

PER SAPERNE DI PIÙ

Le parole della Fisica: Pressione Physical terms: Pressure

Clara Frontali (*)

Via del Giuba 10, 00199 Roma, Italia

Riassunto. Termini derivati dal linguaggio comune spesso portano con sé suggestioni in contrasto con il loro uso nel linguaggio scientifico, ponendo così problemi nella didattica. Viene qui ricostruito il tortuoso percorso storico che ha spostato il significato della parola “pressione” dall’idea di una forza esercitata contro una superficie resistente al moderno concetto di variabile di stato, passando attraverso le parole di Stevino, Torricelli, Pascal, Boyle, Magalotti, Bernoulli e Dalton, ed attraverso le conquiste tecnologiche della rivoluzione industriale (le macchine a vapore, il diagramma indicatore di Southern e Watt) nella loro elaborazione ottocentesca.

Abstract. Scientific terms drawn from common language are often charged with suggestions that may even be inconsistent with their restricted scientific meaning, thus posing didactic problems. The non-linear historical journey of the word “pressure”, from the idea of a force acting against a resisting surface to the modern understanding of the term as a state variable, is illustrated here through quotations from Stevin, Torricelli, Pascal, Boyle, Magalotti, Bernoulli and Dalton, and through the description of technological advances of the industrial revolution (such as the Southern and Watt’s indicator diagram) in their 19th century re-elaboration.

1. Introduzione

Apparentemente di significato intuitivo, il termine “pressione” che utilizziamo per indicare una proprietà dello stato di un gas, oppure —con l’aggiunta dell’aggettivo “idrostatica”— per caratterizzare proprietà locali di un liquido, è invece foriero di ambiguità, anche se non evidenti. Come molti dei termini prestatati alla fisica dal linguaggio comune, esso porta con sé suggestioni che possono anche essere in contrasto con il significato assunto nel linguaggio consolidato della fisica.

Intuitivamente, infatti, la parola “pressione” fa pensare a una spinta in una determinata direzione. Anche in ambito psicologico “subire una pressione” significa ricevere

(*) Già Dirigente di Ricerca presso l’Istituto Superiore di Sanità, Roma.
E-mail: clara.frontali@inwind.it

una spinta ad agire in un determinato modo. L'idea che il termine suggerisce è dunque quella di una forza esercitata contro una superficie resistente. E la forza — anche se non come vettore — è elemento essenziale nella definizione del termine presente nei testi in uso nella scuola secondaria, che risulta dal rapporto tra il modulo della componente ortogonale della forza che agisce sulla superficie e l'area della superficie stessa. Eppure si parla di pressione anche in casi in cui non c'è alcuna forza né alcuna superficie, come quando si attribuisce un valore numerico alla pressione “esistente” in un dato punto della nostra atmosfera, magari per costruire delle isobare.

Ripercorrere la storia di questo slittamento semantico è utile al fine di approfondire il significato attuale del termine.

2. Dall'antichità al Rinascimento

Nel suo testo *Sui corpi galleggianti*, Archimede (ca. 285-212 aC.) spiega la sua brillante intuizione in termini di pesi relativi (dell'acqua e del corpo immerso) senza alcun riferimento a qualcosa di simile alla nostra idea di pressione.

È solo 18 secoli dopo che Simon Stevin (1548-1620), poliedrico scienziato rinascimentale (matematico, fisico, geografo, teorico della musica, ingegnere), nel suo trattato sui fondamenti dell'idrostatica [1] dà una dimostrazione rigorosa del cosiddetto “principio di Archimede” ricorrendo al noto ingegnoso artificio. Egli immagina un recipiente ideale dalle pareti infinitamente sottili (il suo neologismo *vlackvat* si può tradurre con “recipiente fatto di superfici”) immerso nell'acqua: se riempito d'acqua esso resterà in equilibrio, se vuoto galleggerà, se riempito con un liquido più denso dell'acqua andrà a fondo, mentre l'azione del liquido circostante sulle sue pareti — che nel primo caso bilancia il peso dell'acqua contenuta — sarà la stessa nei tre casi.

Lo stesso tipo di ragionamento analogico lo porta a formulare come segue quello che è noto come “il paradosso di Stevino”, riguardante recipienti di forma diversa:

“... il fondo non è caricato con più peso da una quantità d'acqua maggiore che da una minore finché l'altezza rimane la stessa.”

così che:

“... 1 libbra d'acqua può fare più violenza di centomila libbre.”

Dunque il “peso” “fa violenza” sul fondo, ma anche contro le pareti (Stevino è anche costruttore di dighe). Convinto delle potenzialità della lingua fiamminga che egli utilizza nei suoi scritti, quando discute dell'effetto del peso dell'acqua contro le pareti verticali di un vaso —schematizzato come un recipiente parallelepipedo— egli introduce il termine *geprang* (dal verbo *prangen* = premere) linguisticamente equivalente alla parola “pressione”. Per dimostrare che questo effetto aumenta linearmente con la profondità impiega un ragionamento geometrico seguito da un passaggio al limite (vedi fig. 1).

“C’è ragione di credere che non è l’orrore del vuoto che causa la sospensione dell’argento vivo . . . ma è piuttosto il peso e la pressione dell’aria che bilancia il peso dell’argento vivo”.

Qui i termini “peso” e “pressione” sono usati come sinonimi. Pochi anni dopo, nel suo *Traitéz de l’équilibre des liqueurs* [4] (pubblicato postumo nel 1663, ma iniziato nel 1653) Pascal riesce a raffinare la descrizione torricelliana dei liquidi che schizzano in diverse direzioni e ad immaginare di sfruttare questo effetto nella sua “*machine à multiplier les forces*”, il torchio idraulico:

“Se un recipiente pieno d’acqua, chiuso da tutte le parti, ha due aperture, l’una cento volte più grande dell’altra, applicando a ciascuna di loro un pistone a tenuta, un uomo che spinga il pistone più piccolo eguaglierà la forza di cento uomini che spingeranno quello che è cento volte più grande e supererà novantanove di loro’ . . . Si può aggiungere per maggior chiarezza che l’acqua è premuta ugualmente sotto i due pistoni.”

E più sotto:

“Se un recipiente pieno d’acqua ha una sola apertura, larga per esempio un pollice, in cui è presente un pistone caricato col peso di una libbra, questo peso fa uno sforzo contro tutte le parti del recipiente in generale a causa della continuità e fluidità dell’acqua: ma per determinare quanto soffre ogni parte, ecco la regola. Ogni parte larga un pollice come l’apertura soffre tanto quanto se fosse premuta dal peso di una libbra (senza contare il peso dell’acqua di cui non parlo, perché non parlo che del peso del pistone) ⁽¹⁾ . . . Ogni porzione del recipiente più o meno grande soffre precisamente di più o di meno in proporzione alla sua grandezza, sia che questa porzione sia di fronte all’apertura o di lato, lontana o vicina.”

La “sofferenza” delle pareti, che ci ricorda il termine “violenza” impiegato da Stevin, è una bella metafora per l’effetto della forza che agisce su una porzione di parete di data area. Notiamo che il rapporto tra intensità della forza e area considerata non è associato alla parola “pressione”.

5. Robert Boyle (1627-1691)

Nel suo testo *A defence of the doctrine touching the spring and the weight of the air* [5] Boyle descrive dettagliatamente il disegno sperimentale ed il tipo di misure che lo portano a ipotizzare la relazione inversa tra pressione e volume (a temperatura costante), a noi nota come legge di Boyle. Ma, come vedremo, nella sua descrizione il termine “pressione” si riferisce alla spinta che tende a comprimere il sistema aeriforme, e non —come intendiamo noi oggi— a una proprietà di quest’ultimo.

⁽¹⁾ Tale avvertenza purtroppo è spesso omessa nei testi scolastici di fisica.

TABELLA I. — Tabella dei risultati dell'esperimento descritto da Boyle (da [6], p. 158).

A table of the condensation of the air.

A	A	B	C	D	E	
48	12	00		29 $\frac{1}{8}$	29 $\frac{1}{8}$	AA. The number of equal spaces in the shorter leg, that contained the same parcel of air diversly extended.
46	11 $\frac{1}{2}$	01 $\frac{7}{8}$		30 $\frac{3}{8}$	33 $\frac{1}{8}$	
44	11	02 $\frac{1}{2}$		31 $\frac{1}{2}$	31 $\frac{1}{2}$	B. The height of the mercurial cylinder in the longer leg, that compressed the air into those dimensions.
42	10 $\frac{1}{2}$	04 $\frac{1}{8}$		33 $\frac{1}{8}$	33 $\frac{1}{8}$	
40	10	06 $\frac{1}{4}$		35 $\frac{1}{4}$	35 - -	C. The height of the mercurial cylinder, that counterbalanced the pressure of the atmosphere.
38	9 $\frac{1}{2}$	07 $\frac{1}{2}$		37	36 $\frac{1}{2}$	
36	9	10 $\frac{1}{8}$		39 $\frac{1}{8}$	38 $\frac{7}{8}$	D. The aggregate of the two last columns B and C, exhibiting the pressure sustained by the included air.
34	8 $\frac{1}{2}$	12 $\frac{1}{8}$		41 $\frac{1}{8}$	41 $\frac{1}{8}$	
32	8	15 $\frac{1}{8}$		44 $\frac{1}{8}$	43 $\frac{1}{4}$	E. What that pressure should be according to the hypothesis, that supposes the pressures and expansions to be in reciprocal proportion.
30	7 $\frac{1}{2}$	17 $\frac{1}{2}$		47 $\frac{1}{2}$	46 $\frac{1}{2}$	
28	7	21 $\frac{1}{8}$	Added to 22 $\frac{1}{2}$ makes	50 $\frac{1}{8}$	50 - -	
26	6 $\frac{1}{2}$	25 $\frac{1}{8}$		54 $\frac{1}{8}$	53 $\frac{1}{8}$	
24	6	29 $\frac{1}{8}$		58 $\frac{1}{8}$	58 $\frac{1}{8}$	
23	5 $\frac{1}{2}$	32 $\frac{1}{8}$		61 $\frac{1}{8}$	60 $\frac{1}{4}$	
22	5 $\frac{1}{4}$	34 $\frac{1}{8}$		64 $\frac{1}{8}$	63 $\frac{1}{8}$	
21	5 $\frac{1}{8}$	37 $\frac{1}{8}$		67 $\frac{1}{8}$	66 $\frac{1}{8}$	
20	5	41 $\frac{1}{8}$		70 $\frac{1}{8}$	70 - -	
19	4 $\frac{1}{2}$	45 - -		74 $\frac{1}{8}$	73 $\frac{1}{8}$	
18	4 $\frac{1}{4}$	48 $\frac{1}{8}$		77 $\frac{1}{8}$	77 $\frac{1}{8}$	
17	4 $\frac{1}{8}$	53 $\frac{1}{8}$		82 $\frac{1}{8}$	82 $\frac{1}{8}$	
16	4	58 $\frac{1}{8}$		87 $\frac{1}{8}$	87 $\frac{1}{8}$	
15	3 $\frac{1}{2}$	63 $\frac{1}{8}$		93 $\frac{1}{8}$	93 $\frac{1}{8}$	
14	3 $\frac{1}{4}$	71 $\frac{1}{8}$		100 $\frac{1}{8}$	99 $\frac{1}{8}$	
13	3 $\frac{1}{8}$	78 $\frac{1}{8}$		107 $\frac{1}{8}$	107 $\frac{1}{8}$	
12	3	88 $\frac{1}{8}$		117 $\frac{1}{8}$	116 $\frac{1}{8}$	

Un lungo tubo di vetro viene piegato in modo da assumere la forma della lettera J, con l'estremità del braccio lungo aperta e quella del braccio corto chiusa. Strisce di carta su cui sono tracciate scale graduate in pollici e frazioni di pollice vengono attaccate ai due rami verticali del tubo. Si versa poi nel tubo una quantità limitata di mercurio, tale che —inclinando il tubo avanti e indietro— ci si possa assicurare che, quando il dispositivo è rimesso in posizione verticale, “la qualità dell’aria” sia la stessa al di sopra dei due menischi.

Viene poi versato altro mercurio nel braccio lungo, fino a che l’aria “imprigionata” nell’altro occupi la metà dello spazio che occupava prima. A questo punto si misura la differenza di altezza tra i due menischi. Aggiunte graduali di mercurio permettono di prendere una serie di letture che vengono riportate in una tabella (tabella I) e confrontate con i valori calcolati nell’ipotesi che pressione esercitata dal mercurio e volume occupato dall’aria siano in proporzione inversa. Aggiunge Boyle:

“... è evidente che come l’aria comune, se ridotta a metà della sua estensione, realizzava una molla più forte quasi del doppio di quella che aveva prima, così quest’aria compressa se ulteriormente ridotta alla metà del suo già piccolo spazio ... realizza una molla quattro volte più forte dell’aria comune. E non vi è ragione di dubitare che, se avessimo avuto a disposizione una maggior quantità di argento vivo ed un tubo molto robusto, con una ulteriore compressione dell’aria racchiusa avremmo potuto fare in modo che essa controbilanciasse la pressione di un cilindro di mercurio assai più alto e pesante.”

Nel modello atomistico cui Boyle si rifà, minuscole molle impediscono agli atomi di toccarsi l'un l'altro, e sviluppano maggior forza quando sono maggiormente compresse così che "... maggiore è il peso che poggia contro l'aria, più forte è il suo sforzo di dilatazione, e quindi il suo potere di resistenza (così come altre molle sono più forti quando compresse da pesi maggiori)" [5].

6. Lorenzo Magalotti (1637-1712)

Segretario dell'accademia del Cimento (fondata nel 1657 da Ferdinando II de' Medici, e attiva in Firenze per i successivi dieci anni), Magalotti non è considerato una figura preminente nella storia della fisica, ma sue limpide descrizioni degli esperimenti condotti pubblicamente dall'Accademia mostrano una grande profondità e lucidità, unite ad un uso creativo della lingua italiana.

Ecco come descrive [6] l'esperimento in cui l'apparato di Torricelli (il tubo immerso a bocca in giù in una vaschetta di mercurio) è coperto da una campana di vetro (fig. 2):

"La cagione che pigne e violentemente sostiene l'argentovivo ... non è il peso di quella soprastante aria, che si leva con la campana di cristallo ..., ma bensì l'effetto di compressione che fu prodotto da quel peso nell'aria ... Onde non è meraviglia che mantenendosi quella nel medesimo stato di compressione ... non iscemi l'altezza dell'argentovivo dalla solita sua misura ... Dalle quali cose parve di poter credere non dal peso assolutamente, ma ben sì dalla compressione già cagionata dallo stesso peso nell'infime parti dell'aria derivare tal sostentamento de' fluidi."

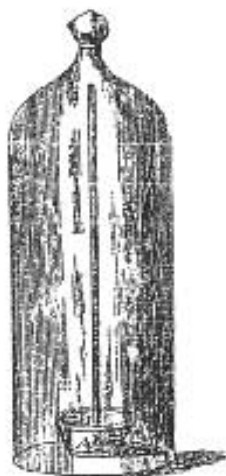


Fig. 2. – L'altezza della colonna di mercurio non diminuisce quando una campana di vetro viene sigillata intorno al dispositivo di Torricelli (da Magalotti [6], p. 72).

È questa la prima volta che per spiegare l'effetto osservato da Torricelli si fa ricorso non ad una spinta esterna, ma allo “stato di compressione” dell'aria presente sopra il pelo liquido del mercurio: è questo “stato” che impedisce al mercurio di scendere.

Notiamo come questa interpretazione presupponga per l'aria un punto di vista atomistico, ma senza necessità di postulare l'esistenza di molle tra le “infime” particelle.

7. Daniel Bernoulli (1700-1782)

Matematico, fisico e medico svizzero (ma olandese di nascita) Daniel Bernoulli proveniva da una famiglia di grande tradizione scientifica. Trattando dei “fluidi elastici” (come l'aria), nel suo fondamentale testo *Hydrodynamica* (vedi Sezione X in [7]) egli immagina che essi siano costituiti da innumerevoli “corpuscoli”, agitati in qua e in là da un moto rapidissimo, in modo indipendente gli uni dagli altri (fig. 3): sono gli impulsi “continuamente ripetuti” dei corpuscoli che urtano contro le pareti del recipiente, e in particolare contro il pistone caricato da un peso P , a sostenere quest'ultimo. Assume inoltre che la velocità media dei corpuscoli sia determinata solo dalla temperatura. Da queste premesse —che costituiscono la base della teoria cinetica dei gas— egli è in grado di dare la prima formulazione completa dell'equazione di stato dei gas, articolata in forma verbale nelle tre seguenti proposizioni

“il peso che comprime è circa in ragione inversa rispetto al volume che l'aria, variamente compressa, occupa ... la temperatura dell'aria mentre viene compressa dovrebbe essere mantenuta accuratamente invariata.”

“La pressione dell'aria aumenta non solo quando questa viene compressa, ma anche quando aumenta la temperatura, dato che sappiamo che questa viene

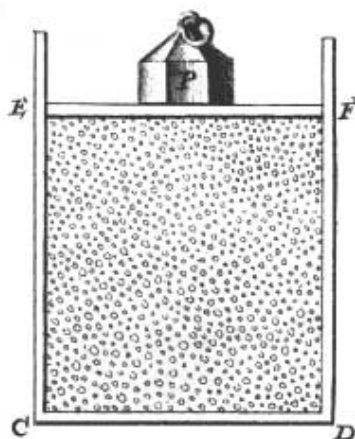


Fig. 3. – Il peso P è sostenuto dagli urti dei corpuscoli contro il pistone EF (da Bernoulli [7], fig. 56, p. 319).

sempre intensificata quando cresce il moto interno delle particelle. Ne segue che un aumento della pressione dell'aria che non ne cambi il volume indica un moto più intenso delle particelle."

"In ogni aria di qualsiasi densità ma a una data temperatura la pressione varia con la densità . . . e inoltre aumenti di pressione che derivano da eguali aumenti di temperatura sono proporzionali alla densità."

dove però abbiamo tradotto con "pressione" il termine "*elasticitas*" usato da Bernoulli con riferimento alla proprietà del gas di resistere alla compressione ⁽²⁾. Si è inoltre reso con "volume" il termine "*spatium*" e con "temperatura" il termine "*calor*" o "*gradus caloris*". Il termine "*pressio*" è presente nel testo originale solo in riferimento alla pressione esterna.

8. La rivoluzione industriale e la nascita della termodinamica

Piacerebbe pensare che l'intuizione di Magalotti ("lo stato di compressione" delle "infime parti dell'aria", 1667) e la chiara visione di Bernoulli ("il moto interno delle particelle", 1738) abbiano rappresentato conquiste condivise nel cammino del pensiero scientifico, ma così non è stato. Ancora nel 1801, nell'enunciare quella che oggi è nota come legge delle pressioni parziali, John Dalton (1766-1844) così si esprime [8]:

"Quando due fluidi elastici, indicati con A e B, vengono mescolati, non vi è repulsione tra le loro particelle, cioè le particelle di A non respingono quelle di B come fanno tra loro. Di conseguenza la pressione ovvero l'intero peso subito da ogni particella deriva solo da quelle del suo stesso tipo."

frase del tutto inconciliabile con la nostra idea di pressione come variabile di stato. E dunque, come ha prevalso quest'idea?

Il fatto è che, tra la fine del 1700 e l'inizio del secolo seguente, la rivoluzione industriale modificò non solo i metodi di produzione, ma anche il modo di pensare. Lo sviluppo delle macchine a vapore e la ricerca per l'ottimizzazione del loro rendimento aprì la via alla costruzione di una nuova scienza —la termodinamica— basata su di un tipo di ragionamento astratto e formale, come si trova negli scritti di ingegneri dalla statura scientifica di Sadi Carnot (1796-1832) e Pierre Emile Clapeyron (1799-1864).

Intorno al 1790, James Watt (1736-1819), al fine di monitorare lo stato del vapore nella camera di espansione della sua macchina, sviluppò un "indicatore ad ago": esso consisteva in un piccolo cilindro comunicante col cilindro principale e dotato di un pistone il cui movimento era contrastato da una molla. La posizione di equilibrio raggiunta, momento per momento, dal pistone era visualizzata dalla posizione di un ago, ad esso solidale, su una scala graduata. L'interesse di Watt era mosso essenzialmente dalla necessità di ottenere il massimo risparmio di vapore, e quindi

⁽²⁾ L'idea di "elasticità" dell'aria richiama "*the spring of the air*" di Boyle, ma i "corpuscoli" in moto continuo e disordinato di Bernoulli non sono dotati di molle.

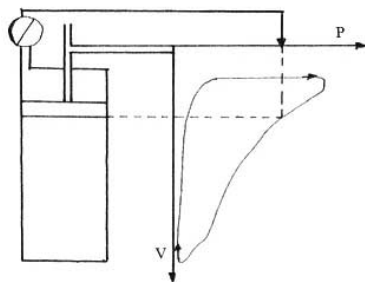


Fig. 4. – Schema del “diagramma indicatore” di Southern e Watt.

di combustibile. Nel descrivere la sua invenzione Watt attribuisce al calore (pensato come un fluido materiale) la capacità di combinarsi chimicamente col vapore, conferendo a quest’ultimo “potere elastico o pressione”. Notiamo come sia qui avviata la transizione del termine “pressione” ad indicare una proprietà dello stato gassoso, riassorbendo il concetto di “elasticità”.

Nel 1796 il suo assistente John Southern (1758-1815) introdusse un importante perfezionamento, il “diagramma indicatore”, che permetteva di registrare con continuità il funzionamento della macchina. Il suo dispositivo (schematizzato in fig. 4) fa uso di una tavoletta scorrevole il cui movimento è rigidamente accoppiato al movimento verticale del pistone del cilindro principale. Un misuratore di pressione (essenzialmente l’indicatore ad ago di Watt) guida il movimento orizzontale di una penna scrivente sulla tavoletta scorrevole: si ottiene così la linea chiusa che rappresenta il ciclo della macchina in un piano pV .

Per ragioni commerciali il dispositivo di Southern e Watt fu tenuto segreto fino alla metà degli anni ’20. È possibile che Clapeyron ne sia venuto a conoscenza durante il suo soggiorno (1820-1830) a San Pietroburgo, dove erano attivi ingegneri della Boulton & Watt Co. Certo è che nelle sue *Mémoires sur la puissance motrice de la chaleur* [9] il “diagramma indicatore” diviene una rappresentazione astratta del ciclo della macchina ideale di Carnot, di cui formalizza e divulga le idee. A lui è chiaro che l’area racchiusa dalla curva rappresenta il lavoro compiuto in un ciclo, il cui rapporto rispetto alla quantità di calore assorbita esprime il rendimento della macchina (mentre non è chiaro a lui, come non lo era a Carnot, che solo una parte del calore assorbito viene utilizzata a fini meccanici).

Nello stesso testo [9] Clapeyron dà la prima formulazione analitica dell’equazione di stato dei gas nella forma $pV = R(t + 267^\circ\text{C})$, dove la pressione ha chiaramente assunto il ruolo di variabile di stato.

9. Dal linguaggio comune alla terminologia scientifica

Cercando la parola “pressione” su un dizionario della lingua italiana (ma altrettanto vale per la parola “pressure”, cercando ad esempio sull’Oxford Dictionary)

troveremo definizioni del tipo: l'azione del premere, spinta o forza esercitata su un corpo o su una superficie.

L'insegnante che chieda ai suoi studenti il significato della parola prima di aver introdotto i concetti base dell'idrostatica e della termodinamica, otterrà probabilmente risposte dello stesso tipo, e dovrà spiegare perché in fisica quella stessa parola è passata ad indicare una grandezza scalare utile a caratterizzare lo stato di un fluido, astruendo dalla presenza di una forza.

Il percorso lungo il quale si è svolta questa transizione è tutt'altro che lineare, e l'interpretazione cinetica proposta nella prima metà del 18° secolo da Daniel Bernoulli fu riproposta e finalmente accettata solo 150 anni più tardi.

Di fatto il concetto di pressione come variabile di stato ha dovuto attendere la nascita, all'inizio del 19° secolo, della termodinamica —la disciplina dall'astratto apparato concettuale che ha le sue radici nella ricerca di ottimizzazione delle macchine a vapore— con la rappresentazione del ciclo compiuto dalla macchina in un diagramma pV . Risulta qui evidente come il trasferimento del concetto di pressione dalla meccanica alla termodinamica comporti un processo di astrazione: oltre alla necessità di ipotizzare che il gas si trovi in uno stato di equilibrio per poterne definire pressione e temperatura, va ricordato come la misura della pressione del gas sia sempre (ed il dispositivo di Southern e Watt ne è un esempio) una misura della pressione esterna necessaria a bilanciare l'effetto degli urti delle particelle sulle pareti.

Bibliografia

- [1] STEVIN S., *De Beghinselen des Waterwichts* (Plantin, Leiden) 1586, pp. 14–60.
- [2] “*Evangelista Torricelli a Michelangelo Ricci, 28 Giugno 1644*”, in GALLUZZI P. e TORRINI M. (curatori), *Le opere dei discepoli di Galileo, Carteggio 1642-1648* (Giunti e Barbera, Firenze) 1975, pp. 130–132.
- [3] “*De Blaise Pascal à Monsieur Périer, 15 Novembre 1647*”, in BEAUFRETON M., *Les lettres de Blaise Pascal accompagnées des Lettres de ses correspondants* (Crès Co., Paris) 1922, pp. 60–67.
- [4] PASCAL B., *Traitez de l'équilibre del liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air, contenant l'explication des causes de divers effets de la nature qui n'avoient esté pas bien connus jusqu'icy et que l'on avait attribué à l'horreur du vide* (Guillaume Deprez, Paris) 1663, Chapt. II, pp. 6–9.
- [5] BOYLE R., “*A Defence of the Doctrine touching the Spring and the Weight of the Air,*” in *Works of the Honourable Robert Boyle* (London) 1772, Vol. I, pp. 156–159.
- [6] MAGALOTTI L., *Saggi di naturali esperienze* (Sellerio, Palermo) 2001, pp. 72–75.
- [7] BERNOULLI D., *Hydrodynamica, sive de Viribus et motibus fluidorum commentarii* (Typis Ioh. Henr. Deckeri, Basilea) 1738, pp. 200 e segg.
- [8] DALTON J., “*New Theory of the Constitution of Mixed Aeriform Fluids*”, *J. Nat. Philos. Chem. Arts*, **51** (1801) 241.
- [9] CLAPEYRON P. E., “*Mémoires sur la puissance motrice de la chaleur*”, *J. Ecole Polytechnique*, **23** (1834) 153. Tradotto e commentato in MENDOZA E. (curatore), *Reflections on the Motive Power of Fire by Sadi Carnot and other Papers on the Second Law of Thermodynamics by E. Clapeyron and R. Clausius* (Dover, New York) 1960, pp. 71–105.