

**NUOVI E VECCHI STRUMENTI
PER INDAGARE I FENOMENI IN NATURA**
Il laboratorio tra tradizione e innovazione

Firenze, 22 – 23 aprile 2026

SEZIONE TESINE BIENNIO

Primo classificato

**Massa Volat, Tempus manet
Il carrellino di Galileo**

Studenti

Doncean Matteo - Filippoli Marco – Lusha Samuel - Scarpetta Gianluca

Classi 2 AINF - 2 CINF - 2 LOGR

Istituto di Istruzione Superiore

Istituto Tecnico per Geometri Fazzini – Mercantini
Grottammare (AP)

Docente Coordinatore

Santini Lucia

Gli studenti progettano e costruiscono un prototipo di piano inclinato e di carrellino che rispondono al meglio ai requisiti teorici. Per la misura del tempo di discesa utilizzano strumenti moderni (cronometri digitali e fotocellule), mentre la misura di tipo tradizionale è eseguita con l'orologio ad acqua realizzato dall'altro gruppo.

MASSA VOLAT, TEMPUS MANET

IL CARRELLINO DI GALILEO

In questo lavoro è stato dimostrato come la massa non influisca sul tempo di discesa di un carrellino su un piano inclinato, seguendo le intuizioni di Galileo Galilei. Per dimostrarlo sono stati utilizzati strumenti di misura antichi (cronometro ad acqua realizzato in un progetto parallelo a questo dal titolo "Un grammo di tempo - L'orologio ad acqua di Galileo") e strumenti moderni, cronometri digitali e fotocellule.

I dati emersi hanno confermato, entro le incertezze sperimentali, la tesi: la massa non è una variabile che modifica il tempo di discesa del carrellino sul piano inclinato.

1. INTRODUZIONE

L'obiettivo del progetto è di riproporre l'esperimento di Galileo utilizzando un piano inclinato; in particolare si intende verificare che il tempo di discesa di un grave su un piano inclinato sia indipendente dalla massa del grave stesso come dimostrato dalla teoria galileiana.

Nel caso specifico per riprodurre l'esperimento, è stato osservato un carrellino costruito in laboratorio. Per la misura dei tempi di discesa vengono impiegati tre diversi strumenti: cronometri digitali da smartphone e fotocellule come strumenti moderni e un orologio ad acqua, appositamente costruito per l'occasione, come strumento antico.

1.1. DESCRIZIONE ESPERIMENTO DI GALILEO

L'esperimento di Galileo Galilei sulla caduta dei gravi vuole dimostrare che tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione e toccano terra nello stesso istante, indipendentemente dalla loro massa. Galileo mise in discussione la precedente ipotesi di Aristotele, secondo la quale il corpo con massa maggiore sarebbe più veloce di un altro con minor massa. Le argomentazioni di Galileo, si basavano su un esperimento concettuale che avrebbe portato in contraddizione l'ipotesi aristotelica: se si legassero insieme due corpi di masse diverse con una corda di massa trascurabile, l'oggetto più massivo cadrebbe più velocemente dell'altro, mentre, viceversa, l'altro corpo dovrebbe frenare quello con massa maggiore. Tuttavia considerando che sono legati, dovrebbero cadere con una velocità proporzionale alla somma delle loro masse, cioè ancor più veloce dell'uno e dell'altro. Questa descrizione ha una evidente contraddizione che fece dedurre a Galileo che la velocità deve essere indipendente dalla massa dell'oggetto.

1.2. PERCHE' IL PIANO INCLINATO?

Il piano inclinato è stato scelto poiché, per altezze non eccessive, il tempo di caduta risulterebbe troppo breve rispetto ai tempi di reazione e difficile da misurare con un orologio ad acqua.

In particolare si è scelto il piano inclinato per rendere il fenomeno osservabile e misurabile rispetto ad una caduta libera. Minore sarà l'inclinazione del piano (rispetto all'orizzontale), minore sarà l'accelerazione del carrellino, producendo tempi di discesa maggiori e, di conseguenza, riducendo i possibili errori di misurazione.

Sul piano inclinato, il vettore Forza Peso (F_p) può essere scomposto in 2 componenti ortogonali fra loro: una parallela al piano ($F_{p//}$) e l'altra perpendicolare al piano ($F_{p\perp}$); la $F_{p\perp}$ non influenza la velocità di discesa del corpo poiché neutralizzata dalla "reazione vincolare". Il secondo principio della dinamica può essere enunciato nel seguente modo:

$$\vec{F} = m\vec{a}$$

e calcolando il modulo di $a_{//}$ si trova che la massa non incide sulla velocità del corpo:

$$a_{//} = \frac{F_{p//}}{m} = \frac{F_p \cdot \sin \alpha}{m} = \frac{\cancel{m} \cdot g \cdot \sin \alpha}{\cancel{m}} = g \cdot \sin \alpha$$

2. ESPERIMENTO

2.1. MATERIALE UTILIZZATO E STRUMENTI DI MISURA

2.1.1. MATERIALE UTILIZZATO

- per il carrello:
 - ruote in legno (diametro = 5 cm, spessore = 1 cm)
 - scatola in legno 10 cm (lunghezza) x 10 cm (larghezza) x 5 cm (altezza)
 - angolari 90° in acciaio con foratura asimmetrica
 - asta metallica a sezione circolare per gli assi delle ruote
- per la guidovia:
 - 2 profili angolari a 90° in alluminio di lunghezza 2,5 m

2.1.2. STRUMENTI DI MISURA

- cronometro digitale (sensibilità: 0,01 s)
- cronometro ad acqua (strumento realizzato nel progetto parallelo)
portata: (40 s (3000 g) stima ottenuta dalla capienza massima del contenitore di raccolta dell'acqua in uscita, sensibilità: 4 g/s)
- metro a nastro (portata: 3 m sensibilità 0,001 m)
- squadrette graduate (sensibilità: 0,001 m)

2.2. COSTRUZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE

(composto da carrello, piano inclinato e guidovia)

Step 1: trovare il centro di un cerchio per le ruote

Per trovare il centro dei dischi di legno che si intendeva usare come ruote sono state valutate ed implementate due diverse opzioni.

La prima opzione prevedeva di trovare il centro del cerchio tracciando tre corde qualsiasi e i loro assi (rette ortogonali alla corda passanti per il punto medio dei tre segmenti). L'intersezione di due assi avrebbe determinato la posizione del centro della circonferenza, il terzo asse sarebbe servito per verificare che la costruzione fosse sufficientemente accurata.

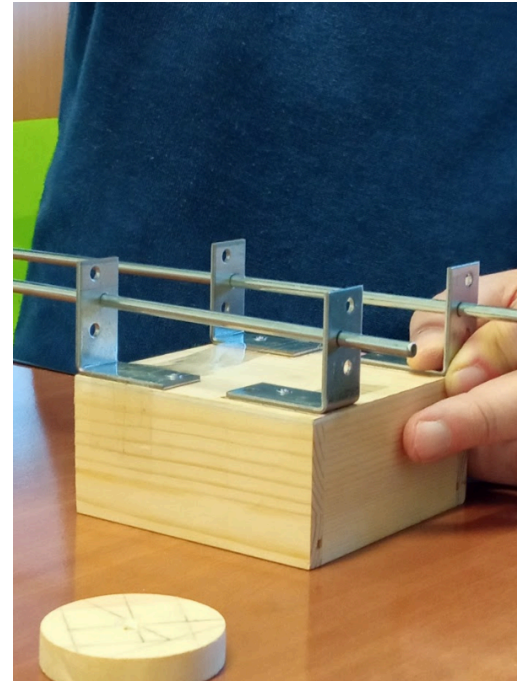
La seconda opzione prevedeva di trovare il centro a partire da un qualsiasi triangolo inscritto nel disco in esame. Consisteva, come nel caso



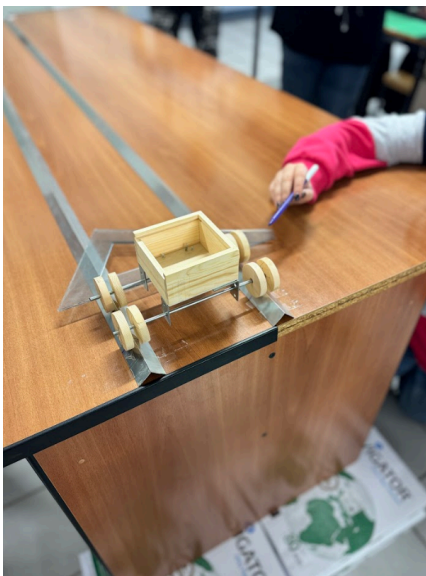
precedente, nel trovare il punto di intersezione dei tre assi dei lati del triangolo inscritto (circocentro) che coincide con il centro della circonferenza circoscritta al triangolo.

Step 2: Posizionamento degli angolari di ferro (90°) e assi delle ruote

Al carrello sono stati applicati quattro angolari a 90° multiforo in ferro per consentire l'inserimento dei due assi delle ruote (aste metalliche di sezione circolare) come in figura al lato. Una difficoltà incontrata è stata quella di allineare i fori poiché gli angolari sono stati posizionati specularmente a coppie. Attraverso l'uso di una livella si è garantito il parallelismo fra l'asse anteriore e l'asse posteriore del carrellino.



Step 3: Adattamento delle ruote e posizionamento sulla guidovia



Durante l'esperimento sono emersi alcuni problemi legati al corretto posizionamento delle ruote del carrellino rispetto alla guidovia. In particolare, era necessario stabilire una distanza adeguata tra le ruote affinché il carrellino potesse scorrere in modo regolare senza urtare lateralmente la guida, evitando così un aumento dell'attrito. Per considerazioni geometriche, sotto riportate, quantitative riguardanti le ruote e la guidovia, le ruote sono state posizionate in modo simmetrico rispetto al centro del profilato metallico. La riduzione dell'attrito è un aspetto fondamentale in questo tipo di esperimenti poiché consente al carrellino di muoversi in modo più regolare e prevedibile. La cura nella costruzione e nell'adattamento del carrellino alla guidovia ha avuto lo scopo di avvicinare il più possibile le condizioni reali al modello teorico del moto.

Considerazioni geometriche

Per la distanza fra le ruote:

$$d_{r-r} = 2 \left[\frac{\left(\frac{1}{2} Lt \right)}{\sqrt{2}} \right]$$

e per la distanza fra i binari della guidovia

$$d = Lc + 2 d_{r-r} + 4 Sr + 2 d_{c-r}$$

dove

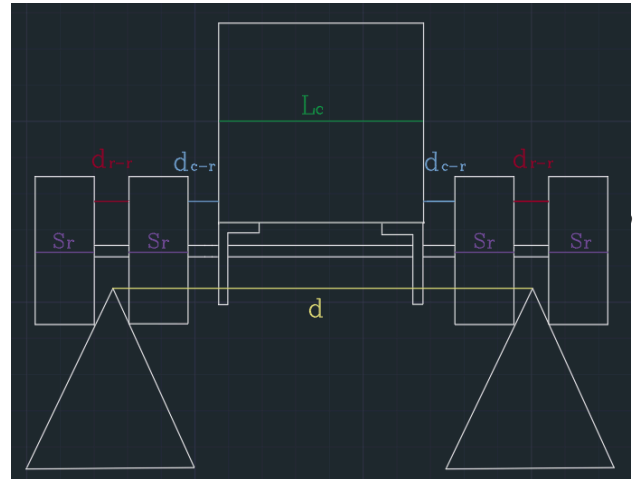
d = distanza fra i 2 binari della guidovia

d_{r-r} = distanza fra le due ruote accoppiate

sr = spessore ruota

d_{c-r} = distanza fra il carrello e la ruota

Lt = lunghezza di un lato della sezione del profilo metallico



Per quanto scritto sopra la distanza fra i 2 binari della guidovia, dovrà essere almeno di 18,6 cm.

3. RACCOLTA, ANALISI DEI DATI E DISCUSSIONE

3.1. INDIPENDENZA TEMPI DI DISCESA - MASSA CARRELLO

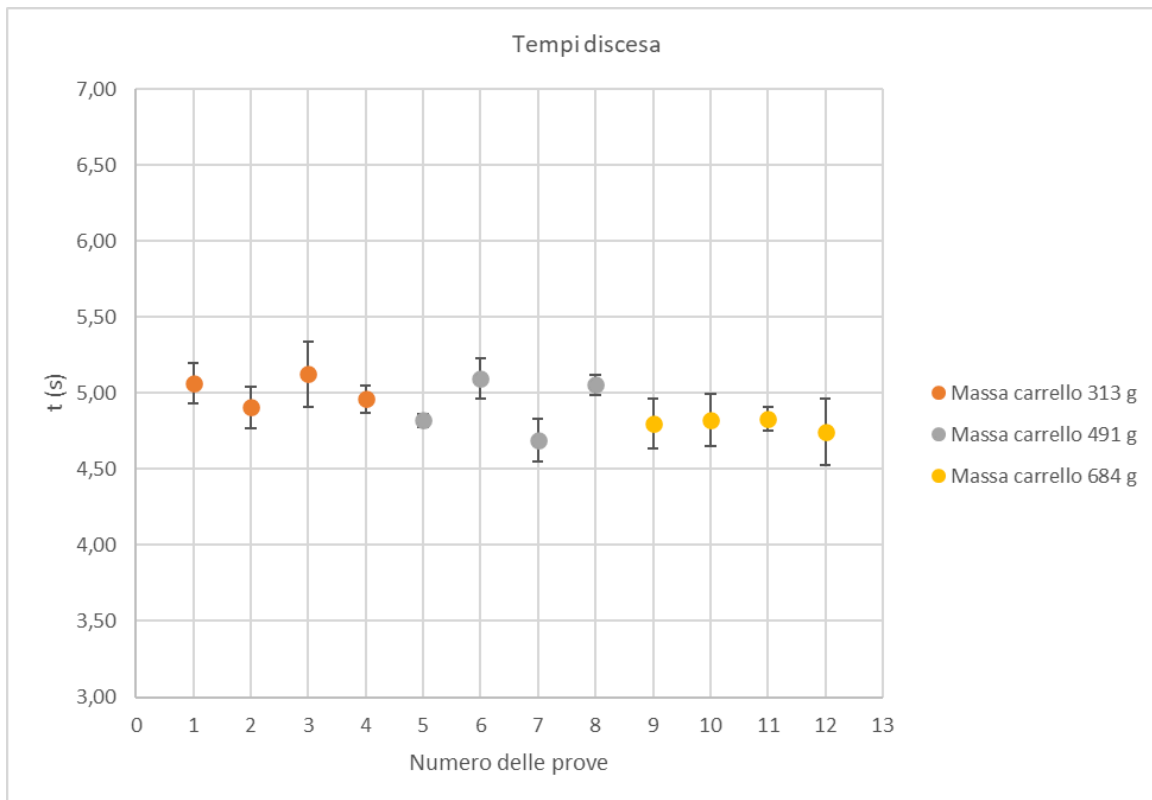
Le misurazioni, effettuate con i cronometri digitali, hanno lo scopo di verificare se il carrellino da noi costruito, sottoposto a carichi di massa differenti, percorra le stesse distanze in tempi di discesa confrontabili. L'obiettivo di queste prove è dunque quello di dimostrare che il tempo di discesa risulta indipendente dalla massa del carrellino. Tale indipendenza si vede chiaramente nella **tabella 1** che raccoglie i dati relativi a queste misurazioni e nel **grafico 1**.

Tabella 1

Misure	Massa carrello (g)	Δm (g)	t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	t_{medio} (s)	Δt (s)
1	313	1	4,93	5,07	5,20	5,07	0,1
2	313	1	4,80	4,85	5,07	4,91	0,1
3	313	1	5,39	5,03	4,96	5,13	0,2
4	313	1	4,87	4,97	5,05	4,96	0,09
5	491	1	4,86	4,82	4,78	4,82	0,04
6	491	1	5,13	5,21	4,95	5,10	0,1
7	491	1	4,53	4,73	4,81	4,69	0,1
8	491	1	4,99	/	5,12	5,06	0,06
9	684	1	4,61	4,94	4,85	4,80	0,2
10	684	1	4,60	4,93	4,94	4,82	0,2
11	684	1	4,73	4,87	4,89	4,83	0,08
12	684	1	4,46	4,87	4,90	4,74	0,2

Si pone attenzione alle diverse misure dei tre cronometri digitali (t_1 t_2 t_3) e alle discrepanze dovute ai tempi di reazione dei diversi operatori.

Grafico 1



3.2. STUDIO E CONTROLLO VARIABILI ESTERNE

Sono state condotte delle prove per verificare l'influenza di variabili esterne sul cronometro ad acqua, mantenendo costante la massa del carrellino. In questa fase, è stata prestata particolare attenzione a non creare turbolenze all'interno del dispositivo, garantendo così un flusso costante e privo di variazioni di velocità.

Durante le rilevazioni, è stato osservato che i tempi registrati con l'orologio ad acqua tendevano a essere sistematicamente maggiori rispetto a quelli dei cronometri digitali. Il cronometro ad acqua ha uno start e stop meccanici (un operatore deve far partire il flusso di acqua e poi interromperlo manualmente), per cui questa discrepanza si verifica soprattutto quando i segnali di avvio e arresto sono dati dalla persona incaricata di rilasciare il carrellino invece che da chi gestisce direttamente il cronometro ad acqua. Si è concluso che tale fenomeno è riconducibile al tempo di reazione umano, che genera una sovrastima della misura. Nel momento dello "Start" l'operatore che apre il flusso d'acqua è più coordinato con la persona che è incaricata di rilasciare il carrellino, grazie alla comunicazione verbale o visiva, e l'operazione di togliere il dito per dare l'avvio alla misura è quasi immediata, riducendo al minimo il ritardo iniziale. In corrispondenza dello "Stop", invece, chi manovra l'orologio deve reagire a un evento improvviso (il carrellino che arriva a fine corsa) e il cervello impiega mediamente dai 0,2 ai 0,4 secondi per elaborare l'evento e inviare il comando ai muscoli della mano (come osservato dalle discrepanze cronometriche dei tempi dei diversi operatori), a questo ritardo fisiologico si aggiunge una difficoltà meccanica: chiudere il flusso d'acqua con il dito richiede un movimento più deciso e contrastato dalla pressione del liquido, operazione più difficoltosa rispetto al semplice rilascio iniziale. Il ritardo alla chiusura è quasi sempre superiore a quello dell'apertura; il tempo finale risulta perciò inevitabilmente sovrastimato.

3.3. MISURAZIONI TEMPI DI DISCESA

Una volta verificato che i tempi di discesa del carrellino risultano indipendenti dalla massa applicata, procediamo a misurarli in modo più accurato, sia utilizzando strumenti tradizionali che moderni, così da poter confrontare i risultati ottenuti.

3.3.1. MISURAZIONI TEMPI DI DISCESA CON OROLOGIO AD ACQUA E CRONOMETRI DIGITALI

Tale fase della sperimentazione ha previsto la rilevazione dei tempi di discesa di un carrellino attraverso l'impiego congiunto di un orologio ad acqua e di moderni cronometri digitali. Mentre il primo strumento si fonda su un principio fisico di derivazione antica, basato sulla costanza del flusso dell'acqua nel tempo, i dispositivi elettronici garantiscono un'acquisizione dei dati immediata e una sensibilità strumentale notevolmente superiore. L'integrazione di queste due tecnologie, pur nella loro diversità, è stata finalizzata alla comparazione sistematica dei risultati, permettendo di valutare criticamente eventuali discrepanze nelle misurazioni. Il carrellino è stato inoltre sottoposto a carichi di massa variabile, i cui valori sono elencati nella **tabella 2** riportata di seguito.

Tabella 2

massa carrello+masse aggiuntive			
m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	m_{medio} (g)
298 (solo carrello)	299 (solo carrello)	297 (solo carrello)	298 (solo carrello)
495	489	490	491
608	600	602	603

Due operatori hanno rilevato i tempi in secondi con i cronometri digitali, le masse in uscita dall'orologio ad acqua sono state misurate da tre bilance, e ricavate per differenza togliendo la massa del contenitore.

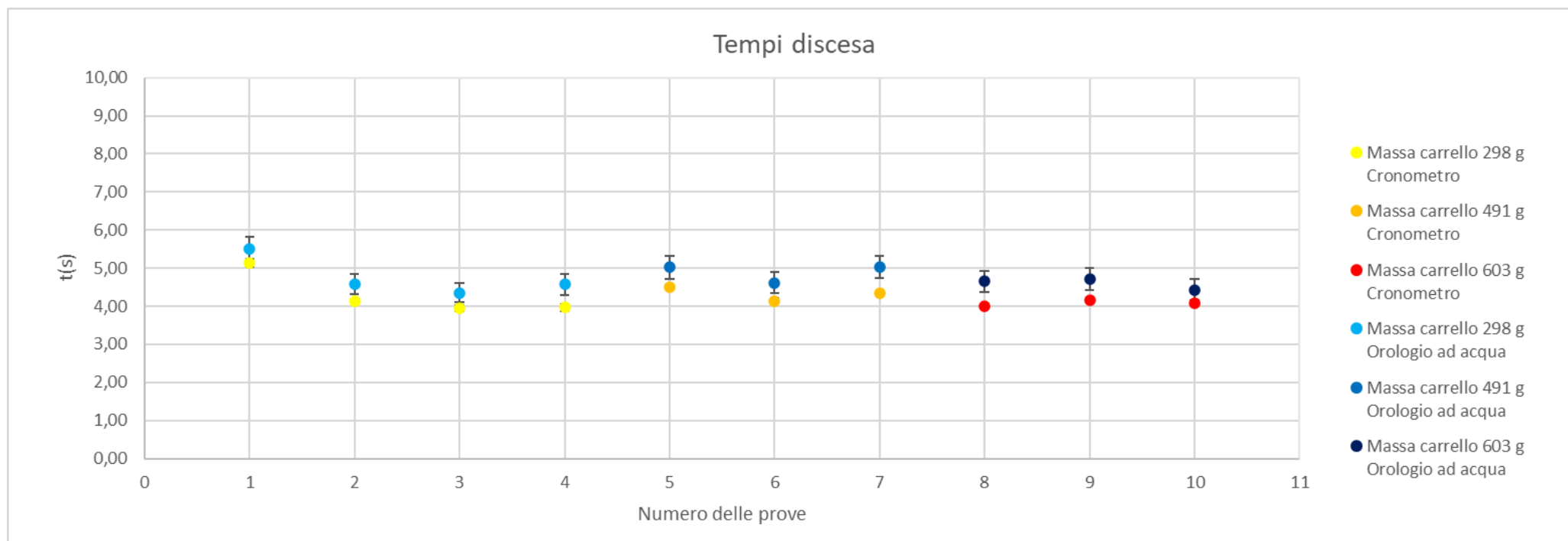
Per la determinazione dei tempi in secondi attraverso l'orologio ad acqua, è stato impiegato un coefficiente di conversione pari a (78 ± 4) g/s, valore derivato dalla specifica fase di calibrazione dello strumento, costruito e realizzato nel progetto parallelo, al quale si rimanda per ulteriori approfondimenti tecnici. Tale procedura di conversione ha permesso di tradurre la massa d'acqua raccolta in una grandezza temporale, rendendo così i dati direttamente confrontabili con quelli dei cronometri digitali. Dall'analisi dei risultati emerge che i tempi rilevati con entrambi gli strumenti risultano indipendenti dalle variazioni di massa del carrellino; i valori ottenuti tramite l'orologio ad acqua sono leggermente maggiori rispetto ai cronometri digitali, confermando le osservazioni già esposte nel paragrafo [STUDIO E CONTROLLO VARIABILI ESTERNE](#).

L'intera serie di dati è sintetizzata nella **Tabella 3** e rappresentata nel **Grafico 2**, che permette un immediato ed efficace riscontro visivo.

Tabella 3

Misure	t_1 (s)	t_2 (s)	t_{medio} (s)	Δt (s)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	m_{media} (g)	Δm (g)	Tempo calcolato con orologio ad acqua (s)	Δt (s)
1	5,23	5,04	5,14	0,095	433	427	428	429	3	5,5	0,4
2	4,10	4,14	4,12	0,020	360	355	356	357	3	4,6	0,3
3	4,03	3,88	3,96	0,075	342	339	337	339	3	4,4	0,3
4	4,06	3,88	3,97	0,090	361	354	356	357	4	4,6	0,3
5	4,55	4,47	4,51	0,040	395	389	390	391	3	5,0	0,3
6	4,20	4,07	4,14	0,065	364	358	358	360	3	4,6	0,3
7	4,38	4,32	4,35	0,030	396	390	392	393	3	5,0	0,3
8	4,00	4,01	4,01	0,005	367	361	362	363	3	4,7	0,3
9	4,11	4,20	4,16	0,045	371	365	366	367	3	4,7	0,3
10	4,10	4,08	4,09	0,010	350	342	345	346	4	4,4	0,3

Grafico 2

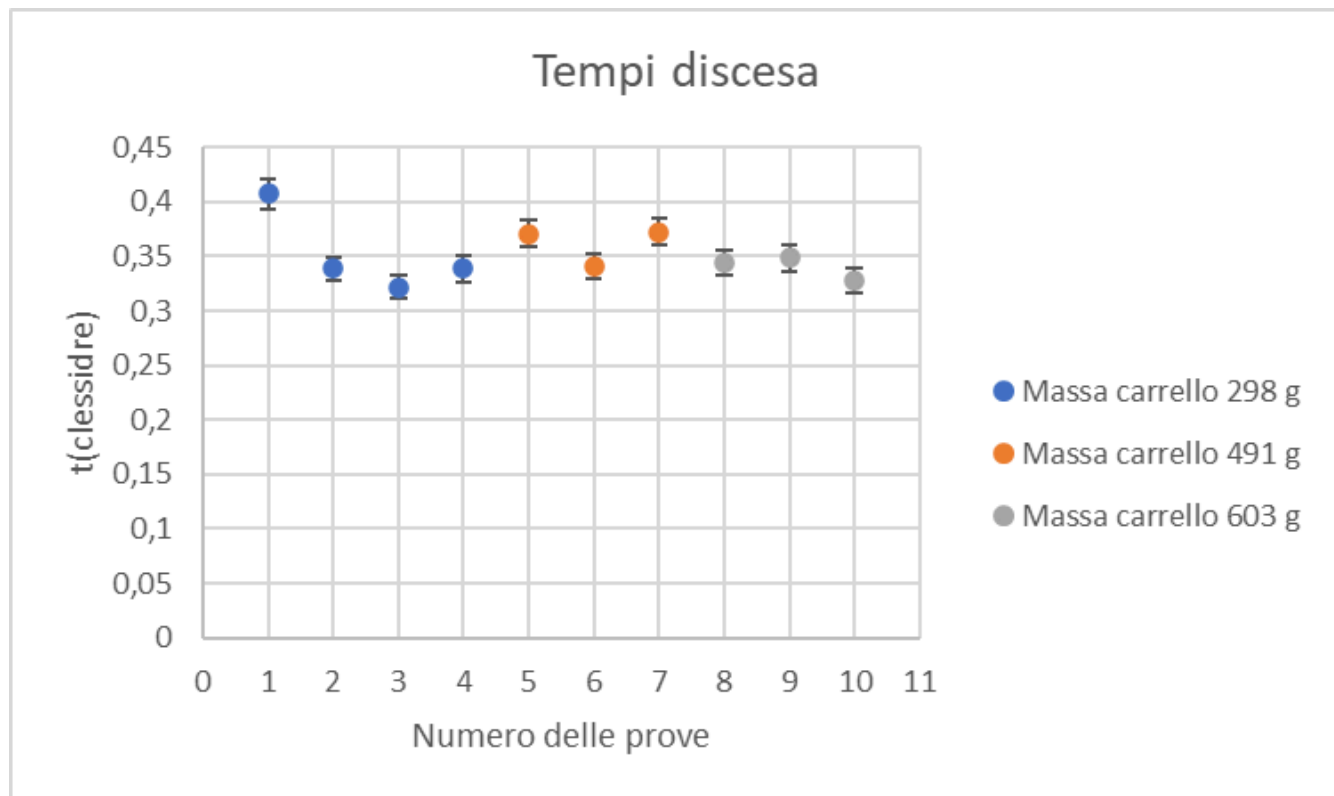


Infine si è calcolato il tempo in frazioni di clessidra, con il coefficiente di conversione pari a (1055 ± 27) g/clessidre, valore ottenuto anch'esso durante la fase di calibrazione dell'orologio ad acqua. Tali tempi sono riportati in **tabella 4** e visualizzati nel **grafico 3**.

Tabella 4

Tempo calcolato con orologio ad acqua (clessidre)	Δt (clessidre)
0,41	0,02
0,34	0,02
0,32	0,01
0,34	0,02
0,37	0,02
0,34	0,02
0,37	0,02
0,34	0,02
0,35	0,02
0,33	0,02

Grafico 3



3.3.2. MISURAZIONI TEMPI DI DISCESA CON OROLOGIO AD ACQUA, CRONOMETRI DIGITALI E FOTOCELLULE

In ultima fase, l'indagine sperimentale è stata integrata attraverso l'implementazione di un sistema di monitoraggio più articolato, volto a incrementare l'accuratezza complessiva nella rilevazione dei tempi di discesa. Oltre all'orologio ad acqua e ai cronometri digitali (tempi t_1 e t_2 nella **tabella 5**), sono state introdotte delle fotocellule posizionate strategicamente in corrispondenza dei punti di avvio e di arresto del percorso di discesa del carrellino. Mentre l'orologio ad acqua ha garantito il mantenimento di un riferimento metodologico tradizionale basato sulla costanza del flusso idrico, e i cronometri digitali hanno offerto praticità e una buona precisione di lettura, l'impiego delle fotocellule ha rappresentato un significativo avanzamento tecnico. Questo strumento, infatti, permette di registrare automaticamente l'istante esatto del passaggio del carrellino, azzerando l'incertezza sperimentale derivante dai tempi di reazione umani e, quindi, funge da riferimento oggettivo. In questa fase le masse sono state misurate con una sola bilancia così da rendere la procedura più semplice e veloce.

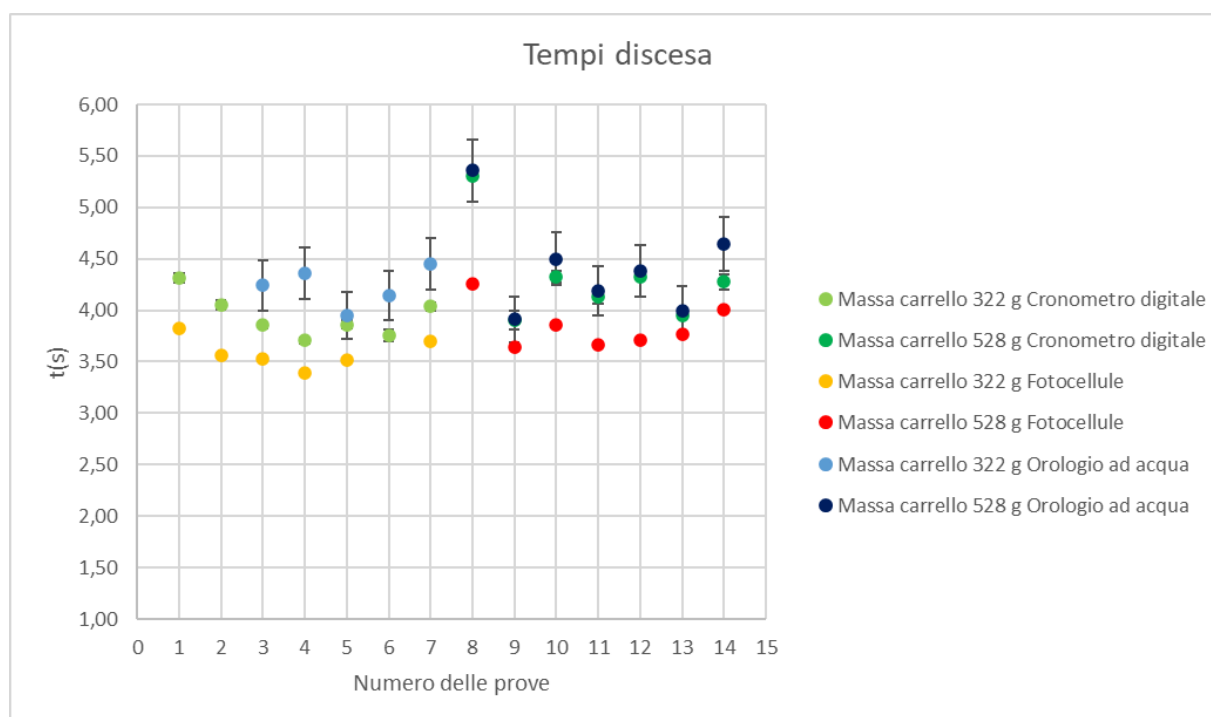
I risultati di tali misurazioni sono riportati nella **tabella 5** sottostante e rappresentati nel **grafico 4**, che permette un immediato ed efficace riscontro visivo. Come effettuato precedentemente, i tempi relativi all'orologio ad acqua sono stati espressi in secondi applicando il coefficiente di conversione di (78 ± 4) g/s.

Dall'analisi comparativa dei dati emerge con chiarezza che i tempi di percorrenza risultano indipendenti dalle variazioni di massa del carrellino, confermando quanto specificato nel test precedente, indipendentemente dallo strumento di misura.

Tabella 5

Misure	Massa carrello (g)	t _{fotocellula} (s)	Δt (s)	t ₁ (s)	t ₂ (s)	t _{medio} (s)	Δt (s)	m (g)	Δm (g)	Tempo calcolato con orologio ad acqua	Δt (s)
1	322	3,825	0,001	4,27	4,36	4,32	0,05	/	2	/	/
2	322	3,567	0,001	4,01	4,10	4,06	0,04	/	2	/	/
3	322	3,531	0,001	3,88	3,83	3,86	0,02	331	2	4,2	0,3
4	322	3,389	0,001	3,68	3,73	3,71	0,02	340	2	4,4	0,3
5	322	3,521	0,001	3,82	3,90	3,86	0,04	308	2	3,9	0,3
6	322	/	0,001	3,81	3,70	3,76	0,05	323	2	4,1	0,3
7	322	3,699	0,001	4,00	4,08	4,04	0,04	347	2	4,4	0,3
8	528	4,253	0,001	/	5,30	5,30	0,00	418	2	5,4	0,3
9	528	3,646	0,001	3,81	4,00	3,91	0,10	305	2	3,9	0,3
10	528	3,861	0,001	4,27	4,38	4,33	0,06	351	2	4,5	0,3
11	528	3,665	0,001	4,21	4,06	4,14	0,08	327	2	4,2	0,3
12	528	3,712	0,001	4,34	4,30	4,32	0,02	342	2	4,4	0,3
13	528	3,771	0,001	3,94	3,96	3,95	0,01	312	2	4,0	0,3
14	528	4,010	0,001	4,20	4,35	4,28	0,07	362	2	4,6	0,3

Grafico 4

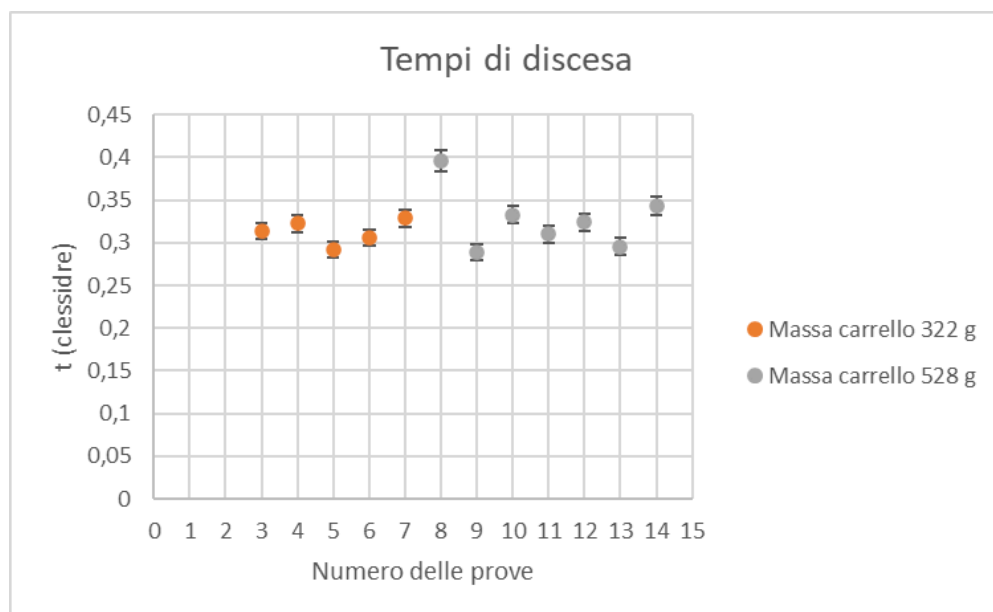


Anche in questo caso è stato calcolato il tempo in frazioni di clessidra, con il coefficiente di conversione pari a (1055 ± 27) g/clessidre ottenendo valori compatibili ai precedenti (vedi tabella 6).

Tabella 6

Misure	Tempo calcolato con orologio ad acqua (clessidre)	Δt (clessidre)
1	/	/
2	/	/
3	0,31	0,01
4	0,32	0,01
5	0,29	0,01
6	0,31	0,01
7	0,33	0,01
8	0,40	0,02
9	0,29	0,01
10	0,33	0,01
11	0,31	0,01
12	0,32	0,01
13	0,30	0,01
14	0,34	0,01

Grafico 5



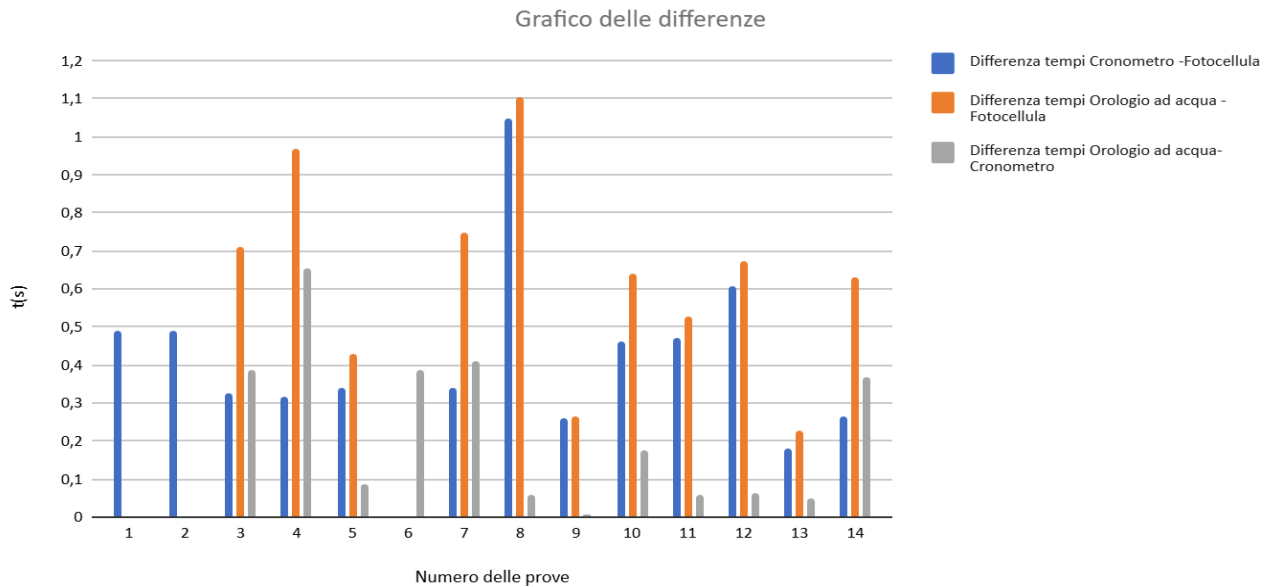
Il confronto diretto con le misurazioni effettuate tramite fotocellule, permette uno studio approfondito sull'affidabilità dell'orologio ad acqua, strumento storicamente impiegato da Galileo Galilei per le medesime finalità. Le rilevazioni effettuate evidenziano sovrastime nei tempi forniti dall'orologio ad acqua e dai cronometri manuali rispetto ai dati delle fotocellule motivate, come già detto, dai tempi di reazione dell'operatore. Per avere un quadro ancora più chiaro, è stato elaborato un diagramma delle differenze temporali, i cui valori sono riportati nella **tabella 7** da cui si evince che tali differenze sono dell'ordine di decimi di secondo (corrispondenti a circa 8 g di acqua).

Tabella 7

Δt cronometro-fotocellula (s)	Δt orologio ad acqua -fotocellula (s)	Δt orologio ad acqua - cronometro (s)
0,5	/	/
0,5	/	/
0,3	0,713	0,39
0,3	0,970	0,65
0,3	0,428	0,09
/	/	0,39
0,3	0,750	0,41
1,0	1,106	0,06
0,3	0,264	0,01
0,5	0,639	0,18
0,5	0,527	0,06
0,6	0,673	0,06
0,2	0,229	0,05
0,3	0,631	0,37

Nel **grafico 6** la colonna blu rappresenta lo scarto fra i valori misurati dai cronometri e la fotocellula, quindi quantifica l'errore di reazione umana usando i cronometri. La colonna arancione fornisce la differenza dei tempi fra l'orologio ad acqua e la fotocellula quindi quantifica l'errore di reazione rispetto all'orologio ad acqua. La differenza fra le due colonne, che è rappresentata dalle colonne grigie, evidenzia la sovrastima dell'orologio ad acqua rispetto ai cronometri digitali, come già spiegato nel paragrafo 3.2; tale sovrastima è esigua rispetto alle differenze di entrambi gli strumenti con il tempo assunto come riferimento (fotocellula).

Grafico 6



4. CONCLUSIONI

L'obiettivo centrale di questo progetto consisteva nel riproporre l'esperimento del piano inclinato per verificare un principio fondamentale della fisica: l'indipendenza del tempo di discesa di un corpo dalla sua massa. Per rendere l'indagine più completa, si è scelto di quantificare i dati utilizzando tre diversi strumenti di misura antichi e moderni, mettendoli a confronto. Durante le fasi iniziali di costruzione del carrellino, la difficoltà principale è stata di natura geometrica e meccanica. Per garantire un moto rettilineo uniformemente accelerato, è stato necessario individuare con estrema precisione il centro di ogni ruota. Senza questo accorgimento, la discesa sarebbe risultata irregolare e il moto non uniforme, inficiando la validità delle misure sperimentali. Parallelamente, si è dovuto affrontare il problema degli attriti causati dal disallineamento degli assi rispetto alla guidovia correggendo l'angolo fra i profili della guidovia e l'asse delle ruote, ottimizzando lo scorrimento. Un altro aspetto fondamentale è stata la sincronizzazione tra l'inizio e la fine del moto del carrello e l'attivazione degli strumenti di misura. È risultato infatti complesso far partire cronometri e l'orologio ad acqua nell'istante esatto del distacco del carrello e stopparlo con precisione nel momento dell'arresto. L'utilizzo della fotocellula ha permesso di eliminare totalmente l'errore umano, lasciando come unica variabile la sensibilità intrinseca dello strumento elettronico. Il confronto diretto con le misurazioni effettuate tramite fotocellule, ha permesso anche uno studio sull'affidabilità dell'orologio ad acqua, il confronto evidenzia infatti una sovrastima nei tempi forniti dall'orologio ad acqua di poco superiore a quella dei cronometri digitali.

In conclusione, l'analisi comparativa dei dati raccolti ha confermato con chiarezza la validità della legge fisica esaminata. Nonostante le difficoltà tecniche incontrate e risolte in fase di progettazione, i tempi di percorrenza sono risultati costanti, indipendentemente dalle variazioni di massa del carrello. Questo esperimento non solo ha confermato quanto teorizzato da Galileo, ma ha permesso di comprendere come gestire le variabili esterne in una prova sperimentale.

5. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano tutti coloro che hanno partecipato in modo diretto e indiretto al progetto contribuendo attraverso un prezioso supporto teorico, pratico, tecnico e morale. Va un grazie particolare alle professoresse/ al professore *omissis*.

Grazie anche alla dirigente scolastica professoressa *omissis* per l'opportunità di partecipare a questo progetto.

6. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- https://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento_di_Galileo_sulla_caduta_dei_gravi_dalla_torre_di_Pisa
 - Libro "L'Amaldi.verde 1" di Ugo Amaldi per il piano inclinato.
-

Sommario

1. INTRODUZIONE	1
1.1. DESCRIZIONE ESPERIMENTO DI GALILEO	1
1.2. PERCHE' IL PIANO INCLINATO?	1
2. ESPERIMENTO	2
2.1. MATERIALE UTILIZZATO E STRUMENTI DI MISURA	2
2.1.1. MATERIALE UTILIZZATO	2
2.1.2. STRUMENTI DI MISURA	2
2.2. COSTRUZIONE DELL'APPARATO SPERIMENTALE	2
Step 1: trovare il centro di un cerchio per le ruote	2
Step 2: Posizionamento degli angolari di ferro (90°) e assi delle ruote	3
Step 3: Adattamento delle ruote e posizionamento sulla guidovia	3
3. RACCOLTA, ANALISI DEI DATI E DISCUSSIONE	5
3.1. INDIPENDENZA TEMPI DI DISCESA - MASSA CARRELLO	5
3.2. STUDIO E CONTROLLO VARIABILI ESTERNE	6
3.3. MISURAZIONI TEMPI DI DISCESA	7
3.3.1. MISURAZIONI TEMPI DI DISCESA CON OROLOGIO AD ACQUA E CRONOMETRI DIGITALI	7
3.3.2. MISURAZIONI TEMPI DI DISCESA CON OROLOGIO AD ACQUA, CRONOMETRI DIGITALI E FOTOCELLULE	11
4. CONCLUSIONI	16
5. RINGRAZIAMENTI	16
6. BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA	16
Sommario	17

RELAZIONE DEL DOCENTE

“MASSA VOLAT, TEMPUS MANET” - IL CARRELLINO DI GALILEO

Il titolo scelto dagli studenti, "Massa Volat, Tempus Manet", sintetizza l'idea che, osservando il moto di discesa di un carrellino su un piano inclinato, la massa sia un elemento che quasi svanisce, "vola" via senza influire sul tempo di discesa.

Il progetto ha richiesto un approccio multidisciplinare che ha spinto i ragazzi a coniugare la progettazione meccanica, la geometria applicata e l'analisi metrologica.

La fase di realizzazione dell'apparato sperimentale ha visto gli studenti impegnati in un arduo processo di costruzione manuale di un carrellino in legno. L'individuazione esatta del centro geometrico delle ruote, ad esempio, non è stata una banale operazione per loro ed era una delle condizioni necessarie per garantire l'assialità del moto e annullare le asimmetrie del carrellino che all'inizio “zoppicava” un po'.

In questa fase, le formule matematiche hanno smesso di essere degli oggetti astratti lontani dagli studenti e sono diventate uno strumento indispensabile per risolvere un problema reale.

La rilevazione dei tempi di discesa è stata effettuata con diversi strumenti, antichi e moderni. Come strumento antico è stato utilizzato un orologio ad acqua, realizzato da un altro gruppo di studenti, in un progetto parallelo, con cui i ragazzi di questo gruppo hanno collaborato. Come strumenti moderni sono stati utilizzati cronometri digitali e fotocellule. Indipendentemente dallo strumento utilizzato i risultati ottenuti hanno confermato le intuizioni di Galileo.

La fase di misurazione dei tempi vera e propria è stata importantissima: gli studenti hanno realizzato quanto è importante capire il motivo dell'incertezza di cui può essere affetta una misura, cercare di ridurla il più possibile e quantificarla per poterne prendere atto e arrivare a delle conclusioni. In queste misurazioni l'errore di reazione era inevitabile, con i cronometri e soprattutto con l'orologio ad acqua che gli studenti hanno dovuto imparare a maneggiare. L'idea di misurare il tempo di discesa del carrellino anche con le fotocellule è sopraggiunta alla fine proprio per avere una misura di riferimento, non affetta da errore umano, che ha permesso agli studenti di mettere a confronto le diverse misure e di trarre importanti conclusioni sull'orologio ad acqua.

Il progetto ha messo i ragazzi davanti alle difficoltà che si incontrano durante un'indagine scientifica: problemi tecnici e aspettative spesso deluse.

La capacità acquisita dai ragazzi di imbastire una tavola rotonda con i docenti per riflettere sui dati, proporre soluzioni, avere quella pazienza indispensabile per non mollare, capire che spesso arrivare ad un risultato inatteso è più prezioso perché arricchisce la sperimentazione è stata una bellissima soddisfazione.