la farina essendo compatta si comporta quasi come un solido, che aderisce alla parete del barattolo. Il baricentro si alza notevolmente finché la struttura compatta cede, si stacca e precipita a “blocchi” o a zolle.
2. Esaltazione dell'effetto arco: essendo la farina una polvere fine, l'effetto arco che mantiene il materiale sulle pareti è amplificato dall'enorme coesione tra i grani, per cui le fluttuazioni di forza e di pressione sono ancora più marcate che nei materiali granulari grossolani.

Quindi, per concludere, possiamo dire che il barattolo riempito con la farina scende in maniera lenta, frenato dalla dissipazione di energia che occorre per rompere continuamente i legami di coesione interni al materiale; il moto di discesa sarà meno irregolare e a scatti rispetto a quello dei materiali granulari grossolani e collocherà questo tipo di

materiale in una situazione intermedia tra un materiale granulare puro e un fluido viscoso denso.

2.14 Definizione di moto armonico

Durante il secondo laboratorio abbiamo potuto osservare il pendolo con il suo moto.

In cinematica il moto armonico può essere definito come “*la proiezione di un moto circolare uniforme (MCU) su un diametro della circonferenza*”: se immaginiamo un punto P che percorre una traiettoria circolare con velocità lineare costante ed indichiamo con il punto Q la sua proiezione sul diametro, mentre P compie un giro completo Q va avanti e indietro completando una singola oscillazione.

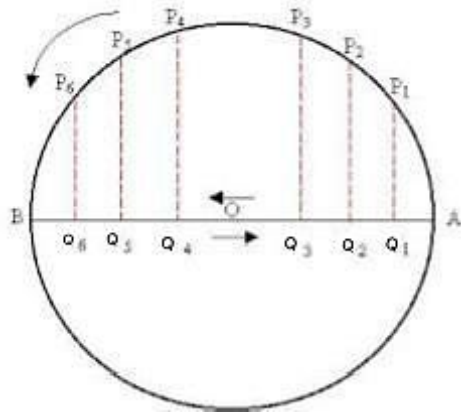


Figura 26: moto armonico su circonferenza

In questo moto le grandezze caratteristiche sono:

- ampiezza (A): massima distanza di Q dal centro dell'oscillazione (coincidente con il raggio della circonferenza);
- elongazione (x): la distanza dal punto Q dal centro in un istante generico;
- periodo (T): l'intervallo di tempo necessario per compiere un giro completo

$$T = \frac{1}{f}$$

- frequenza (f): il numero di oscillazioni compiute in un secondo

$$f = \frac{1}{T}$$

Nel moto armonico, la velocità non è costante, ma raggiunge il massimo valore nel punto medio (centro di oscillazione) ed è nulla agli estremi (punti di inversione del moto).

L'accelerazione, invece, essendo direttamente proporzionale allo spostamento ma di segno opposto, è massima agli estremi e nulla al centro:

$$a = -\omega^2 s$$

Se rappresentiamo su un grafico l'andamento dello spazio in funzione del tempo si ottiene una curva chiamata senoide.

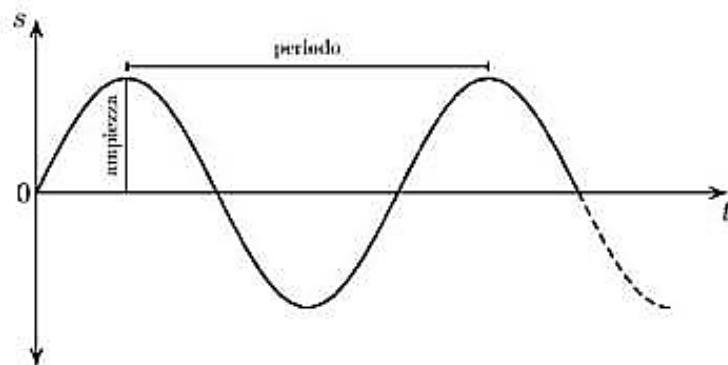


Figura 27: grafico spazio-tempo

Questo andamento (un'armonica) è di fondamentale importanza in Fisica: andamenti non sinusoidali di oscillazioni possono essere ottenuti dalla sovrapposizione di armoniche al variare di ampiezza e frequenza. Analogamente ciò avviene per le corrispondenti onde indipendentemente dalla loro natura (elastica, elettromagnetica). L'esplorazione dei moti armonici può coinvolgere i bambini a scuola, ad esempio utilizzando una molla *slinky* e analizzando le caratteristiche del suono.

2.15 Il pendolo semplice

Il pendolo semplice è un modello fisico astratto, costituito da una massa puntiforme (come il dado nel nostro esperimento) sospesa ad un filo inestensibile e di massa trascurabile: quando questa massa viene allontanata dalla sua posizione di equilibrio e poi rilasciata, essa inizia ad oscillare.

Se le oscillazioni hanno piccole ampiezze (angoli $< 10^\circ$ - 15°) si applica l'approssimazione e si dice che il sistema si muove con moto armonico perfetto: in questo caso vale la Legge di Galilei dell'isocronismo delle piccole oscillazioni per la quale *“il periodo T dipende esclusivamente dalla lunghezza del filo (l) e dall'accelerazione di gravità (g) e non dipende né dalla massa del corpo né dall'ampiezza”*:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Ciò dimostra che un pendolo con un filo più lungo avrà un periodo di oscillazione maggiore cioè oscillerà più lentamente: questo principio è alla base dell'esperimento da noi condotto durante il secondo laboratorio nella Scuola Primaria.

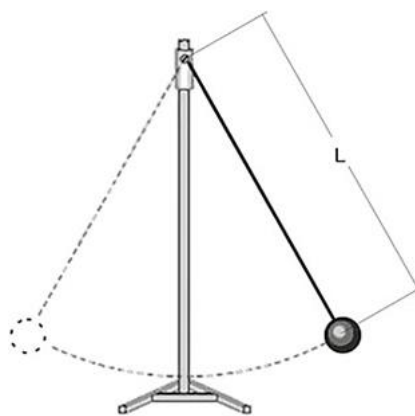


Figura 28: pendolo semplice

2.16 Il pendolo fisico (o composto)

Il pendolo fisico è “*un corpo rigido di forma qualsiasi che oscilla attorno a un'asse orizzontale fisso senza passare per il suo baricentro*”. Differentemente dal pendolo semplice, nel pendolo fisico la massa è distribuita su tutto il corpo esteso. Per oscillazioni piccole l'equazione del moto dipende dal momento torcente della forza peso e il periodo dipende dal momento di inerzia (cioè da come la massa è distribuita rispetto al punto in cui il pendolo è appeso), dalla massa totale, dalla gravità e dalla distanza tra il perno e il baricentro dell'oggetto:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgd}}$$

Dove:

- I è il momento d'inerzia rispetto all'asse di rotazione;
- m la massa;
- g la gravità;
- d la distanza tra il perno e il baricentro.

Il pendolo fisico detto anche composto è uno strumento che tra l'altro permette di misurare il momento di inerzia di oggetti diversi e per la misura dell'accelerazione di gravità. Un esempio semplice di pendolo composto può essere realizzato facendo oscillare una riga o un righello forato intorno ad un asse perpendicolare al foro. Esempio di pendoli composti sono le altalene e tante strutture oscillanti ed è utile sapere che ad ogni pendolo composto può essere associato un equivalente pendolo semplice che oscilla con la stessa frequenza.

2.17 Fenomeni ondulatori: oscillazioni forzate e risonanza

Nella realtà di tutti i giorni, i moti oscillatori non durano per sempre: a causa delle forze di attrito e della dissipazione dell'energia, le oscillazioni tendono a rimpicciolirsi fino a fermarsi (moto smorzato). Per mantenere un'oscillazione costante nel tempo è necessario rifornire continuamente il sistema dell'energia che perde. Questo si fa applicando una forza esterna regolare, esattamente come

facciamo quando diamo una spinta ad un bambino su un'altalena per non farlo fermare. Se questa forza esterna è periodica, parliamo di oscillazioni forzate.

Quando più onde si incontrano nello stesso spazio, si originano fenomeni di interferenza. L'interferenza può essere:

- costruttiva (rinforzo): quando la cresta di un'onda coincide con la cresta dell'altra, quindi le ampiezze si sommano e producono un'onda di maggiore intensità
- distruttiva (elisione): quando la cresta di un'onda si sovrappone alla valle di un'altra, quindi gli effetti si riducono e possono anche annullarsi se hanno identica ampiezza.

Un caso speciale e potentissimo di interferenza costruttiva è la risonanza: un fenomeno che si verifica quando un sistema viene sollecitato da una forza esterna la cui frequenza coincide esattamente con la frequenza di oscillazione caratteristica del sistema stesso, il sistema e la forza esterna entrano in sintonia, la forza esterna fornisce energia al sistema e produce un aumento considerevole dell'ampiezza di oscillazione. Tornando all'esempio dell'altalena, se diamo la spinta proprio nel momento in cui l'altalena si trova nel punto più alto e sta per scendere, la nostra spinta “va a tempo” con il moto naturale, trasformando il massimo dell'energia e facendo aumentare tantissimo l'ampiezza del movimento.

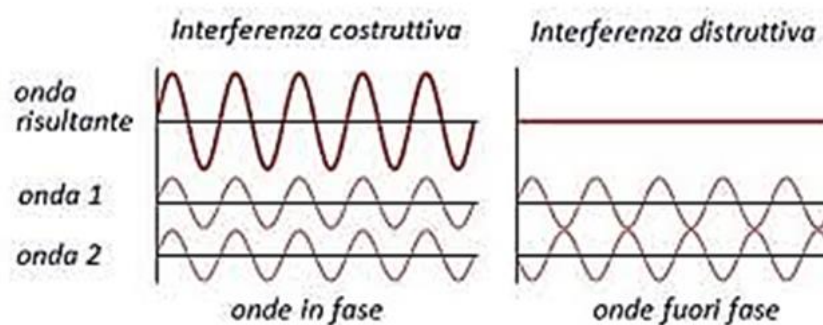


Figura 29: fenomeno dell'interferenza

Un esempio classico di questo fenomeno, che abbiamo realizzato in laboratorio, è la risonanza con due pendoli uguali: quando un diapason viene

colpito e inizia a vibrare produce delle onde sonore. Se queste onde sonore colpiscono un altro diapason, per risonanza esso comincerà a vibrare a sua volta.



Figura 30: risonanza con due diapason alla frequenza della nota La_3 (440Hz)

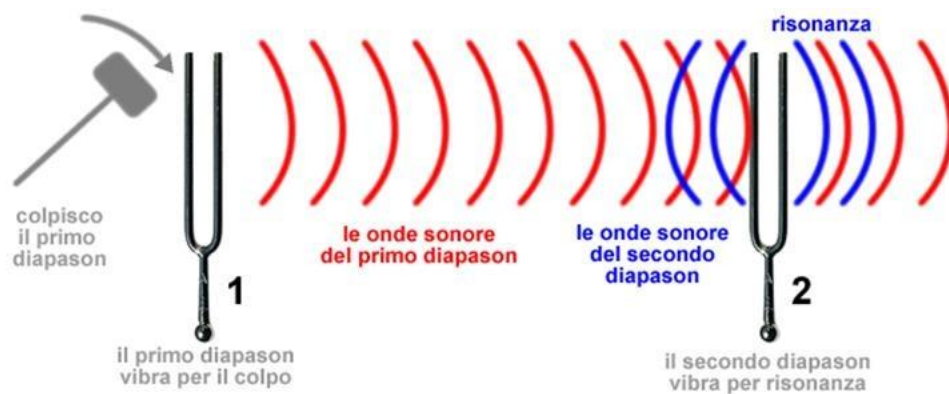


Figura 31: rappresentazione della risonanza con due diapason

Un altro esperimento che abbiamo potuto mettere in pratica in laboratorio per osservare le oscillazioni forzate e la risonanza sono stati i pendoli di Barton.

Per allestire questo esperimento, abbiamo teso una corda orizzontale tra due sostegni stabili e vi abbiamo appeso diversi pendoli costruiti semplicemente con dello spago e delle sfere di piombo come masse, disponendoli in modo da alternare le loro lunghezze.

Mettendo in movimento un pendolo abbiamo dimostrato visivamente il principio della risonanza: le oscillazioni si sono trasmesse lungo la corda comune, ma solo il pendolo che condivideva la stessa lunghezza di quello messo

in moto ha iniziato a muoversi, mentre tutti gli altri avendo frequenze naturali diverse sono rimasti immobili.

Dal punto di vista energetico si assiste a un continuo passaggio di energia tra i due corpi in sintonia:

- il pendolo motore oscillando cede gradualmente la sua energia all'altro pendolo tramite la corda;
- man mano che il secondo pendolo acquista ampiezza, il pendolo motore perde vigore fino al punto di fermarsi quasi del tutto, mentre l'altro oscilla alla sua massima ampiezza;
- una volta completato il trasferimento il processo si inverte: il secondo pendolo inizia a restituire energia al motore, facendolo ripartire e rallenta fino a fermarsi a sua volta.

Questo passaggio energetico, in Fisica, è una proprietà tipica degli oscillatori accoppiati. Se operassimo in una condizione ideale e teorica, si verificherebbe un moto perpetuo e l'energia continuerebbe a viaggiare da un pendolo all'altro all'infinito. Nella realtà del nostro laboratorio, invece, abbiamo dovuto fare i conti con i fattori dissipativi: gli attriti con l'aria e le frizioni dello spago sul punto di aggancio, che sottraggono costantemente energia meccanica al sistema trasformandolo in calore; di conseguenza l'ampiezza totale diminuisce fino a quando tutto il sistema si ferma.

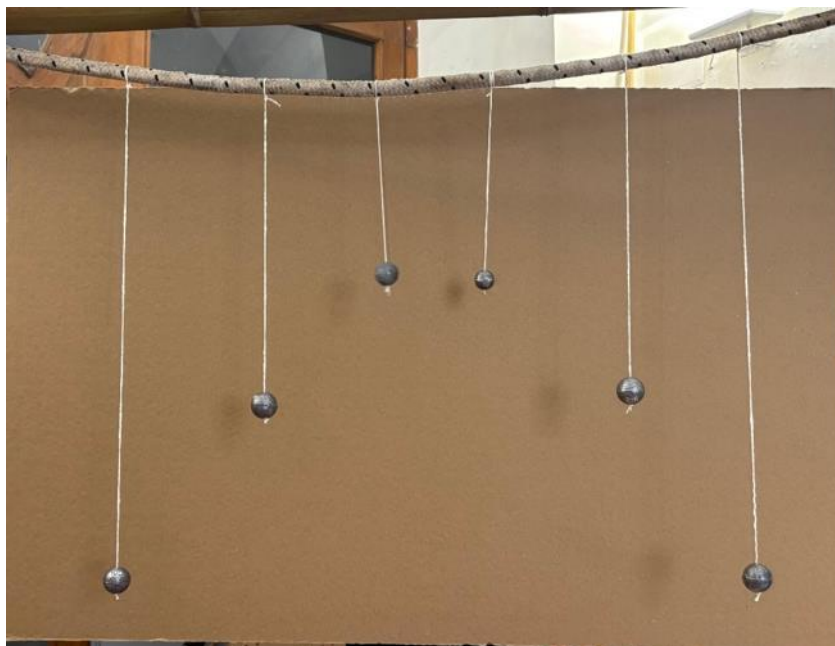


Figura 32:pendoli di Barton costruiti da noi in laboratorio

2.18 Applicazione pratica: il metronomo

Un esempio classico di pendolo composto è il metronomo meccanico, lo strumento utilizzato dai musicisti per mantenere il tempo. Funziona come un pendolo capovolto dotato di una massa fissa nella parte bassa e di una massa che scorre lungo un'asta; su una scala graduata è indicata la frequenza in corrispondenza della posizione della massa mobile rispetto a quella fissa. Spostando la massa lungo l'asta si cambia la distribuzione della massa del sistema, modificando così il momento di inerzia e la posizione del baricentro.

Il metronomo, quindi, mette in gioco i concetti fisici di energia potenziale, energia cinetica e legge di conservazione dell'energia. Il peso o il bilanciere quando vengono caricati o sollevati accumulano energia potenziale che si trasforma in energia cinetica non appena inizia il movimento. Il trasferimento ciclico di energia permette un'oscillazione regolare che garantisce un battito costante nel tempo. Inoltre, il movimento del pendolo è anche influenzato dall'attrito e dalla gravità: l'attrito ne rallenta il movimento oscillatorio in maniera microscopica, garantendo un movimento fluido; la gravità richiama costantemente il pendolo o il peso verso il basso, fornendo la forza di richiamo necessaria per consentire l'oscillazione.



Figura 33: il metronomo da noi utilizzato a scuola

Come abbiamo visto in laboratorio, se si attivano due o più metronomi con la stessa frequenza, di 176 bpm nel nostro caso, ma in momenti diversi e li si appoggia su una superficie rigida ogni metronomo batte autonomamente e quindi tra di loro sono asincroni. Se invece vengono posti su una base mobile, sempre aventi stessa frequenza, come ad esempio una tavoletta sospesa o appoggiata su rulli o lattine, il moto di ogni pendolo trasmette una piccola forza alla base che oscillando agisce come un mezzo di comunicazione tra i metronomi che, influenzandosi l'uno con l'altro tramite risonanza, cominciano in breve tempo ad oscillare perfettamente all'unisono. I nostri metronomi si sono sincronizzati dopo circa 19 secondi⁹.

⁹ <https://www.youtube.com/watch?v=fce197oxwMY>

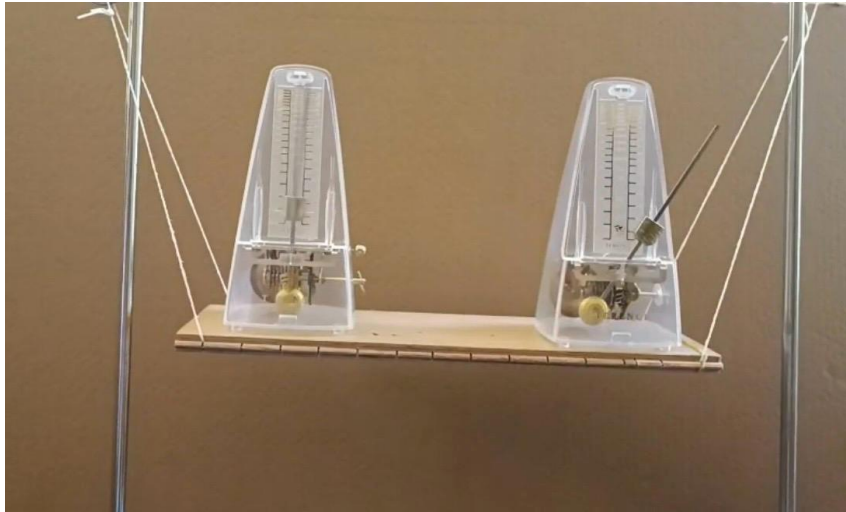


Figura 34: due metronomi asincroni alla frequenza di 176 bpm su una tavoletta sospesa

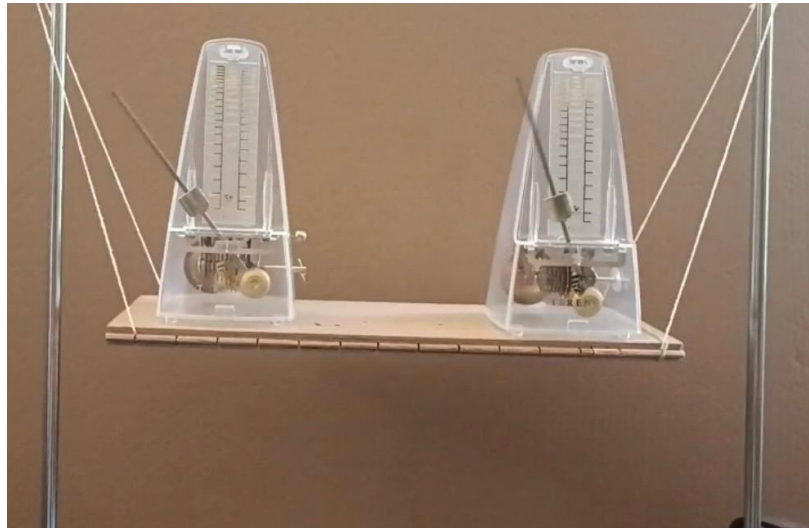


Figura 35: i due metronomi si sono sincronizzati dopo circa 19 secondi

Capitolo 3 – La sperimentazione in classe: quando il senso comune incontra la Fisica

3.1 Introduzione al percorso laboratoriale

Il presente capitolo è dedicato alla narrazione e all'analisi critica dell'intervento didattico da me svolto all'interno delle ventidue classi quarte della Scuola Primaria coinvolte nel progetto "MusEdu- Arte e Scienza tra Scuola e Museo" in qualità di esperta del percorso di Scienze. L'obiettivo principale della sperimentazione non è stato quello di "insegnare la Fisica" in senso stretto, ma di creare le condizioni adatte affinché i bambini potessero “fare esperienza” della Fisica e costruire le proprie conoscenze attraverso l'osservazione, l'ipotesi, la manipolazione ed anche l'errore.

L'aula per ogni bambino si è dunque trasformata in un vero e proprio laboratorio scientifico. Insieme alla mia collega ho assunto il ruolo di mediatrice didattica con l'intento di innescare quello che Piaget definisce "conflitto cognitivo"¹⁰: la messa in crisi dei preconcetti infantili (il senso comune) per fare spazio a una nuova e più rigorosa comprensione della realtà fisica, al fine di formalizzare scientificamente le intuizioni di cui i bambini sono portatori.

Il progetto vede inseriti nelle attività gli alunni che appartengono a istituti comprensivi della cintura esterna, cioè ad un contesto sociale e culturale difficile.

Essi hanno partecipato a due laboratori di due ore ciascuno in classe in orario scolastico e a un'uscita di circa due ore, avendo l'occasione di venire a contatto con studenti di Scienze della Formazione Primaria dell'università Bicocca, che li hanno coinvolti in laboratori di Fisica e di Arte. Due esperti individuati dalla Fondazione, si sono occupati della formazione degli studenti universitari e degli insegnanti presenti nelle classi coinvolte nel progetto, affinché fossero in grado di seguire e supportare gli alunni.

Nell'anno scolastico 2025/2026 il progetto MusEdu è stato messo in atto, per la prima volta, anche a Napoli, grazie al supporto finanziario del gruppo Brightstar e all'intervento dell'associazione Progetto Museo. La selezione delle

¹⁰ Jean Piaget, *L'equilibrizzazione delle strutture cognitive: problema centrale dello sviluppo*, Torino, Boringhieri, 1981

giovani operatrici è stata effettuata presso l'Università degli Studi Suor Orsola Benincasa di Napoli, e ha visto il coinvolgimento di dodici studentesse iscritte al quinto anno al corso di laurea in Scienze della Formazione Primaria.

Il progetto a Napoli è stato attuato con la stessa struttura metodologica del progetto milanese: anche in questo caso l'obiettivo principale è stato il contrasto alla povertà educativa in contesti sociali e culturali difficili, per cui sono state coinvolte le scuole della città con più alta dispersione scolastica e con una platea più "a rischio".

Gli Istituti Comprensivi coinvolti sono stati quattro per un totale di 44 classi (22 classi terze e 22 classi quarte):

- I.C. Confalonieri-Ristori (quartiere Pendino);
- I.C. Alpi-Levi (quartiere Scampia);
- I.C. Radice-Sanzio-Ammaturo (area Poggioreale e San Carlo all'Arena);
- I.C. 17 Angiulli (area sanità e Borgo dei Vergini).

I percorsi si sono conclusi con uscite didattiche presso due storiche istituzioni napoletane: il Museo e Real Bosco di Capodimonte per le classi terze che hanno partecipato al percorso di Arte, e il museo scientifico Città della Scienza di Bagnoli per le classi quarte partecipanti al percorso di Scienze.

3.1.1 La selezione

Alla fine di ottobre 2025, dopo aver presentato la mia candidatura, ho ricevuto la convocazione per un "incontro collettivo di selezione", fissato per i primi giorni di novembre. La ricezione di quella mail ha generato in me un'immediata apprensione, legata alla naturale ansia di dover superare un processo valutativo. Ricordo nitidamente il momento dell'arrivo in Università quel giorno di novembre: fuori dall'aula con le altre colleghe condividevo un forte senso di preoccupazione perché tutte immaginavamo di dover affrontare un colloquio frontale, simile a un classico esame universitario, in cui saremmo state interrogate singolarmente da una commissione.

Il nostro timore, però, è stato ribaltato dalla realtà. Con grande sorpresa, siamo state invitate a entrare nell'aula tutte insieme: le sedie erano disposte in cerchio e sulla cattedra erano poggiati materiali creativi. Tra la commissione

erano presenti le formatrici; Roberta Viscardi, docente a contratto in corsi di Didattica della Fisica e della Matematica presso la nostra Università, e Cira Maddaloni, educatrice e coordinatrice del polo territoriale delle arti visive dell'associazione Maestri di Strada e presidente dell'associazione EST. Insieme alla commissione, ci hanno accolto con un calore che ha subito stemperato la tensione, creando un clima disteso e rassicurante.

Per “rompere il ghiaccio” e favorire la coesione del gruppo, ci sono state proposte delle attività introduttive. Abbiamo scritto i nostri nomi su dello scotch carta che abbiamo attaccato sui vestiti in un punto visibile e, a turno, ci siamo presentate associando al nostro nome un gesto simbolico con le mani. Nel mio caso, coerentemente con la mia natura scaramantica, ho scelto il classico gesto delle “corna”.

Sono seguite attività basate sull'interazione e la fiducia reciproca, come il muoversi nello spazio ad occhi chiusi cercando di non urtarsi o il camminare, sempre ad occhi chiusi, affidandosi alla guida di una collega. Essendo caratterialmente timida e temendo di risultare impacciata, ho inizialmente provato un certo disagio. Tuttavia, la consapevolezza di essere lì per mettermi in gioco autenticamente ha prevalso e mi sono quindi lasciata andare. È stata un'esperienza profondamente positiva, agevolata, poi, dalla maturazione della consapevolezza che in quel momento eravamo tutte ugualmente disorientate, vulnerabili e sotto osservazione.

Successivamente, Roberta ci ha mostrato un esperimento di Fisica posizionando della schiuma da barba all'interno di una campana a vuoto.

Ci ha chiesto di formulare delle ipotesi su cosa sarebbe accaduto azionando la pompa per sottrarre l'aria dalla campana. Contrariamente a quanto si potrebbe intuire, abbiamo osservato come la diminuzione della pressione dell'aria all'interno della campana permettesse al gas intrappolato nella schiuma di espandersi, facendola gonfiare, per poi collassare solo al momento della reintroduzione dell'aria. Questo esperimento denominato “le forme dell'assenza” ci ha dimostrato che togliendo l'aria le forme cambiano, e spesso in maniera poco intuitiva.

Terminata la dimostrazione di Fisica, siamo state casualmente suddivise in piccoli gruppi per affrontare una sfida di progettazione creativa. Ci è stato detto:

Immaginate che tutti i colori del mondo siano scomparsi. Il vostro gruppo è stato scelto per scoprirne uno nuovo: un colore che non esiste nella realtà, ma che deve avere un significato, una sensazione, una storia. Rendetelo percepibile con i mezzi che avete: materiali, parole, suoni, movimento, oggetti, metafore. L'obiettivo non è semplicemente descriverlo, ma farlo vivere agli altri.

Insieme ad altre tre colleghe ho esplorato e rielaborato tutti i materiali messi a disposizione (tempere, torce colorate, palline di polistirolo, fili, carta, perline, fogli di alluminio...) per dare forma ad un concetto astratto che rimandasse alla “tranquillità”. Al momento della restituzione collettiva, durante la quale dovevamo condividere con gli altri gruppi l’idea sviluppata, abbiamo scelto di agire sull’ambiente: spegnendo le luci dell’aula, io ho assunto il ruolo di voce narrante per guidare le altre partecipanti attraverso l’esperienza sensoriale e simbolica che avevamo costruito.

Alcuni giorni dopo la prova collettiva, ho ricevuto la comunicazione di ammissione al progetto e ciò ha suscitato in me una profonda gratitudine e un grande orgoglio personale. Essere stata scelta dopo essermi messa realmente in gioco ha rappresentato un’importante “iniezione” di fiducia in me stessa. Fin dal primo istante questa gioia si è unita a un forte senso di responsabilità verso un progetto educativo in cui credo fermamente, consapevole dell’impatto che avrebbe avuto sui bambini dei contesti coinvolti.

3.1.2 La formazione

Il nostro percorso formativo è stato strutturato in tre incontri: il primo ci ha riunite tutte insieme, il secondo e terzo si sono svolti in laboratorio soltanto per noi operatrici del percorso scientifico. A questi incontri sono succeduti altri quattro, due per ogni laboratorio, tenuti in una classe in cui abbiamo sia assistito all’attuazione da parte di Roberta, sia all’attuazione da parte nostra con la supervisione della nostra formatrice.

Coerentemente con l'anima del progetto il primo incontro ci ha visto coinvolte in un'attività pratica, pensata non solo per trasmettere competenze tecniche ma anche per tessere relazioni e consolidare le dinamiche del gruppo.

Abbiamo sperimentato in prima persona la metodologia laboratoriale cardine dell'intero intervento didattico: il learning by doing.

L'attività è stata dedicata alla cianotipia¹¹, inventata dall'astronomo e chimico inglese John Herschel, che è un'antica tecnica di stampa fotografica a contatto che sfrutta la fotosensibilità di due sali di ferro: il citrato ferrico ammoniacale e il ferricianuro di potassio. Quando queste due sostanze vengono miscelate e stese su un supporto poroso (come la carta), creano una superficie sensibile ai raggi ultravioletti (UV) del sole. Durante l'esposizione al sole, le parti coperte dagli oggetti schermano i raggi solari: i sali rimangono inalterati e idrosolubili, venendo poi lavati via con della semplice acqua. Al contrario, le aree esposte direttamente alla luce subiscono una reazione fotochimica di ossidazione trasformandosi in un pigmento permanente e insolubile, caratterizzato da una tonalità brillante e caratteristica, il blu di Prussia.

Dopo l'introduzione teorica su questo affascinante fenomeno siamo passate all'azione. A ciascuna di noi è stato fornito un cartoncino precedentemente sensibilizzato e abbiamo potuto comporre il nostro "negativo" personalizzato scegliendo tra immagini stampate su plastica ed elementi botanici (foglie, fiori, rametti) raccolti da noi stesse nel giardino dell'Università. Il processo pratico si è articolato in diverse fasi:

1. la composizione: abbiamo adagiato gli elementi scelti sul cartoncino sensibilizzato creando una composizione;
2. il fissaggio e l'esposizione: abbiamo sigillato la composizione sovrapponendo un foglio di plastica trasparente e bloccando il tutto con delle mollette. Le composizioni sono state poi posizionate sulle scale dell'università esposte alla luce diretta del sole;
3. l'attesa: il tempo trascorso in attesa della reazione, caratterizzato da curiosità e trepidazione;

¹¹ <https://it.wikipedia.org/wiki/Cianotipia>

4. lo sviluppo (lavaggio e ossidazione): trascorso il tempo necessario abbiamo recuperato i fogli e li abbiamo sciacquati sotto l'acqua corrente. Versando l'acqua ossigenata sul foglio bagnato, la reazione di ossidazione ha subito un'accelerazione facendo affiorare il colore azzurro e definendo i contorni bianchi dei nostri elementi.

Rientrate in aula, abbiamo dedicato l'ultima parte dell'incontro alla condivisione nella quale a turno ciascuna di noi ha raccontato la propria composizione. Questo si è rivelato un momento denso di emotività: attraverso la mediazione della materia visiva e delle scelte compositive, ognuna di noi ha impresso sul foglio qualcosa di personale e significativo. Questa esperienza ci ha dimostrato concretamente come l'incontro tra rigore scientifico e libera espressione possa farsi veicolo di narrazioni identitarie, preparandoci a guidare i bambini verso lo stesso tipo di rivelazione.



Figura 36: materiali a disposizione



Figura 37: le nostre composizioni sulle scale mentre avviene la reazione con il sole



Figura 38: le nostre composizioni dopo essere state sciacquate e bagnate con l'acqua ossigenata mostrando il risultato finale

I successivi incontri di formazione sono stati realizzati separatamente per i due percorsi disciplinari, ciascuno condotto dalla rispettiva esperta.

Il percorso di formazione dei laboratori di Scienze al quale ho partecipato si è articolato in due incontri accademici configurati come veri e propri laboratori di sperimentazione diretta in prima persona. Sotto la guida e la supervisione della formatrice Roberta abbiamo analizzato e testato preventivamente i due moduli didattici destinati alle classi quarte: il laboratorio sul rotolamento dei barattoli dal titolo “barattoli in movimento” e quello sull’oscillazione dei pendoli dal titolo “non perdere il ritmo”.

Un elemento metodologico importante è stato rappresentato dalla successione tra la simulazione in laboratorio accademico e l’osservazione diretta in classe. Prima di dare inizio alla conduzione dei laboratori in autonomia, abbiamo preso parte a quattro incontri di formazione proprio all’interno delle classi (anche in questo caso, due per il primo laboratorio e due per il secondo), in cui la nostra formatrice ci ha prima mostrato come attuare il laboratorio in classe e poi un altro giorno ci ha osservato metterlo in pratica.

Questa metodologia ci ha permesso di osservare la formatrice agire direttamente nel contesto di applicazione, avendo la possibilità di notare e interiorizzare elementi relativi alla gestione delle complesse dinamiche relazionali del gruppo classe, degli spazi e del tempo a disposizione, ma soprattutto all’organizzazione logistica della distribuzione dei materiali. Da questi momenti di formazione in classe, è emersa la questione legata alla necessità di umanizzare e avvicinare ai bambini la figura dello scienziato; poi l’attenzione è stata spostata sulla cinematica e sulla dinamica dei corpi coinvolti nelle attività laboratoriali.

Nel primo incontro di formazione presso il laboratorio dell’Università, la nostra formatrice Roberta ci ha introdotto le attività ponendoci una domanda apparentemente semplice: “*Secondo voi, se lascio cadere dalla stessa altezza una penna e una piuma, quale toccherà prima terra?*” Tutte quante noi abbiamo risposto immediatamente ed intuitivamente: “La penna! Perché è più pesante!” Per validare questa ipotesi e verificare se la massa fosse l’unica variabile a determinare la velocità di caduta, Roberta ha disposto una tavola di legno su una

sedia, formando un piano inclinato, e vi ha fatto rotolare due barattoli di plastica identici nella forma, ma di massa differente essendo uno vuoto (contenente aria) ed uno parzialmente riempito con acqua. Prima di lasciar rotolare i due barattoli lungo il piano inclinato, ci è stato chiesto nuovamente di prevedere l'ordine di arrivo, e noi coerentemente con il nostro precedente schema interpretativo, abbiamo ipotizzato che sarebbe arrivato prima il barattolo contenente acqua in virtù della sua massa maggiore. E così è stato!

Ma la questione non era del tutto risolta e per farci comprendere che la nostra intuizione non fosse del tutto valida, la formatrice ha introdotto una nuova variabile, riempiendo il barattolo con alcuni fagioli secchi. Anche in questo caso ci è stata chiesta una previsione e poiché era quasi impossibile basarsi sui nostri sensi e pesare i barattoli “con le mani”, abbiamo proceduto ad una misurazione oggettiva dei barattoli mediante una bilancia e stabilito che il barattolo riempito con i fagioli presentava una massa maggiore (260g) rispetto a quello contenente acqua (200g). Abbiamo quindi nuovamente ipotizzato che il barattolo con i fagioli sarebbe arrivato prima, in quanto più “pesante” ma, osservando l'esperimento...così non è stato!

Le nostre certezze intuitive sono crollate e ci hanno spinto ad interrogarci sul fatto che la velocità di rotolamento dipendesse da altre variabili diverse dalla sola massa. Abbiamo pertanto ripetuto più volte l'esperimento cambiando i materiali e le quantità all'interno dei barattoli (riso, farina e acqua) e siamo giunte alla conclusione che: a parità di altezza e inclinazione del piano, la velocità di discesa dei barattoli varia in relazione alla forma, alla granularità e allo stato fisico del materiale contenuto al suo interno.

È stato inoltre interessante notare come la dispersione di energia si manifestasse anche sotto forma di energia sonora, cioè i barattoli producevano rumore durante il loro rotolamento e ciò a causa dell'attrito interno dei materiali.

Al termine della sessione sperimentale, la formatrice ci ha fornito precise indicazioni didattiche per calibrare il registro linguistico da adottare con gli alunni:

- sostituire il termine “scivolamento” con “rotolamento” per definire correttamente il moto analizzato;

- utilizzare l'espressione "arriva prima" al posto di "vince" o "arriva per primo" per eliminare la dimensione agonistica e la competizione e focalizzare l'attenzione dei bambini sul fenomeno fisico.

Lo scopo principale del progetto non è la memorizzazione di formule o risposte definitive ma la capacità di generare domande, alimentare la curiosità e promuovere il desiderio di scoprire perché le cose accadono e funzionano in un determinato modo. Confrontandoci tra noi operatrici è emerso il timore che i bambini, durante la fase di condivisione finale, non arrivassero a comprendere la correlazione tra velocità e natura del materiale interno, ma la nostra formatrice ci ha fatto comprendere lo spessore pedagogico della didattica laboratoriale ovvero promuovere la consapevolezza metacognitiva del processo, l'analisi dell'errore e la co-costruzione di senso; tutte finalità che prescindono dal raggiungimento di un "risultato finale" o di un punto preciso di conoscenza che si mira a raggiungere. Di qui l'idea secondo la quale non esistano degli interventi laboratoriali che "riescano" ed altri che "non riescano", ma piuttosto si tratta di garantire a tutti e a ciascuno molteplici possibilità di accedere ai concetti e di offrire loro gli strumenti necessari per sostenere la progressione nella costruzione del pensiero scientifico.

Dopo aver ricevuto gli insegnamenti da Roberta, abbiamo assistito ad una sperimentazione da lei tenuta in una classe: ciò ci ha permesso di renderci conto ancora di più dell'impatto della sperimentazione stessa sui bambini e ci ha reso più consapevoli e sicure nell'affrontare in autonomia i successivi sei incontri.

Il secondo incontro di formazione, sempre svoltosi all'interno del laboratorio di Fisica dell'Università, è stato incentrato sul concetto di ritmo e sulle leggi fisiche del moto oscillatorio.

La formazione ha preso il via da una riflessione sulla natura del ritmo, su come viene percepito (lento/veloce) e sulla presenza di strutture ritmiche nella vita quotidiana. Coerentemente con i principi che ho individuato nell'*embodied cognition* (cognizione incarnata) abbiamo concettualizzato il ritmo attraverso i nostri corpi: prima ci siamo numerate dicendo ad alta voce il numero a noi corrispondente, poi abbiamo battuto le mani ogni volta che veniva detto il

numero tre o un suo multiplo, e infine abbiamo esclamato “BUM!” ogni volta che dicevamo il numero quattro o un suo multiplo.

Successivamente la formatrice ha introdotto l’oggetto principale del secondo laboratorio: un pendolo rudimentale composto da uno spago a cui era legato un dado di metallo.

Facendolo oscillare avanti e indietro, e in maniera lenta e veloce, Roberta ha subito evidenziato come il tremore della sua mano o altri fattori potessero interferire con il fenomeno e abbiamo quindi riconosciuto la necessità di ancorarlo ad un supporto fisso. Dopo esserci divise nelle “solite” coppie, Roberta ci ha consegnato il nuovo materiale: tre travi di legno preforate, viti filettate e dadi a farfalla, due morsetti metallici, mollette fermacarte e tre pendoli (due formati da dadi di massa uguale ed uno differente). Ci siamo diverte a montare il sostegno in legno seguendo le istruzioni stampate su un foglio e vi abbiamo agganciato i pendoli. Quando abbiamo fatto oscillare i pendoli, Roberta ci ha chiesto di capire quale fattore ne influenzasse la velocità, cominciando così la nostra sperimentazione: avendo dadi di due differenti grandezze e masse, a turno, abbiamo effettuato delle prove escludendo una variabile alla volta (grandezza del dado o lunghezza del filo) giungendo, così, alla conclusione che la velocità di oscillazione non dipendesse dalla massa del bullone ma esclusivamente dalla lunghezza del filo (più corto=più veloce).

Appurato ciò, Roberta ha introdotto il metronomo ed il suo funzionamento, basato sullo spostamento lungo l'asta graduata del pesetto che ne determina la velocità di oscillazione. Abbiamo impostato il metronomo alla frequenza di 80 battiti al minuto e ad esso ogni coppia ha sincronizzato un pendolo, che doveva compiere 80 semi oscillazioni, operando sulla variabile determinante (lunghezza dello spago); per poi annotarla e condividerla con le altre colleghe al fine di confrontare le misure.

Al fine di validare ulteriormente la corretta sincronizzazione abbiamo utilizzato un altro strumento di misura, il cronometro: misurando il tempo e contando le oscillazioni compiute in un minuto, abbiamo verificato se il nostro pendolo fosse realmente sincronizzato, per quanto possibile, ovvero se stesse compiendo 80 semi oscillazioni al minuto.

Ancora una volta, l'osservazione della sperimentazione in classe condotta da Roberta ci ha permesso di capire come attuare al meglio questo laboratorio.

Contemporaneamente al nostro percorso anche le docenti presenti in classe nelle ore del Progetto hanno partecipato a incontri di formazione: questo ha permesso di creare una forte continuità pedagogica contribuendo ad elevare il valore dell'intera esperienza.

3.2 Le Metodologie didattiche: costruire il Sapere attraverso l'inchiesta

Un aspetto che ho particolarmente apprezzato del progetto MusEdu è l'attenzione data non ad una semplice esposizione dei contenuti, ma ad una reale integrazione di metodologie attive che hanno trasformato il gruppo classe in una comunità di ricerca. Ho potuto constatare che queste metodologie rispondono alla necessità di superare la "didattica della risposta" a favore di una "didattica della domanda", dove il centro del processo è l'alunno con le sue intuizioni e i suoi errori.

3.2.1 L'approccio IBSE (*Inquiry-Based Science Education*) e il ciclo delle "5E"

Una metodologia di riferimento è stata l'*IBSE*, un approccio pedagogico che promuove l'apprendimento delle Scienze attraverso l'indagine. Invece di presentare la legge Fisica come un dato immutabile, i bambini sono stati guidati attraverso le fasi tipiche della ricerca scientifica. In particolare, le attività sono state declinate seguendo il modello delle "5E":

1. *Engage* (Coinvolgimento): attraverso la domanda: «tra una pietra e una piuma, secondo voi, chi arriva prima a terra?», è stata catturata l'attenzione dei bambini, stimolando la curiosità e facendo emergere le loro conoscenze pregresse;
2. *Explore* (Esplorazione): la fase manipolativa con i barattoli contenenti riso o fagioli e la costruzione dei pendoli, ha permesso ai bambini di testare direttamente le grandezze variabili (peso, lunghezza, materiale);

3. *Explain* (Spiegazione): solo dopo l'esperienza diretta, i bambini hanno provato a dare una spiegazione ai fenomeni (es. «*I fagioli sbattono e rallentano*»), introducendo gradualmente il lessico specifico;
4. *Elaborate* (Elaborazione): durante lo svolgimento del primo laboratorio è stato richiesto esplicitamente ai bambini di annotare su dei fogli a quadrettoni i pesi dei barattoli e le osservazioni relative al loro rotolamento. Al termine del laboratorio ai bambini è stato chiesto di rielaborare liberamente, mantenendo i gruppi di lavoro, l'esperienza della sperimentazione su un cartellone bianco. Questa pratica ha però creato un precedente e una precisa aspettativa: nel secondo laboratorio, infatti, non essendo prevista la raccolta dei dati, i bambini si sono mostrati disorientati e hanno richiesto dei fogli per poter prendere appunti. Per far fronte a questa loro esigenza io e la mia collega abbiamo deciso di riadattare la metodologia in itinere, registrando i nuovi dati (lunghezza del pendolo e oscillazioni al minuto) in modo collettivo e condiviso direttamente sulla LIM;
5. *Evaluate* (Valutazione): pur non essendo stata prevista una fase di valutazione formale e strutturata, i bambini hanno potuto acquisire coscienza del proprio percorso di apprendimento sia in itinere, attraverso il costante confronto tra pari all'interno dei piccoli gruppi di lavoro, sia nei momenti di discussione e restituzione finale in grande gruppo.

3.2.2 Il Costruzionismo di Papert e gli "oggetti per pensare"

Particolare attenzione è stata data al "Costruzionismo"¹², teorizzato da Seymour Papert. Secondo questa teoria, l'apprendimento è più efficace quando avviene durante la costruzione di un oggetto tangibile: in accordo con questo principio i barattoli e le impalcature del pendolo non sono stati semplici sussidi, ma veri e propri "oggetti per pensare": montare il supporto del pendolo con le proprie mani ha permesso ai bambini di comprendere la stabilità non come concetto astratto, ma come necessità meccanica per far funzionare lo

¹² Seymour Papert, *Mindstorms. Bambini, computer e creatività*, Milano, Emme Edizioni, 1984.

strumento. In questo modo, la conoscenza "entra nelle dita" prima di arrivare alla mente.

3.2.3 Il *Role-Playing* e la trasfigurazione dell'identità: "essere" scienziati per apprendere la scienza

Sotto il profilo motivazionale e della gestione del gruppo un'altra metodologia che rientra tra le più efficaci, è stata l'applicazione del *Role-Playing* (gioco di ruolo).

Il *Role-Playing* non va inteso come una semplice recitazione, ma come una tecnica di simulazione che permette al soggetto di "abitare" un ruolo diverso dal proprio, esplorandone le regole, il linguaggio e la "postura" culturale.

L'atto simbolico di consegnare e far indossare il *badge* da scienziato ha rappresentato il *turning point* dell'intero intervento: attraverso questo dispositivo, secondo me è stato creato quello che Huizinga definisce un "cerchio magico"¹³, cioè uno spazio-tempo pedagogico in cui le regole della quotidianità scolastica vengono sospese per far posto alle regole del metodo scientifico.

L'efficacia di questa metodologia si è palesata in tre direzioni fondamentali:

1. Potenziamento dell'identità e dell'autostima: in un contesto di fragilità sociale e povertà educativa, offrire a un bambino la possibilità di definirsi "scienziato" significa compiere un atto di giustizia sociale. Il *Role-playing* ha permesso agli alunni di distaccarsi da eventuali etichette negative (il bambino "vivace", quello "svogliato", quello "lento") per assumere un'identità di alto valore intellettuale. La frase «*Aspetta, sto scientizzando!*» testimonia come il bambino non stessee solo eseguendo un compito, ma stessee attuando una performance identitaria: agiva, parlava e pensava "da scienziato".
2. Autoregolazione del comportamento: il ruolo dello scienziato impone intrinsecamente il rigore, la precisione e il silenzio osservativo. Si è potuto notare come, una volta indossato il tesserino, il caos nei gruppi sia diminuito drasticamente e come siano stati gli stessi bambini a richiamarsi all'ordine utilizzando la cornice del ruolo:

¹³ Huizinga, Johan, *Homo ludens*, Torino, Einaudi, 1946

«Fai silenzio, sennò non sentiamo il rumore del pendolo, uno scienziato deve ascoltare!».

In questo senso, il *Role-playing* ha agito come uno strumento di gestione della classe (*classroom management*) estremamente raffinato, poiché le regole non sono state imposte dall'alto (docente), ma sono scaturite dalla coerenza interna del personaggio interpretato.

3. Distanziamento cognitivo: interpretare un ruolo permette al bambino di guardare il problema con occhi diversi. Se "io bambino" posso aver paura di sbagliare o di non saper pesare correttamente, "io scienziato" vedo l'errore come un dato da registrare sulla tabella. Il *Role-playing* favorisce quindi quel distanziamento emotivo necessario per affrontare il conflitto cognitivo senza frustrazione, trasformando la sfida didattica in un'avventura professionale simulata.

Per comprendere appieno la portata di questa metodologia pedagogica, risulta utile mettere a confronto il rigore cognitivo e comportamentale richiesto all'alunno nella didattica trasmissiva tradizionale rispetto a quello promosso dalle nostre proposte didattiche di stampo laboratoriale:

Tabella 3: confronto didattica trasmissiva tradizionale e Role-playing scientifico

Dimensione pedagogica	Ruolo dell'alunno nella "Didattica trasmissiva tradizionale"	Ruolo dell'alunno nel "Role-playing scientifico"
Postura cognitiva	Ricettiva e passiva: ascolta la spiegazione del docente, memorizza la regola e cerca di riprodurla fedelmente.	Attiva e generativa: ipotizza, agisce, misura, deduce la regola dall'esperienza pratica e dal conflitto cognitivo.

Gestione dell'errore	Sanzionatoria: l'errore è temuto, vissuto come un fallimento personale e un indicatore di incapacità.	Epistemologica: l'errore è una risorsa, un dato sperimentale da registrare (es. <i>«la misura non torna, riproviamo»</i>) essenziale per correggere l'ipotesi.
Dimensione relazionale	Individualistica e competitiva: il bambino lavora da solo sul proprio quaderno; l'aiuto del compagno è spesso visto come "copiare".	Cooperativa e sociale: il bambino opera in un <i>team</i> di ricerca, divide i compiti (<i>scaffolding</i> tra pari) e si confronta costantemente per arrivare a una sintesi.
<i>Locus of control</i> ¹⁴	Esterno: la validazione della risposta dipende esclusivamente dall'approvazione dell'insegnante (<i>«Maestra, ho fatto bene?»</i>).	Interno/strumentale: la validazione dipende dall'evidenza sperimentale e dalla misurazione con gli strumenti (la bilancia, il cronometro) e non dal giudizio dell'adulto.

In sintesi, l'integrazione di questa metodologia ha permesso di trasformare l'aula in un laboratorio di Fisica in cui ha avuto luogo un'esperienza di apprendimento situato dove la conoscenza non è stata "trasmessa", ma "agita" all'interno di una cornice narrativa potente e coinvolgente.

¹⁴ https://it.wikipedia.org/wiki/Locus_of_control

3.2.4 Scaffolding Sociale e Cooperative Learning

Nell'attuazione delle attività, significativo è stato il riferimento al pensiero di Vygotskij: le mie colleghe ed io siamo intervenute nell'intento di collocarci nella "zona di sviluppo prossimale"¹⁵ dei bambini. Il lavoro in piccolo gruppo ha attivato forme di *scaffolding* sociale: i bambini che avevano intuito per primi come tarare la bilancia o come contare le oscillazioni hanno supportato i loro compagni. Non si è trattato di un semplice aiuto o di una prevaricazione, ma di una co-costruzione del sapere, dove il linguaggio dei pari ha fatto da ponte tra il senso comune e il linguaggio scientifico (durante il secondo laboratorio sul pendolo è capitato che un bambino dicesse al suo compagno, non sapendo come definirlo, «*passami il ciondolo più grande*» intendendo il filo con all'estremità legato il bullone di massa maggiore).

Questo approccio metodologico, unito all'uso di materiali destrutturati e manipolativi (come riso, fagioli e contenitori di alluminio utilizzati nel primo laboratorio), ha permesso di gestire la platea eterogenea delle classi, includendo anche gli alunni con Bisogni Educativi Speciali che, nella dimensione pratica, hanno trovato canali espressivi meno frustranti rispetto alla lezione frontale. Tale flessibilità didattica si è rivelata per noi fondamentale: pur non essendo state preventivamente informate della presenza di alunni BES, la fluidità dell'organizzazione spaziale e la natura versatile dei materiali ci ha consentito di adattare e ricalibrare le attività in itinere. Ad esempio, il laboratorio per due bambini nello spettro autistico è stato personalizzato in base ai loro bisogni sensoriali: per il primo, attratto dai suoni e dalla musica, i barattoli sono stati trasformati in maracas; per il secondo, è stata strutturata un'attività di travaso (riempire e svuotare i contenitori), valorizzando la funzione rassicurante e formativa della manipolazione.

3.3 Traguardi per lo Sviluppo delle Competenze

Il progetto è stato realizzato in stretta coerenza con i principi e le finalità delineati dalle "Indicazioni Nazionali per il Curricolo della scuola dell'Infanzia

¹⁵ Lev S. Vygotskij, *Il processo cognitivo*, Torino, Boringhieri, 1980.

e del Primo ciclo d'Istruzione (2012/2018)¹⁶”, puntando alla mobilitazione di conoscenze, abilità e atteggiamenti e raggiungendo traguardi che non riguardano solo la Fisica, ma lo sviluppo integrale della persona.

Nello specifico il percorso laboratoriale si pone in forte continuità con i seguenti aspetti cardine:

- l'esplorazione attiva della realtà e il superamento della visione “ingenua” (area Scienze): l'incoraggiamento ad un approccio investigativo che guida l'alunno a superare le misconcezioni dettate dal senso comune, per giungere ad una prima strutturazione del pensiero scientifico attraverso l'osservazione e la formulazione di ipotesi;
- l'acquisizione di linguaggi specifici e procedure di misura (area Matematico-Scientifica): l'introduzione graduale al rigore procedurale, all'uso di strumenti di indagine standardizzati e all'appropriazione di un lessico rigoroso per descrivere i fenomeni fisici;
- la consapevolezza metacognitiva (“Imparare ad imparare”): la promozione di un atteggiamento di ricerca caratterizzato da curiosità, capacità di porre domande e riflettere sui propri processi cognitivi e logici;
- l'educazione alla Cittadinanza e l'Inclusione: la valorizzazione dell'apprendimento collaborativo, il rispetto delle regole all'interno di una “comunità di ricerca” e l'utilizzo del sapere come strumento di emancipazione culturale e sociale in contesti di fragilità.

3.3.1 Esplorare i fenomeni con un approccio scientifico

Il traguardo principale individuato in questo progetto è stato lo sviluppo della capacità di osservare i fenomeni della realtà con occhio critico. Gli alunni hanno imparato che la realtà non sempre si comporta come ci aspetteremmo sulla base del senso comune o dell'esperienza quotidiana. La nostra abitudine, porta a credere intuitivamente che un oggetto più pesante arrivi sempre per primo;

¹⁶ Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, *Indicazioni nazionali per il curriculum della scuola dell'infanzia e del primo ciclo d'istruzione*, Roma, Miur, 2012.
Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, *Indicazioni nazionali e nuovi scenari*, Roma, Miur, 2018.

tuttavia, esplorando attivamente il fenomeno e osservando specifiche variabili, i bambini si sono resi conto che questa convinzione “ingenua” non è sempre valida. Questa presa di consapevolezza ha permesso loro di interiorizzare il concetto che la Scienza richiede un metodo rigoroso di indagine per essere validata.

- Competenza acquisita: l'alunno è in grado di formulare ipotesi sulla base delle osservazioni e di testarle attraverso esperimenti controllati.

3.3.2 Utilizzo di strumenti, misure e linguaggi specifici

Un altro traguardo importante è stato l'approccio alla misura. I bambini hanno imparato che "pesare" non è solo una parola, ma un'azione che richiede uno strumento (la bilancia), un'unità di misura (il grammo) e un rigore procedurale. Lo stesso è avvenuto per il tempo (cronometro) e lo spazio (metro).

- Competenza acquisita: l'alunno utilizza strumenti di misura comuni per investigare i fenomeni e comincia a utilizzare un linguaggio specifico (peso, forza, tempo, oscillazione) per descrivere le proprie scoperte.

3.3.3 Sviluppo di un atteggiamento di curiosità e rigore

Oltre a consentire ai bambini di avvicinarsi, di sperimentare e di cominciare a conoscere alcuni contenuti scientifici, si è cercato di innescare in loro lo sviluppo della “passione per la scoperta”. Il progetto MusEdu ha mirato a trasformare la paura dell'errore nella gioia della ricerca. La frase «*Sto scientizzando*» è la prova del raggiungimento di una competenza metacognitiva: il bambino è consapevole di stare usando il proprio pensiero in modo logico e strutturato.

- Competenza acquisita: l'alunno riconosce le principali caratteristiche dei fenomeni fisici analizzati e mostra un atteggiamento curioso e proattivo verso il mondo circostante, cercando spiegazioni che vadano oltre l'ovvio.

3.3.4 Cittadinanza e Inclusione sociale attraverso la Scienza

Nei contesti di fragilità educativa come quelli degli Istituti coinvolti, un altro traguardo implicito ma potentissimo è stato quello della Cittadinanza

Scientifica. Dare ai bambini gli strumenti per capire il "come" e il "perché" delle cose significa dar loro fiducia nelle proprie capacità intellettive, offrendo un riscatto culturale che combatte l'emarginazione.

- Competenza acquisita: l'alunno collabora con i compagni, rispetta le regole della comunità di ricerca e comprende il valore della conoscenza come strumento di crescita personale e collettiva.

3.3.5 Sviluppo dell'identità e dell'autonomia

Il progetto, inoltre, ha tentato di operare un ribaltamento della prospettiva didattica, restituendo all'alunno la *agency* (l'agentività), ovvero la consapevolezza di essere l'attore principale del proprio processo di apprendimento. Non si è trattato di "eseguire" un esperimento, ma di "vivere" un'esperienza di ricerca in prima persona.

- Competenza acquisita: l'alunno consolida la propria identità personale e scolastica, sviluppando una positiva fiducia nelle proprie capacità. Sperimenta la presa di iniziativa e l'autonomia operativa, impara a tollerare la frustrazione dell'imprevisto (il pendolo che non oscilla a tempo, il barattolo che scivola anziché rotolare) e si riconosce come membro attivo e responsabile di una comunità scientifica e sociale.

3.4 I mediatori didattici: dai supporti fisici alla concettualizzazione

Secondo la teorizzazione di Elio Damiano¹⁷, l'insegnamento non è una trasmissione diretta del sapere, ma un'attività di "mediazione" che agisce tra il soggetto che apprende e l'oggetto della conoscenza. Per favorire il passaggio dal senso comune alla conoscenza scientifica, è stato utilizzato un sistema integrato di mediatori, capaci di "sostituire" la realtà astratta della Fisica con una realtà manipolabile, iconica e simbolica.

¹⁷ Elio Damiano, *La mediazione didattica. Per una teoria dell'insegnamento*, Milano, FrancoAngeli, 2013

3.4.1 Mediatori attivi: l'esperienza diretta come motore della scoperta

I mediatori attivi sono stati il fulcro della nostra sperimentazione. Essi consistono nell'esperienza diretta, nel "fare" che precede il "dire". L'uso dei barattoli (vuoti, con acqua, con riso o fagioli), del piano inclinato costruito con materiali semplici (sedie e assi di legno) e del pendolo (dadi, spaghi e morsetti) ha permesso ai bambini di interagire fisicamente con le forze di gravità, attrito e tensione.

L'efficacia di questi mediatori risiede nella loro "intransigenza": a differenza di una spiegazione verbale, l'oggetto fisico non negozia. Se il barattolo con i fagioli rallenta, il bambino riceve un *feedback* immediato e inconfutabile della realtà. Questa interazione sensoriale è ciò che permette la costruzione di quello che Jon Ogborn definisce "immaginazione transazionale", ovvero la capacità di pensare il mondo attraverso le sue risposte concrete.

3.4.2 Mediatori analogici: il Role-Playing e la simulazione

Come già approfondito nel paragrafo dedicato alla metodologia, il *Role-playing* è stato un potente mediatore analogico perché attraverso l'investitura a "scienziati" e l'uso dei tesserini, i bambini hanno simulato un contesto professionale. Il mediatore analogico ha avuto la funzione di rendere "vicino" e comprensibile un mondo che sarebbe stato altrimenti distante. Quindi, interpretando il ruolo, l'alunno non solo ha imparato la Fisica ma ha sperimentato in prima persona le relazioni, le responsabilità e i processi mentali tipici di chi fa Scienza: questa simulazione ha garantito un alto livello di coinvolgimento emotivo, essenziale per la persistenza dell'apprendimento.

3.4.3 Mediatori iconici: la rappresentazione grafica

Per consolidare l'esperienza e favorire la riflessione, sono stati introdotti mediatori iconici, ovvero rappresentazioni visive della realtà sperimentata.

- Il *badge*: il bambino dopo averlo disegnato lo ha indossato al collo;
- I cartelloni: la creazione di cartelloni di gruppo ha permesso di "fissare" l'evento fluido del laboratorio in un'immagine statica su cui tornare a riflettere collettivamente.

3.4.4 Mediatori simbolici: il linguaggio e la misura

Infine, il percorso è approdato ai mediatori simbolici, che rappresentano il massimo grado di astrazione e di allontanamento dalla realtà fisica.

- Le tabelle e i numeri: il passaggio dal "pesa tanto/poco" al valore numerico della bilancia (es. 260 g vs 208 g) o al numero di oscillazioni misurate dal cronometro rappresenta l'ingresso nel linguaggio convenzionale della Scienza;
- Il lessico specifico: termini come "attrito", "gravità", "oscillazione" e "isocronismo" sono stati introdotti come "etichette" per concetti già messi in atto attraverso gli altri mediatori. In questo modo, il simbolo (la parola o la formula) non è un guscio vuoto, ma il culmine di un percorso di significazione che parte dal corpo e arriva alla mente.

L'integrazione di questi quattro tipi di mediatori ha assicurato ad ogni bambino, indipendentemente dal proprio stile di apprendimento o dalle proprie fragilità linguistiche, di poter trovare un canale d'accesso alla complessità del sapere fisico, trasformando l'aula in un ecosistema formativo ricco e stratificato.

3.5 L'identità dello scienziato e l'esplorazione del senso comune

Appena entrate in ogni classe la mia collega ed io ci siamo presentate alle maestre che hanno chiesto ai bambini di mettere subito via i quaderni, interrompere quello che stavano facendo e prestare a noi la loro attenzione. Ho percepito sempre la loro eccitazione ed emozione («*Eccole! Sono loro!*», «*Sono arrivate!*») e siccome era fondamentale per noi stabilire un patto educativo e motivazionale con la classe, chiedevamo loro di aiutarci a spostare i banchi per preparare insieme lo spazio necessario per le nostre attività.

Poi ci sedevamo a terra con i bambini disponendoci in *circle time* ed esordivamo presentandoci in una veste insolita per loro:

«Noi siamo delle scienziate e abbiamo dei dubbi riguardo un esperimento che abbiamo fatto, perciò siamo venute qui per farci aiutare da voi. Siete pronti a diventare insieme a noi dei piccoli scienziati? Ma soprattutto, secondo voi, cos'è la Scienza?».

Questa introduzione aveva un duplice scopo: in primo luogo, attivare la "sfida ottimale" ingaggiando i bambini non come recettori passivi, ma come co-ricercatori essenziali per la risoluzione di un problema; in secondo luogo, ci permetteva di mappare il loro "zoo ontologico" di partenza.

Le risposte raccolte sono state uno spaccato affascinante del senso comune infantile, intriso di vissuti quotidiani, fantasia e magia. Qui di seguito riporto quelle che mi hanno maggiormente colpito:

- «*Per me la scienza è l'acqua che passa da ghiaccio, a liquida, a goccioline*» (un'intuizione chiaramente legata ai passaggi di stato e all'esperienza visiva).
- «*Per me gli scienziati sono quelli che fanno le pozioni nei laboratori*»
«*Per fare gli esperimenti ci servono le provette*»
(l'influenza dell'immaginario fiabesco e televisivo).
- «*Per me la scienza riguarda i pianeti e le stelle*»
(l'associazione classica tra Scienza e Astronomia).
- «*Per me la scienza è il vento e la pioggia*»
(la Scienza come spiegazione dei fenomeni atmosferici).

Per sancire formalmente l'ingresso in questa nuova dimensione, abbiamo chiesto ai bambini di realizzare un tesserino identificativo (*badge*) scrivendo il proprio nome e disegnando la loro idea di Scienza e per metterci in gioco ai loro occhi, esattamente come loro, anche noi abbiamo disegnato un *badge* che poi abbiamo indossato. Questo gesto simbolico, un vero e proprio *Role-playing*, ha avuto un impatto straordinario sull'autocontrollo e sull'attenzione della classe perché indossare il *badge* al collo ha immediatamente fatto calare i bambini nel ruolo di scienziati come se avessero indossato un'altra identità con il suo rigore e la sua professionalità.



Figura 39: alunni in cerchio mentre creano il badge

3.5.1 Il primo conflitto cognitivo: il sasso, la piuma e la gravità

Prima di passare all'esperimento con i barattoli, formulavo agli alunni una domanda provocatoria per testare le loro intuizioni sulla Cinematica e sulla Dinamica delle cadute: *«Bimbi, secondo voi, se lasciassi cadere dalle mie mani una piuma e un sasso quale arriverebbe prima a terra?»*

I bambini hanno risposto in coro, con una sicurezza disarmante:

- *«Ovviamente, il sasso! Perché è la gravità!»*
- *«La piuma svolazza di qua e di là, arriva domani maestra!»*
- *«La piuma la butta su il vento perché ha meno peso!»*
- *«La pietra arriva prima perché è più pesante!»*

In queste affermazioni emerge chiaramente come i bambini assorbano termini scientifici dal contesto, ma li applichino secondo la logica del senso comune: la gravità è percepita non come un'accelerazione costante universale, ma come una forza che agisce in proporzione diretta al peso percepito; il sasso cade prima non per via dell'assenza di attrito aerodinamico sulla sua superficie rispetto alla piuma, ma semplicemente perché "pesa di più". Questo preconcetto (il corpo più pesante cade/arriva prima) rappresenta l'assunto aristotelico per

eccellenza, ed è esattamente ciò che il nostro esperimento sui piani inclinati si proponeva di confutare.

3.6 Il laboratorio sui barattoli rotolanti e la destrutturazione dell'ovvio

Successivamente è stata rivolta ai bambini un'altra domanda chiave: *«Sapete cos'è un piano inclinato?»*

Anche in questo caso i bambini hanno dato le loro risposte, alternando espressioni linguistiche comuni a espressioni “più scientifiche”.

- *«Quello così maestra!»* (mentre mimava una diagonale con le mani)
- *«Come la discesa!»*

Dopo aver dato voce alle loro risposte, gli proponevo: *«Adesso lo costruiamo insieme, usando una tavola di legno ed una sedia.»*



Figura 40: esempio di piano inclinato

Anche qui l'entusiasmo dei bambini era immediato:

- *«Maestra! Ma è uno scivolo!»*

dimostrando anche in questo caso come il setting sperimentale fosse da loro immediatamente associato ad un'esperienza motoria a loro ben nota. In Fisica, il piano inclinato permette di "diluire" la gravità, riducendo l'accelerazione dei corpi e rendendo i fenomeni di rotolamento e scivolamento più lenti e misurabili a occhio nudo.

3.6.1 Primo test: barattolo vuoto vs. barattolo con acqua

Per prima cosa ho preso un barattolo di plastica, che essendo trasparente suscitava immediatamente nei bambini la preoccupazione che fosse di vetro e quindi fragile, e ho chiesto loro se sapessero cosa fosse.

Poi ho preso due barattoli di plastica identici, ma uno vuoto e uno riempito con acqua, e ho chiesto loro: *«Secondo voi, se lasciassimo insieme questi due barattoli senza spingerli e li facessimo rotolare sullo scivolo, chi arriverebbe prima? E perché?»*

Seguendo la logica del sasso e della piuma, i bambini hanno ipotizzato con grande certezza:

- *«Maestra ma è ovvio, arriva prima quello con l'acqua!».*

Le giustificazioni erano altamente creative:

- *«L'acqua fa un vortice!»*
- *«L'acqua fa come un piccolo tornado dentro al barattolo e arriva prima!».*
- *«Arriva prima l'acqua perché è liquida!»*
- *«Prima l'acqua perché si espande nei lati!»*
- *«Il barattolo con l'acqua perché ha più peso!»*
- *«Nell'acqua c'è più gravità!»*

Al momento del rilascio dei barattoli, le loro ipotesi si rivelavano corrette: il barattolo con l'acqua arrivava prima.

Anche in questo caso il loro entusiasmo era disarmante:

- *«Ma era ovvio maestra, te l'avevo detto!»,* esclamavano in coro.

Questo momento è stato pedagogicamente cruciale: abbiamo permesso al senso comune di trovare una temporanea conferma, creando una zona di comfort prima di innescare la vera rottura epistemologica.

3.6.2 Secondo test: barattolo con acqua vs. barattolo con fagioli

Per rompere la logica del "più pesante = più veloce", introducevo un elemento di “disturbo”: riempivo un ulteriore barattolo vuoto con fagioli secchi.

Quindi chiedevo loro cosa sarebbe successo lasciando rotolare il barattolo con l'acqua e quello con i fagioli.

A questo punto, cominciavano a manifestarsi le prime crepe nelle loro certezze e i bambini si dividevano dando vari tipi di risposta:

- *«Secondo me i fagioli pesano troppo quindi rallentano il barattolo, l'acqua va più veloce.»*
- *«Non lo so maestra, secondo me arrivano prima i fagioli perché sono più pesanti, per lo stesso discorso del sasso no?»*

Al rilascio dei barattoli, i bambini hanno potuto notare che il barattolo con l'acqua vinceva la “gara” in modo netto e lo stupore calava sulla classe perché non riuscivano a spiegarsi il fenomeno. Per evitare che la discussione finisse in mere supposizioni visive, introducevo uno strumento di misura: la bilancia. Spiegavo l'uso e la taratura in grammi, pesavo i due barattoli di fronte a loro e la bilancia dava un verdetto inequivocabile: il barattolo con i fagioli pesava di più di quello con l'acqua. Nonostante fosse il più pesante, arrivava “secondo”. L'incredulità ha portato alla verbalizzazione del conflitto cognitivo:

- *«Ma non succedeva sempre che quello più pesante arrivava prima perché spingeva di più?».*

L'impianto teorico aristotelico dei bambini così crollava.

3.6.3 La sperimentazione autonoma in piccolo gruppo

A questo punto, sfruttando la sospensione del giudizio ("suspence"), i bambini sono stati divisi in piccoli gruppi da quattro-cinque alunni ciascuno e gli sono stati consegnati i materiali necessari per la sperimentazione (esclusivamente dopo aver spiegato loro il fine della sperimentazione in quanto abbiamo imparato che una volta consegnato il materiale i bambini tendono a distrarsi e a non ascoltare più altre indicazioni): barattoli vuoti, postazioni con

riso e fagioli, una bilancia, un pannello di legno e dei fogli a quadrettoni per le annotazioni. La consegna era aperta: *«Adesso dovete cercare di osservare, con vari esperimenti, se è vero che arriva sempre il più pesante, il più leggero o a volte uno e a volte un altro. Buon lavoro!»*

Il lavoro di gruppo attivava immediatamente uno *scaffolding* sociale spontaneo: la collaborazione non era imposta, ma nasceva naturalmente dal bisogno concreto di risolvere problemi tecnici dividendosi gli incarichi.

Durante la sperimentazione, noi esperte abbiamo assunto un ruolo periferico, limitandoci a porre domande orientative (*«Se giriamo o alziamo la tavola che succede?»*).



Figura 41: alunni mentre riempiono i barattoli



Figura 42: alunna mentre annota i pesi dei barattoli



Figura 43: alunni mentre fanno rotolare i barattoli sul piano inclinato

Le voci dei bambini durante questa fase sono state la testimonianza più vivida dell'avvenuto passaggio da un apprendimento passivo a un'esplorazione rigorosa:

- *«Devo separare un po' i barattoli sennò si incrociano quando rotolano.»*
«Arrivano insieme dobbiamo levarne un poco.»
(Controllo delle variabili sperimentali).
- *«Ma il riso non ha rotolato!»*
«Scivola, aumentiamo i fagioli.»
«Non ha rotolato è troppo leggero.»
(Osservazione della differenza tra rotolamento e scivolamento puro).
- *«Spostiamo la bilancia da questo banco che si muove»*
«Non muovere il banco che cambia tutto!»
(Consapevolezza dell'errore di misura e necessità di un *setting* stabile).
- *«Aspetta, sto scientizzando!»*
«Ho fatto il pesamento.»
(Coniazione di neologismi che indicano l'interiorizzazione profonda dell'azione scientifica e della misurazione come atto identitario).
- *«I fagioli sono di meno e fanno più rumore.»*
(Osservazione della dissipazione di energia).
- *«Ho chiuso bene il barattolo?»*
(Manifestazione di rigore metodologico).
- *«Non è che poi mentre scende si apre? È troppo pieno!»*
(Capacità di previsione e valutazione del rischio).
- *«Vieni a vedere dalla mia visuale!»*
(Invito alla validazione tra pari).

Molti gruppi, presi dal fervore della misurazione, hanno pesato non solo i barattoli, ma anche quaderni, penne, borracce, singoli chicchi di riso e persino le proprie mani! Questo ha dimostrato come lo strumento tecnologico (la bilancia), se lasciato all'esplorazione libera, diventi una "protesi cognitiva" per interrogare interamente il mondo circostante.

3.6.4 L'analisi fisica e la restituzione collettiva

L'attività di sperimentazione in gruppo si concludeva con una fase di restituzione, nella quale un portavoce per ciascun gruppo condivideva i dati annotati sui fogli riguardo il fenomeno analizzato.



Figura 44: alunni durante la restituzione di gruppo

La parola chiave emersa spontaneamente dai bambini è stata "dimensione" o "grandezza" degli ingredienti. Questo ci ha permesso di istituzionalizzare il sapere scientifico, operando una trasposizione didattica complessa.

Dal punto di vista fisico, la dinamica dei barattoli sul piano inclinato non dipende dalla massa totale, ma da come l'energia potenziale gravitazionale si distribuisce tra energia cinetica traslazionale ed energia cinetica rotazionale, oltre che dall'attrito interno (dissipazione).

I bambini venivano guidati a comprendere che la velocità dipendeva dal "comportamento" dei materiali all'interno:

1. L'acqua: essendo un fluido con bassa viscosità, non è costretta a ruotare rigidamente con il barattolo, tende a scivolare all'interno (le molecole sono molto coese) frenando pochissimo la traslazione del contenitore. Tutta l'energia si trasforma in velocità di discesa.

2. I fagioli: sono corpi solidi grandi che durante il rotolamento, vengono sollevati e poi ricadono gli uni sugli altri, creando innumerevoli urti anelastici. Questi urti disperdono una quantità enorme di energia cinetica sotto forma di calore e suono (attrito interno), rallentando drasticamente il barattolo.
3. Il riso: ha chicchi molto più piccoli e fitti rispetto ai fagioli; quindi, disperde energia con urti minori in intensità rispetto ai fagioli. Pertanto, il barattolo con il riso arriva prima di quello con i fagioli.

La conclusione formulata dai bambini: *«a parità di peso, il riso arriva prima dei fagioli perché i chicchi piccoli frenano di meno»* ha rappresentato una sintesi perfetta tra l'intuizione visiva e la legge Fisica della dissipazione dell'energia.

3.6.5 La restituzione grafica e la paralisi creativa

Un momento di riflessione pedagogica fondamentale emergeva durante l'ultima fase: la restituzione su cartellone bianco. Veniva chiesto ai gruppi di rappresentare in forma libera ciò che li aveva maggiormente colpiti.



Figura 45: esempio di cartelloni (1)



Figura 46: esempio di cartellone (2)



Figura 47: esempio di cartelloni (3)

L'assenza di prescrizioni precise generava disorientamento e, in alcuni casi, una vera e propria paralisi:

- «Ma dobbiamo disegnare?»
- «Ci vuole il titolo?»
- «Dobbiamo fare un'unica rappresentazione di gruppo o ognuno qualcosa?»

- *«Maestra mi dici cosa devo fare?»*
- *«Ma non ci dai una consegna?»*
- *«Ma possiamo disegnare proprio tutto quello che vogliamo?»*
- *«Sta facendo bene così?»*

Queste reazioni ci hanno portato a riflettere sull'evidenza di una criticità del nostro sistema scolastico: fin dalla tenera età, i bambini vengono abituati all'esecuzione di compiti standardizzati, con cornici predefinite e regole ferree in cui la "paura di sbagliare" prende il posto della libera interpretazione. Il progetto MusEdu ha cercato di scardinare questa rigidità strutturale, ponendo l'errore non come elemento di giudizio (il "voto" rosso della maestra), ma come condizione imprescindibile del procedere scientifico. Rassicurati del fatto che non vi fosse un "modo giusto" o "sbagliato" di riempire il cartellone, i bambini infine si lasciavano andare a sintesi grafiche di grande potenza espressiva.

3.7 Il laboratorio sull'oscillazione e il pendolo

Il secondo laboratorio (talvolta svolto con classi diverse da quelle del primo laboratorio) ha spostato il focus dalla dinamica del rotolamento alla cinematica dell'oscillazione periodica e alla misurazione del tempo.

3.7.1 Il concetto di ritmo e la costruzione dello strumento

Anche in questo caso l'attività iniziava con la nostra presentazione ai bambini, ai quali rivolgevamo subito una domanda, dopo esserci seduti in cerchio come nel primo laboratorio.

«Cos'è secondo voi il ritmo?».

I bambini rispondevano sempre con grande entusiasmo, e come al solito con risposte più attinenti alla vita reale che non al linguaggio scientifico vero e proprio:

- *«Andare a tempo!»*,
- *«Battere le mani!»*,
- *«È qualcosa che si ripete!»*
- *«E' quello di una canzone!»*

- *«Come quando faccio beat box con i miei amici!»*
- *«Le rime!»*

che dimostravano tuttavia una comprensione intuitiva della periodicità. Per spiegare meglio il concetto di “periodicità”, la indicavo come qualcosa “che si ripete”: il compleanno, i giorni della settimana, le stagioni...

Poi per rafforzare il concetto, proponevo un gioco di numerazione corporea: dire i numeri ad alta voce, battere le mani sui multipli di tre, e aggiungere la parola "BUM!" sui multipli di quattro. La sovrapposizione ritmica permetteva ai bambini di "sentire" fisicamente la periodicità.

Successivamente, introducevo il pendolo.

Alla domanda se sapessero cos'è un pendolo, un bambino ha candidamente risposto:

- *«Cos'è? Una pentola?».*

Questa risposta mi ha inizialmente colpita e stupita per l'equivoco che il suono della parola provocava: poi però ho constatato, durante altri incontri in altre classi, che l'equivoco si ripeteva, segno di un retaggio dialettale a cui i bambini erano legati.

L'assenza di vocabolario specifico non è stata però un ostacolo perché subito i bambini riconoscevano l'oggetto quando tenevo in mano lo spago con attaccato il bullone e simulavo un'oscillazione; poi per maggiore chiarezza mostravo loro l'immagine di un orologio a pendolo sulla LIM:

- *«Ah, maestra! Mia nonna ce l'ha a casa!»*
- *«Ma è quello di Vecna!»*
- *«L'ho visto in un film!»*

Chiedevo loro di osservare il ritmo del pendolo rudimentale che reggevo in mano: i bambini subito notavano l'instabilità ("avanti/indietro", "lento/veloce") dovuta al tremolio del mio braccio (errore umano) e suggerivano delle soluzioni per renderlo più stabile:

- *«Appendiamolo!»*,
- *«Lo vogliamo agganciare alla porta?»*,
- *«Maestra su quel muro c'è un chiodino!»*.
- *«Puoi appenderlo sul filo!»*

facendo emergere quindi da loro stessi la necessità di un supporto fisso.



Figura 48: io mentre mostro il pendolo rudimentale agli alunni

In questa fase, applicando i dettami costruttivisti, fornivo ad ogni gruppo di quattro-cinque bambini tre fili di spago con all'estremità dei "bulloni" (o «burloni» come dicevano spesso i bambini) grandi e piccoli, un foglio di istruzioni testuali, aste di legno bloccate con degli elastici (anche qui c'era una difficoltà nella comprensione perché spesso li chiamavano «molle»), mollette per fermare lo spago al sostegno (con le quali hanno avuto molte difficoltà perché non riuscivano ad aprirle o incastrarle), viti filettate e morsetti. I bambini, cooperando tra loro, dovevano decodificare le istruzioni e montare l'impalcatura («ma lo dobbiamo tagliare il legno?»). Montare fisicamente la struttura permetteva loro di materializzare il problema: l'oggetto costruito non era solo legno e metallo, ma l'estensione tangibile del loro ragionamento logico. Inoltre, nelle istruzioni a loro fornite era contenuta la parola "predisponi", di cui puntualmente i bambini chiedevano il significato: tale parola era stata inserita nelle indicazioni di costruzione appositamente, per tarare il livello culturale degli alunni stessi.

Anche la distribuzione di dadi uguali tra di loro (due grandi ed uno piccolo o due piccoli ed uno grande) non è stata casuale ma è stata fatta affinché

i bambini avessero, in ogni caso, due dadi uguali e quindi potessero effettuare la loro sperimentazione considerando una variabile alla volta: cambiare la lunghezza del filo mantenendo i dadi della stessa grandezza e massa, cambiare la grandezza del dado mantenendo il filo della stessa lunghezza o addirittura confrontare dadi differenti per forma e massa, con fili di lunghezze differenti.

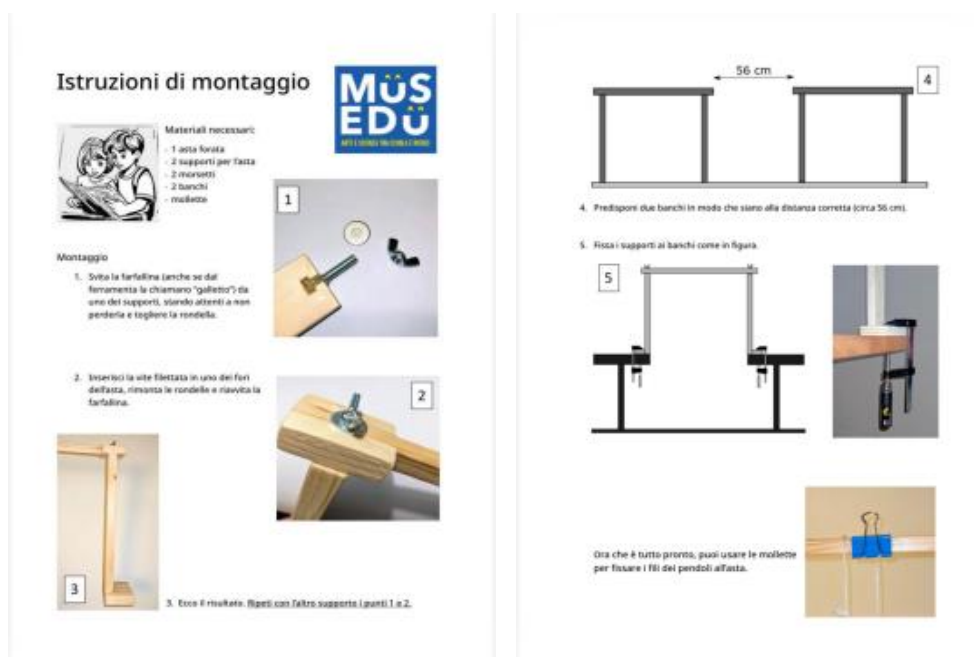


Figura 49-52: istruzioni



Figura 50: alunni mentre leggono le istruzioni



Figura 51: alunni mentre montano il sostegno del pendolo



Figura 52: alunni durante la sperimentazione del pendolo

3.7.2 La scoperta dell'isocronismo

La domanda che ponevo per iniziare la nostra sperimentazione era precisa: *«Come faccio a costruire un pendolo più veloce o uno più lento?»*.

Le intuizioni iniziali dei bambini, ancora una volta viziate dal senso comune della gravità proporzionale alla massa, vertevano sul peso:

- *«Lo slancio del bullone dipende dal peso.»*
- *«Il più corto provoca meno peso.»*
- *«Il più lungo va più lontano quindi ci mette più tempo a ritornare.»*

Dopo venti minuti di prove, errori, accorciamenti e allungamenti dello spago, la discussione in grande gruppo portava alla rivelazione galileiana: la velocità del pendolo (il suo periodo di oscillazione) non dipende dalla massa del bullone appeso, ma esclusivamente dalla lunghezza del filo (che i bambini chiamavano "altezza").

Fisicamente, l'equazione del periodo del pendolo semplice dimostra esattamente questo:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

dove la massa m non compare nella formula.

I bambini sono arrivati così a dedurre una legge fisica della cinematica semplicemente smontando le loro stesse percezioni iniziali.

3.7.3 Sincronizzazione, metronomo e validazione matematica

L'ultimo step ha introdotto l'uso di strumenti professionali per la validazione quantitativa: per meglio spiegare il concetto di ritmo, mostravo loro un metronomo, chiedendo come al solito se sapessero cosa fosse e come funzionasse:

- *«Maestra io lo uso a chitarra!»*
- *«Ma cos'è?»*
- *«L'ho visto in un cartone»*
- *«Mio padre è un musicista e ce l'ha!»*
- *«Ma fa tic tac!»*



Figura 53: io mentre spiego il funzionamento del metronomo

Quindi spiegavo loro che si trattava di un metronomo “meccanico”, ovvero che funzionava senza l’uso di batterie ma si ricaricava a molla e che il suo funzionamento poteva essere associato a quello del pendolo: le sue oscillazioni simulavano il moto oscillatorio del pendolo, ma con una disposizione del pesetto al “contrario”. Qui, all’aumentare della lunghezza dell’asta (quella che nel pendolo era la lunghezza dello spago del dado) aumentava la velocità di oscillazione; il suo ticchettio era prodotto dall’ingranaggio che girava all’interno.

A questo punto impostavo un metronomo a 80 battiti per minuto (bpm), spiegando che il numero riportato sull’asta graduata, sul quale allineavo il pesetto, indicava il numero di oscillazioni che il metronomo compiva in un minuto. Poi davo loro la consegna di sincronizzare il suono prodotto dal metronomo (tic-tac) con il proprio pendolo costruito, modulando, dunque, la lunghezza del filo.



Figura 54: alunni mentre sincronizzano il pendolo con il metronomo

Una volta trovata la lunghezza del filo che sembrava più o meno permettere al pendolo di oscillare in sincronia con il ticchettio prodotto dal metronomo

(«Guarda è proprio perfetto, non lo vedi?», «Il mio pendolo va a tempo con il ritmo»), i bambini dovevano misurarla con il metro e comunicarla.



Figura 55: alunna mentre misura la lunghezza del pendolo

Pur non corrispondendo alla misura perfetta per la sincronizzazione (che noi operatrici conosceamo avendo effettuato le stesse prove durante la nostra formazione) le lunghezze registrate alla lavagna erano sorprendentemente simili tra tutti i gruppi, a dimostrare proprio una “sincronizzazione generale” nell’aula, come se tutti i pendoli fossero stati mossi da un’unica energia invisibile che consentiva loro di andare a ritmo.

Ma la scienza non si accontenta del "sembra uguale".

E quindi ho chiedevo: «Come facciamo a essere sicuri?».

Ricordando che 80 bpm significano ottanta oscillazioni al minuto, introducevo il cronometro. I bambini tornati alle postazioni e, in un silenzio carico di concentrazione, contavano le oscillazioni in sessanta secondi.

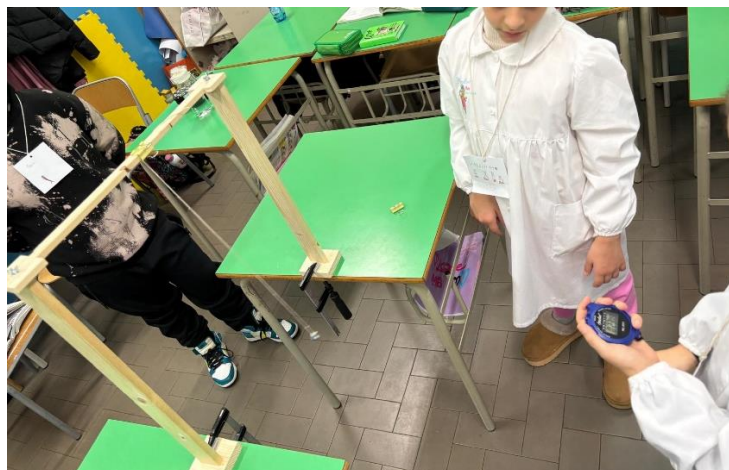


Figura 56: alunni usano il cronometro per contare le oscillazioni

I dati registrati in tabella confermavano le misure visive, con scarti minimi dovuti all'errore umano e alle variabili inevitabilmente presenti nella situazione sperimentale.

	lunghezza pendoli	
GRUPPO A	53 cm	80/min
GRUPPO B	43 cm	89/min
GRUPPO C	44 cm	86/min
GRUPPO D	48 cm	85/min

Figura 57: dati registrati sulla LIM

L'uso congiunto di metro, cronometro e metronomo permetteva agli alunni di comprendere il concetto di misurazione incrociata e di riproducibilità del dato sperimentale.

3.8 Le biglie di Newton

Alla conclusione di questa seconda sperimentazione in classe, diversamente da quella dei barattoli, non è stato chiesto ai bambini di elaborare su un cartellone un lavoro da restituire ma gli sono state presentate le “biglie di Newton”. Questo strumento, che dimostra perfettamente la legge della

conservazione della quantità di moto e dell'energia cinetica, ha affascinato sempre le classi. Alla vista delle sfere di acciaio che trasmettevano l'urto a distanza senza apparente movimento di quelle centrali, le reazioni sono state di puro stupore:

- «Sono magnetiche!»
- «Si attraggono!».
- «Ma come è possibile?!»

È stato spiegato loro che si trattava di "urti magici" (usando un linguaggio a loro affine per veicolare il concetto di trasferimento di energia) e che "il potere" dipendeva da quante biglie venivano sollevate inizialmente. Poi le poggiavo sulla cattedra in modo che potessero utilizzarle loro stessi: l'esplorazione libera di questo strumento ha lasciato una traccia profonda di meraviglia, dimostrando che la Fisica, quando sperimentata direttamente, possiede un fascino quasi illusionistico.



Figura 58: io mentre dimostro le biglie di Newton

3.10 Il culmine dell'esperienza MusEdu: la visita immersiva alla mostra "SensAzioni" presso Città della Scienza

La fase conclusiva e di consolidamento del progetto MusEdu ha trovato la sua ideale e naturale estensione al di fuori delle mura scolastiche, traducendosi

in un'uscita didattica ad alto valore culturale e sociale presso il museo di "Città della Scienza" in via Coroglio 57/104 a Napoli, specificamente dedicata alla visita della mostra interattiva "SensAzioni". Questa esperienza non si è configurata come un semplice momento ricreativo o isolato dal percorso curricolare, bensì come il coronamento strutturale dell'intero progetto finanziato dalla Fondazione De Agostini. L'essenza stessa di MusEdu, come già detto, risiede infatti nel contrasto alla povertà educativa e nel garantire il diritto all'accessibilità culturale, offrendo l'opportunità di fruire di spazi museali e scientifici d'eccellenza a quegli alunni che, per ragioni socioeconomiche o di marginalità periferica, ne sono normalmente privati. In questo scenario, la mostra "SensAzioni" si è presentata come un dispositivo pedagogico perfetto: un percorso interattivo composto da 34 *exhibit* multimediali e sensoriali espressamente progettati per favorire la riscoperta, il potenziamento e la consapevolezza delle abilità percettive umane, oggi drammaticamente sopite o mediate dall'abuso pervasivo delle tecnologie digitali.

L'orizzonte epistemologico della mostra si è sposato fedelmente con la filosofia dei laboratori precedentemente svolti in classe. Come evidenziato nelle linee guida dell'esposizione, la Fisica nelle sue molteplici branche, dall'Ottica all'Acustica, fino alla Meccanica e alla Fluidodinamica non è stata presentata come un insieme di nozioni astratte da recepire passivamente, ma come lo strumento d'elezione per comprendere il funzionamento del nostro sistema nervoso e i meccanismi attraverso i quali il cervello costruisce la percezione del mondo esterno. Il focus didattico è stato così radicalmente spostato dalla comprensione puramente razionale e dogmatica del fenomeno all'esperienza corporea diretta ed estetica. All'interno di questo contesto ludico, altamente stimolante e destrutturato, è decaduta la dicotomia valutativa, legittimando e valorizzando l'unicità della percezione soggettiva di ciascun bambino.

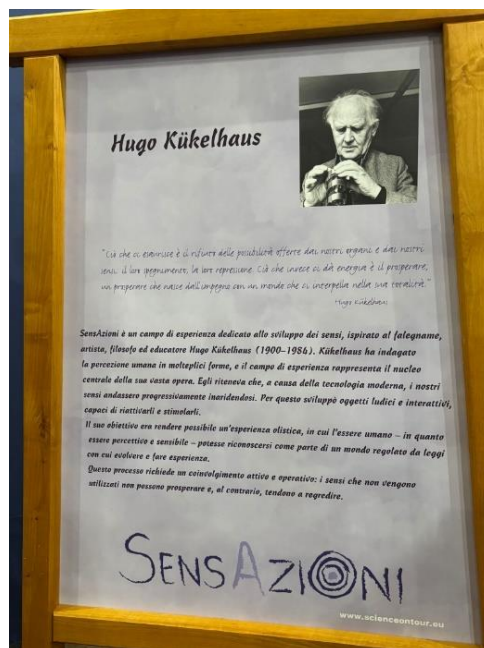


Figura 59: presentazione della mostra

Accompagnando le classi in qualità di figura di riferimento e di mediazione pedagogica, ho potuto osservare gli alunni interagire con i diversi dispositivi sotto la guida esperta degli operatori del museo che hanno strutturato un'azione di *scaffolding* verbale e procedurale che ha permesso ai bambini di esplorare attivamente le dieci sezioni tematiche della mostra (Vista, Tatto, Udito, Olfatto, Ascolto, Coordinazione, Illusioni ottiche, Ritmo, Equilibrio e Percezione sensoriale).

Nello specifico, l'itinerario laboratoriale ha visto i piccoli scienziati approcciarsi ad una serie di postazioni chiave, descritte di seguito nei loro dettagli fenomenologici e pedagogici:

1. Scatola tattile (isolamento e deduzione tattile): gli alunni si sono interfacciati con dei cubi sigillati al cui interno erano celati oggetti di uso comune o forme geometriche. Inserendo la mano attraverso un'apertura protetta, e privati del supporto della vista, i bambini hanno dovuto affidarsi esclusivamente alla discriminazione aptica e tattile (valutando texture, durezza, spigoli e dimensioni) per ricostruire mentalmente

l'identità dell'oggetto, attivando complessi processi di rappresentazione transmodale.



Figura 60: scatola tattile

2. Un bouquet profumato (discriminazione e memoria olfattiva): strutturati come installazioni cilindriche chiuse da dei tappi, questi *exhibit* custodivano ovatta impregnata di essenze e liquidi aromatici dalle fragranze contrastanti (gradevoli e sgradevoli). Sollecitando il senso dell'olfatto, i bambini sono stati chiamati a isolare e riconoscere le diverse sfumature odorose, legando lo stimolo chimico alla memoria autobiografica e alla verbalizzazione emozionale.



Figura 61: bouquet profumato

3. Pressa per bambini (esperienza corporea e proprioccezione): una struttura a rulli morbidi stretti all'interno della quale i bambini dovevano letteralmente strisciare e passare attraverso. Questa attività ha sollecitato la sfera della *deep pressure* (pressione profonda) e della consapevolezza dei confini corporei, offrendo un carico sensoriale che stimola la proprioccezione e l'orientamento nello spazio in condizioni di costrizione fisica.



Figura 62: pressa per bambini

4. La trave per l'equilibrio (controllo posturale e vestibolare): un classico ma efficace dispositivo meccanico che ha costretto i soggetti a misurarsi con la forza di gravità e con il mantenimento del proprio baricentro. L'esercizio ha evidenziato l'integrazione costante tra il sistema vestibolare (orecchio interno) e i recettori visivi e muscolari necessari per la stabilità dinamica.



Figura 63: trave per l'equilibrio

5. I piatti di Chladni (visualizzazione delle onde acustiche): costituito da basi metalliche cosparse di sabbia fine, questo *exhibit* ha permesso ai bambini di "suonare" i bordi della struttura utilizzando un archetto da violino. Lo sfregamento ha generato onde stazionarie che hanno impresso alla sabbia forme geometriche regolari e simmetriche, traducendo visivamente il concetto astratto di frequenza acustica e vibrazione meccanica.



Figura 64: piatti di Chladni

6. La giungla di corde (resistenza fisica e gravità artificiale): un fitto percorso di corde pesanti sospese dall'alto che i bambini dovevano attraversare a passo lento. La densità e il peso dei materiali hanno restituito al corpo una sensazione di forte attrito e di "trascinamento pesante", costringendo i muscoli a esercitare forze contrastanti e permettendo di sperimentare la fatica motoria in modo metaforico e situato.



Figura 65: giungla di corde

7. Bosco di colori (sintesi cromatica e inganni della mente): una serie di pannelli e cerchi grafici che, se azionati manualmente e fatti ruotare a diverse velocità, modificavano radicalmente la percezione dei colori e delle forme (fenomeni analoghi ai dischi di Newton e di Benham). Gli alunni hanno constatato come la fusione retinica possa generare la percezione del bianco, la scomparsa dei dettagli o la comparsa di sfumature cromatiche inesistenti sul supporto statico, sperimentando l'intrinseca discrepanza tra realtà fisica e percezione neuronale.



Figura 66: bosco di colore

8. Il globo di flussi (modellizzazione delle correnti terrestri): una semisfera trasparente contenente un liquido viscoso arricchito da particelle brillanti. Ruotando il dispositivo, i bambini hanno potuto osservare visivamente la formazione di vortici, correnti e turbolenze, comprendendo intuitivamente i moti macroscopici delle masse d'acqua sul pianeta Terra e le leggi fisiche che regolano la dinamica dei fluidi su scala planetaria.



Figura 67: globo di flussi

9. Mano ferma (coordinazione oculo-motoria e controllo della motricità fine): questo dispositivo ha sfidato la precisione psicomotoria degli alunni attraverso un gioco di percorso elettrificato. I bambini dovevano condurre un'impugnatura metallica ad anello (la "lente bucata") lungo un tracciato filiforme e articolato, evitando meticolosamente qualsiasi contatto con il bordo. L'errore, segnalato istantaneamente da un feedback visivo (l'accensione di una luce), ha imposto un altissimo livello di concentrazione, stabilità muscolare e coordinazione oculo-manuale, stimolando la propriocezione e l'inibizione motoria riflessa.



Figura 68: mano ferma

10. Il disco dell'equilibrio (dinamico statico-proprioceettivo): costituito da una piattaforma circolare provvista di un fulcro centrale sporgente nella parte inferiore, questo *exhibit* ha richiesto ai bambini di posizionare correttamente i piedi per stabilizzare la base. L'instabilità strutturale della pedana ha costretto l'apparato muscolo-scheletrico a continui e finissimi micro-aggiustamenti posturali, attivando i recettori proprioceettivi delle cavità articolari e integrando i segnali del sistema vestibolare per evitare la caduta e mantenere il baricentro al centro della figura geometrica.



Figura 69: disco dell'equilibrio

11. Il carosello rotante ad impulso (conservazione del momento angolare): una piattaforma circolare girevole su cui l'alunno, dopo aver impresso una spinta iniziale per avviare la rotazione, poteva sperimentare in modo corporeo e cinestetico una legge fondamentale della Fisica. Allargando le braccia verso l'esterno, i bambini constatavano un immediato rallentamento della velocità di rotazione, mentre stringendo gli arti al corpo avvertivano una netta accelerazione. L'esperienza ha permesso di interiorizzare fisicamente, prima ancora di una formalizzazione matematica, il principio di conservazione del momento angolare e l'effetto della variazione del momento d'inerzia legato alla distribuzione della massa rispetto all'asse di rotazione.



Figura 70: carosello rotante ad impulso

12. L'organo del tempo (acustica, ritmo e traduzione cinetica del suono): questa complessa installazione sonora raggruppava diversi dispositivi meccanici azionabili manualmente, tra cui un tubo trasparente contenente microsfere, una membrana tesa assimilabile a un tamburo e un meccanismo a manovella. Interagendo con questi elementi, gli

studenti hanno potuto esplorare i concetti di ritmo, durata, altezza e intensità del suono. Il movimento meccanico impresso dai bambini (come la rotazione della manovella o la percussione) si tramutava istantaneamente in onde sonore e pattern ritmici, evidenziando il legame indissolubile tra energia cinetica, tempo e propagazione acustica.



Figura 71: organo del tempo

13. La scala illusoria (percezione spaziale e inganno stereoscopico): attraverso un ingegnoso sistema di pannelli, luci e specchi contrapposti (effetto infinity mirror), questa postazione creava l'illusione ottica tridimensionale di una scala a pioli che sprofondava in un abisso verticale infinito. I bambini hanno vissuto il cortocircuito cognitivo generato dalla discrepanza tra il dato fisico reale (una superficie piana di spessore ridotto) e la rielaborazione visiva del cervello, che ricostruisce una profondità fittizia ingannando i meccanismi fisiologici della visione stereoscopica.



Figura 72: scala illusoria

14. Lo zootropio a manovella (persistenza retinica e moto apparente): l'installazione consisteva in contenitori cilindrici dotati di manovella, con al loro interno una sequenza di disegni statici in serie. Imprimendo un rapido movimento rotatorio, la successione frammentata delle immagini si fondeva visivamente, generando l'illusione di un movimento fluido e continuo. Questa postazione ha permesso agli alunni di mettere in atto direttamente il fenomeno della persistenza retinica e del moto apparente (o effetto phi), comprendendo come il sistema nervoso centrale sintetizzi stimoli visivi discreti e rapidi in un'unica percezione cinetica coerente, principio fondativo dell'animazione cinematografica.



Figura 73: zootropio a manovella

La visita ha così rappresentato il perfetto anello di congiunzione tra l'azione motoria manipolativa vissuta a scuola e la formalizzazione scientifica istituzionale, offrendo agli studenti una giornata di profonda emancipazione cognitiva in cui l'entusiasmo della scoperta ha validato l'intero percorso di ricerca-azione.



Figura 74: alunni davanti l'edificio della mostra

3.11 Riflessioni conclusive: la Scienza come lente per leggere il mondo quotidiano

Alla luce dell'intero percorso descritto in questo capitolo la mia riflessione finale non può che ripartire dal mio vissuto personale iniziale. L'ansia e il senso di inadeguatezza provati durante l'incontro di selezione, dettati dalla paura di dover eventualmente fornire "la risposta giusta" ad una commissione incaricata di valutarmi, si sono rivelati lo specchio esatto di come i bambini si approcciano all'apprendimento. Così come io temevo di essere valutata sulle mie mancanze anche gli alunni vivono spesso l'errore come un fallimento personale. Aver vissuto in prima persona quello spaesamento e la successiva liberazione data dal potersi "mettere in gioco" manipolando i materiali, mi ha permesso di essere una mediatrice didattica molto più empatica e consapevole, capace di guidare i bambini attraverso lo stesso processo di trasformazione emotiva e cognitiva.

Un ostacolo emerso durante la sperimentazione riguarda lo squilibrio percettivo che gli alunni (e talvolta il sistema scolastico stesso) nutrono nei confronti delle discipline scientifiche. Esiste un profondo divario, ad esempio, tra l'insegnamento dell'Italiano e quello delle Scienze. La lingua madre viene giustamente interiorizzata dai bambini come uno strumento espressivo, necessario per comunicare, raccontarsi e stare nel mondo. La Scienza, al contrario, viene troppo spesso percepita esclusivamente come una "disciplina scolastica", un sapere da libro di testo fatto di concetti astratti e formule da memorizzare, limitato alle pareti dell'aula e del tutto estraneo alla vita reale.

Il grande successo del progetto MusEdu è stato proprio quello di intervenire su questo divario, dimostrando che la Scienza non è un concetto "fuori" dalla vita ma è la trama stessa di cui è composta la quotidianità.

Attraverso metodologie, come *l'Inquiry-Based Science Education* e l'utilizzo di materiali "poveri" e destrutturati, la Fisica ha perso il suo alone di inaccessibilità. I bambini hanno toccato con mano le leggi del moto rotatorio o dell'oscillazione dei pendoli, capendo che non appartengono solo ai libri di testo ma regolano il comportamento dei loro giocattoli, dei suoni che ascoltano, del ritmo del loro corpo e degli oggetti che maneggiano ogni giorno.

L'adozione del Role-playing e la creazione del tesserino da scienziato hanno restituito ai bambini una nuova identità, non facendoli semplicemente partecipare ad un laboratorio didattico ma facendogli acquisire una nuova lente attraverso cui interpretare la realtà.

In conclusione, l'obiettivo più radicato di questo intervento in contesti complessi e a forte rischio di povertà educativa non è stato formare dei futuri fisici, ma far rientrare a pieno titolo la cultura scientifica nel "bagaglio culturale" personale di ciascun bambino: eliminare il *gap* tra sapere scientifico e vita quotidiana significa dotare questi alunni di un pensiero critico, differente e investigativo, significa insegnare loro a non fermarsi alle apparenze del senso comune ma a fare domande, a validare le fonti e misurare i fatti. Tutte queste competenze trascendono la Fisica e diventano, a tutti gli effetti, strumenti di emancipazione e di cittadinanza attiva.

Conclusioni

Giunta al termine di questo lavoro di tesi, guardando all'intera sperimentazione condotta all'interno del progetto MusEdu, emergono riflessioni che legano la teoria pedagogica alla pratica vissuta sul campo. Il progetto si è configurato, fin dalle sue premesse, come un modello didattico fortemente innovativo, fondato sull'apprendimento per indagine (*Inquiry-Based Science Education*) e sul laboratorio attivo (*learning by doing*) legati a un approccio fenomenologico. Questo ha comportato un ribaltamento di prospettiva: l'aula scolastica si è liberata dalla sua rigidità per trasformarsi in un laboratorio di vita e scoperta, dove i banchi sono stati spostati per lavorare in gruppo e le nozioni astratte sono state sostituite da elementi reali.

Dal punto di vista dell'impatto cognitivo ed emotivo sui bambini, il progetto è riuscito nel suo intento perché ha saputo incarnare i principi fondamentali riconducibili al *framework* internazionale *How People Learn*. Prima di entrare nelle classi la nostra formazione ci aveva rese ben consapevoli del fatto che i bambini non sono mai "vasi vuoti" da riempire con formule e definizioni, ma al contrario, essi arrivano a scuola portando con loro un bagaglio di idee intuitive, il cosiddetto "senso comune", utilizzato quotidianamente per

darsi una spiegazione su come funziona il mondo che li circonda. Spesso, tuttavia, queste intuizioni sono scientificamente errate, come l'idea radicata che un oggetto più pesante debba necessariamente rotolare più velocemente di uno leggero.

Se avessimo adottato una metodologia trasmissiva tradizionale, limitandoci a spiegare la teoria alla lavagna, i bambini, con il loro senso comune, avrebbero respinto le nozioni astratte o, nel migliore dei casi, le avrebbero imparate a memoria per poi dimenticarle. Invece, mettendo loro in mano i materiali e chiedendo di fare ipotesi prima di agire, abbiamo innescato (o ci abbiamo provato) un vero e proprio “conflitto cognitivo”. I bambini hanno visto crollare le loro certezze iniziali di fronte all'evidenza dei fatti, come quando hanno osservato con i loro occhi che forma e distribuzione della massa contano molto di più del peso in sé in una “gara” di rotolamento. Hanno imparato costruendo attivamente il proprio sapere, sperimentando, sbagliando senza essere giudicati, e riflettendo sulle proprie azioni attraverso la metacognizione. Così facendo l'errore non è stato vissuto come un fallimento segnato con la penna rossa, ma come un passaggio naturale e indispensabile del metodo scientifico.

Tuttavia, un bilancio conclusivo richiede di evidenziare non solo i successi, ma anche gli eventuali punti deboli, e ciò al fine di apportare successivi miglioramenti.

Un punto critico ha riguardato la difficoltà di calare un progetto complesso così ideale e idealistico nelle dinamiche dell'organizzazione scolastica reale: ci siamo infatti dovute rendere conto di quanto fosse difficile inserire in un contesto scolastico già strutturato un progetto nuovo.

Inoltre, si dovrebbe preventivamente essere messi a conoscenza della presenza nelle classi interessate di alunni con Bisogni Educativi Speciali, perché ciò permetterebbe di tarare l'esperienza sui bisogni specifici dei bambini, così da attuare una didattica realmente universale.

Tuttavia, anche queste difficoltà hanno costituito per noi un banco di prova importante e il loro superamento è stato altamente formativo per la nostra futura professionalità di insegnanti. Dover a volte riadattare i laboratori

estemporaneamente ha richiesto da parte nostra una forte capacità di improvvisazione attingendo alle metodologie pedagogiche apprese nel nostro percorso di studi. Ciò è stato fortemente arricchente sia dal punto di vista professionale che dal punto di vista umano perché il cuore del progetto MusEdu era proprio l'inclusione, il contrasto alla povertà educativa e la rivalutazione dei talenti di ciascuno e quindi riuscire ad includere tutti, ripensando i materiali, i tempi di attenzione, la disposizione degli spazi e le modalità di trasmissione ha permesso a tutti, nessuno escluso, di partecipare con dignità, sicurezza e successo.

Nonostante le fisiologiche difficoltà, l'esito pedagogico e umano di questa esperienza conferma un principio per me ormai irrinunciabile: lo studio delle discipline scientifiche introdotto fin dalla scuola primaria, con un approccio pratico e coinvolgente, possiede un'importantissima utilità culturale che trascende i confini della disciplina stessa.

Capire come rotola un cilindro su un piano o come costruire un pendolo più o meno veloce non serve, in questa fase della vita, a creare dei futuri fisici o ingegneri. Serve, invece, allo sviluppo integrale e armonico dell'individuo. Fare scienza a scuola significa abituare i bambini a non credere ciecamente al "sentito dire", significa educarli a fare domande scomode, a cercare prove tangibili, a collaborare con i compagni ascoltando idee diverse dalle proprie e a misurare oggettivamente i fatti prima di trarre conclusioni.

In contesti territoriali e sociali complessi, dove la povertà educativa rischia di negare opportunità a intere generazioni, restituire alla Scienza il suo volto più umano calandola nella realtà quotidiana e togliendola dai piedistalli accademici, assume un fortissimo valore di emancipazione: significa donare a queste bambine e a questi bambini una nuova lente per leggere, decodificare e, un domani, cambiare la realtà che li circonda, formandoli non solo come studenti consapevoli, ma come futuri cittadini liberi, critici e attivamente partecipi nella società.

Per me, in veste di futura insegnante, aver contribuito a far accendere in loro questa scintilla di curiosità ripaga ampiamente ogni ostacolo incontrato lungo il cammino.

Bibliografia

- Arcà, Maria, Guidoni, Paolo, *Guardare per sistemi, guardare per variabili. Un approccio alla fisica e alla biologia per la scuola dell'obbligo*, Torino, Emme Edizioni, 1987.
- Bransford, John D., Brown, Ann L., Cocking, Rodney R. (a cura di), *How People Learn: Brain, Mind, Experience, and School. Expanded Edition*, Washington (DC), National Academy Press, 2000.
- Damiano, Elio, *La mediazione didattica. Per una teoria dell'insegnamento*, Milano, FrancoAngeli, 2013.
- Hewitt, Paul G., *Fisica per concetti*, Bologna, Zanichelli, 1990.
- Huizinga, Johan, *Homo ludens*, Torino, Einaudi, 1946.
- Marini Bettolo, Umberto, Puglisi, Andrea, Vulpiani, Angelo, *La forza dei granelli*, in *Le Scienze*, n. 408, agosto 2002.
- Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, *Indicazioni nazionali per il curriculum della scuola dell'infanzia e del primo ciclo d'istruzione*, Roma, Miur, 2012.
- Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca, *Indicazioni nazionali e nuovi scenari*, Roma, Miur, 2018.
- Ogborn, Jon, *Science and Commonsense*, in M. Vicentini, E. Sassi (a cura di), *Connecting Research in Physics Education with Teacher Education*, Singapore, International Commission on Physics Education, 2008.
- Papert, Seymour, *Mindstorms. Bambini, computer e creatività*, Milano, Emme Edizioni, 1984.
- Piaget, Jean, *L'equilibratura delle strutture cognitive: problema centrale dello sviluppo*, Torino, Boringhieri, 1981.
- Vygotskij, Lev S., *Il processo cognitivo*, Torino, Boringhieri, 1980.

Sitografia

- *Cianotipia*, in *Wikipedia, l'enciclopedia libera*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Cianotipia>.
- *Cicloide*, in *Wikipedia, l'enciclopedia libera*. URL: <https://it.wikipedia.org/wiki/Cicloide>.
- Fondazione De Agostini, *MusEdu. Arte e scienza tra scuola e museo*. URL: <https://www.fondazionedeadagostini.it/sala-stampa/musedu-arte-e-scienza-tra-scuola-e-museo/.si>
- Info Les, *urti con carrello su piano inclinato*, YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=64MNAq5R9t0>.
- Info Les, *sincronizzazione di due metronomi alla frequenza di 176 Hz*, YouTube. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=fcel97oxwMY>
- *Locus of control*, in *Wikipedia, l'enciclopedia libera*. URL: https://it.wikipedia.org/wiki/Locus_of_control.

Ringraziamenti

Adesso arriva per me la parte più difficile, quella che non puoi studiare nei libri, quasi più difficile della tesi stessa: i ringraziamenti. Per la prima volta voglio riconoscermi un traguardo e prendermene il merito. Sono fiera di me stessa e di essere riuscita ad arrivare fin qui. Lo sono per tutte le volte in cui ho avuto paura e mi sono detta che non ce l'avrei fatta (come avrò detto sicuramente anche questa mattina, e invece eccoci qui), e puntualmente ce l'ho fatta e, se posso dirlo, anche particolarmente bene. Sono fiera di tutti i sacrifici fatti e di tutte le volte in cui ho dovuto dire di no perché mi hanno portata ad essere qui oggi.

Questa Tesi e il progetto da cui prende vita hanno per me un valore inestimabile. Credo profondamente nella necessità di intervenire nei contesti in cui l'istruzione è carente, per offrire un'alternativa ai bambini che nascono in realtà complesse, allontanandoli da un futuro che altrimenti sembrerebbe già scritto. Il mio più grande obiettivo, come futura insegnante, sarà proprio questo: garantire pari opportunità a tutti i bambini e le bambine che incroceranno il mio cammino.

Detto ciò, credo che sia giusto dedicare qualche parola alle persone che mi hanno accompagnata in questa avventura.

A **mia mamma**, anche se non vuoi ammetterlo siamo molto simili, so che lo sai e probabilmente vorresti che fosse diverso. Tu sai tutto di me e a te devo tutto. Grazie per tutto ciò che fai, per non avermi mai fatto mancare niente, per aver sopportato il mio carattere a volte insopportabile, soprattutto in questi ultimi mesi di ansia e stress in cui ho messo un po' tutti a dura prova. Grazie per essermi stata vicina in ogni momento, bello e brutto, per aver gioito con me o per avermi rialzata quando cadevo. Per avermi aiutata ogni volta che ne avevo bisogno e per avermi ascoltata ripetere ancora e ancora ogni giorno prima degli esami. Ci scherziamo sempre, ma bisogna ammettere che questa Laurea è un po' anche tua e che oggi, a essere proclamata, ci saresti potuta tranquillamente essere anche tu. Potrei continuare a ringraziarti all'infinito, ma non basterebbero le parole per spiegare quanto io sia grata che sia proprio tu la mia mamma. Questo traguardo è per te.

A **mio padre**, per avermi immaginata da prima che io nascessi e per aver fatto di tutto per concedermi sempre ciò che chiedevo, lasciandomi la libertà di inseguire tutto ciò che desidero. Ti voglio bene e ti sono eternamente grata.

A **mio fratello**, per essere stato un (im)perfetto fratello maggiore: da quando eri bravissimo a scuola e io volevo a tutti i costi superarti, fino a quando hai deciso di non laurearti lasciando questo impegno a me, che quindi potevo solo fare meglio! Se sono la persona che sono oggi, un po' lo devo anche a te. Ti voglio bene.

Ad **Alessandra**, per avermi mostrato che con l'impegno e la tenacia tutto si può ottenere. Ovunque sarai, se mai avrai bisogno di un pastello, te lo porterò fin lì.

A **Camilla**, che con la sua caparbia mi ha spronata a raggiungere presto i miei risultati e non abbandonare mai il mio sogno.

A **Chiara**, dittatrice dal cuore tenero e coraggioso con cui condivido l'amore per i bambini, per aver alleggerito ogni mia giornata pesante.

A **Olimpia**, per aver ascoltato qualsiasi mio pensiero senza mai giudicarmi e per tutte le sue preziose informazioni su animali e piante che hanno arricchito la mia cultura.

A **Roberta**, anima pura e compagna fondamentale di questo percorso. Grazie per avermi spinto, in quest'ultimo anno, a buttarmi nelle cose, insegnandomi a non aver paura di occupare il mio spazio nel mondo e a non "pre-occuparmi" degli eventi prima del tempo. Per i "buongiorno" all'alba, quando fuori era buio e immancabilmente pioveva; per ogni volta che mettevamo piede in una scuola vivendo situazioni sempre nuove e, a tratti, surreali; per aver sopportato le mie manie organizzative tra schemi, audio

infiniti e lamentele quando qualcosa non andava come dicevo io; per avermi lasciato sempre sistemare le buste del materiale, comprendendo che, in fondo, era solo il mio modo per fare ordine tra i pensieri e per esserti, infine, accollata ogni volta la spiegazione delle biglie di Newton, che a me proprio non piacevano. È stata un'avventura assurda e meravigliosa, e non avrei mai potuto dividerla con nessun altro.

A **Gabriele**, l'uomo più buono e gentile che io conosca. Si può dire che ho iniziato e concluso i miei studi con te. Grazie per essermi sempre stato vicino, anche quando i pensieri erano troppi; per essere sempre riuscito a metterli a tacere e per farmi riposare sulla tua spalla (anche se questo significa rimanere immobile per tanto tempo) dove tutto diventa tranquillo. Per accarezzarmi come se fossi fragile e per prenderti costantemente cura di me. Per i fiori, le parole dolci e gli infiniti gesti, mai scontati. Per avermi sempre incoraggiata e per aver creduto in me, arrivando a farlo per entrambi, quando io non riuscivo. Per le notti trascorse a immaginare il nostro futuro insieme e per ogni traguardo raggiunto per
costruirlo.
«Scommetti che l'amore esiste, e compi un gesto d'amore.» Tu sei il mio gesto d'amore, ti amo.

Un ringraziamento speciale va al **Professore Balzano**, senza il quale questa tesi non esisterebbe. La ringrazio per essersi fidato di me e avermi affidato un lavoro così importante, anche quando ha saputo che venivo dal Liceo Linguistico e che di Fisica, nella mia testa, c'era ben poco: per compensare, però, c'era tanta voglia di imparare e di creare. Grazie per insegnare la sua materia con tanta passione, curiosità per la scoperta ed entusiasmo. Lo stesso entusiasmo di quando ci ha abbracciate in laboratorio, dopo che eravamo riusciti a visualizzare sul grafico l'andamento del moto del barattolo. Pochi giorni fa le ho confessato di aver paura. Lei, dopo averci inviato una foto di un paesaggio, ci ha detto *«la bellezza ci allontana dalla paura»*. Ora, guardandomi intorno, vedo la bellezza di questo traguardo e in effetti non ho più paura.

La stessa gratitudine va a **Roberta “grande”**, formatrice prima e co-relatrice poi: grazie per quello che mi hai insegnato e per aver letto e riletto la mia tesi. Sei una persona veramente speciale e meriti tutto ciò che verrà da ora in poi nella tua già splendida carriera.

Una menzione speciale a tutti i miei riti scaramantici, il maglione e la maglietta gialla, i miei amuleti e la mia scrivania su cui qualsiasi cosa veniva poggiata non poteva più essere spostata fino al giorno dell’esame come questione di vita o di morte, il balcone dei nonni e il panino con il prosciutto cotto prima di ogni esame.