

Stefano Giovanni Loffi

Piccola
Storia dell'Idraulica

libera traduzione, ridotta ma integrata, di

“History of Hydraulics” di Hunter Rose e Simon Ince
dell'Istituto di Ricerca Idraulica dell'Università Statale dell' IOWA – U.S.A.,
édita, nel 1954, come supplemento, su *“LA HOUILLE BLANCHE”* .

Capitolo 21 – L'ascesa della Meccànica dei fluidi

Cremona 23 agosto 2007

Capitolo 21 – L'ascesa della Meccanica dei fluidi

Pienamente comparabile al progresso dell'Idraulica sperimentale, all'inizio del XX secolo fu lo sviluppo della teoria dell'Idrodinamica, rendendo necessario questo specifico Capitolo, certo aiutata dal moltiplicarsi dei Laboratori di Idraulica, dove si potevano condurre innumerevoli prove e verifiche.

Interesse e dotazioni strumentali accentuarono la separazione tra la ricerca in Idraulica ed in Idrodinamica, quest'ultima favorita dalla crescente e pressante domanda di sviluppo nella scienza Aeronautica, alla prima strettamente legata.

La scienza 'del volo', concretizzando un sogno che l'Umanità aveva tanto cullato, sino ad allora, da viverlo come un mito, attrasse le menti scientifiche più eccelse, certo grazie anche ai poderosi interessi, purtroppo alimentati dalla inevitabile competizione internazionale in fatto di potenziamento militare.

Poco o nulla, dei problemi affrontati in questa 'corsa', era veramente una assoluta novità: Charles Bossut aveva specificatamente raccomandato, ben più di un secolo prima, l'insegnamento della "Meccanica dei fluidi" ai giovani ingegneri; poi, uomini come Weisbach, Reynolds e Boussinesq, avevano chiaramente dimostrato come il comportamento dei fluidi potesse essere affrontato e risolto in base a precisi riferimenti di Fisica, piuttosto che attraverso puri calcoli matematici o semplici osservazioni empiriche.

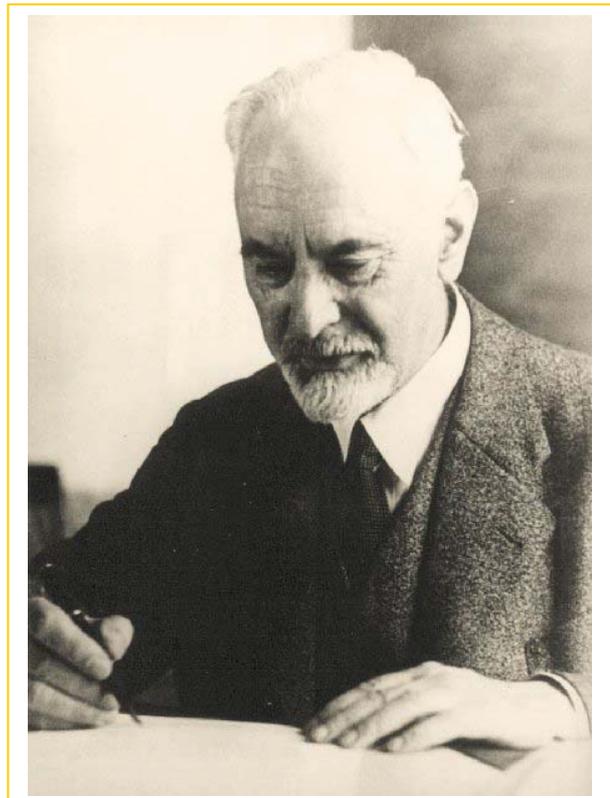
Tuttavia soltanto all'inizio del XX secolo si assiste alla svolta decisiva nel nuovo approccio che dà il via allo sviluppo dell'Aeronautica con applicazioni, questa volta secondarie, all'Idraulica e ad altre scienze che non avevano fattori strategico-commerciali così rilevanti, come invece aveva, ed ha tuttora, la scienza che presiede la costruzione delle macchine volanti.

Il fondatore dell'attuale Meccanica dei fluidi, considerato uno dei fondatori dell'Aerodinamica, fu Ludwig Prandtl (Frisinga 1875 - Göttingen 1953).

Figlio di Karl, professore di Filosofia all'Università di Monaco di Baviera, nacque vicino a Frisinga, borgo prossimo alla stessa Monaco. Ludwig studiò Ingegneria Meccanica all'Istituto Politecnico della capitale bavarese e, laureato, ottenne il dottorato, alla stessa Università, nell'ambito di ricerche sull'elasticità.

La necessità di una migliore correlazione tra la teoria ed i dati sperimentali, nel problema del flusso dei fluidi, gli risultò evidente mentre lavorava come ingegnere in una grande industria meccanica, dove, così, iniziò le ricerche sul flusso dell'aria.

Nel 1901 Prandtl ricevette l'incarico di professore all'Istituto Politecnico di Hannover, dove continuò le ricerche giungendo, nel 1904, a presentare un iniziale rapporto sulle proprie scoperte, in tempo perché fosse presentato al terzo Congresso Internazionale di Matematica:



“Mi sono assunto il compito di investigare sistematicamente il moto di un fluido la cui resistenza interna possa assumere valori molto piccoli. Infatti io ritengo che la resistenza sia così

piccola da poter essere ignorata, laddove le grandi differenze di velocità e gli effetti cumulativi della resistenza non esistono. Questo approccio ha dato ottimi risultati, perché attraverso di esso si può arrivare alle formulazioni matematiche che non solo permettono di risolvere problemi ma danno anche la garanzia di raggiungere un soddisfacente accordo con l'osservazione . . . la ricerca di un particolare fenomeno è così divisa in due parti interdipendenti: da una parte c'è il fluido libero, che può essere trattato come perfetto in accordo con il principio di Helmholtz sulla vorticosità, dall'altro gli strati di transizione prossimi al contorno fisso, alle pareti del condotto; il movimento nelle due parti è controllato dal fluido libero, che tuttavia si pone in rotazione al formarsi, negli strati, dei primi vortici”.

Tra gli oltre ottanta documenti tecnici letti prima del congresso, quello di Prandtl ricevette apparentemente un'attenzione soltanto superficiale da parte dei matematici che lo ascoltavano; tuttavia il concetto che esso introdusse – la *Teoria dello Strato Limite* – ha avuto ed ha oggi una grandissima influenza sulla comprensione del moto dei fluidi e su ogni principio discusso in queste pagine. Prandtl si preoccupò di pubblicare una versione del documento presentato al Congresso largamente descrittiva e di solo otto pagine, nella quale traspare la sua previsione di tutti gli effetti che la sua scoperta avrebbe provocato nella teoria e nella pratica.

Un matematico che partecipò al Congresso del 1904 e che percepì il valore del contributo di Prandtl, fu il professor Felix Klein, prestigioso riferimento di Matematica Applicata, Meccanica e Fisica all'Università di Göttingen.

Senza indugio, ancora nel 1904, Klein si fece promotore dell'invito di Prandtl all'Università di Göttingen, con l'offerta di un doppio incarico: professore e direttore di un piccolo istituto di ricerca di Meccanica Applicata.

Prandtl accettò e, ben presto, rese a tutti l'evidenza dell'aver acquisito, tra le fila della prestigiosa università, un giovane ma eccellente scienziato “ . . . *altamente dotato, con una rara predisposizione alla comprensione dei fenomeni fisici e di una non consueta capacità nel descriverli con formule matematiche relativamente semplici. Il suo controllo dei metodi e degli artifici matematici fu limitato, ma molti dei suoi collaboratori e seguaci, superandolo nel risolvere le difficoltà dei problemi matematici, ne divennero affascinati collaboratori, creando un gruppo di grandi capacità. Fu unica la sua abilità nel definire sistemi di equazioni semplificate, che esprimevano l'essenziale relazione fisica, e di eliminare o dimostrare irrilevanti gli aspetti non essenziali nel fenomeno osservato . . .*”.

Sotto la guida ispiratrice di Prandtl, la nuova organizzazione della ricerca – che fu alla fine ispiratrice del *Kaiser Wilhelm Institute für Strömungsforschung* – si avviò rapidamente in tre distinte direzioni: la prima, intorno ai metodi di analisi che non erano più astrazioni matematiche né formulazioni empiriche; la seconda, concentrata sulle più raffinate tecniche sperimentali, che produssero il proliferare di laboratori in ogni centro dove fosse attiva la ricerca; la terza – ma non certo la meno importante – l'organizzazione di ottimi corsi di tirocinio per giovani analisti, sperimentatori ed insegnanti.

Così, a Göttingen si condussero, perché strettamente associate con la teoria dello *Strato Limite*, molte analisi del fenomeno della turbolenza e della resistenza aerodinamica, scoprendo i numerosi principi, puramente aerodinamici, sul comportamento delle superfici soggette al flusso, sia subsònico che supersònico.

A sostegno del poderoso lavoro, alimentato dall'attività del gruppo di Prandtl, venne costruita una *Galleria del Vento* estremamente avanzata per quell'epoca, la cui impostazione fu portata a riferimento in tutte quelle che furono realizzate in seguito. Anche gli strumenti utilizzati e perfezionati da Prandtl – tubi di Pitot, misuratori di pressione, bilance da tunnel, dispositivi per

rivelare le traiettorie del flusso – si diffusero, nella loro versione originale, per poi subire continui miglioramenti.

Tra i molti mériti, Ludwig Prandtl annovera certamente l'essere stato anche un ottimo insegnante, per i numerosi allievi, molti dei quali divennero, a loro volta, i più insigni studiosi di Aerodinamica.

Il primo, tra questi, a ricevere un condiviso riconoscimento fu il tedesco Paul Richard Heinrich Blasius (Berlino 1883 – Amburgo 1970), che, all'inizio del 1908, pubblicò una soluzione analitica della distribuzione della velocità e della resistenza nel flusso Laminare di bordo, introducendo l'aspetto quantitativo alla teoria, solo qualitativa, di Prandtl. Tale risultato fu pienamente verificato da successive misure di laboratorio.

Nell'ambito dell'Idraulica, fu Blasius che originalmente dimostrò, nel documento del 1911 “*Das Aehnlichkeitsgesetz bei Reibungsvorgängen in Flüssigkeiten*“, che il coefficiente di resistenza per tubi lisci poteva essere un'unica funzione del *Numero di Reynolds*. L'edizione del 1913 confermava questo risultato, estendendo la sperimentazione con acqua a diversa temperatura e con l'aria.

Blasius inoltre presentò (nello stesso documento) il primo diagramma del *Numero di Reynolds* per lo strato limite, elaborato in parte su dati originali ottenuti a Berlino nella vasca navale.

Con le *Formule di Blasius* si procede ancora oggi nel calcolare le forze ed i momenti aerodinamici agenti su un corpo, a causa della corrente fluida che lo lambisce.

Probabilmente il più illustre alunno della scuola di Göttingen fu Theodor von Kármán (Budapest 1881 – Aquisgrana 1963), figlio di un professore dell'Università di Budapest.

Dopo la laurea con i più alti onori in Ingegneria Meccanica all'Istituto Politecnico Reale della capitale ungherese, Kármán ottenne il dottorato e poi l'insegnamento a Göttingen; nel 1912 divenne professore nel Politecnico di Aquisgrana, dove fondò l'Istituto di Aerodinamica.

Nel 1930 si trasferì negli Stati Uniti d'America, assumendo l'incarico di direttore del laboratorio di Aerodinamica di Pasadena, presso il *California Institute of Technology*.

Gli interessi di Kármán, come quelli di Prandtl, si estesero praticamente in ogni campo della Meccanica, comprendendo, quindi, anche la Meccanica dei fluidi.

Mentre l'approccio di Prandtl fu principalmente fisico, Kármán affiancò alla Fisica l'intuito della Matematica, mostrando in questo una naturalezza tanto eccezionale da sembrare che ogni deduzione fosse per lui semplicemente istintiva.

Qui ci limitiamo a parlare dei suoi principali contributi sulla resistenza al moto, sulla turbolenza, sull'analogia tra le onde sonore e le onde di gravità.

Tra le sue prime ricerche (1911) vi fu quella della formazione dei vortici attorno ai corpi cilindrici immersi in un flusso; egli elaborò una soluzione analitica che ancor oggi è conosciuta come la *Traccia del vortice di Kármán*, che dimostra come la corrente che supera l'ostacolo di un



corpo cilindrico, forma, a valle di questo, vòrtici caratterizzati da un'intensità crescente sino ad un massimo e che poi si annulla per poi riprendere a crescere, in modo alternato ai due lati dell'ostacolo. In gergo tecnico si dice che i vòrtici 'si staccano' dall'ostacolo alternativamente, prima da un lato poi da un altro.

* * *

Questo fenomeno produce alcuni effetti quantomeno curiosi e rari. Un caso avviene nel canale 'Pietro Vacchelli', del *Consorzio Irrigazioni Cremonesi*. Quando la portata entrante è prossima al massimo concesso, in corrispondenza del primo manufatto sostenuto da pile nell'álveo, il pelo libero oscilla, trasversalmente, quasi fosse un piano rigido incernierato al centro del canale, con escursioni di livello che, in corrispondenza delle sponde, possono raggiungere i trenta centimetri. L'oscillazione produce un'onda retrògrada, alternata tra destra e sinistra, che risale la corrente. Il fenomeno, studiato da una commissione del Politecnico di Milano, fu attribuito proprio ai *Vòrtici di Kármán* che, staccandosi alternativamente, a destra e sinistra delle pile, e favoriti dalla particolare geometria del canale e del suo percorso (il ponte è posto al término di un'ampia curva), entrano in risonanza producendo questa oscillazione, curiosa, quantomeno, per chi ha il tempo e l'accortezza di osservare . . . guardando. (Gli ési dello studio di questo fenomeno furono presentati nella Memoria: "*Transversal oscillation induced by vortex street downstream of piers.*" – XX Congresso dell'Associazione Internazionale di Ricerca in Idraulica – Mosca 1983 – a cura di E. Orsi e D. Zampaglione – Politecnico di Milano – Istituto di Idraulica e Costruzioni Idrauliche).

* * *

Theodor von Kármán condusse anche studi approfonditi sui raccordi tra le ali e la fusoliera degli aeroplani, oggi detti *Raccordi di Kármán*.

Lo scienziato ungherese, assieme a Prandtl, contribuì con successo all'analisi della distribuzione della velocità e della resistenza nel flusso turbolento in tubi e lungo le superfici piane, e le risultanti espressioni logaritmiche portano ancora i loro nomi.

Da ultimo ricordiamo che al *California Institute of Technology* Kármán elaborò métodos derivati dai principi dell'Acustica per condurre analisi sul moto dei canali in *Corrente Veloce*.

Troppo numerosi sono i 'frutti di Prandtl', sia nelle conquiste scientifiche che nelle òpere di coloro che da allievi ne divennero successori.

Citarne alcuni, inevitabilmente, produrrà torto per tanti altri.

Albert Johan Betz (1885 - ?), che fu a lungo il principale assistente di Prandtl, divenne direttore di quella parte del laboratorio di Göttingen dedicata alle macchine a fluido, ottenendo risultati notevoli e di generale applicazione.

Walter Gustav Johannes Tollmien (1900 - ?), un altro giovane assistente, distintosi più volte per le sue analisi sulla stabilità del flusso e sulla diffusione della turbolenza, fu nominato successore alla cattedra di Prandtl a Göttingen, dopo il formale ritiro di questi verso la metà del secolo.

Walter Ludwig Christian Schiller (1882 - ?), il cui principale interesse fu rivolto al problema della resistenza nelle tubazioni; fu professore all'Università di Liepzig, dove pubblicò lo stupendo "*Handbuch der Experimentalphysic.*"; quattro volumi dell'òpera furono dedicati al moto dei fluidi.

Jalov Ackeret (1898 - ?), una vera autorità sul fenomeno della *Cavitazione*; particolarmente attivo nel laboratorio di Aerodinamica dell'Istituto Federale di Zurigo, dove, nell'ambito delle ricerche sul flusso supersonico, realizzò importanti progressi nello studio del moto d'onda.

Oskar Karl Gustav Titjens (1893 - ?), ridusse le 'letture' di Prandtl in forma di testo nel 1929, ed aiutò lo stesso Prandtl a preparare la propria òpera "*Abriss der Strömungslehre*", nel 1931, che subì quattro successive ampliate edizioni.

Herman Schlichting (1907 - ?) contribuì notevolmente all'analisi della stabilità ed allo sviluppo dello *Strato Limite* e fondò un'organizzazione sperimentale all'Istituto Politecnico di Brunswick.

Tre altri membri dello staff del gruppo di Göttingen allargarono grandemente il raggio della conoscenza sperimentale:

- Carl Wieselberger (1887-1941), sul fenomeno della resistenza aerodinamica;
- Otto Flachsbart (1898 - ?), anch'egli sulla resistenza aerodinamica, particolarmente sulla pressione del vento sugli edifici (contribuendo ad un notevole e storico sommario del manuale di Schiller);
- Johan Nikuradse (1894 - ?) nel campo della resistenza dei tubi.

Sebbene il laboratorio di Göttingen fosse una parte dell'Università, piuttosto che un autonomo Istituto Politecnico, non fu predominio degli Ingegneri Meccanici, ma attrasse anche molti tecnici e ricercatori con particolare predisposizione agli studi avanzati.

Inoltre l'influenza del laboratorio di Göttingen non caratterizzò soltanto la preparazione degli allievi Ingegneri Meccanici tedeschi, ma avvicinò allo studio ed alla ricerca in Idraulica anche gli Ingegneri Civili, che si accostarono a questa scienza secondo un'altra prospettiva, rispetto agli studi scolastici. Un esauriente esempio di questa tendenza è contenuta nel piccolo libro "*Elemente der techischen Hydromechanik*", pubblicato nel 1914 da Richard von Mises, allora Ingegnere Meccanico all'Università di Strasburgo Inteso come un utile manuale per la pratica dell'Ingegnere, questo manuale spiega, in modo semplice e coerente, i principi dell'accelerazione e della resistenza del fluido, applicati alla soluzione dei problemi idraulici.

* * *

Dell'Università di Göttingen non possiamo mancare di ricordarne la morte, decretata durante l'abisso nel quale fu trascinato quasi l'intero mondo e dal quale, ancora oggi, non tutta l'Umanità sembra esserne completamente e sicuramente uscita. La follia di cui fu preda la Germania e poi, con cruento contagio, l'intera Europa ed il mondo, trovò nell'Università di Göttinga un obiettivo da distruggere, per farneticanti motivi neppur degni d'essere elencati. Così è che, nel 1933, tutti i contributi pubblici vennero sospesi ed i professori, di sospetta origine ebraica, furono costretti a dimettersi o messi nell'impossibilità di lavorare; l'attività, di fatto, cessò. Si completò, allora, la distruzione, con questa Università, del primato europeo negli studi matematici, a favore della città di Princeton, USA, dove chi poté riuscì ad emigrare, colà ricostruendo, brandello dopo brandello, una nuova Università libera e prestigiosa. I lavori di Gauss, Riemann, Prandtl, Maxwell non andarono completamente perduti, l'attività riprese ma l'Europa, da allora, divenne più povera, per sempre!

* * *

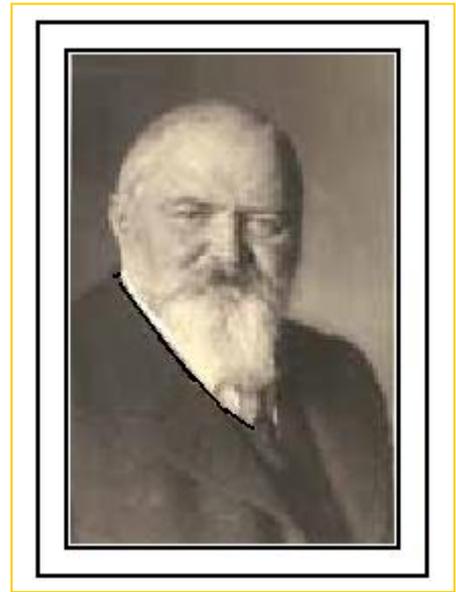
Nello stesso periodo, lo svizzero Franz Prásil (Zurigo 1857 - 1929), dell'Istituto Politecnico Federale di Zurigo, usando molti principi dell'Idrodinamica classica nell'analisi delle pompe e delle turbine, nel 1913 per primo utilizzò il *Reticolo a Maglie Quadrate* quale strumento per l'interpretazione grafica dei tracciati del flusso.

Il '*Reticolo a maglie quadrate*' è un artificio grafico-matematico che consente di suddividere il campo di un flusso (la corrente in una tubazione, in un canale o un moto di filtrazione) in una ragnatela di poligoni di quattro lati, non necessariamente sempre quadrati.

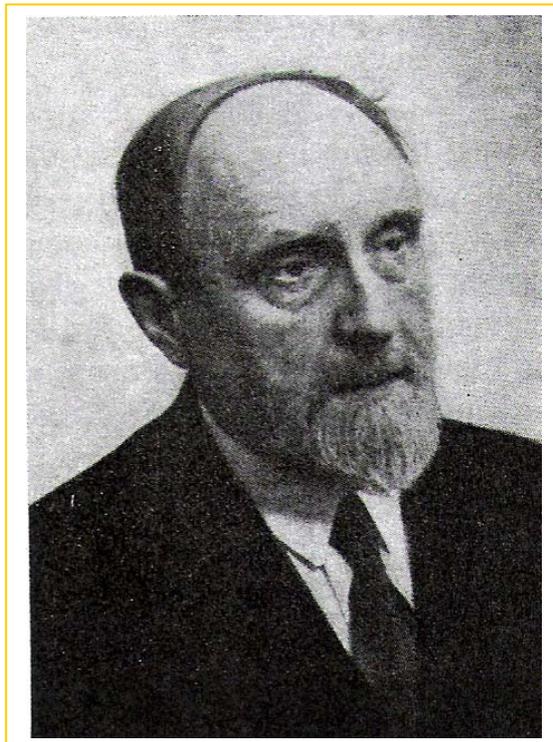
L'analisi numerica del fenomeno studiato consente di attribuire a ciascuna maglia, le caratteristiche che generano il fenomeno studiato, partendo da estremi nei quali tali caratteristiche siano note: procedendo, secondo i principi del flusso in questione, di maglia in maglia, è possibile costruire le grandezze del flusso in ogni punto.

I metodi di Prásil furono generalizzati e portati in una forma che si accordava con l'approccio di Parndtl, ad opera di Wilhelm Soannhake (1881 - ?), un allievo di Göttingen, che lavorò nel Laboratorio di Meccanica Fluida all'Istituto Politecnico di Karlsruhe.

Attraverso l'ulteriore influenza di tali Ingegneri Meccanici, come Thoma e Ackerett, l'uso del numero di Reynolds nella calibrazione e nelle standardizzazioni della misura del flusso finalmente divenne una cosa abituale, come avviene nei dispositivi dei *test* di Idraulica in aria e, in alcune occasioni, in quelli idrodinamici in acqua.



La necessità di un nuovo approccio all'analisi del moto del fluido fu in tutto il mondo sentita quale cruciale problema nello sviluppo dell'Aeronautica, tant'è che non ottenne progressi significativi soltanto in Germania.



Particolarmente importante fu la ricerca condotta, su questo argomento, in Russia, seppure ancora agli inizi; ai primi lavori di Jouwowsky seguirono quelli di un suo giovane collega, Dimitri Pavlovitch Riabouchinsky (1882, ?), che giunse a nuovi ed originali sviluppi.

Nativo di Mosca, Riabouchinsky fondò un istituto di Aerodinamica in una proprietà di famiglia vicino a Koutchino agli inizi del 1904; lo mantenne attivo sino a che la Rivoluzione del 1917 lo costrinse a trasferirsi, nel 1919, a Parigi, dove collaborò con il Ministero dell'aria.

Nella capitale francese Riabouchinsky divenne direttore associato del Laboratorio di Meccanica dei Fluidi, realizzato dal Ministero dell'Università.

Acuto analista, fantasioso sperimentatore e prolifico scrittore, Riabouchinsky diede origine a diverse teorie e tecniche, alle quali, però, il suo nome non è oggi più associato.

Ricordiamo, tra le molte, l'invenzione dei tubi di lancio per i proiettili autopropulsi (oggi chiamati *bazooka*), da lui proposti nel 1916, ma che non divennero popolari se non un quarto di secolo dopo. I suoi originali contributi nel generale campo della Meccanica dei fluidi portarono a sviluppi nell'analisi dimensionale (1911), nella resistenza laminare e turbolenta (1914), nel disegno delle superfici libere (1919), nella Cavitazione (1923), nell'analogia delle onde (1932) e nella strumentazione. Lo scienziato russo, nel 1909, formulò l'ipotesi di misurare la velocità dei fluidi gassosi attraverso uno strumento che divenne poi

l'Anemometro a Filo Caldo, al quale si deve gran parte dello sviluppo della Meccanica dei fluidi, nella prima metà del XX secolo.

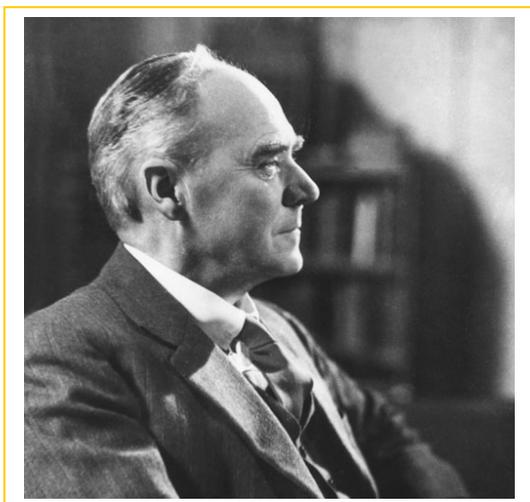
Purtroppo gran parte degli scritti di Riabouchinsky, oltre duecento, erano difficili da leggere perché in essi egli rifletteva in pieno il proprio carattere schivo e la naturale propensione alla massima concisione; così le sue opere non ricevettero quell'attenzione e quel riconoscimento che invece meritavano pienamente.

In Francia, sebbene la ricerca fosse condotta secondo la prevalente tendenza dei suoi studiosi nella direzione della pura Analisi Matematica, si ebbe, in questo periodo, almeno un eminente scienziato di grande livello scientifico, che seppe unire all'analisi i successi di numerose applicazioni pratiche: Alexandre Gustave Eiffel (Digione 1832 - Parigi 1923).

Sebbene il suo nome richiami alla mente di tutti la sua più spettacolare costruzione in ferro, la Torre che, a Parigi, porta il suo nome, Eiffel affrontò anche il problema di determinare la pressione del vento su forme elementari attraverso *test* su modelli; nel primo decennio del Novecento egli condusse, inoltre, esperimenti di caduta libera, sfruttando i trecento metri della sua Torre, eretta a Parigi in occasione dell'Esposizione Universale, ma costruì anche numerose *Gallerie del Vento*, dalle quali trasse numerosi dati sperimentali.

La più notevole conseguenza dei risultati dei suoi *test* in Aerodinamica, fu l'ottenere un coefficiente di forma, per la resistenza al moto, tipico dei corpi sferici, pari a meno della metà di quello determinato a Göttingen; esito che confermò anche riducendo la velocità del flusso d'aria allo stesso valore utilizzato nell'Università tedesca.

Inoltre Eiffel osservò il decremento delle dimensioni della scia, lasciata dal corpo che si sposta nell'aria, che intervenivano con l'aumento della velocità, fenomeno che Prandtl, nel 1914, finalmente spiegò in termini di riduzione dello spazio di transizione tra il moto Laminare, dello Strato Limite, e quello turbolento, lungo i bordi del profilo dell'oggetto.



La vasta serie di contributi inglesi nel XIX secolo sull'analisi del moto del fluido migliorarono, in qualità, all'inizio del Novecento attraverso il lavoro di Geoffrey Ingram Taylor (Londra 1886 – Cambridge 1975), un meteorologo all'Università di Cambridge.

Iniziando nel 1915 con uno studio del moto dei vortici nell'atmosfera, Taylor presentò, nel corso dei successivi due decenni, una serie di scritti dedicati alla fondamentale analisi delle turbolenze dei fluidi con metodi statistici; ne derivò un notevole progresso, rispetto alle ipotesi di Prandtl e di Kármán, poiché la teoria di Taylor tracciò la via per i successivi miglioramenti ed analisi. Taylor estese le proprie ricerche nel campo dei moti vorticosi creati dagli esplosivi e fu nel gruppo di scienziati che, negli anni

Quaranta, costruì la prima bomba atomica a Los Alamos USA.

Nell'ambito dei moti vorticosi, meritevole di citazione fu il lavoro sperimentale di Thomas Edward Stanton (1865 - 1931), un tempo studente e collega di Osborne Reynolds all'Owens College e per quarant'anni soprintendente del Dipartimento di Ingegneria del Laboratorio Nazionale di Fisica.

Meglio conosciuto in Idraulica per i suoi studi sulla resistenza dei tubi, Stanton contribuì a molti altri aspetti della sperimentazione nella Meccanica dei fluidi, dalla forza del vento sui ponti al flusso supersonico.

L'evidenza sperimentale ed il sostegno delle nuove analisi, particolarmente quelle sulla turbolenza dei fluidi, furono ottenuti in larga misura dai più significativi nuovi strumenti sviluppati nel XX secolo, in particolare l'*Anemometro a Filo Caldo*, il cui principio di funzionamento fu compiutamente formulato, dopo l'iniziale intuizione di Riabouchinsky nel 1909, dall'inglese Louis Vessot King (1886 - ?) nel 1914; poi sia la teoria che la tecnica di questo strumento furono grandemente affinate in diverse parti del mondo, mentre già dava ottimi risultati grazie all'intenso uso condotto nel laboratorio di Johannes Martinus Burges (1895 - ?), a Delft in Olanda, ed anche al contributo di Hugh Latimer Dryden (1898 - ?) e di Galen Brandtl Schubauer (1904 - ?), entrambi ricercatori presso il *US Bureau of Standard*.

Le applicazioni dell'*Anemometro a Filo Caldo* furono inizialmente limitate al flusso dell'aria, poiché l'uso nei liquidi presentava alcuni gravi limiti, soprattutto per la rottura del filo, che ha diametri dell'ordine di 1/200 di millimetro.

Successivamente, utilizzando lo stesso principio, si realizzò l'*Anemometro a Film Caldo*, che potremmo più correttamente chiamare *Idrotachimetro a Film Caldo*.

Il principio, che accomuna i due strumenti, sfrutta il fenomeno secondo il quale un conduttore, se attraversato da una corrente elettrica, si riscalda (per il cosiddetto *Effetto Joule*); ma se, contemporaneamente, questo conduttore è immerso in un flusso, parte del calore viene ceduto al fluido, per convezione, in proporzione alla velocità del flusso stesso.

Definita questa proporzionalità, non lineare e di una certa complessità, fu possibile risalire, conoscendo tutti i parametri dello strumento, alla misura istantanea della velocità.

L'istantaneità della misura, la semplicità dello strumento e la sua intrinseca precisione, ne fecero l'invenzione che provocò un vero salto di qualità nella ricerca sulla dinamica dei fluidi.

La prima evidenza del nuovo approccio apparve negli Stati Uniti d'America, grazie agli scritti sull'analisi dimensionale, pubblicati nel 1914 e nel 1915, da Edgar Buckingham (1867 - 1940), un fisico al *US Bureau of Standard*.

Non soltanto Buckingham introdusse in America (senza citare le fonti) le osservazioni di Blasius della correlazione dei dati sulla resistenza al moto nelle tubazioni ed il *Numero di Reynolds*, ma egli presentò (ancora tacendone l'origine) la generalizzazione del metodo di Riabouchinsky nel formulare diversi parametri non dimensionali, per mezzo di quella che chiamò *Teorema del π* .

Una puntuale attenzione fu dedicata alla logica del ragionamento dimensionale in un piccolo libro pubblicato nel 1922 da un altro fisico, Percy Williams Bridgman (1882 - ?) dell'Università di Harvard; ma il maggior impulso all'America, nell'accogliere le nuove teorie della Meccanica dei fluidi, venne procurato, in modo indipendente, da quattro scienziati che qui ricordiamo.

Già abbiamo presentato John R. Freeman e Theodor von Kármán.

L'impatto di von Kármán sulla ricerca e sulle applicazioni pratiche fu immediata già dal suo arrivo in America.

L'influenza di Freeman fu indiretta ed anche più lenta nel produrre evidenti effetti, grazie alle molte iniziative che abbiamo già raccontato.

Di certo il decano dei pionieri americani della moderna scuola dei fluidi fu William Frederick Durand (1859 - 1958). Attraverso una intensa esperienza in Ingegneria Civile, in Marina, in Meccanica ed in Aeronautica, durante la sua lunga ed attiva vita, Durand esplorò ampi campi della ricerca, portando la sua influenza i molti aspetti dell'attività professionale.

Egli servì come professore di Ingegneria Marina a Cornell e di Ingegneria Meccanica a Stanford; come professore del *National Advisory Research Council* ed alla fondazione Guggenheim per la promozione dell'Aeronautica; fu inoltre consulente in molti progetti di ingegneria.

I suoi scritti furono pochi, non certo proporzionati alla sua influenza; uno di essi merita particolare attenzione: "*Teoria aerodinamica*", edito nel 1934; opera in sei volumi nella quale coordinò il lavoro dei *leader* mondiali di questa ancor giovane disciplina, comprendendo anche una dettagliata indagine storica sugli sviluppi di questa scienza.

Il quarto personaggio che grandemente sostenne il pensiero e la ricerca negli USA fu il russo Boris Alexandrovich Bakhmeteff (1880-1951), nativo di Tiflis, che studiò all'Istituto Politecnico di San Pietroburgo ed a quello di Zurigo; divenne poi professore di Ingegneria Civile, sviluppando anche un'intensa attività di progettazione, a San Pietroburgo.

Nel 1916 Bakhmeteff pubblicò in Russia un libro sull'Idraulica dei canali a *pelo libero*, nel quale per primo fece uso del diagramma dell'energia.

Ambasciatore di Russia negli Stati Uniti sotto il regime di Kerensky, Bakhmeteff rimase poi in America, dove acquisì prestigio e fortuna nelle fabbriche di fiammiferi.

Non abbandonò però il suo grande interesse per l'Idraulica, pubblicando la versione in inglese, ampliata, del suo libro sui canali a *pelo libero*, e curando numerose lecture alla *Columbia University*. Queste lecture includevano una serie specificatamente dedicata alla Meccanica dei fluidi ed un compendio che venne pubblicato in estratto nel 1932 ad uso degli studenti, che rappresentò il primo esempio di una nuova serie di tale tipologia di testi che invaderanno la stampa scientifica statunitense.

Bakhmeteff pubblicò anche un numero di documenti su originali ricerche ed una speciale serie di lecture sulla turbolenza, più tardi apparse in forma di libro.

Sebbene molti dei suoi scritti proponevano l'interpretazione di teorie e risultati di altri, piuttosto che scoperte sue originali, furono comunque assai efficaci nello stimolare l'interesse degli studenti e degli idraulici americani in questo nuovo approccio. Tuttavia ancora più efficace in tale effetto fu la stessa dinamica personalità di Bakhmeteff.

Con riferimento ai persistenti sforzi di Freeman per costruire un laboratorio idraulico nazionale è doveroso ricordare, a questo punto, l'impianto che venne realizzato al *US Bureau of Standards*, che ottenne l'universale apprezzamento attraverso gli scritti di un uomo, Garbis Hovannes Keulegan (1890 - ?), nel campo della Meccanica dei fluidi. Nato in Armenia, Keulegan completò la sua educazione negli Stati Uniti, dove ricevette un ufficiale riconoscimento dal *US*



Bureau of Standards a vent'anni, diventando poi membro effettivo dello staff del nuovo laboratorio di Idraulica. Garbis Hovannes Keulegan fu un matematico per tendenza ed un idraulico per associazione; non deve quindi sorprendere che i suoi successivi documenti e rapporti (sul moto dell'onda, sulla resistenza nei canali a cielo libero e nelle tubazioni, sul flusso con stratificazione della densità) rifletterono la combinazione della teoria del suono, degli esperimenti e dell'ampia conoscenza della letteratura sull'argomento.

L'indubbio successo, universale, dell'insegnamento di Prandtl-Kármán trascinò tutti gli studiosi di Idraulica al nuovo approccio, soprattutto dopo aver verificato l'esattezza delle risultanze nella correlazione del fenomeno della resistenza al flusso nelle condotte. A metà degli anni Trenta, alcuni tra loro avevano già dato un notevole ed originale contributo, non soltanto ampliando grandemente la ricerca sulla scabrezza delle pareti dei condotti, ma anche nell'applicazione della teoria della turbolenza, nell'analisi del movimento del sedimento, sia temporaneamente in sospensione che sul fondo dell'alveo.

I flussi dell'aria e dell'acqua cominciarono ad essere considerati aspetti particolari di un medesimo fenomeno; attraverso la teoria di Prandtl dello Strato Limite, l'essenziale ruolo delle equazioni fondamentali del moto ottenne un definitivo riconoscimento, sebbene in Idraulica il problema della configurazione dei singoli filetti di corrente non ebbe mai, e non ha tuttora, l'importanza che invece riveste nell'Aerodinamica.

In ogni caso, la fine degli anni Trenta, proprio in procinto dell'immane tragedia, la Meccanica dei Fluidi giunse ad un ampio ed esaustivo corredo di strumenti e concetti, non solo per gli idraulici ma per qualunque scienza che fosse in qualche modo interessata a questo tipo di moto.

* * *