

O Vôo dos Pássaros e a Mecânica dos Fluidos

Atila P. Silva Freire

Programa de Engenharia Mecânica

COPPE/UFRJ



Preâmbulo

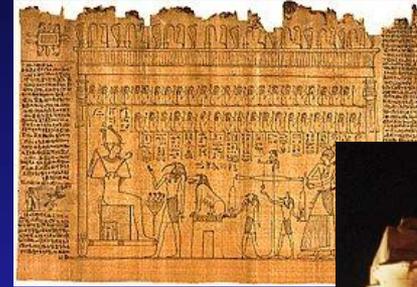
- Escola de Métodos Computacionais em Biologia, LNCC, janeiro de 2000.
 - ◆ Prof. Luiz Bevilacqua
 - ◆ Prof. Jair Koiller

- Escola de Primavera em Transição e Turbulência, UFSC/ABCM, setembro de 2002.
 - ◆ Prof. César Deschamps
 - ◆ Prof. Jader R. Barbosa Jr.



Plano da apresentação

- Introdução
- Uma breve cronologia
- As civilizações antigas
- O período clássico
- A biblioteca de Alexandria
- O Renascimento
- A Mecânica dos Fluidos em sua infância
- Os grandes avanços tecnológicos
- Os quatro pilares
- A época moderna
- A biocinética do vôo
- Conclusão





Referências

- Russel, B., *History of Western Philosophy*, 1946.
- Padovani, U. e Castagnola L., *História da Filosofia*, Melhoramentos, 1995.
- Katz, V. J., *A History of Mathematics*, Addison-Wesley, 1998.
- Anderson, J. D. Jr., *A History of Aerodynamics*, C. U. P., 1998.
- Azuma, A., *The Biokinetics of Flying and Swimming*, Springer-Verlag, 1992.
- Pough, F. H., Heiser, J. B. E McFarland, W. N., *A Vida dos Vertebrados*, Atheneu, 1993.



Introdução

- **O progresso da mecânica dos fluidos sobre o ponto de vista da sua perspectiva histórica é revisto. Interessado em desvelar a mais remota linha de pensamento que tenha nos conduzido ao atual estado do saber, este artigo abrange XXVI séculos de desenvolvimento da ciência. Sistemas, escolas, doutrinas e teorias do conhecimento são apresentados por intermédio de seus expoentes.**
- **Neste texto estaremos, portanto, interessados em investigar como os antigos percebiam a turbulência e lidavam com ela. Com isso retornaremos a épocas onde o método científico era sequer imaginado, onde a física e a matemática tiveram seu nascedouro. As razões são simples. Não podemos esperar descrever o futuro sem conhecer o presente e o passado, sem nos apoiar nos ombros de gigantes da filosofia e da ciência.**



- **Neste texto, e através de um fenômeno natural que exerce um grande fascínio sobre o homem, o vôo dos pássaros, descortinaremos todo este ramo da ciência. Na natureza, a maioria dos animais voa. Existem quase 1 milhão de espécies de insetos voadores e dos 13.000 vertebrados de sangue quente conhecidos, 10.000 voam (9.000 pássaros e 1.000 morcegos). Devido à grande variedade de dimensões presente nesses seres, do milímetro ao metro, o ambiente fluido exerce diferentes efeitos sobre suas habilidades de modo que as mais distintas estratégias de locomoção precisaram ser desenvolvidas. A graça e beleza com que os pássaros executam manobras aéreas inspiraram definitivamente os primeiros cientistas e suas teorizações. Por exemplo, algumas das velocidades envolvidas, taxas de mergulho e de rolagem, aperfeiçoadas ao longo de 150 milhões de anos de evolução natural não possuem qualquer correlato nos 100 anos de existência das ciências aeronáuticas. Portanto, ainda hoje um devotado esforço tem sido feito para o desenvolvimento de uma teoria abrangente para asas móveis.**
- **Essencialmente, buscaremos descrever os sistemas de idéias, manifestos através de seus maiores expoentes. Para isso, algumas personalidades serão eleitas como representativas de sistemas, escolas, doutrinas e teorias; elas serão nossos guias pela história da mecânica dos fluidos.**



Antiguidade

- **6500-2900 a.C.** Período Neolítico. Domesticação das plantas e dos animais.
- **3500 a.C.** *Início do império babilônico. A escrita cuneiforme; primeiramente gráfica, depois fonética. 400 a 500 sinais representando sílabas.*
- **3100 a.C.** Menes unifica o Egito superior e inferior. Uma nova capital é erigida em Mênfis.
- **3000 a.C.** Mesopotâmia. O rei de Agade, Sargão I, estende seus domínios até o Mediterrâneo.
- **3000-1700 a.C.** Inglaterra. Construção de Stonehenge.
- **3100-2668 a.C.** Primeiro período dinástico egípcio. Fortalecimento da unificação do Egito.
- **2900-2000 a.C.** Idade do Bronze.
- **2900 a.C.** *Primeiros hieróglifos.*
- **2700 a.C.** O calendário de 365 dias é inventado no Egito (começando em junho).
- **2686-2613 a.C.** 3ª dinastia egípcia. Zoser constrói a primeira pirâmide em Sakkara com o auxílio de Imhotep (Vizir, arquiteto e sacerdote).





3000 a.C.



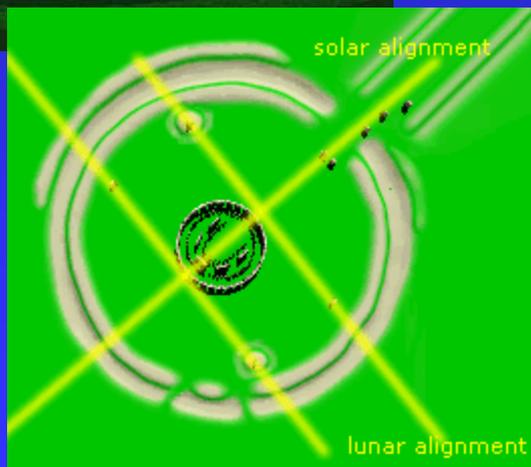
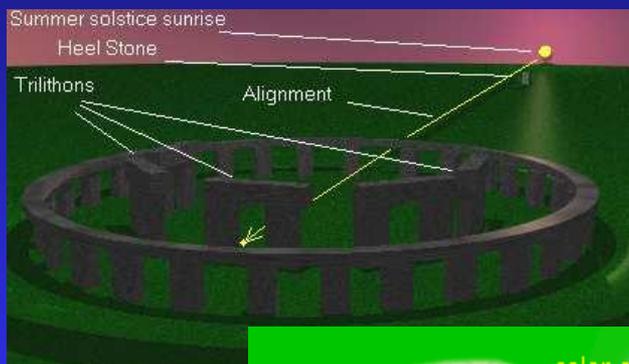
2500 a.C.



2300 a.C.



1700 a.C.





- 2600 a.C. Khufu (Kheops) constrói a pirâmide de Gizé, Chephren uma segunda e a Esfinge, e Mycerinus a terceira.
- 2500 a.C. Desenvolvimento da civilização minóica.
- 2250 a.C. Império babilônico. Hamurabi.
- 2181-2040 O aumento de poder dos governos provincianos leva à quebra da autoridade central e ao caos em todo o Egito.
- 2100 a.C. Mentuhopet II . 1º rei da 11ª dinastia unifica o Egito e estabelece a nova capital em Tebes.
- 2000-1000 a.C. *Egito: idéias de equações lineares, áreas e volumes. Mesopotâmia: teorema de Pitágoras, equações quadráticas, sistemas de equações.*
- 1700-1550 a.C. 13ª dinastia colapsa.
- 1674 a.C. Mênfis cai para os Hicsos.
- 1550-1085 a.C. Ahmose derrota os Hicsos e estabelece uma nova dinastia no Egito.
- 1512-1448 a.C. Tutmosis III. Os domínios do Egito se estendem até o rio Eufrates.
- 1450 a.C. Tutmosis IV desenterra a Esfinge.
- 1391-1358 a.C. Amenhotep IV tenta instituir uma religião monoteísta no Egito com a adoração do deus Aten.
- 1368-1349 a.C. Tutankhamon restabelece os antigos cultos mas é assassinado.
- 1300 a.C. Moisés, e os dez mandamentos. Judaísmo.
- 1299 a.C Ramsés II luta contra os Hititas a batalha de Kadesh. Ele é considerado o maior construtor de templos do Egito antigo.



Tutankhamon



RamsésII



Osiris



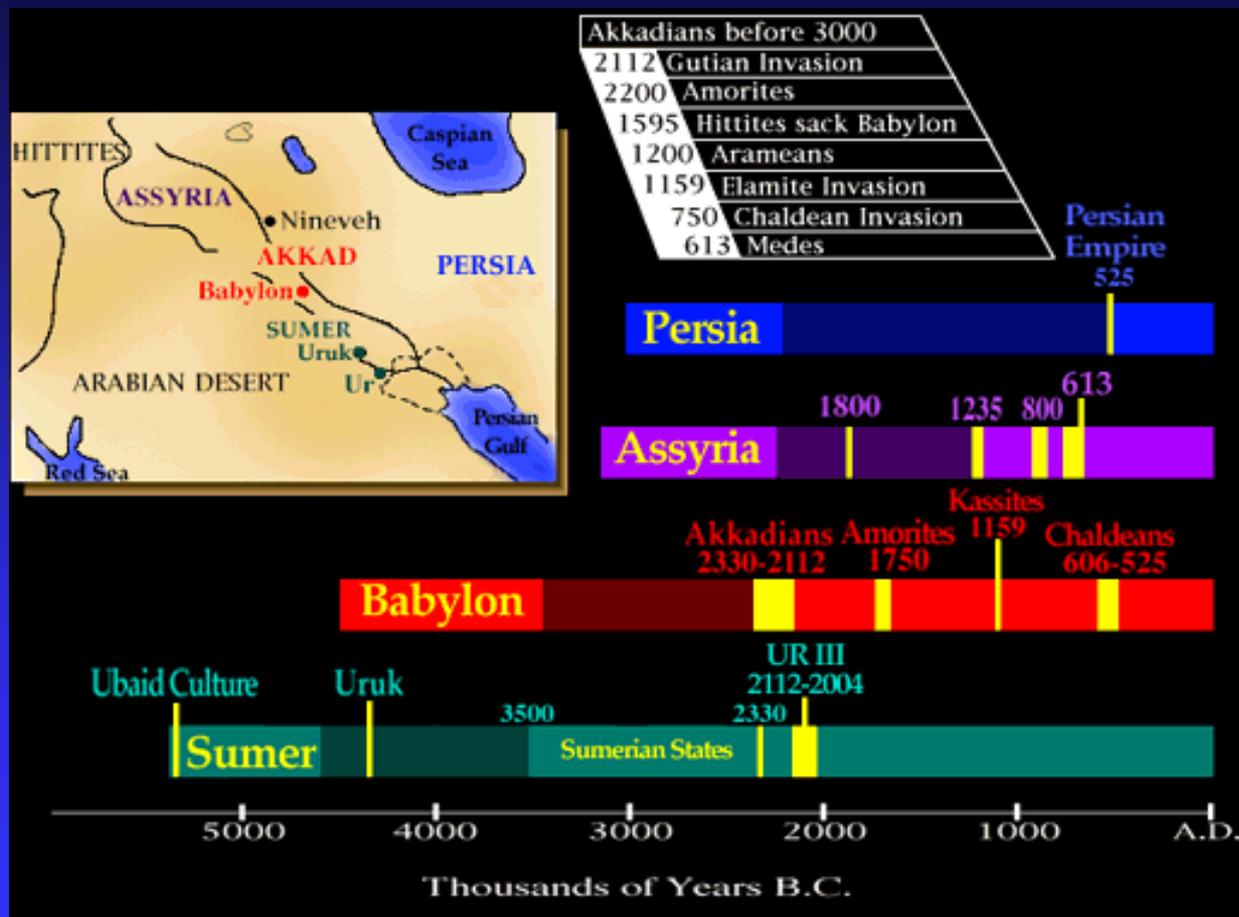
- 1220 a.C. Destruição de Creta.
- 1224-1165 a.C Ramsés III expulsa os invasores marítimos.
- 1070-712 a.C. Reis fracos governam o Egito.
- 1050-750 a.C. Período inicial da formação da Grécia.
- 1000 a.C. *China: primeiras pipas.*
- 1000-500 a.C. *Índia: raiz quadrada, teorema de Pitágoras. China: teorema de Pitágoras. Grécia: início da geometria teórica.*
- 800-700 a.C. A Itália é ocupada pelos helênicos e pelos etruscos.
- 750-500 a.C. Período da Grécia arcaica. Os gregos buscam terras novas para a agricultura. As cidades-estado se formam por todo o mediterrâneo funcionando como unidades políticas, cada uma governada por um rei e um conselho.
- 728 a.C. Fim do império babilônico pelos assírios. Invasão do Egito.
- 730-710 a.C. Os espartanos conquistam o sul do Peloponeso.
- 677-671 a.C. Os assírios invadem o Egito, saqueando Tebes e Memphis.
- 625 a.C. Segundo império babilônico, Nebuchadnezzar II.
- 551-478 a.C. China. Confúcio e os 9 clássicos.
- 525-404 a.C. A primeira dinastia pérsica no Egito é estabelecida (Ciro). As conquistas de Câmbises, filho de Ciro. Expansões de Dario.
- 509 a.C. Os romanos encerram a dinastia etrusca.
- 563-483 a.C. Índia. Sidarta Gautama e as quatro nobres verdades. A lei do Karma. Início do budismo.
- 500-300 a.C. *Grécia: Platão, Aristóteles, matemática axiomática, descoberta da incomensurabilidade, Eudoxus e proporcionalidade. Egito: Euclides e os Elementos.*



Painel Assírio

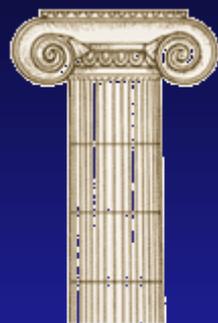


Búfalo da Babilônia





**Coluna
Dórica**



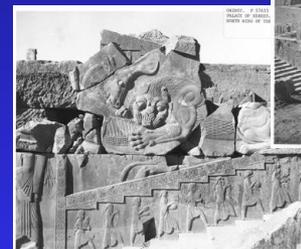
**Coluna
Jônica**



**Coluna
Coríntia**



- **490 a.C. Primeira guerra pérsica. Atenas (Gen. Milcíades) derrota os persas na planície de Maratona.**
- **480 a.C. Segunda guerra pérsica. Os persas liderados por Xerxes destroem Atenas. Os gregos vencem a batalha marítima de Salamina e terrestre de Platea.**
- **461-446 a.C. Primeira guerra do Peloponeso entre Esparta e Atenas (Péricles).**
- **431-405 a.C. Segunda guerra do Peloponeso entre Esparta e Atenas.**
- **399 a.C. Sócrates é julgado e executado por sua oposição aos Trinta tiranos.**
- **386 a.C. Platão funda a Acadêmia.**
- **384 a.C. Aristóteles nasce.**
- **359 a.C. Felipe II se torna rei da Macedônia.**
- **357-356 a.C. Guerra social entre a Grécia e a Macedônia.**
- **340 a.C. Início das guerras latinas.**
- **338 a.C. Felipe II derrota os atenienses e os tebanos.**
- **336 a.C. Felipe II é assassinado. Alexandre, o grande, assume o trono.**
- **332 a.C. Alexandre derrota os persas em Grânico, Isso e Arbelas. Ele constrói a capital de seu império em Alexandria.**



Palácio de Xerxes



Leônidas



Felipe II



Alexandre, o grande



Construção de Alexandria



- **331-323 a.C. Período helenístico. Macedônia, Egito e Síria emergem como os 3 maiores impérios.**
- **330-304 a.C. Dinastia dos Ptolomeus.**
- **264 a.C. Primeira guerra púnica de Roma contra Cartago (Amílcar Barca).**
- **241 a.C. Os romanos conquistam a Sicília.**
- **218-201 a.C. Segunda guerra púnica. Aníbal é derrotado.**
- **197 a.C. Felipe V é derrotado pelos romanos em Kynoskephalai.**
- **149-146 a.C. Terceira guerra púnica termina com a captura de Cartago.**
- **44 a.C. Júlio César é assassinado. (Bruto e Cássio)**
- **31 a.C. Otávio derrota Marco Antônio. Batalha naval de Actium.**
- **300 a.C.-0 d.C. China: raízes quadradas e cúbicas, sistemas de equações lineares. Grécia: Arquimedes e a física teórica, Hiparco e a trigonometria. Egito: Apolônio e as seções cônicas.**
- **5-6 a.C.-33 d.C. Jesus de Nazaré. Jesus Cristo. Início do cristianismo.**
- **0-200 d.C. Alexandria: Heron e a matemática aplicada. Judéia: Nicomachus e a teoria dos números. Egito: Claudius Ptolomeu e a astronomia.**



Aníbal



- 200-400 d.C. *Egito: Diophantus e a teoria dos números.*
- 235-284 d.C. Germanos, godos e persas atacam Roma, Atenas, Esparta e Corinto.
- 284 d.C. Diocleciano restabelece a ordem e divide o império romano em dois.
- 312 d.C. Constantino se estabelece como governante absoluto de Roma.
- 400-800 d.C. *Itália: Boethius e a matemática elementar. México: numeração Maia e astronomia. Índia: Aryabhata e a trigonometria; Brahmagupta e análise indeterminada. Desenvolvimento do sistema numérico decimal hindu-arábico. China: primeiras tabelas com tangentes.*
- 410 d.C. Os godos destroem Roma.
- 570-632 d.C. Mohammed, fundador do islamismo, escritor do Alcorão.
- 641 d.C. Conquistas árabes.
- 771-814 d.C. Império de Carlos Magno. Reunião dos povos germânicos.
- 800-1000 d.C. *Índia: desenvolvimento da álgebra. Iraque e Egito: álgebra avançada.*
- 1000-1200 d.C. *Iraque: indução e o triângulo de Pascal. Egito: soma de potências e volumes de parabolóides. Irã: soluções geométricas de equações cúbicas. Índia: trigonometria esférica. China: triângulo de Pascal utilizado para resolver equações. Leonardo de Pisa (Fibonacci) e a introdução da matemática islâmica.*
- 1096-1272 d.C. As Cruzadas (total de oito). Papa Urbano II.
- 1140 d.C. A fundação de Portugal. D. Afonso I (Henriques).
- 1200-1400 d.C. *Oxford: velocidade, aceleração e o teorema da velocidade média.*
- 1300 d.C. *Europa: primeiras pipas, primeiros moinhos de vento, a bússola.*
- 1436 d.C. Fim da guerra dos 100 anos.



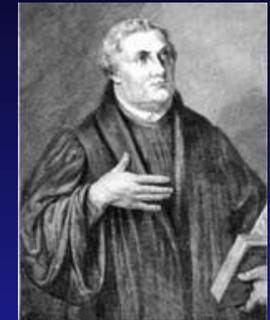
Diocleciano



Constantino



- **1400-1600 d.C.** *Índia: descoberta das séries de potência para o seno, o cosseno e o arcotangente. Itália: solução algébrica de equações cúbicas. Alemanha: perspectiva e geometria. Polônia: Nicolau Copernico e o sistema heliocêntrico. França: Viète e o simbolismo algébrico.*
- **1453 d.C.** O império do oriente termina.
- **1455 d.C.** Gutenberg. 1º livro impresso por blocos gravados (Bíblia).
- **1490 d.C.** *Contribuições de Leonardo da Vinci.*
- **1492-1498 d.C.** O descobrimento da América.
- **1498 d.C.** Caminho marítimo para as Índias.
- **1500 d.C.** O descobrimento do Brasil.
- **1500-1600 d.C.** A reforma da Igreja. As 95 teses de Martinho Lutero(1483-1546). João Calvino (1509-1564). Santo Inácio de Loiola (1491-1556). Isabel (1533-1603), rainha da Inglaterra. William Shakespeare (1564-1616).
- **1600-1700 d.C.** *Kepler, Newton e a mecânica celeste. Descartes, Fermat e a geometria analítica. Napier, Briggs e os logarítmos. Pascal, Fermat e a teoria elementar das probabilidades. Newton, Leibniz e a invenção do cálculo.*
- **1600 d.C.** *Galileo é o primeiro a compreender que a resistência aerodinâmica varia direta e proporcionalmente com a massa específica.*
- **1673 d.C.** *Edme Mariotte afirma que a resistência aerodinâmica varia com o quadrado da velocidade.*
- **1700-1800 d.C.** *Desenvolvimento de técnicas para a resolução de equações diferenciais ordinárias e parciais. Desenvolvimento do cálculo de funções a várias variáveis. Lagrange e a análise da solução de equações polinomiais.*
- **1732 d.C.** *Invenção do tubo de Pitot.*
- **1738 d.C.** *Daniel Bernoulli publica o livro Hidrodinâmica.*



Lutero



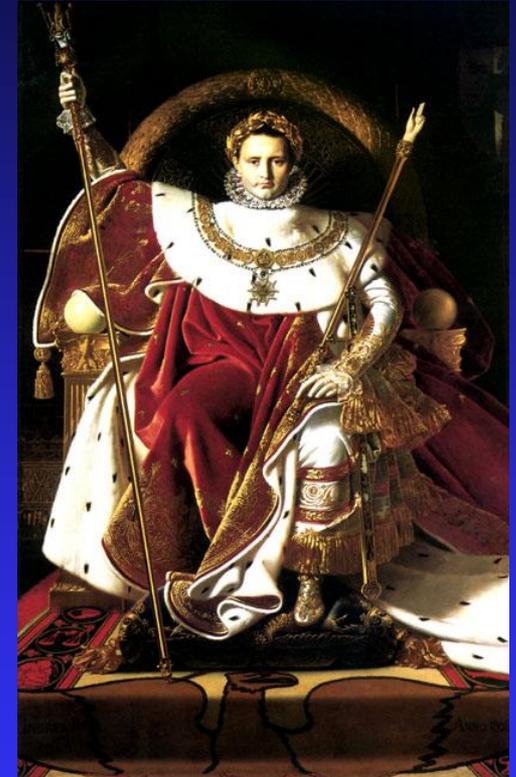
Calvino



Isabel I

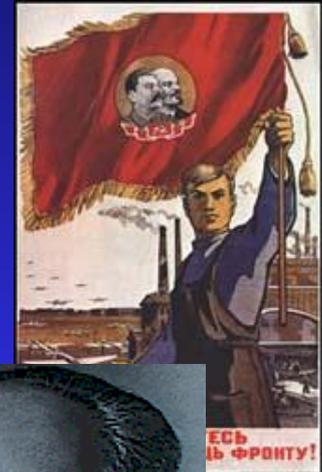


- **1744 d.C.** *d'Alembert anuncia seu paradoxo.*
- **1752 d.C.** *Leonard Euler publica as equações do movimento para um fluido não viscoso.*
- **1765-1788 d.C.** **Revolução americana.**
- **1776 d.C.** **Declaração de independência americana (Jefferson).**
- **1787-1788 d.C.** **Ratificação da constituição americana.**
- **1788 d.C.** *Joseph Lagrange introduz o conceito de potencial de velocidade e de função de corrente.*
- **1789 d.C.** **Revolução francesa. Queda da Bastilha.**
- **1799 d.C.** **Golpe de estado por Napoleão.**
- **1799 d.C.** *George Cayley introduz a configuração moderna dos aeroplanos.*
- **1800-1900 d.C.** *Teoria algébrica dos números. Teoria das matrizes. Análise complexa. Análise vetorial. Geometria diferencial. Geometria não euclidiana.*
- **1804 d.C.** *Teste com sucesso do primeiro planador (Cayley).*
- **1810 d.C.** *Publicação dos três artigos de Cayley.*
- **1814 d.C.** **Abdicação de Napoleão.**
- **1815 d.C.** **Batalha de Waterloo (Duque de Wellington).**
- **1822 d.C.** **Independência do Brasil.**
- **1840 d.C.** *Publicação das equações do movimento para um fluido viscoso, as equações de Navier-Stokes.*





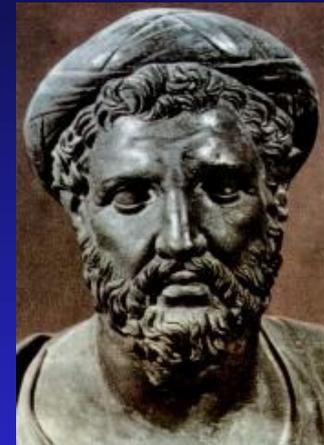
- 1848 d.C. Publicação do manifesto comunista.
- 1861-1865 d.C. Guerra civil americana.
- 1865-1870 d.C. Guerra do Paraguai.
- 1888 d.C. Abolição da escravatura no Brasil.
- 1889 d.C. Proclamação da República no Brasil.
- 1893 d.C. *Primeiro vôo tripulado de uma máquina mais pesada que o ar. Otto Lilienthal.*
- 1896 d.C. *Primeiro vôo de uma máquina mais pesada que o ar propulsada por um motor. Samuel Langley.*
- 1903 d.C. *Primeiro vôo de uma máquina mais pesada que o ar, tripulada, propulsada por um motor e com controle de vôo. Wilbur e Orville Wright.*
- 1904 d.C. *Prandtl. Teoria da camada limite.*
- 1906 d.C. *Teoria da circulação para a sustentação.*
- 1906 d.C. *Primeiro vôo de uma máquina mais pesada que o ar, tripulada, propulsada por um motor, com controle de vôo e decolagem por meios próprios. Santos Dumont.*
- 1915 d.C. *Prandtl. Teoria da sustentação.*
- 1914-1918 d.C. I Guerra Mundial.
- 1917 d.C. Revolução bolchevista.
- 1922 d.C. *Max Munk. Teoria do aerofólio fino.*
- 1940 d.C. *Teoria do escoamento supersônico.*
- 1939-1945 d.C. II Guerra Mundial.
- 1949 d.C. Revolução comunista chinesa (Mao Zedong).



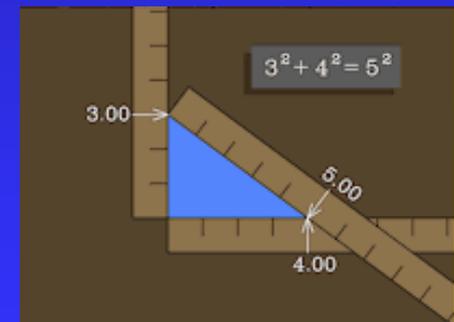


500-323 a.C. O período clássico

- A substância única, a causa, o princípio do mundo natural vário, múltiplo e mutável: a água (Tales de Mileto, 624-546 a.C.), o indeterminado (Anaximandro, 610-547 a.C.) e o ar (Anaxímenes, 585-528 a.C.).
- Segundo Pitágoras (571-497 a.C.), a essência, o princípio primordial da realidade é representado pelo número, isto é, pelas relações matemáticas.
- Para Heráclito a realidade única é o vir-a-ser perpétuo e o princípio primordial é o fogo: tudo muda, tudo está sujeito a um fluxo eterno.
- Parmênides, a esfera suspensa no vácuo.
- Empédocles (494 e 432 a.C.), os quatro elementos fundamentais: a terra, a água, o ar, o fogo.
- Anaxágoras (500 -428 a.C.), uma infinidade de partículas mínimas, eternas e imutáveis.
- Demócrito (Trácia, 460-370 a.C.) divide o ser único em uma infinidade de corpúsculos simples e homogêneos (átomos) iguais na qualidade, diversos por grandeza, forma, posição.

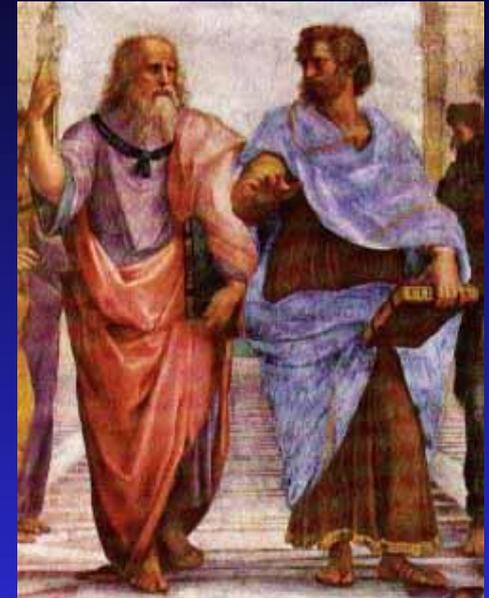


Pitágoras





- **Sócrates (470-399 a.C.) nasceu em Atenas; ele foi um amargo crítico do saber vulgar, da opinião, buscando incansavelmente o saber racional, universal, imutável. Sua filosofia, de finalidade prática, moral, se realiza apenas pelo conhecimento, pela razão. A única construção racional de Sócrates é a gnosiologia, não a metafísica; com isso, ele deu-nos um método da ciência, não uma ciência verdadeira e própria. A gnosiologia de Sócrates fundamenta-se nos seguintes pontos: ironia, maiêutica, introspecção, ignorância, indução, definição. Embora não tenha deixado escrito algum, Sócrates descobriu um método sendo virtualmente o fundador da ciência, em geral, mediante a doutrina do conceito.**

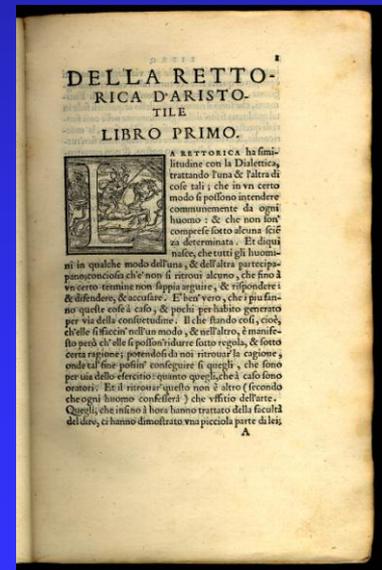
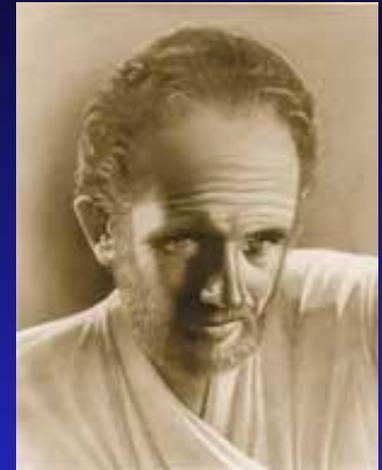


- **Platão (428-348 a.C.), como seu mestre Sócrates, também nasceu em Atenas. Distinguindo um conhecimento sensível - a opinião - e um conhecimento intelectual - a ciência, Platão julga que o conhecimento intelectual não pode derivar do conhecimento sensível, por terem esses dois conhecimentos características opostas. Em Atenas, por volta de 387 a.C., Platão fundou sua célebre escola, que, dos jardins de Academo, onde surgiu, adquiriu o famoso nome de *Academia*. A Academia sobreviveu por quase um milênio, até o século VI d.C.**



Aristóteles

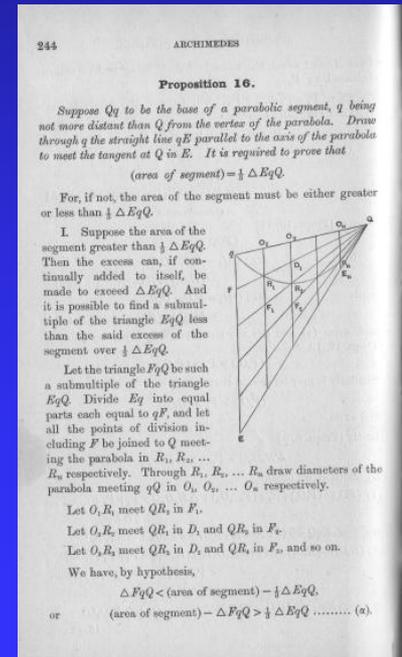
Aristóteles (384-322 a.C.) nasceu na Estagira, na Trácia. A primeira edição das obras de Aristóteles data do século I a.C. Elas podem ser classificadas em: I) Escritos lógicos. II) Escritos sobre a física. III) Escritos metafísicos. IV) Escritos morais e políticos. V) Escritos retóricos e poéticos. Segundo Aristóteles a filosofia é essencialmente teórica, deve decifrar o enigma do universo. A filosofia aristotélica é dedutiva, mas o ponto de partida da dedução é tirado-- mediante o intelecto - da experiência. Segundo sua classificação, a filosofia divide-se em teórica, prática e poética. A teórica, por sua vez, divide-se em física, matemática, teologia e metafísica; a filosofia prática divide-se em ética e política; a poética em estética e técnica. Aristóteles é o criador da lógica, por ele denominada analítica. No sentido estrito a filosofia aristotélica é a dedução do particular pelo universal, explicação do cotidiano mediante a condição. A lógica aristotélica é, portanto, essencialmente dedutiva, demonstrativa, apodíctica. Seu processo característico clássico é o silogismo. Portanto, segundo Aristóteles, os conceitos e juízos devem ser tirados da experiência.





Arquimedes

Arquimedes (287-212 a.C.) nasceu em Siracusa na Sicília. De acordo com alguns historiadores, inclusive Plutarco, Arquimedes visitava constantemente o Egito tendo estudado com os discípulos de Euclides em Alexandria. Apesar de ter construído sua reputação por intermédio das máquinas que inventou, Arquimedes acreditava ser a matemática pura o único objeto merecedor de sua atenção. Ele aperfeiçoou um método de integração que lhe permitia calcular áreas e volumes de muitos corpos. Na mecânica, Arquimedes descobriu teoremas importantes relacionados ao centro de gravidade de um corpo; seu teorema mais famoso conhecido como o teorema de Arquimedes fornecia o peso de um corpo imerso em um líquido.





A coroa de ouro do rei Hierão II

De acordo com Vitruvius, para determinar se a coroa de Hierão seria de ouro, Arquimedes teria simplesmente colocado um objeto de ouro puro e com o mesmo peso da coroa em um recipiente completamente cheio. A seguir, o objeto teria sido retirado do recipiente e a coroa colocada em seu lugar. Com o maior volume da falsa coroa, a água no recipiente teria transbordado. Isso provaria a fraude. Entretanto, as coroas fabricadas na época possuíam a forma das coroas de louros.

Tipicamente essas coroas possuíam um diâmetro máximo de 18,5 cm e massa de 1000 g; consideremos ainda que o diâmetro do recipiente fosse de 20 cm. Logo, uma coroa de ouro pura colocada no recipiente provocaria uma variação no nível d'água de 0,165 cm. Considere ainda que o artesão tivesse colocado 300 g de prata na coroa. Isso resultaria em um aumento de nível de 0,206 cm. A diferença, portanto, no deslocamento de água de um caso para outro seria uns meros 0,41 mm, uma diferença muito difícil de ser observada àquela época.



Hieron II





MECÂNICA DA
TURBULÊNCIA

A Biblioteca de Alexandria

(700.000 manuscritos)



Ptolemy I Soter, 367-283 A.C.



Ptolemy II Philadelphus, 308-246 A.C.



Cleopatra VII, 69-30 A.C.

Demetrius of Phalerum, 350-? A.C.

Julius Caesar, 100-44 A.C.



Alexandria

Por uma decisão política dos Ptolomeus, escritores, poetas, artistas e cientistas foram trazidos a Alexandria de todo o mundo conhecido para enriquecerem duas instituições sem precedente: o “Museu” e a “Biblioteca”. O Museu, ou, o templo das musas, foi o primeiro instituto científico e a maior das universidades dos tempos antigos.

Supõe-se que foi Demetrius de Phalerum, filósofo peripatético e chanceler romano, a convencer Ptolomeu I Soter a estabelecer um grande centro do saber. Iniciada em 290 a.C., a biblioteca atingiu seu ápice durante o reinado de Ptolomeu II Philadelphus. Alexandria era uma biblioteca de Estado, mas sem público. Sua finalidade não era a difusão filantrópica e educativa do saber na sociedade, e sim a acumulação de todos os escritos da Terra, no centro do palácio real. Para o enriquecimento da biblioteca não se pouparam meios. O mandato do rei, segundo a *Carta de Aristeu*, é de “reunir na íntegra, se possível, todas as obras aparecidas no mundo inteiro”. Para isso recorria-se a confiscos, a aquisições e a transcrições sistemáticas. Embora nenhum dado concreto exista, acredita-se que, no seu ápice, a biblioteca chegou a reunir 700.000 pergaminhos o que nos dias de hoje representaria de 100 a 125.000 livros.

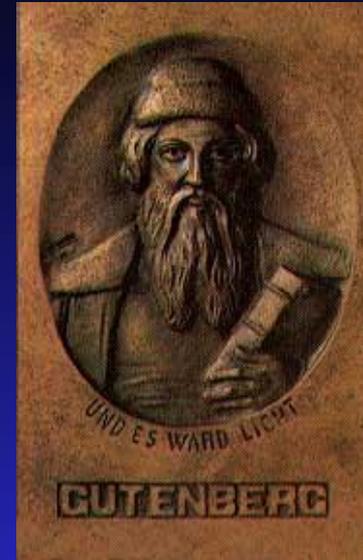


Aristeu, filho do deus Apolo com a ninfa Cirene.



O Renascimento

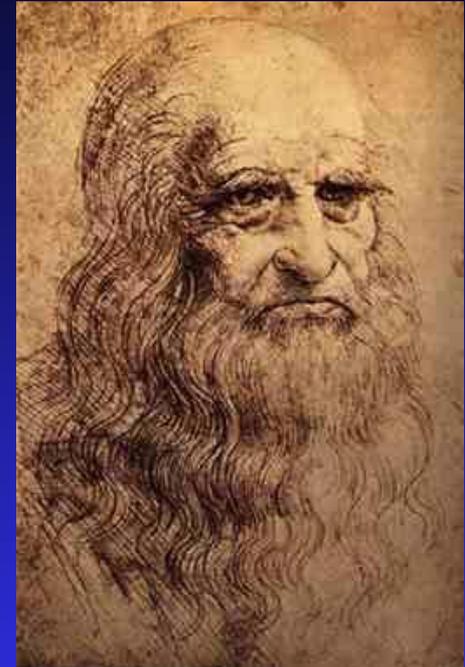
Após os anos de escuridão provocados pela política dogmática da igreja, o aparecimento da imprensa moderna em 1455 fortemente contribuiu para a vulgarização dos autores e a disseminação dos conhecimentos. A impressão por blocos gravados era conhecida e usada. Praticavam-na os chineses e os ocidentais a tinham adquirido. Na primeira metade do século XV imprimiam-se livros inteiros por esse processo demorado e dispendioso. Foi porém Gutenberg (1400-1468) quem imaginou servir-se para a impressão de tipos separados, que seu associado Faust pensou fabricar de uma liga de chumbo e antimônio. Em poucos anos as obras de escritores gregos, latinos e hebraicos estariam ao alcance da inteligência européia.

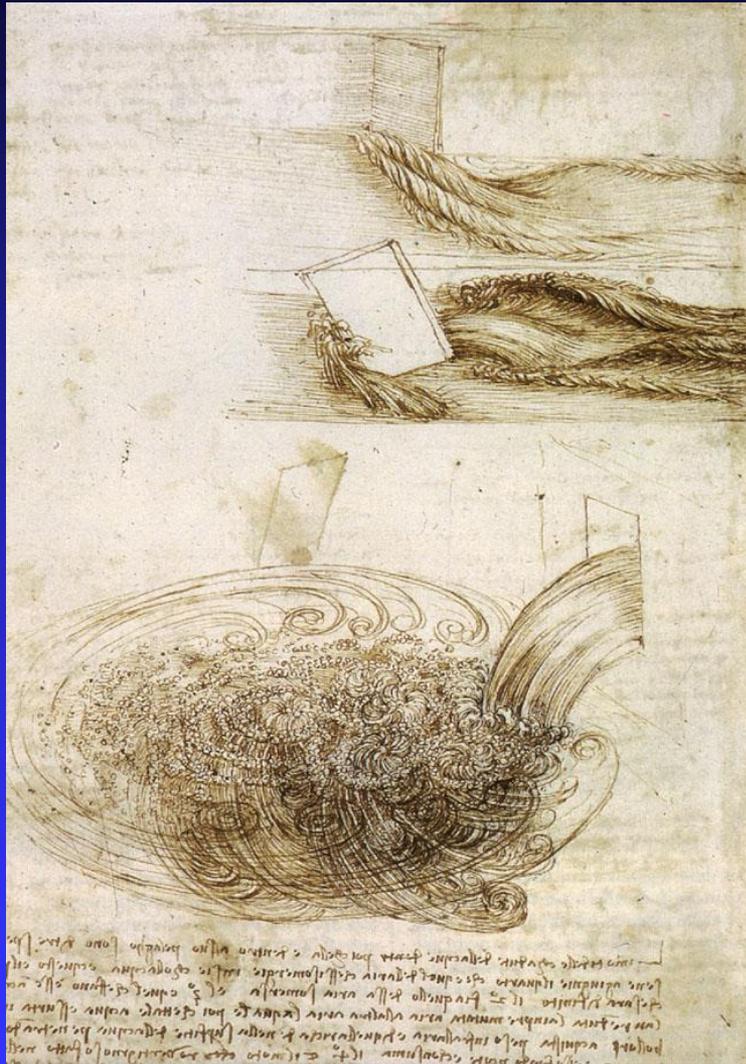




1490 Contribuições de Leonardo da Vinci (1488-1514)

1. Lei da continuidade.
2. Observações e desenhos de vários padrões de escoamento, constituindo-se na primeira contribuição qualitativa para a mecânica dos fluidos experimental.
3. Afirmção do “Princípio do túnel de vento”.
4. Afirmção de que a resistência do ar é diretamente proporcional à área exposta do corpo.
5. Introdução do conceito de formas aerodinâmicas para reduzir o arrasto.







A Ciência de Leonardo da Vinci (1488-1514)

“Nenhum conhecimento pode ser certo se não for baseado em matemática ou em outro conhecimento ele próprio baseado nas ciências matemáticas. A ciência mecânica, é a mais nobre e está acima de todas, a mais útil.”

“Que nenhum homem que não seja um matemático leia os elementos de meu trabalho.”

Codex sobre o vôo dos pássaros

“um pássaro é um instrumento que funciona de acordo com as leis matemáticas, um instrumento dentro da capacidade do homem de ser reproduzido em todos os seus movimentos, embora não com o correspondente grau de resistência, por sua deficiência na potência de manter o equilíbrio. Podemos então dizer que a tal instrumento construído pelo homem nada falta exceto a vida de um pássaro, e que esta vida deve portanto ser fornecida através daquela do homem.”

A afirmação acima levou à construção do ornitóptero.

Codex Trivultianus

“Quando a força gera mais velocidade que o alívio da resistência do ar, o mesmo é comprimido da mesma forma que os colchões de pena são comprimidos e esmagados por uma pessoa que dorme.”

1a tentativa de explicar o conceito de sustentação.



Codex Atlanticus

“O ar a altas velocidades que atinge um corpo é comprimido proporcionalmente à sua velocidade”.

1ª tentativa de quantificar a força aerodinâmica.

Codex E

“Que qualidade de ar cerca os pássaros em vôo? O ar circundando os pássaros é menos espesso acima deles que a espessura de outros ares, e abaixo mais espesso que mesmo o ar, e é menos espesso atrás do pássaro que acima dele em proporção à velocidade do pássaro em seu movimento avante, em comparação com o movimento das asas em relação ao solo; e, do mesmo modo, a espessura do ar na frente do pássaro é maior que a espessura do ar abaixo dele, em proporção à dita espessura dos ditos ares”.

1ª tentativa de quantificar altas e baixas pressões.

Codex Atlanticus

“Mover o objeto contra o ar parado é como mover o ar contra o objeto parado.” “A mesma força exercida pela coisa sobre o ar, é exercida pelo ar contra a coisa.”

Princípio da reciprocidade aerodinâmica. Princípio de funcionamento dos túneis de vento.



Codex Atlanticus

“Portanto, se o ar se move contra asas fixas, o mesmo ar suporta o peso dos pássaros através do ar.”

1ª admissão de um mecanismo separado de propulsão. Princípio das asas fixas.

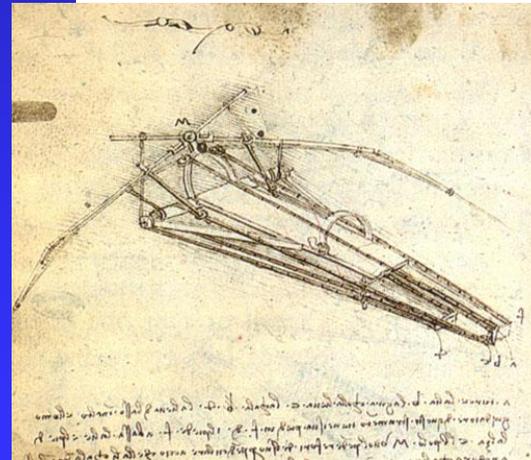
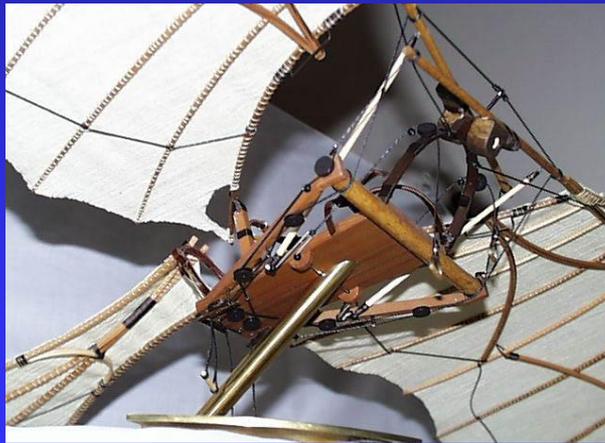
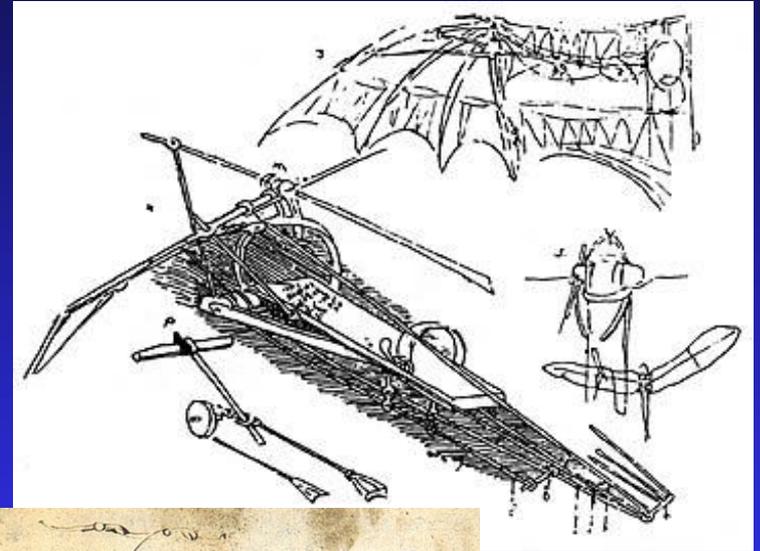


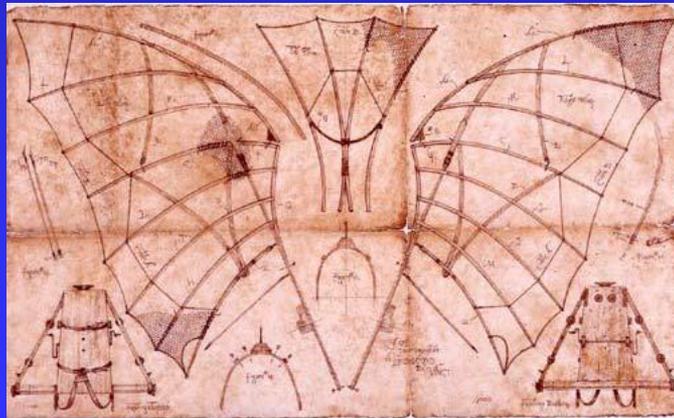
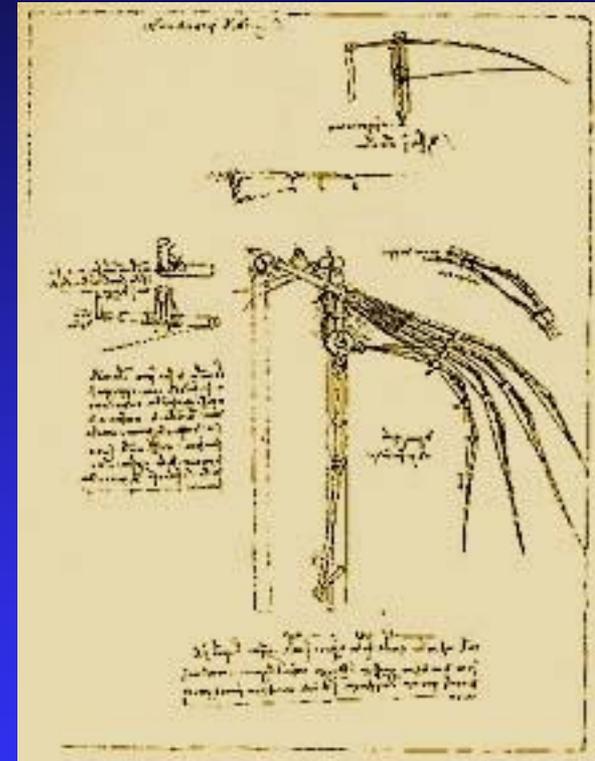
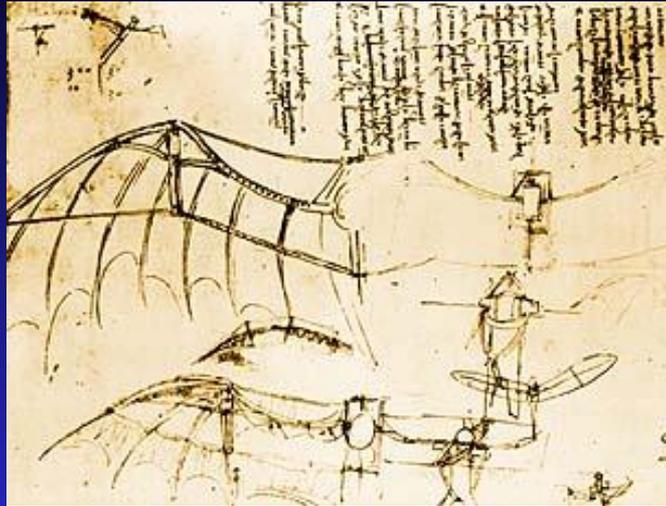
Codex G, Codex Arundel

**Desenhos de peixes e cascos de navios.
Formas aerodinâmicas avançadas.**

Introdução do conceito de corpos aerodinâmicos.







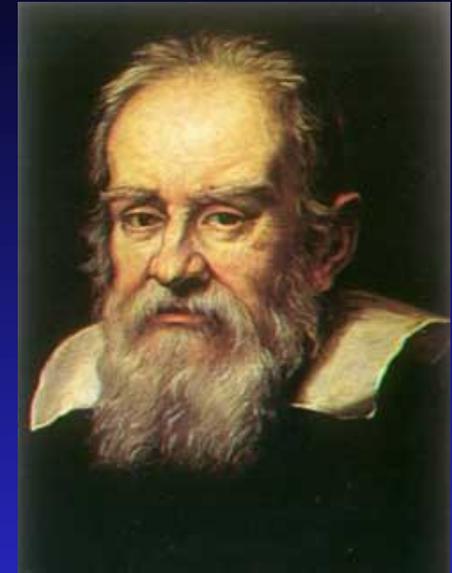


Galileo Galilei

O grande metodólogo da ciência natural foi Galileo Galilei (1564-1642). Nascido em Pisa na Toscana, Galileo foi o primogênito de uma prole de sete. Seu pai, Vincenzo Galilei, músico e compositor, foi a primeira pessoa a aplicar a teoria dos números para a análise de harmonia musical.

Galileo julga que apenas a aplicação da matemática à física poderá resultar na constituição do elemento verdadeiramente racional, universal e necessário da ciência moderna. Toda a ciência, então, deve ser construída sobre a experiência e a razão, ou, como afirma Galileo, sentido e discurso. Quanto ao procedimento para construir o saber, Galileo identifica três instâncias: i) a observação, ii) a hipótese, iii) a experimentação, que é a verificação da hipótese. Esta, quando confirmada experimentalmente, transforma-se em lei.

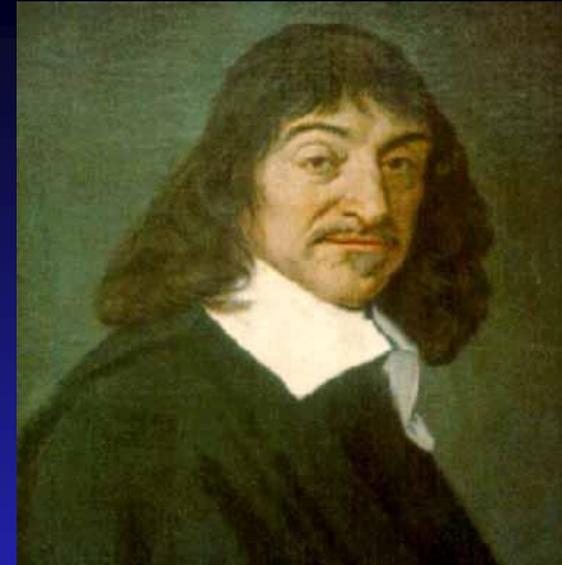
As contribuições de Galileo para a mecânica foram gigantes; ele introduziu os conceitos de inércia e de quantidade de movimento. Portanto, ele foi o primeiro a constatar que o efeito de uma força é modificar um movimento ao invés de simplesmente sustentá-lo. Em relação à mecânica dos fluidos, em experimentos envolvendo corpos em queda e o movimento de pêndulos ele foi capaz de verificar que a resistência aerodinâmica era diretamente proporcional à massa específica do fluido.





René Descartes

René Descartes (1596-1649) foi o fundador do racionalismo e da filosofia moderna; ele afirma ser o único método da ciência o método racionalista, dedutivo, próprio da matemática. O método cartesiano será explanado a seguir.



O ponto de partida é fornecido pela intuição, que seria a apreensão universal de essências elementares e de relações simples. Esses elementos intuitivos, portanto, têm que servir de fundamento a todo saber.

Da intuição depende o processo discursivo, a dedução em geral que Descartes separa em análise e síntese. A análise é o procedimento que isola as noções intuitivas e de onde deve partir a dedução em seu sentido estrito, chamada por ele de síntese. Um quarto elemento do método cartesiano é representado pela enumeração completa; esta seria o controle que garante que nenhum elo da cadeia dedutiva tenha sido omitido. Ela é, portanto, a conclusão, igualmente certa como o ponto de partida. Portanto, o método cartesiano consiste em quatro etapas: intuição, análise, síntese, conclusão.

Logo, para se aplicar o método cartesiano é mister encontrar um início concreto, para construir um sistema concreto. Com Descartes fica definitivamente inaugurada a época científica.

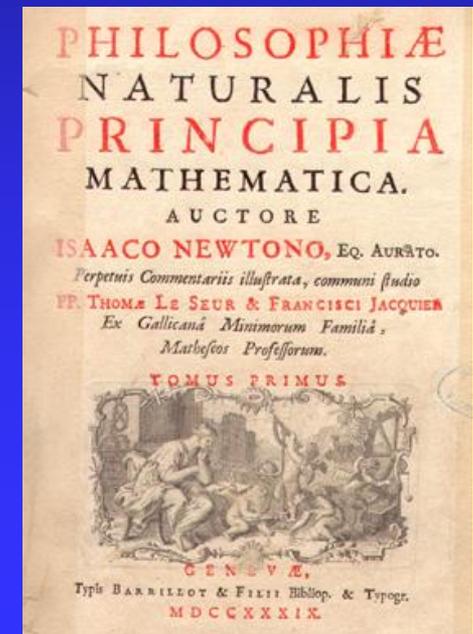
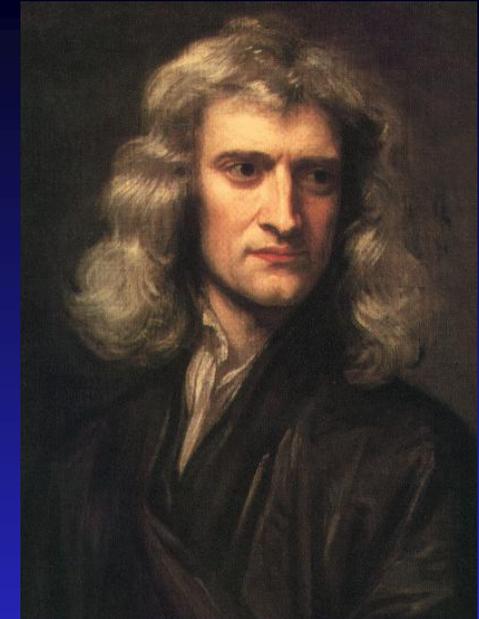


Isaac Newton

Newton (1642-1727) nasceu na localidade de Woolsthorpe.

Em 1668, Newton foi nomeado para a cátedra em matemática aplicada conhecida como “Lucasian Professorship”. Como preceptor da cátedra, Newton era obrigado a ministrar pelo menos uma aula por semana durante o ano acadêmico. Sua longa série de aulas, ministradas de 1669 a 1687, deram forma ao texto final que viria a se tornar seu famoso compêndio *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, publicado em 1687.

Newton foi o grande formulador da mecânica clássica. Suas três leis fundamentais concernentes ao movimento fornecem a base para toda a mecânica. Para a mecânica dos fluidos, sua segunda lei, que relaciona a força à taxa de variação da quantidade de movimento para um corpo em movimento, se tornou a equação básica para todo o estudo teórico doravante feito. De fato, a segunda lei de Newton seria utilizada no futuro por Euler, Navier e Stokes para obter as equações fundamentais do movimento de um fluido.





Especificamente, uma contribuição importante de Newton, registrada no Livro II do *Principia* diz respeito à relação existente entre a tensão cisalhante em um ponto do fluido e o gradiente local de velocidade. Na seção IX do Livro II, Newton afirma que a resistência resultante da ação do atrito em partes do fluido seria, conservadas as outras variáveis iguais, proporcional à taxa de deformação experimentada por um elemento fluido no escoamento.

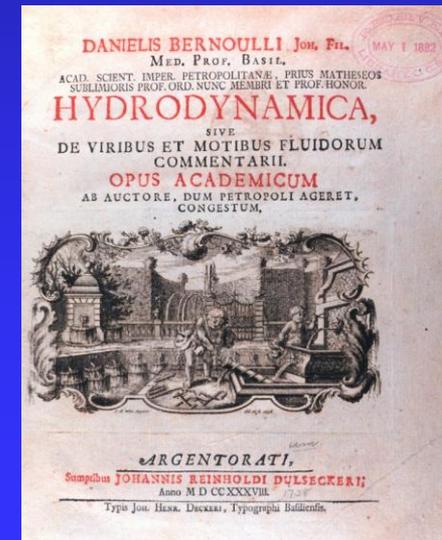
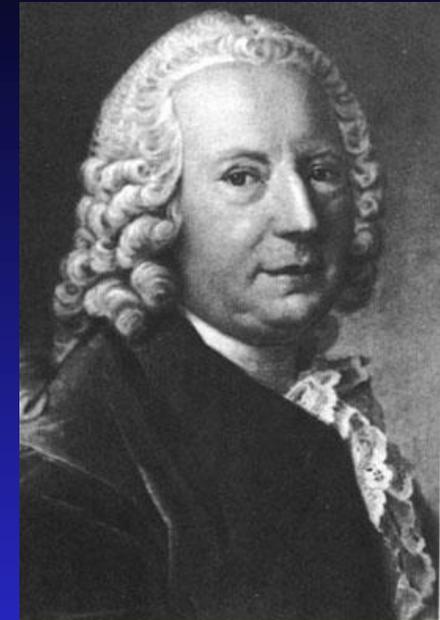


No final do século XVII um problema de especial interesse era a previsão do arrasto provocado pelo casco de um navio. A Inglaterra já havia se tornado a maior potência marítima mundial e seu domínio dos mares dependia sobremaneira do projeto e da construção de naus com alto desempenho. Este fato certamente colaborou para o interesse de Newton em mecânica dos fluidos. Entretanto, um problema de maior grandeza o atormentava. Descartes havia formulado uma teoria que afirmava ser o espaço interplanetário preenchido por uma matéria que se movimentava com movimentos do tipo vorticais ao redor dos planetas. Mas, as observações de Johannes Kepler publicadas em 1627 mostravam que o movimento dos planetas através do espaço não era dissipado, outrossim executava órbitas estáveis e periódicas. A única justificativa plausível para a teoria de Descartes seria, portanto, não existir atrito entre os planetas e o meio que os circundava, ou seja, o arrasto deveria ser nulo. O objetivo central de Newton, em mecânica dos fluidos, passou então a ser: provar que existe arrasto quando um corpo se move em um meio contínuo. Isso derrubaria a teoria de Descartes.



Daniel Bernoulli

Daniel Bernoulli (1700-1782) nasceu em Groningen na Holanda. Parte de uma família de famosos matemáticos, Bernoulli recebeu da Universidade de Basel em 1716, o título de mestre em filosofia e lógica. Prosseguindo com seus estudos, agora em medicina, e após passagens por Basel, Heidelberg e Strasbourg, Bernoulli recebe em 1721 seu doutorado em anatomia e botânica. Em 1725, Bernoulli ingressa na Acadêmia de Ciências de São Petersburgo, à época, um proeminente templo do saber. Em Petersburgo, Bernoulli publica seu famoso livro *Hydrodynamica* (termo cunhado por ele), terminado em 1634 mas publicado em 1638. Sua grande contribuição para a mecânica dos fluidos foi o estabelecimento de uma relação entre a variação da pressão e da velocidade em um escoamento.

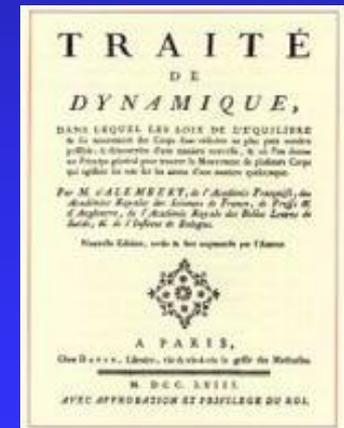




Jean d'Alembert

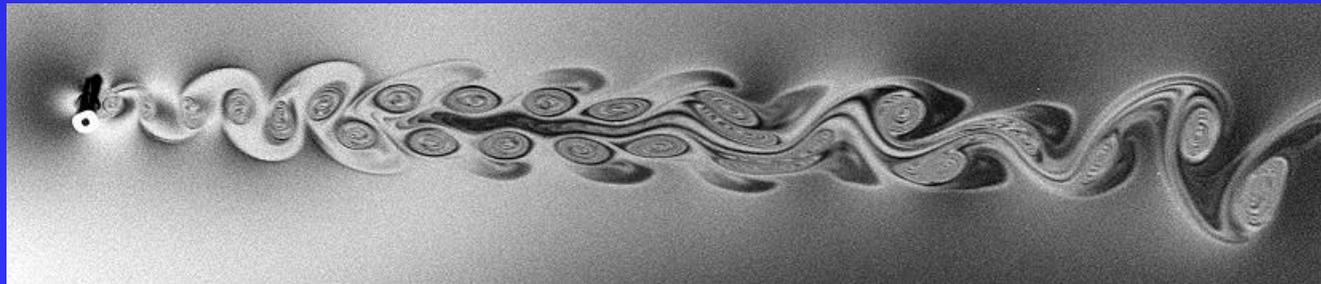
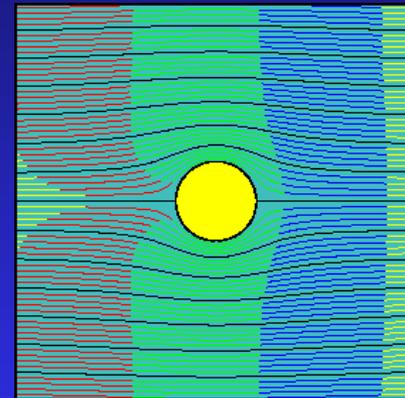
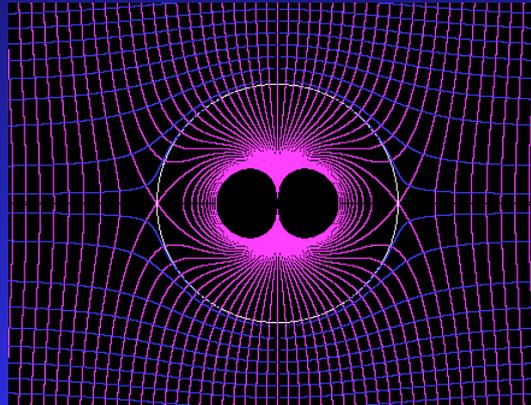
Jean le Rond d'Alembert (1717-1783) foi filho ilegítimo de Claudine de Tencin com Chevalier Destouches, um oficial de cavalaria. Logo após seu nascimento, em Paris, d'Alembert foi abandonado pela mãe que, mais tarde, viria a ser tornar uma famosa cortesã.

Com o apoio de seu pai, d'Alembert foi educado no Collège des Quatre-Nations, onde ele estudou direito e medicina, e, mais tarde, matemática. Em um programa de estudos planejado pessoalmente, d'Alembert aprendeu os trabalhos de Newton e Bernoulli. Seu esforço, notado pela Academia de Ciências de Paris, tornou-o um membro em 1741. Suas contribuições mais notáveis no período foram: i) ele foi o primeiro a formular a equação da onda, ii) o primeiro a expressar o conceito de uma equação diferencial parcial, iii) o primeiro a resolver uma equação diferencial parcial (pelo método da separação das variáveis), iv) o primeiro a expressar as equações diferenciais da dinâmica de um fluido por meio de um campo (de velocidades). A primeira vez que a equação da continuidade foi expressa em termos de uma equação diferencial aplicada localmente em um campo de escoamento ocorreu em seu artigo *Traité de l'équilibre et des mouvements des fluides pour servir de suite au traité de dynamique* (1744). Por quase toda sua carreira d'Alembert tentou resolver o clássico problema de um corpo se movendo através de um fluido. Entretanto, fosse qual fosse a análise que ele aplicasse ao problema o resultado final era sempre o mesmo: arrasto zero. Em um total estado de frustração, d'Alembert escreve em 1768 não ver como o problema pudesse ser resolvido; ele utiliza o termo “paradoxo” para admitir sua incapacidade em desenvolver uma teoria satisfatória, expressão que ficou famosa como o “Paradoxo de d'Alembert”. Claramente suas dificuldades resultavam da não consideração dos efeitos viscosos.





1744 Paradoxo de d'Alembert





Leonard Euler

Leonard Euler (1707-1783) nasceu em Basel na Suíça. Seu pai era um ministro protestante cujo passatempo era a matemática. Aos 13 anos, Euler ingressa na Universidade de Basel. Àquela época, a Universidade possuía 100 alunos e 19 professores. Um dos professores era Johann Bernoulli, que foi seu tutor em matemática. Foi em São Petersburgo que Euler concebeu a pressão como uma propriedade local que poderia variar de ponto para ponto e ser estabelecida a partir de uma equação diferencial que a relacionava com a velocidade do escoamento. A integração desta equação diferencial permitiu a Euler deduzir rigorosamente a equação de Bernoulli.



Em 1741 Euler já havia publicado 90 artigos e os dois volumes de seu livro *Mechanica*. Neste ano, distúrbios políticos na Rússia forçaram Euler a se mudar para Berlim. Na Associação de Ciências de Berlim, Euler continuou trabalhando com grande dinamismo tendo preparado pelo menos 380 publicações. Em 1766, após severas divergências com Frederico, o Grande, Euler retornou a São Petersburgo onde terminou seus dias

Euler foi o responsável pela rigorosa formulação matemática do movimento de um fluido.



A revolução francesa (1789-1798)



Robespierre

Danton



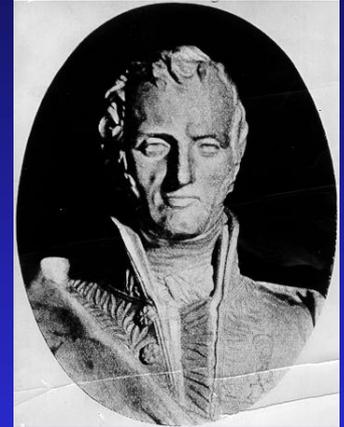


Claude Navier

Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) nasceu em Dijon na França. Seu pai, advogado, durante o período do terror na revolução francesa foi um destacado membro da Assembléia Nacional. Com a súbita morte de seu pai em 1793, Navier teve a boa fortuna de ser deixado aos cuidados de seu tio Emiland Gauthey, o, então, maior engenheiro francês. Sob a influência do tio, Navier ingressou, com dificuldade, na École Polytechnique em 1802. Apesar dos percaussos iniciais, Navier mostrou-se um brilhante aluno tendo sido particularmente influenciado por Fourier, seu professor de análise matemática. Em 1804 Navier ingressou na École de Ponts et Chaussées, obtendo, dois anos mais tarde, e com louvor, seu título de engenheiro.

Em 1819, Navier tornou-se regente dos cursos de mecânica aplicada na École des Ponts et Chaussées, sendo conduzido ao posto de catedrático em 1830. No ano seguinte ele substituiu Cauchy na École Polytechnique. Sua postura reformista, que defendia uma maior ênfase em física e análise matemática, logo lhe trouxe dissabores quando ele se envolveu em uma amarga disputa com Poisson a respeito do ensino da teoria de calor de Fourier.

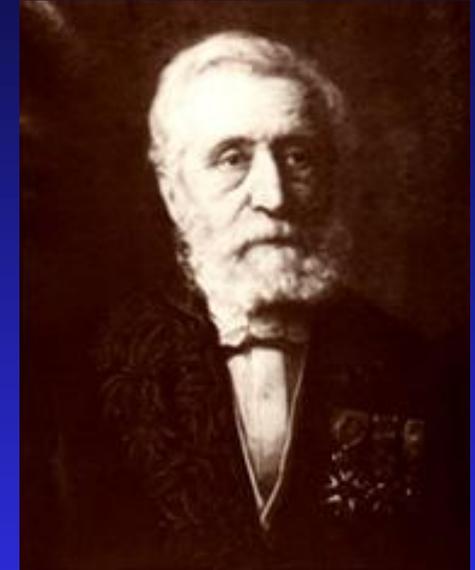
Um grande especialista na construção de estradas e pontes, Navier ficou universalmente conhecido pela primeira dedução das equações de movimento de um fluido em 1822, *Mémoire sur les lois du mouvement des fluids*. Apesar de não conhecer o conceito de tensões cisalhantes em um fluido, Navier deduziu as equações para um fluido viscoso baseando suas premissas em modificações das equações de Euler e em considerações sobre as forças de interação entre as moléculas de um fluido. Portanto, é irônico que Navier seja vastamente conhecido por obter um resultado clássico através de premissas totalmente equivocadas.





Adhémar Barré de Saint-Venant

Adhémar Jean Claude Barré de Saint-Venant (1797-1886) ingressou na École Polytechnique em 1813. Sua trajetória universitária seria seriamente abalada pelos violentos eventos de 1814 quando, guiado por sua consciência política, Saint-Venant se recusou a participar com seus colegas da defesa de Paris momentos antes da abdicação de Napoleão. Como consequência de seus atos Saint-Venant foi expulso da École Polytechnique tendo finalmente se formado em 1816 na École des Ponts et Chaussées. Saint-Venant trabalhou por 27 anos como um destacado engenheiro civil para o Service des Poudres et Salpêtres e para o Service de Ponts et Chaussées. Tardiamente, em 1839-1840, Saint-Venant frequentou o Collège de France onde estudou com Liouville. Na École des Ponts et Chaussées ele sucedeu Coriolis como professor de matemática.

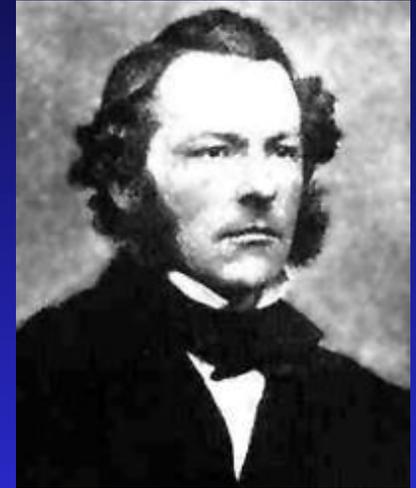


Em sua postergada vida acadêmica, Saint Venant se destacou com trabalhos em mecânica, elasticidade, hidrostática e hidrodinâmica. Sete anos após a morte de Navier, Saint Venant re-deduziu as equações do movimento para um fluido viscoso introduzindo, pela primeira vez, o conceito de tensões internas viscosas. Este trabalho de 1843, *Note à joindre un mémoire sur la dynamique des fluids*, derrubava por terra os argumentos moleculares de Navier, identificando, definitivamente, o coeficiente de viscosidade e seu papel como multiplicador dos gradientes de velocidade do escoamento. Ele ainda, corretamente, identificou aquele produto como as tensões viscosas que atuam sobre o fluido como resultado do atrito.



George Stokes

George Gabriel Stokes (1819-1903) nasceu em uma família com profunda conotação religiosa. Seu pai, Gabriel Stokes, era um ministro protestante em Skeen no condado de Sligo na Irlanda, enquanto sua mãe era a filha de um ministro da igreja. O alto grau de erudição de seus pais e suas conexões religiosas foram decisivos em sua educação. Mesmo antes de ingressar na escola, George já podia ler e escrever em latim ensinado por seu pai. Seus estudos, primeiro em Dublin e depois em Bristol foram fundamentais em sua preparação para ingressar em Cambridge. Stokes ingressou no Pembroke College em 1837 onde foi tutelado por William Hopkins. Ao terminar sua graduação em 1841, e, aconselhado por Hopkins, Stokes dedicou-se à pesquisa em hidrodinâmica publicando em 1842 o trabalho *On the steady motion of incompressible fluids*. Um curto tempo depois, Stokes descobriu que Duhamel tinha obtido resultados semelhantes aos seus mas sobre a distribuição de calor em um sólido.

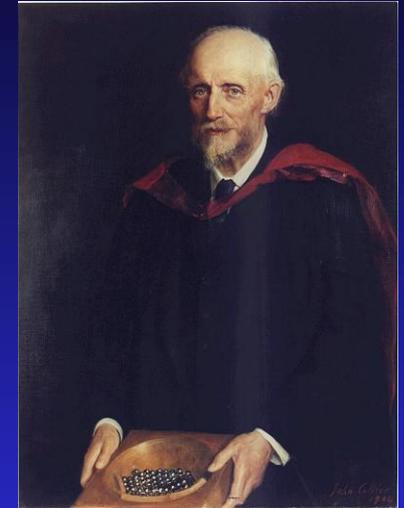


Continuando suas investigações Stokes corretamente deduziu as equações do movimento em um fluido levando em conta seu atrito interno. Novamente, ele descobriu que outros pesquisadores já haviam obtido resultados semelhantes, notadamente, Navier, Poisson e Saint Venant. De qualquer forma, Stokes considerou que seus resultados haviam sido obtidos por meio de hipóteses suficientemente diferentes para justificar publicação. Portanto, em 1845 o famoso artigo *On the theory of internal friction of fluids in motion* foi publicado. Neste artigo, Stokes também discutiu o equilíbrio e o movimento de sólidos elásticos, usando argumentos de continuidade para justificar as mesmas equações de movimento para um corpo elástico e um fluido viscoso.



Osborne Reynolds

Semelhantemente a Stokes, Osborne Reynolds também recebeu forte formação religiosa. Seu pai, o Rev. O. Reynolds era não apenas um simples sacerdote na igreja anglicana mas um respeitado acadêmico, tendo se graduado em Cambridge em 1837 e recebido grande reconhecimento manifesto por sua eleição para “Fellow” do Queens' College, diretor da Belfast Collegiate School e, mais tarde, da Dedham School em Essex. De fato, o Rev. Reynolds seguia na longa lista de tradição familiar com a igreja, que já havia eclodido em três Reitores nomeados para Debach-with-Boulge, Suffolk, ele próprio, seu pai e seu avô.



Embora Osborne (1842-1912) tivesse nascido em Belfast, sua iniciação escolar deu-se em Dedham. Neste período, sua educação foi ministrada diretamente por seu pai que, além de ser um excelente matemático, possuía um grande interesse em mecânica, e, em particular, em tudo que possuísse uma remota relação com o aperfeiçoamento de equipamentos agrícolas. Fortemente influenciado pelo pai, que não colocava limites ao conhecimento da matemática e da física como fundamentos das aplicações mecânicas, Osborne foi enviado para trabalhar como aprendiz na firma de engenharia de Edward Hayes em Stony, Stratford. Lá, ele permaneceu por um ano onde adquiriu grande experiência na fabricação de navios a vapor.

Depois de se graduar em matemática em Cambridge em 1867, Reynolds, como seu pai, foi eleito para uma fellowship no Queens' College, Cambridge. Novamente, Reynolds empregou-se em uma firma de engenharia, a de John Lawson em Londres onde permaneceu um ano trabalhando como engenheiro civil.



Em 1868, Reynolds tornou-se o primeiro catedrático em engenharia em Manchester, e o segundo na Inglaterra. Apesar de sua juventude e inexperiência Reynolds respondeu a um edital de convocação para preenchimento da cátedra recém criada no Owens College, mais tarde Universidade de Manchester, tendo sido admitido sem aparente contestação. Reynolds ocupou esta cátedra até sua aposentadoria em 1905, quando, com uma saúde já bastante frágil retornou à Cambridge.

Seus primeiros trabalhos foram em eletricidade e magnetismo; entretanto, rapidamente seu interesse se concentrou em hidráulica e hidrodinâmica, tendo, após 1873, praticamente se resumido a esta matéria. Reynolds estudou brilhantemente as mudanças que um escoamento experimenta quando passa do regime laminar para o regime turbulento. Em seus artigos de 1883 *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and the law of resistance in parallel channels* e de 1895 *On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion*, Reynolds introduziu o, sem dúvida, mais importante grupo adimensional da mecânica dos fluidos que hoje conhecemos como o “Número de Reynolds”. Em 1886 Reynolds formulou a moderna teoria de lubrificação. Três anos mais tarde, com a formulação da noção de campos médios e flutuantes em escoamentos turbulentos, Reynolds produziu um importante modelo teórico para a análise de escoamentos turbulentos que hoje ainda se constituem em estado da arte. De importante nota, vale relembrar aqui sob que condições Reynolds conduziu suas investigações científicas. À época que Reynolds iniciou sua carreira no Owens College, pouquíssimos recursos foram colocados à sua disposição. O próprio Owens College havia se instalado em uma antiga casa residencial em Quay Street que havia abrigado por um bom tempo Richard Cobden, um deputado por Stockport. Por esse motivo suas primeiras pesquisas precisavam ser feitas em aparatos muito primitivos em sua casa ou ao ar livre. Desta forma, os recursos necessários à realização de experimentos precisavam ser necessariamente simples, baratos e descomplicados. Apesar das dificuldades, o resultado final foi da qualidade hoje amplamente conhecida. Isso, de certa forma, ilustra a renomada tradição britânica de muita engenhosidade e poucos recursos.

Uma constante preocupação de Reynolds sempre foi a permanente e insofismável ligação que deve existir entre o progresso da engenharia e a melhoria de condições sociais da população. Quando convidado para proferir a palestra de abertura do ano letivo de 1868 no Owens College, Reynolds escolheu como título *The progress of engineering with respect to social conditions of this country*. Reynolds rejeitava completamente qualquer noção da engenharia como uma abstração do tipo “ivory tower” divorciada do contexto social humano. Suas investigações em engenharia e arquitetura naval tiveram um imediato impacto. Entretanto, uma de suas mais importantes e precoces contribuições foi uma pequena e esquecida publicação de 1872 intitulada *On sewer gas and how to keep it out of houses*. Esta curta monografia é um manual sobre a adequada instalação de drenos residenciais, que fornece ao leitor um guia detalhado sobre sistemas sanitários projetados para isolar o esgoto de residências. O livro esgotou-se completamente até sua quarta edição.

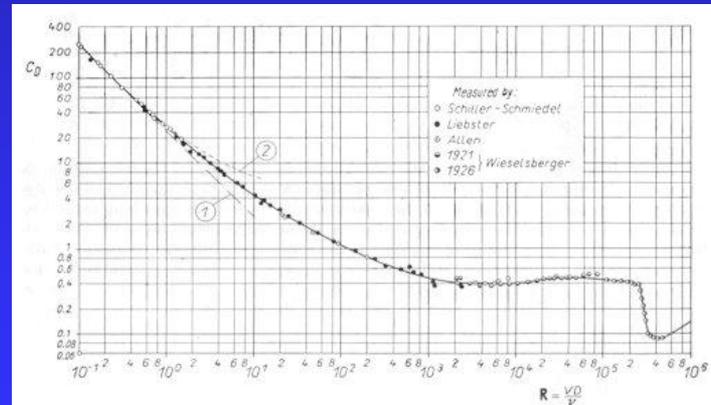


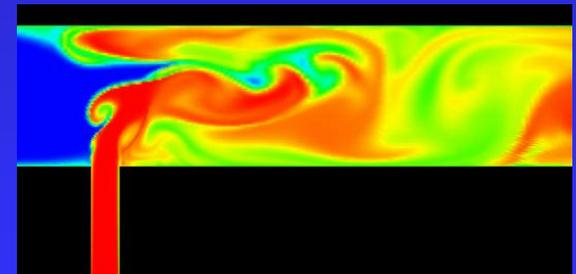
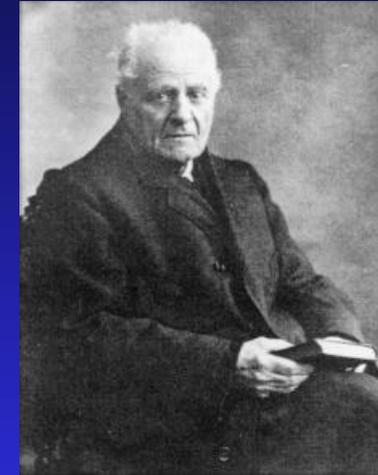
Fig. 1.5. Drag coefficient for spheres as a function of the Reynolds number
Curve (1): Stokes' theory, eqn. (6.10); curve (2): Oseen's theory, eqn. (6.13)



Joseph Boussinesq

Joseph Valentim Boussinesq (1842-1929) nasceu em Saint-André-de-Sangonis. Seu pai era um camponês; sua mãe, filha de um industrial, morreu em 1857. Sua educação inicial foi conduzida por um tio padre que lhe ensinou o latim e o grego. Aos 16 anos, já frequentando o Liceu de Montpellier, ele começa a estudar febrilmente matemática e mecânica. Passionalmente envolvido com a matemática e a mecânica, Boussinesq se interessa igualmente pela religião e pela filosofia. Aos 20 anos começa a ensinar no Collège d'Agde, atividade que lhe permite algum tempo de sobra para mergulhar na literatura. Nesta época publica seu primeiro artigo no “Comptes Rendus” de l'Académie. Elegantemente, Boussinesq resolve o problema de um jato d'água incidindo sobre uma placa plana.

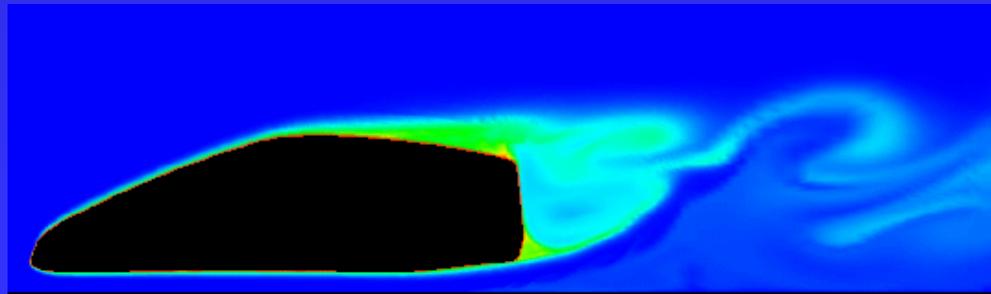
Deixando Agde, Boussinesq se muda para Vigan onde conduz seus primeiros estudos em ótica. Sua tese de doutorado é apresentada em 1867 na Academia de Ciências de Paris. O tema de pesquisa versava sobre a propagação de calor em um meio heterogêneo. Ao mesmo tempo ele envia uma publicação à Academia sobre pequenas deformações de corpos elásticos sujeitos a uma solitação exercida dentro das três direções principais.





Em 1868, durante uma visita aos Alpes franceses, Boussinesq começa a se interessar por hidrodinâmica. Após uma troca de correspondências com Saint Venant, reconhecidamente a única pessoa com a qual ele discutia questões técnicas, Boussinesq passa a demonstrar um interesse pronunciado em obter emprego como professor universitário.

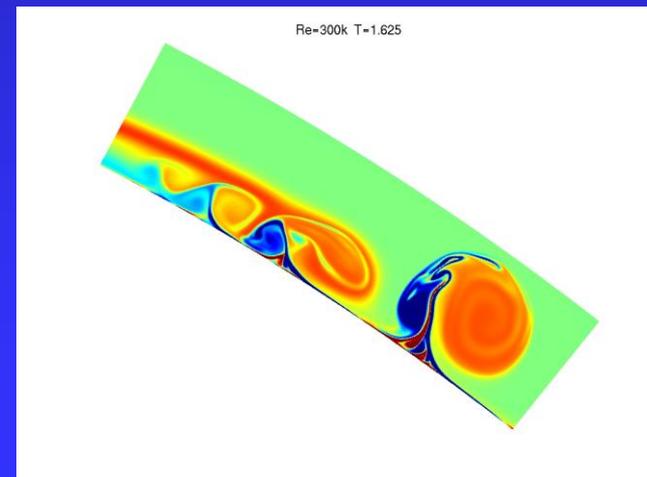
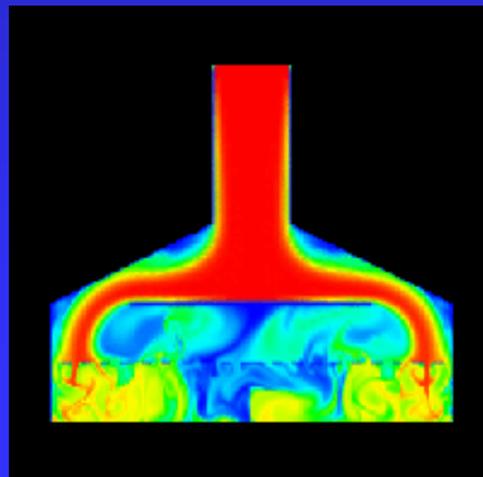
Examinando o problema de escoamentos turbulentos, Boussinesq trava contato com os experimentos de Henri Emile Bazin (1865) e reconhece a origem da formação dos turbilhões pela ação da viscosidade. Contrariamente a Navier e a Stokes, Boussinesq deduz, portanto, que a ação da viscosidade não depende unicamente do fluido, mas também da posição dentro do escoamento e da taxa de turbulência (agitação turbilhonar). Ele, então, resolve descrever matematicamente a experiência de Bazin para os casos mais simples. Em seu trabalho de 1877 *Essai sur la théorie des eaux courantes*, os cálculos mostram uma concordância surpreendente com os dados experimentais. A teoria desenvolvida necessitava uma cuidadosa escolha das hipóteses, envolvendo simplificações no complexo sistema de equações diferenciais e uma grande intuição na utilização de um método analítico para o problema. Essas eram justamente as propriedades peculiares que caracterizavam o trabalho de Boussinesq. Seu mérito essencial no desenvolvimento de uma teoria para a turbulência foi reconhecer o problema de base, desde que seus predecessores haviam logrado dificuldades em reconhecer um ponto de partida.





A fim de descrever a turbulência, Boussinesq começa a elaborar o conceito de grandezas médias e flutuações. Conforme suas observações as flutuações são geralmente fracas, podendo evoluir ao longo do tempo para importantes valores. A soma das flutuações sobre um certo intervalo de tempo é nula por definição. Em 1896, Boussinesq estabeleceu, sem qualquer conhecimento prévio as equações do movimento fluante de Reynolds(1895).

Em sua busca pelas causas da turbulência Boussinesq observa na superfície livre de um rio a presença de “bolas de fluido” que se deslocam na direção do escoamento formando pequenos turbilhões. Adicionalmente, ele constata que as estruturas turbilhonares atingem o fundo e retornam. A origem da turbulência, portanto, deve ser procurada nas paredes que limitam os escoamentos. Segundo suas experiências seguintes, a importância da turbulência varia fortemente com a velocidade local, com o raio hidráulico como um índice de delimitação do fluido com relação à parede e com a rugosidade da parede.





$$\varepsilon = \rho g A h u_0$$

$$\rho g J + \varepsilon \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = 0$$

$$\rho g J z + \varepsilon \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

$$J h = (K A u_0)^2$$

$$\frac{u}{u_0} - 1 = \frac{1}{2} K^2 A \left(1 - \frac{z^2}{h^2} \right)$$



Os grandes avanços tecnológicos

1759 John Smeaton estuda as forças em uma placa alinhada perpendicularmente a um escoamento. Introdução dos coeficientes de Smeaton para o cálculo de forças aerodinâmicas.



1763 Jean-Charles Borda, na França, é o primeiro a observar os efeitos de interferência aerodinâmica em dois corpos pouco espaçados.

1788 Joseph Lagrange introduz os conceitos de potencial de velocidade e de função corrente.

1789 Aparecimento da equação de Laplace para o tratamento de um escoamento não-viscoso, irrotacional e incompressível. Primeiro cálculo da velocidade do som.

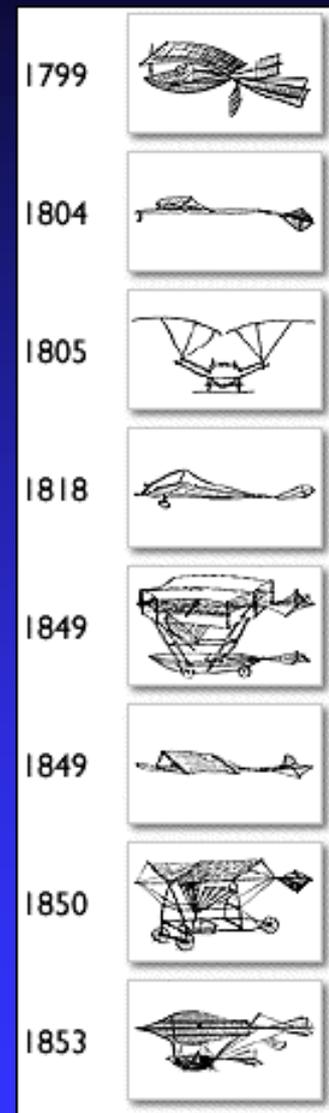
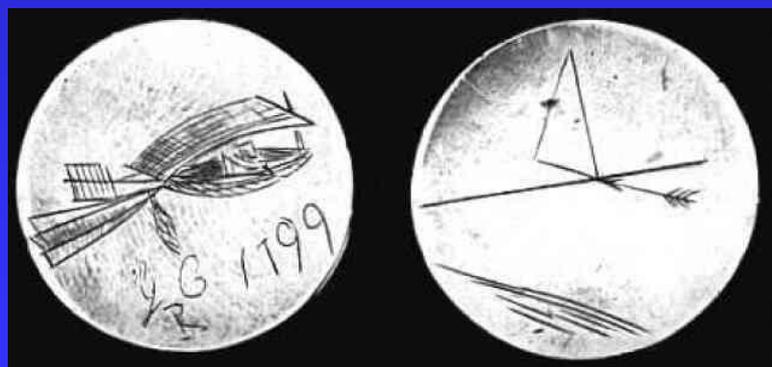


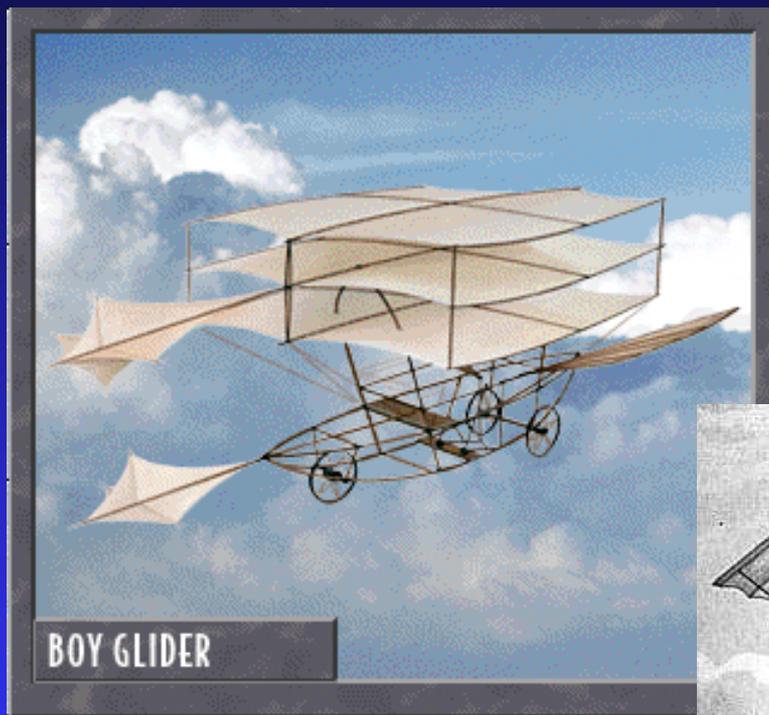


1799 George Cayley, na Inglaterra, introduz o conceito da configuração de um aeroplano em um disco de prata.

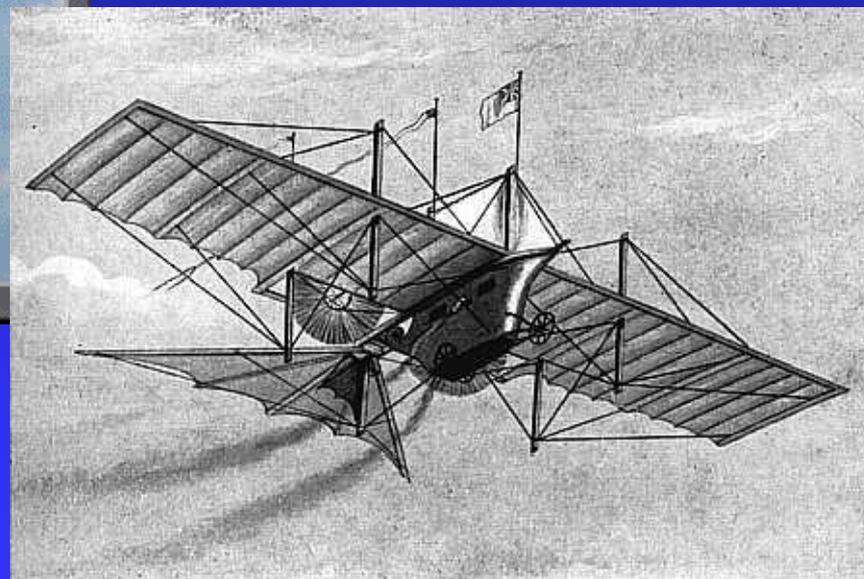
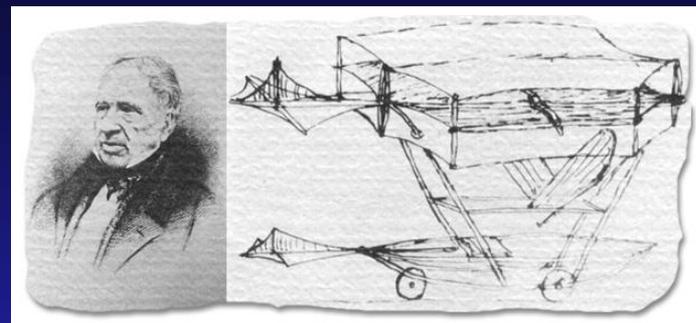
1810 Publicação dos 3 artigos de Cayley.

1840 Publicação das equações do movimento para um fluido viscoso. Equações de Navier-Stokes.





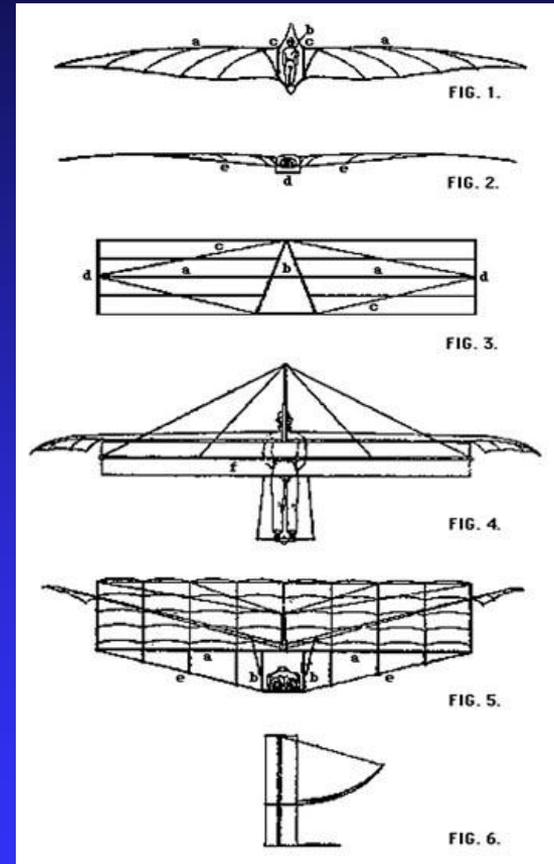
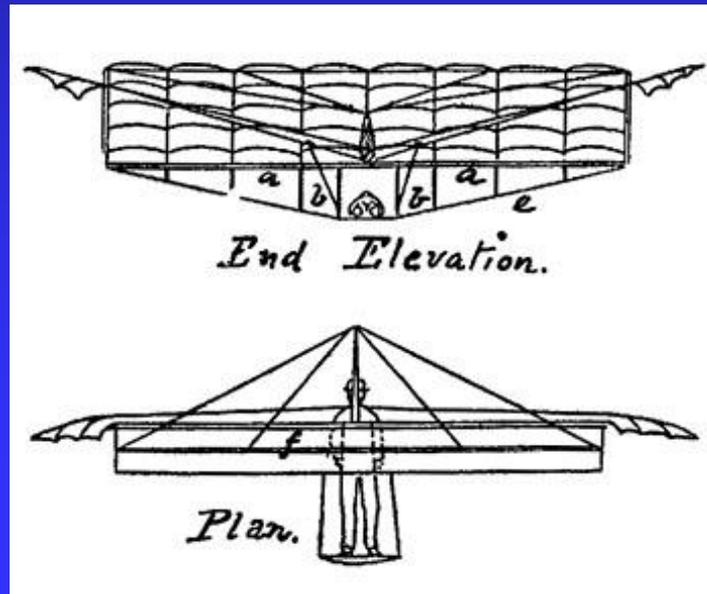
Cayley, 1853.

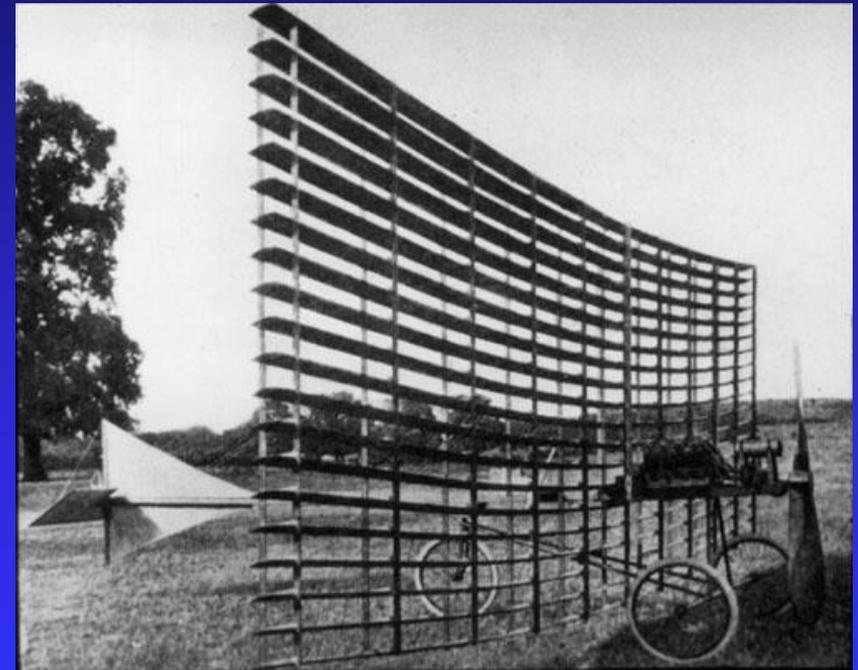
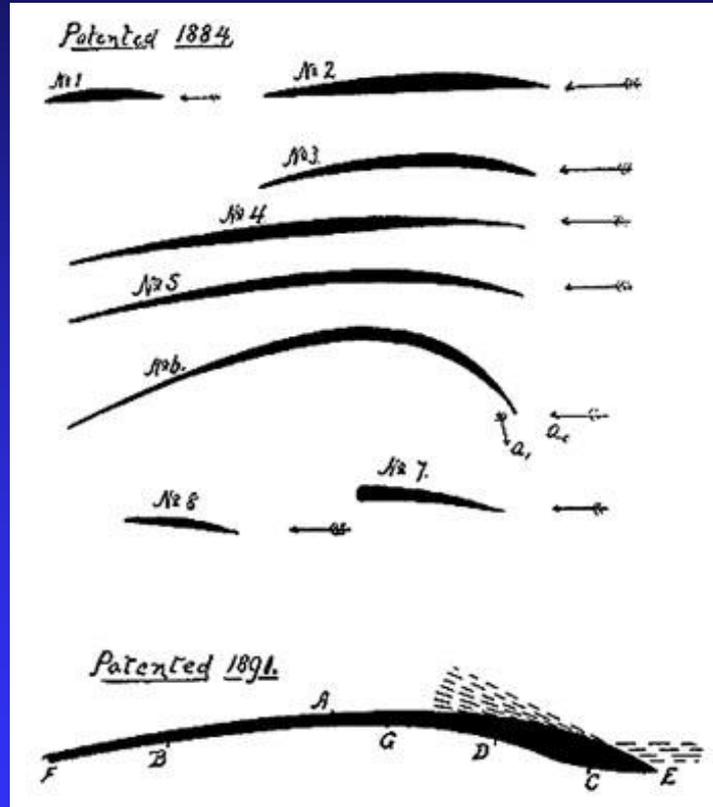


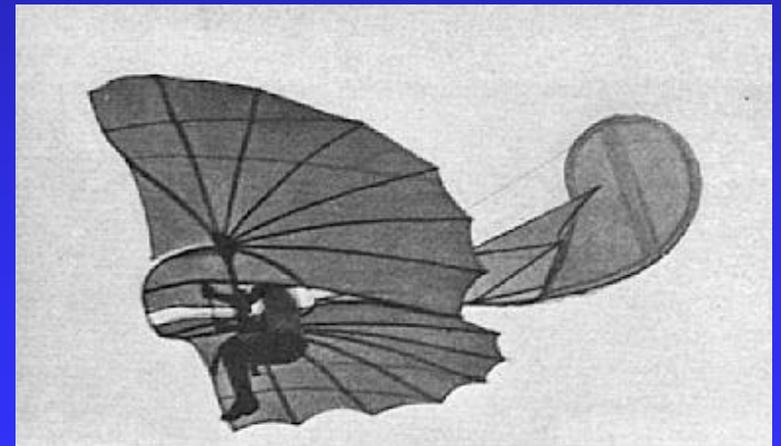
Henson, 1843.

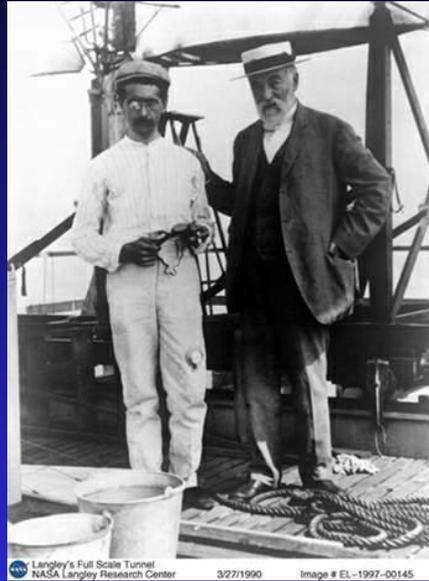


F. W. Wenham
1866

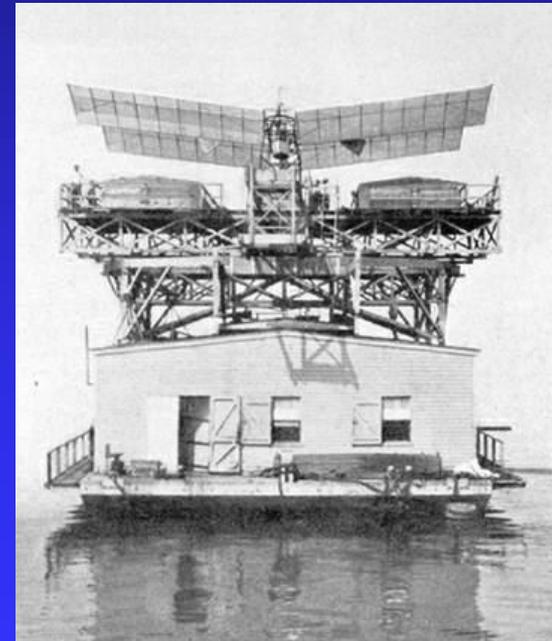
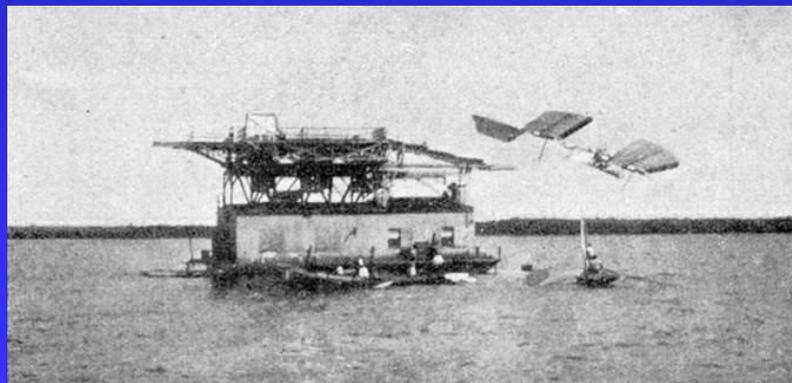
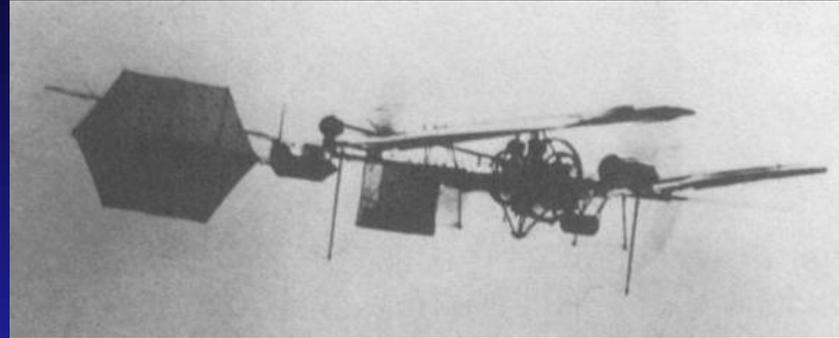


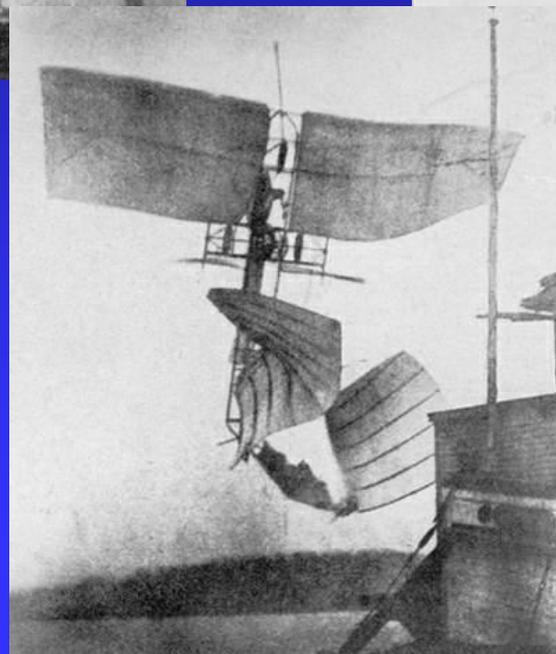
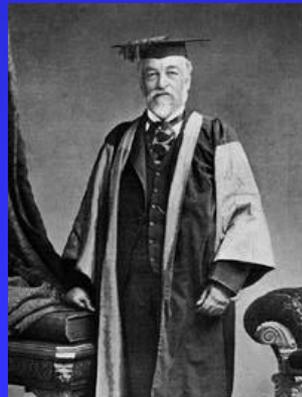
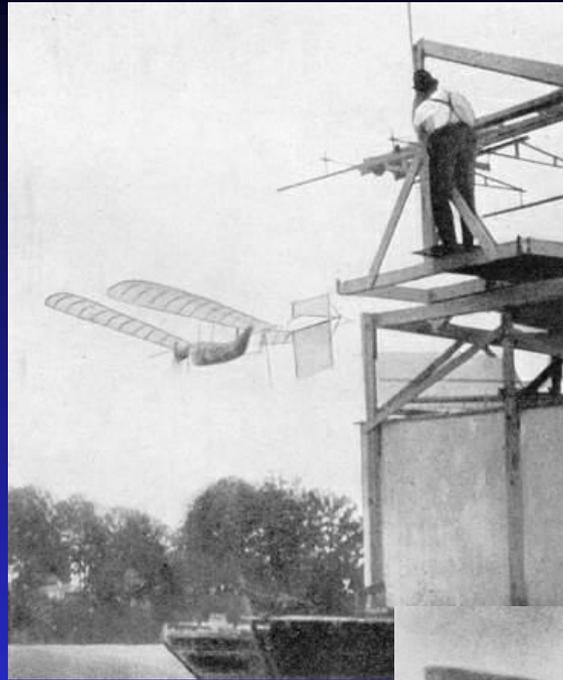






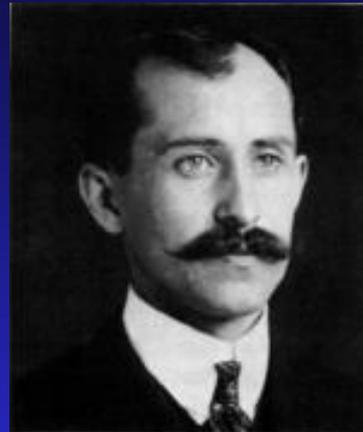
Langley's Full Scale Tunnel
NASA Langley Research Center 3/27/1990 Image # EL-1997-00145



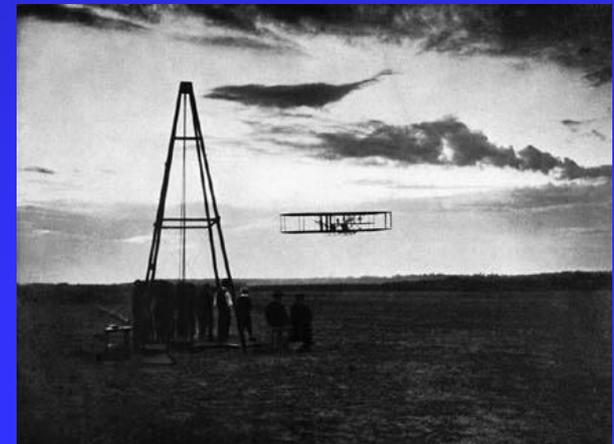
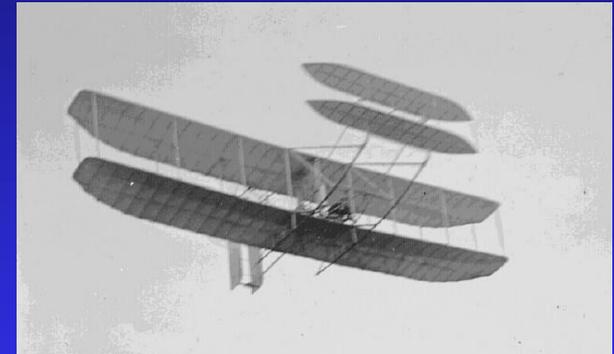
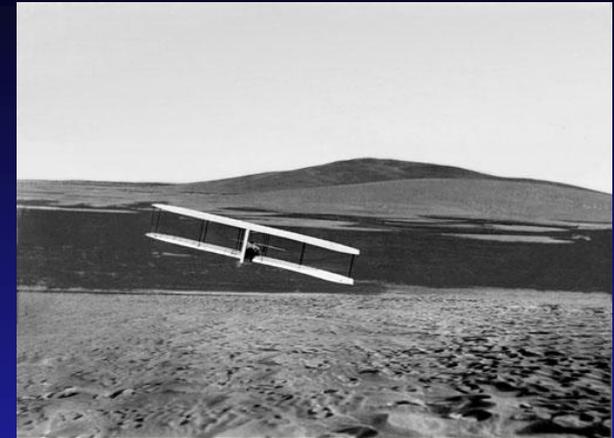




Wilburn, 1867.



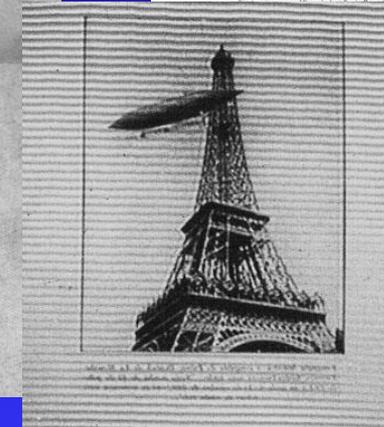
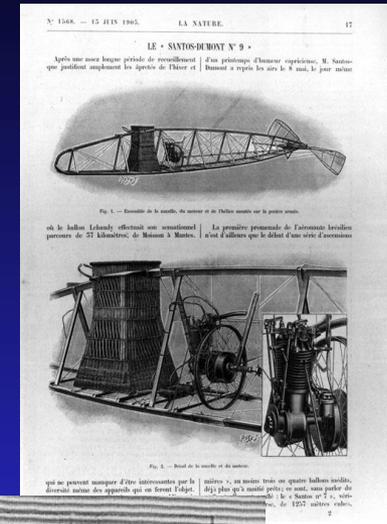
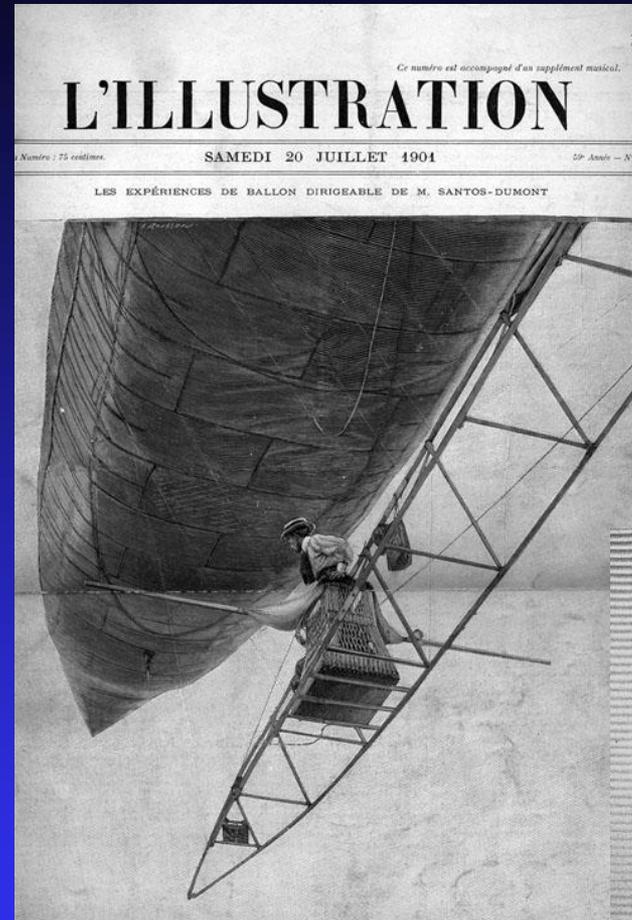
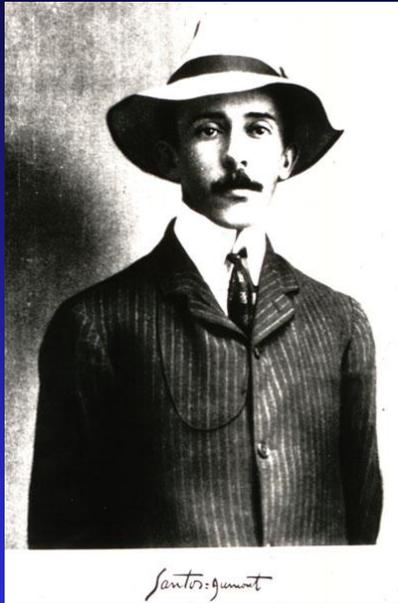
Orville, 1871.





MECÂNICA DA
TURBULÊNCIA

Alberto Santos Dumont, 1873-1932.

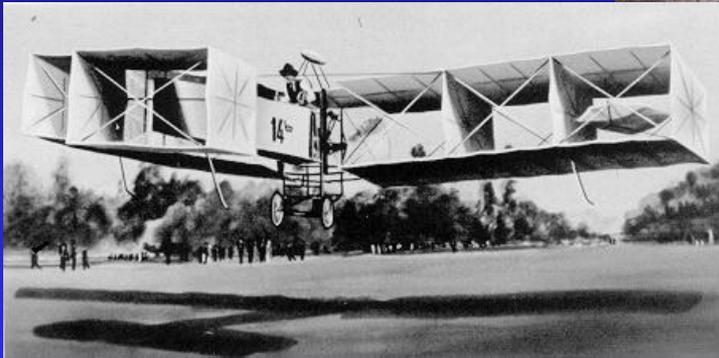
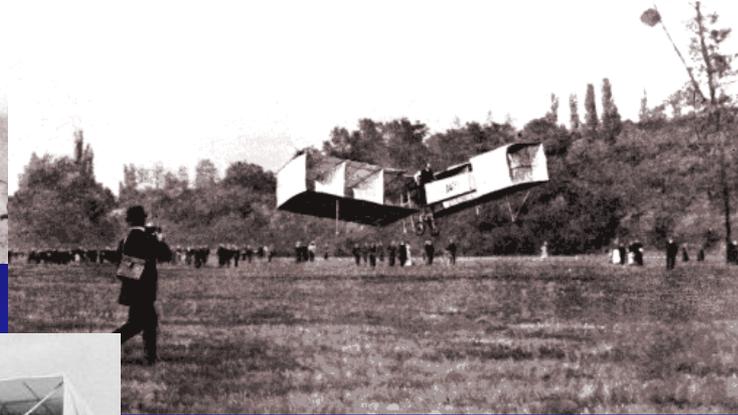
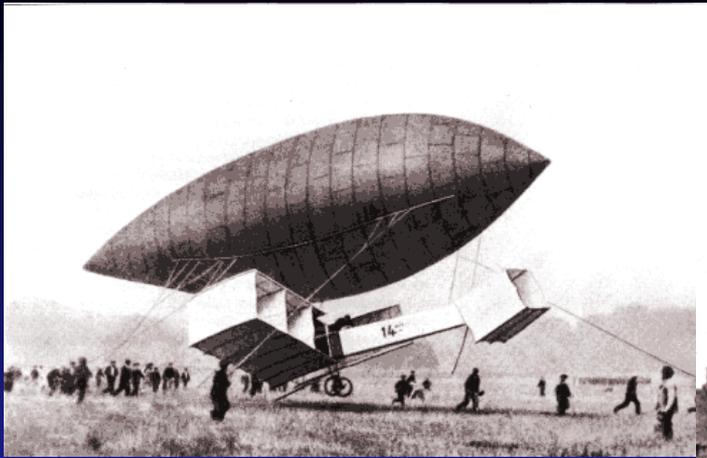


"nas compridas tardes ensoleiradas do Brasil, minado pelo zumbido dos insetos e pelo grito distante de algum pássaro, deitado a sombra da varanda, eu me detinha horas e horas a contemplar o céu brasileiro e a admirar a facilidade com que as aves, com as suas longas asas abertas, atingiam as grandes alturas. E ao ver as nuvens que flutuavam alegremente a luz pura do dia, sentia-me apaixonado pelo espaço livre".



MECÂNICA DA
TURBULÊNCIA

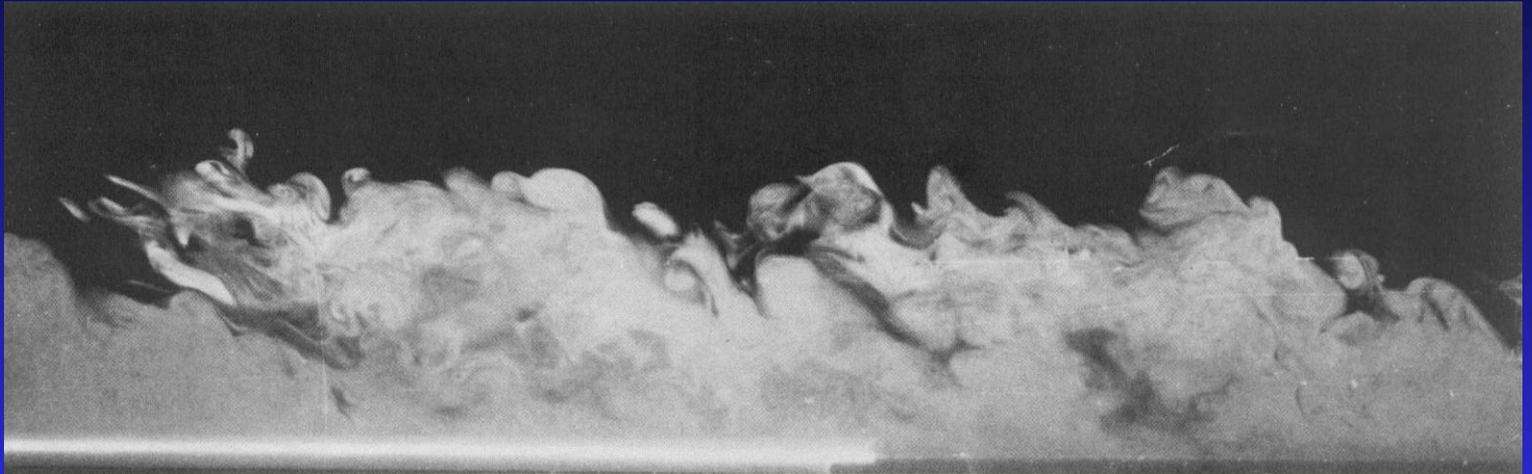
14Bis, Demoiselle, 1906.



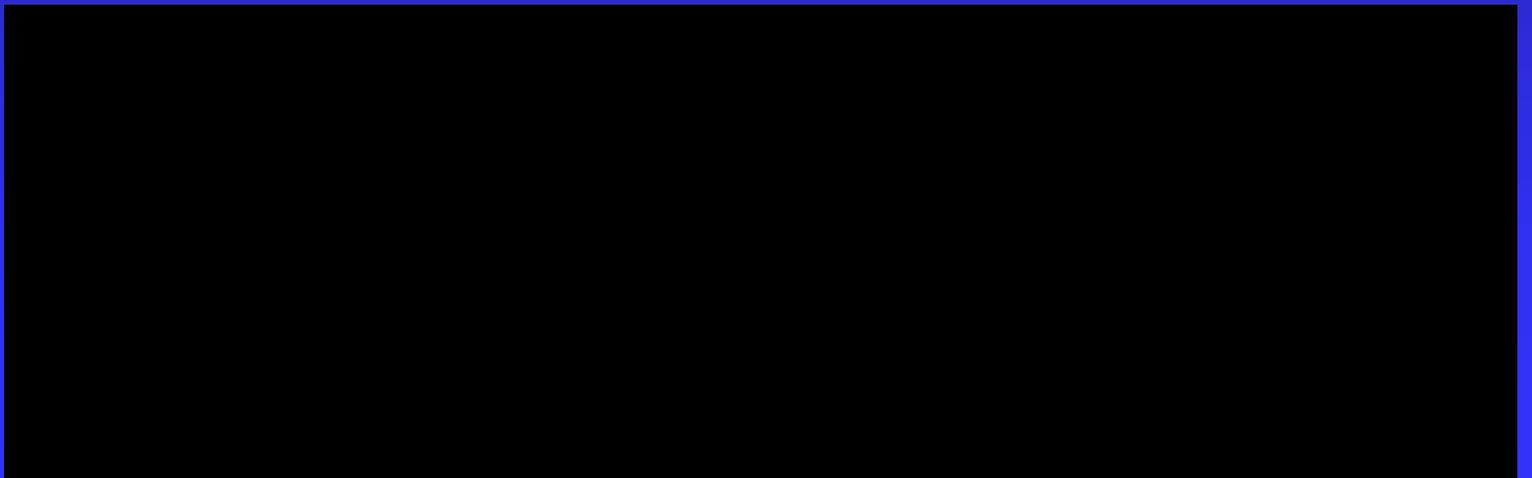


A camada limite turbulenta

An Album of Fluid Mechanics

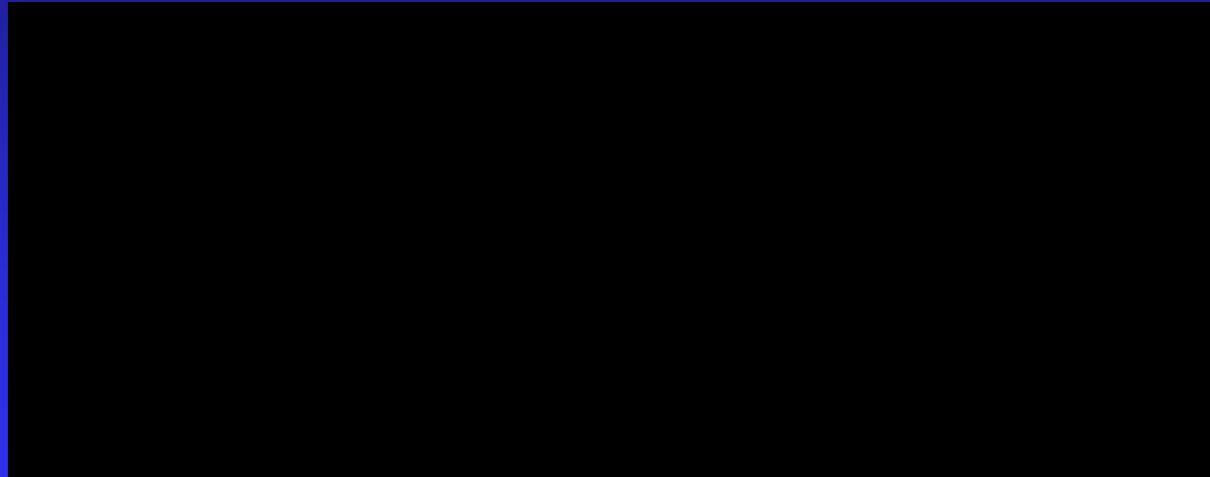


Laboratório de Mecânica da Turbulência



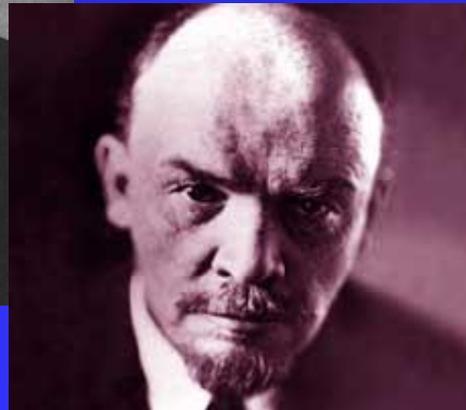


Turbulência: caos no tempo e no espaço.





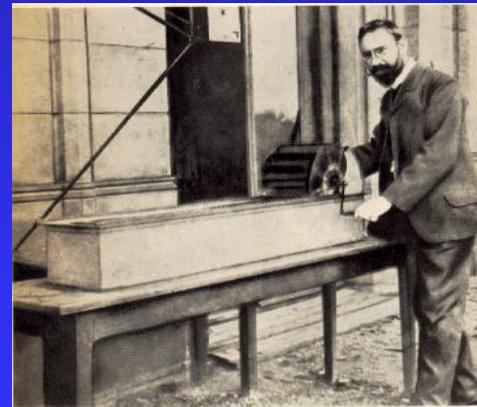
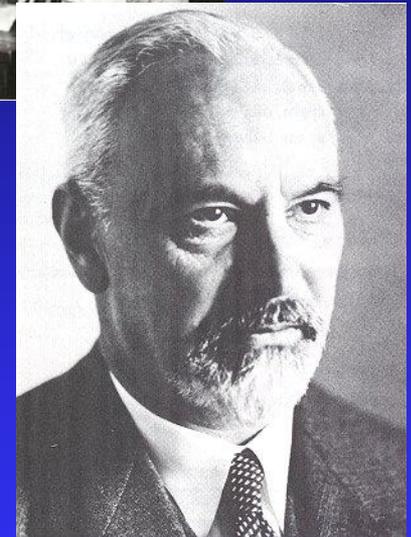
As guerras mundiais, a revolução bolchevista.





Ludwig Prandtl

Prandtl (1875-1953) nasceu em Freising na Bavaria. Seu pai, Alexander Prandtl era professor de engenharia na Faculdade de Agronomia de Weihensrephan. Desde sua juventude Prandtl demonstrara raro interesse por matemática, física e engenharia. Sua assombrosa aptidão para lidar com problemas práticos é justificada por muitos autores como decorrente de seu permanente contato com a natureza e a engenharia resultantes de suas atividades com o pai.



LUDWIG PRANDTL 1904
an seinem handbetriebenen Wasserkanal in Hannover



Antes da descrição da camada limite por Prandtl em 1904 a maioria dos trabalhos em mecânica dos fluidos se resumia a construir escoamentos potenciais. Embora a matemática fosse elegante e os escoamentos esteticamente agradáveis, pouca ou nenhuma relação eles guardavam com os escoamentos reais observados na natureza e na tecnologia. De fato, desde o tempo de d'Alembert que escoamentos potenciais freqüentemente resultavam em arrasto nulo, uma clara contradição com nossa experiência cotidiana.

Estudos preliminares de Coulomb e Stokes, e depois de Hele-Shaw, indicavam que uma condição de aderência deveria ser aplicada aos corpos sólidos. Entretanto, os problemas padrão de escoamento externo são mal colocados quando combinados às equações de Euler com esta condição. O procedimento natural seria então abandonar essas equações retornando ao sistema completo de equações de Navier-Stokes. No problema de escoamento lento ao redor de uma esfera, Stokes fez isso obtendo uma expressão para o arrasto. Mas escoamentos lentos não fornecem largas regiões de separação como aquelas observadas em inúmeras aplicações de interesse o que enormemente limitava a utilização desses resultados.

A contribuição de Prandtl foi observar que, sobre uma larga região do escoamento, a clássica teoria potencial poderia ser aplicada normalmente. Apenas em uma região muito estreita adjacente à parede os efeitos viscosos precisavam ser considerados. A esta região, Prandtl denominou camada limite.



Sob um ponto de vista estritamente matemático, as equações de camada limite podem ser vistas como soluções limites das equações de Navier-Stokes quando a viscosidade decresce (ou o número de Reynolds tende a infinito). Daí, argumentos físicos baseados na ordem relativa de importância dos termos constantes nas equações de Navier-Stokes foram utilizados por Prandtl para deduzir as equações de camada limite.

Passado tanto tempo, não é de surpreender que uma grande parte da comunidade científica tenha perdido a noção de quão à frente de seu tempo Prandtl estava. Sua teoria foi inaugurada em um artigo de sete páginas *Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung* em uma apresentação de dez minutos no 3º Congresso Internacional de Matemática em Heidelberg em 1904. Nos anos seguintes, com o auxílio de uns poucos alunos ele continuou a desenvolver sua teoria. Por duas décadas Prandtl nutriu seus conceitos principais, observando-os crescer em seu próprio instituto e na pequena Universidade de Göttingen. Apenas em 1927 quando Prandtl apresentou-a na “Wilbur Wright Memorial Lecture” sua abrangência tornou-se mundial. Nos anos 30, Richard Courant, então diretor do Instituto de Matemática de Göttingen, tentou organizar um grupo de estudos em camada limite incorporando pesquisadores do Instituto de Aeronáutica. Infelizmente, a ascensão nazista ao poder e a tremenda escalada na onda de violência anti-semita impediu que tal acontecesse. Com a fuga de Von Kármán para os Estados Unidos para fundar e organizar o Laboratório de Aeronáutica do California Institute of Technology, tal projeto foi retomado ao final dos anos 40. Só então contribuições de Friedrichs, Wasow, Lagerstrom e Cole ofereceram uma completa sistematização do problema de camada limite.

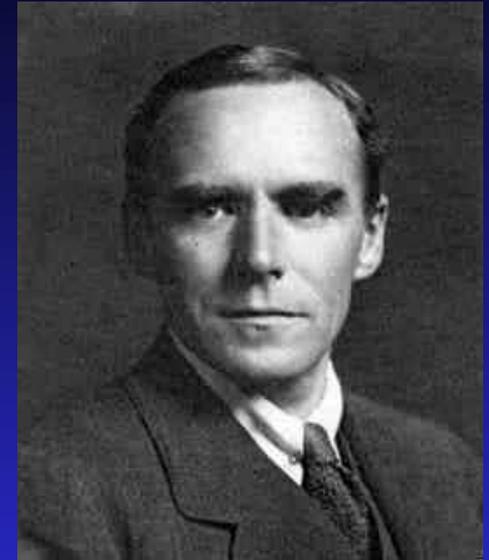
As contribuições de Prandtl para a turbulência foram enormes. Dentre outras podemos citar: i) a teoria do comprimento de mistura, ii) a distribuição logarítmica da velocidade, iii) a lei do atrito, iv) a especificação de modelos turbulentos diferenciais com o auxílio da equação da energia cinética turbulenta, v) a descrição de escoamentos sobre superfícies rugosas.



G. I. Taylor

Geoffrey Ingram Taylor (1886-1975) descendeu de uma grande estirpe de cientistas e humanistas. George Boole foi seu avô e Alicia Stott sua tia. Aos 11 anos G.I. assistiu uma série de aulas sobre “The principles of the electric telegraph” que lhe exerceram um enorme impacto. Nesta época ele conheceu W. Thomsom e Lord Kelvin.

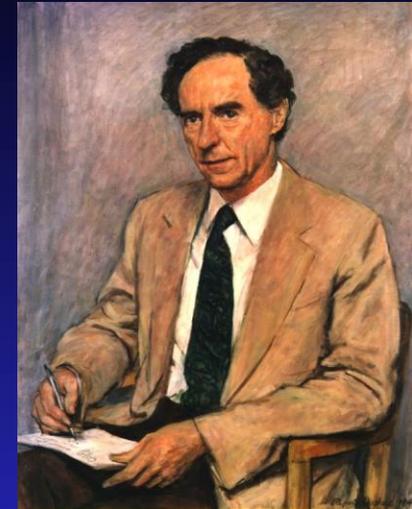
Em 1905, G.I. ingressou no Trinity College em Cambridge onde estudou matemática com Whitehead, Whittaker e Hardy. Depois de estudar matemática no primeiro ano, e já movido por seu vívido interesse por problemas geofísicos, ele transferiu-se para a física. Ainda sem ter completado seu curso, G.I. recebeu um convite para dedicar-se essencialmente à pesquisa no Trinity.



Um de seus primeiros trabalhos versou sobre um estudo teórico de ondas de choque. Neste artigo, agraciado com o *Smith's Prize*, ele teve a oportunidade de aperfeiçoar resultados previamente obtidos por Thomsom. Em 1910 ele foi eleito para uma “Fellowship” no Trinity sendo, no ano seguinte, admitido como meteorologista no Royal Meteorological Office. Nos anos seguintes seu trabalho em turbulência na atmosfera resultou no livro *Turbulent motion in fluids* que recebeu o *Adams Prize* em Cambridge em 1915. De fato, nos próximos 23 anos, até 1938, a produção científica de G.I. em turbulência atingiria níveis de qualidade inimagináveis e, até hoje, inigualáveis. Dentre seus principais trabalhos podemos destacar: *Eddy motion in the atmosphere*(1915), *Diffusion by continuous movements*(1921), *The transport of vorticity and heat through fluids in turbulent motion*(1932), *Statistical theory of turbulence*(1935) e *The spectrum of turbulence*(1938). As idéias e resultados centrais apresentados nesses trabalhos viriam a se tornar, todas elas, clássicas, abrindo grandes alamedas no conhecimento que custariam anos a ser preenchidas.



Além de ter sido o precursor da teoria estatística da turbulência, os estudos de G.I. em estabilidade hidrodinâmica também foram seminais. Seus trabalhos *Experiments with rotating fluids*(1921) e *Stability of a viscous liquid contained between two rotating cylinders*(1923) brilhantemente estabeleceram, pela primeira vez, critérios matematicamente rigorosos para a previsão da transição turbulenta. Infelizmente, por volta de 1945 o interesse de G.I. por turbulência já havia desaparecido por completo o que provocou sua saída de cenário; isso, para aqueles que trabalham com turbulência, foi uma perda sensível. Com relação a esta passagem existe um fato curioso. Ao final da II Guerra Mundial, Heisenberg foi levado prisioneiro para Farm Hall, no limite da vila de Godmanchester a 40 quilômetros de Cambridge. Sabendo disso, Batchelor, um recém chegado estudante de doutorado, convenceu G.I. a visitá-lo. Na conversa que se seguiu G.I. foi informado das recentes descobertas de Kolmogorov sobre o fenômeno de cascata para a transferência da energia turbulenta. Antevendo o alto grau de abstração e caráter não aplicado que a teoria da turbulência atingiria nos anos vindouros ele decidiu abandonar o assunto. De fato, Batchelor relata que desde 1917 G.I. vinha trabalhando com a idéia de componentes, e quando ele lhe chamou a atenção sobre os resultados de Kolmogorov sobre a estrutura da turbulência de pequenas escalas, G.I. retrucou “isso tudo é muito óbvio”.



G. Batchelor

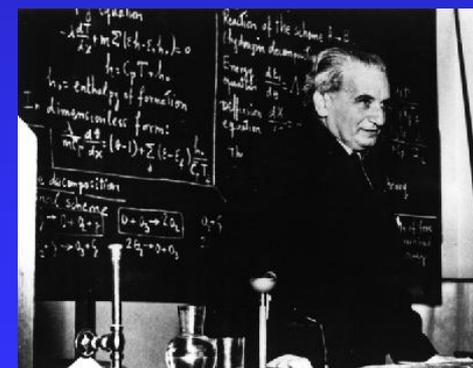


W. Heisenberg



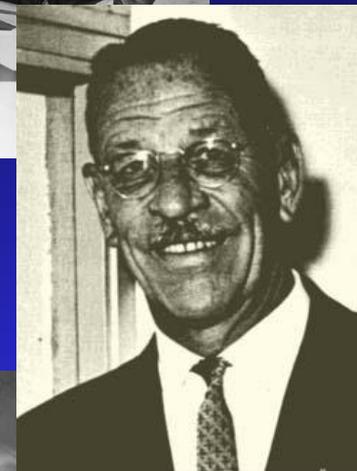
Theodore Von Karman

Nascido em Jozsefvaros nos subúrbios de Budapest, von skolloskislaki Kármán Todor (1881-1963) tornou-se conhecido como Theodore von Karman. Seu ambiente familiar era de uma distinta erudição. Seu pai era um respeitado professor de educação na Universidade de Pazmany Peter em Budapest enquanto sua mãe, Helen Konn, descendia de uma longa linhagem de respeitáveis acadêmicos. Karman foi um menino prodígio, tendo estudado em uma escola experimental concebida por seu pai para as elites intelectuais da Hungria. Aos 22 anos ele se formou com honras na Real Universidade Joseph de Politécnica e Economia de Budapest. Depois de um curto período nas forças armadas húngaras e na indústria, ele se matriculou em 1906 em Göttingen terminando seu doutorado em 1908 sob a tutela de Prandtl. Nos próximos 4 anos, Karman permaneceria trabalhando com Prandtl na condição de “Privat Dozent” o mais baixo posto acadêmico no sistema universitário alemão. Em 1913, finalmente, e por influência pessoal de Felix Klein, Karman se libertou do espectro de Prandtl assumindo uma cátedra em aeronáutica e mecânica em Aachen. Em 1926, Robert Millikan, ganhador do prêmio Nobel de física e um dos fundadores do California Institute of Technology, convidou Karman para estabelecer a sessão de Aeronáutica de CALTECH. O Instituto acabava de receber uma generosa doação da Fundação Guggenheim para especificamente iniciar um programa de pós-graduação em aeronáutica e Millikan julgou ser Karman a pessoa talhada para esta tarefa. Após um período de indefinição, em 1930 Karman finalmente aceitou a oferta provavelmente para escapar da perseguição nazista na Europa e da influência de Prandtl.



A adaptação de Karman ao modo de vida americano foi tão bem sucedida que, em 15 anos, seus compromissos com a formulação de políticas nacionais para o desenvolvimento da aeronáutica consumiam virtualmente todo o seu tempo. Deste ponto em diante sua carreira não teria retorno, até sua morte, em 1963, Washington foi sua segunda casa.

Em 1911 Karman realizou sua magistral pesquisa sobre a natureza da emissão de vórtices no escoamento atrás de um corpo rombudo, as conhecidas “ruas de von Karman”. Isso levaria, anos mais tarde, à concepção da idéia de estruturas coerentes em escoamentos turbulentos. Sua contribuição para o cálculo do arrasto sobre corpos de revolução em escoamentos supersônicos estava pelo menos 20 anos à frente de seu tempo. Para a camada limite turbulenta, sua relação para a descrição da subcamada viscosa tornou-se clássica. Entretanto, e, sem dúvida, sua indistinta marca de genialidade foi expressa em sua extensa e significativa contribuição para a teoria estatística da turbulência. Seus trabalhos *On the statistical theory of turbulence*(1937), *Progress in the statistical theory of turbulence*(1948), *On the statistical theory of isotropic turbulence*(c/ Howarth, 1938) e *On the concept of similarity in the theory of isotropic turbulence*(c/ Lin, 1949) tiveram rivais em qualidade apenas em G.I. e Kolmogorov.



C. B. Millikan



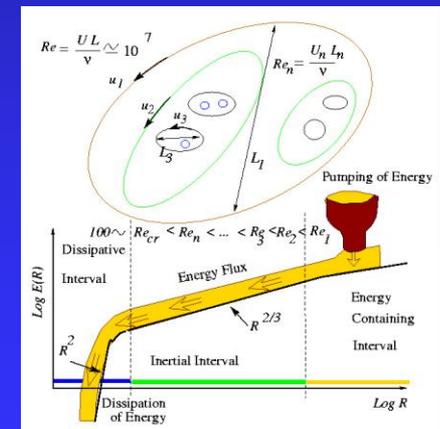
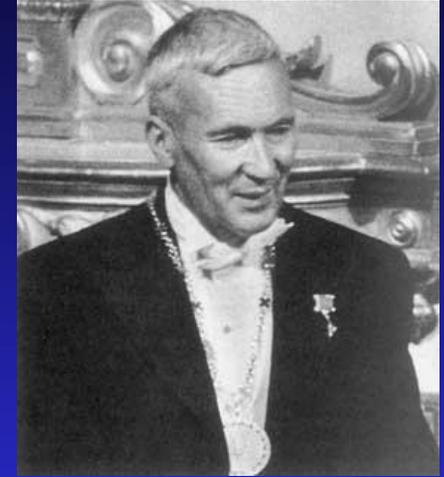


Andrei N. Kolmogorov

Andrei Nikolaevich Kolmogorov foi um dos maiores matemáticos do século XX. Suas contribuições para os vários ramos da física e da matemática são tão abrangentes que qualquer tentativa de classificá-las resultaria em um inútil esforço. Portanto, nesta compilação nos deteremos a uma ínfima contribuição de seu intelecto, seus trabalhos em turbulência.

Em adição ao seu penetrante trabalho em ciência, Kolmogorov dedicou uma grande parcela de seu tempo à melhoria do ensino de segundo grau na União Soviética. Seu reconhecimento social pelo regime político em vigor atingiu os mais altos níveis; ele foi agraciado com as mais altas comendas existentes na antiga URSS.

Kolmogorov (1903-1987) nasceu na cidade de Tambov. Por uma grande infelicidade do destino, seus pais, que nunca se casaram, não estiveram de qualquer forma envolvidos com sua criação. Seu pai, Nikolai Kataev, filho de um padre da igreja ortodoxa, era agrônomo e estava no exílio. Depois da revolução ele foi repatriado e chegou a chefiar o Ministério da Agricultura, mas, morreu em escaramussas em 1919. Sua mãe, Mariya Yakovlevna Kolmogorova morreu de parto. Desta forma, sua criação foi deixada sob a responsabilidade da irmã de sua mãe, Vera Yakovlena. Antes de ingressar na Universidade de Moscou em 1920, Kolmogorov trabalhou algum tempo como condutor de trens. Em seu curso universitário, e, por algum tempo, ele se interessou por matemática, metalurgia e história. Em uma séria pesquisa científica sobre manuscritos dos séculos XV e XVI, ele formulou uma completa teoria sobre as relações agrárias na antiga Novgorod. Mais tarde ele estabeleceu hipóteses sobre o modo como o alto Pinega havia sido colonizado que foram confirmadas por uma expedição científica.





No período soviético pós-revolucionário alguns eminentes matemáticos lideravam fortíssimos grupos de pesquisa em Moscou. Luzin e Egorov lideravam uma renomada escola em teoria de funções reais que incluía Suslin, Urysohn e Aleksandrov. Entretanto, o maior impacto em seu início de carreira foi recebido de Stepanov com o qual havia estudado séries trigonométricas.

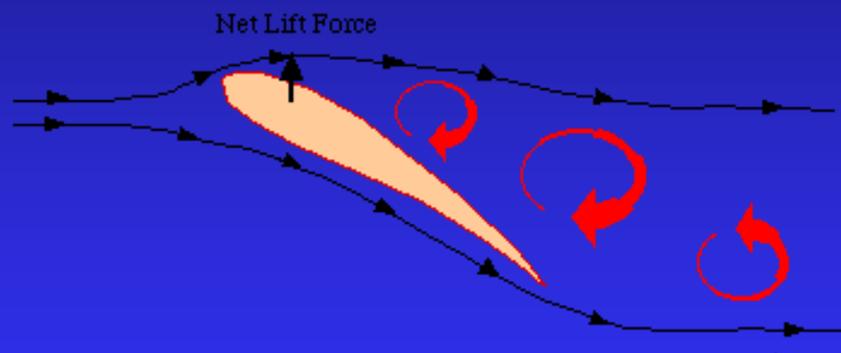
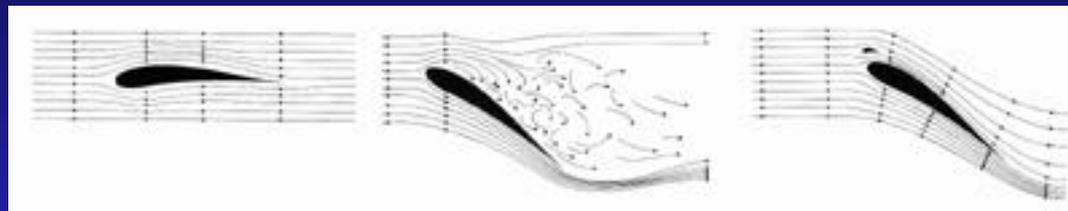
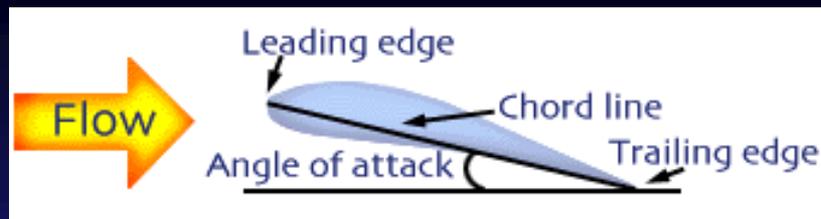
A primeira publicação de qualidade de Kolmogorov remonta ao ano de 1922 e trata sobre operações sobre conjuntos. O ano de 1925 foi particularmente profícuo para ele que publicou 8 trabalhos, um extremamente importante em teoria da probabilidade. Ao terminar seu doutorado em 1929 Kolmogorov já havia publicado 18 trabalhos. Após duas longas visitas à Europa com Aleksandrov quando importantes contatos foram feitos com Hopf, Lévy e Fréchet, Kolmogorov ao retornar a Moscou assumiu uma cátedra na Universidade de Moscou em 1931. Os anos seguintes foram de intensa atividade com Kolmogorov desenvolvendo um especial interesse por processos aleatórios. Sua colaboração com grandes matemáticos como Hadamard, Fréchet, Banach, Hopf, Kuratowski e outros se expande.

No início dos anos quarenta Kolmogorov publicou seus quatro artigos em turbulência que viriam a se tornar de fundamental importância. Seus trabalhos, *The local structure of turbulence in an incompressible viscous fluid for very large Reynolds number(1941)*, *On generation(decay) of isotropic turbulence in an incompressible viscous liquid(1941)*, *Dissipation of energy in locally isotropic turbulence(1941)* e *The equation of turbulent motion in an incompressible viscous flow(1942)*, contém um dos poucos resultados exatos e não triviais em turbulência, bem como idéias extremamente originais no uso de análise de escalas. Nos anos seguintes, uma grande parte dos trabalhos em turbulência colocaria seu foco no entendimento das razões que levaram a teoria de 1941 a uma falha parcial, o chamado problema de “intermitência”.

Nos próximos vinte anos Kolmogorov veria seu interesse migrar para topologia, sistemas dinâmicos, teoria da probabilidade, matemática estatística, teoria de algoritmos, lingüística matemática e mecânica celeste. Apenas em 1961 ele voltaria a mostrar um renovado interesse em turbulência.

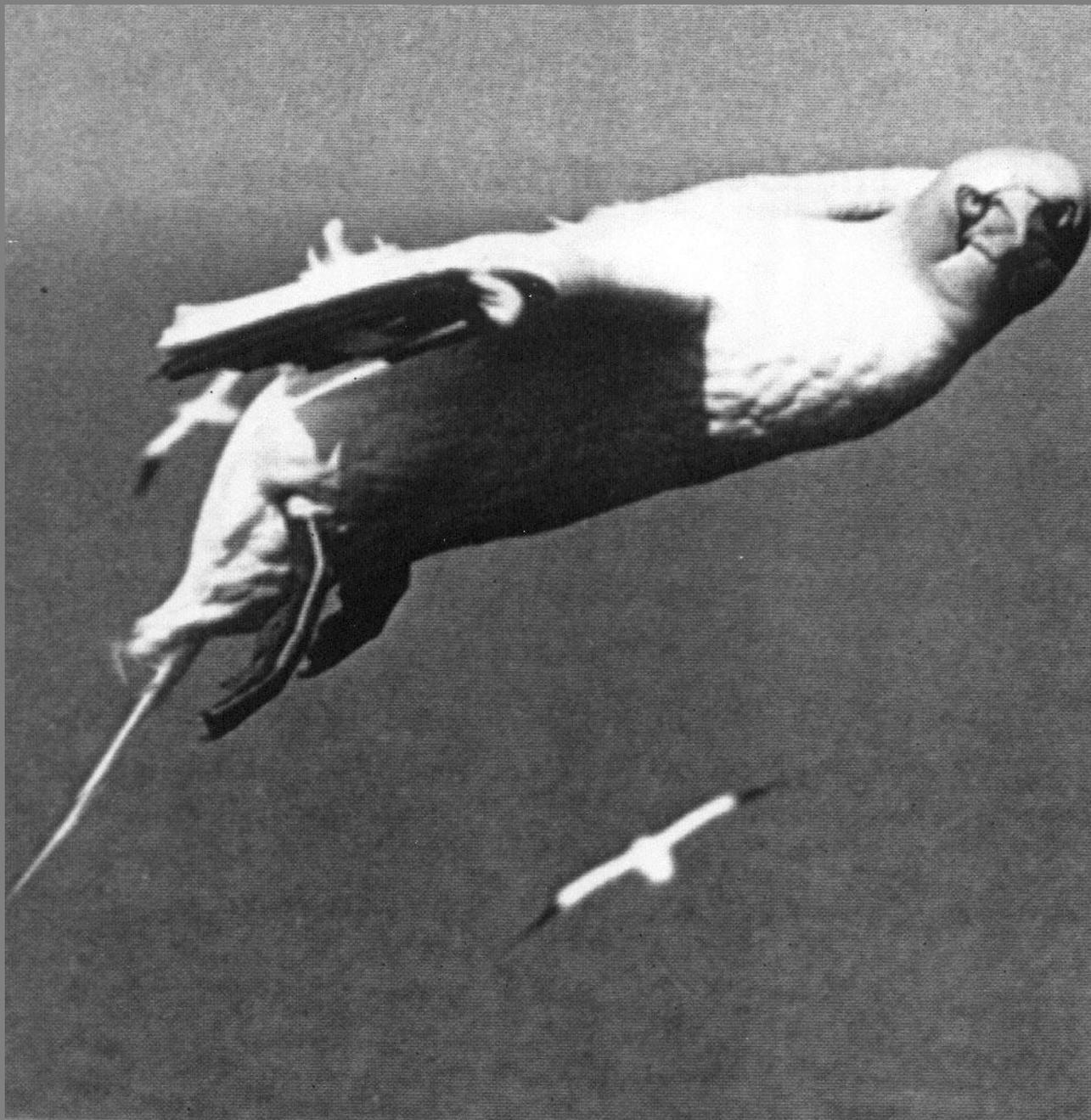
Biocinética do Vôo

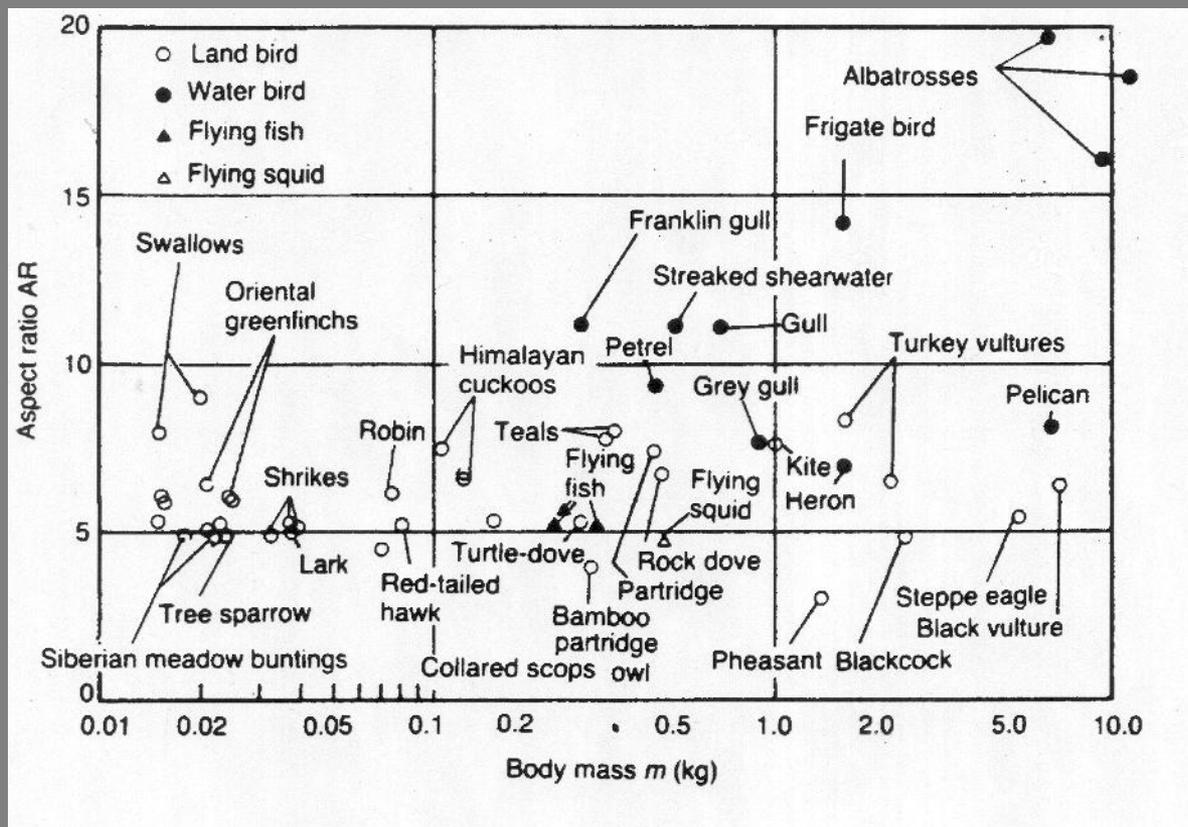


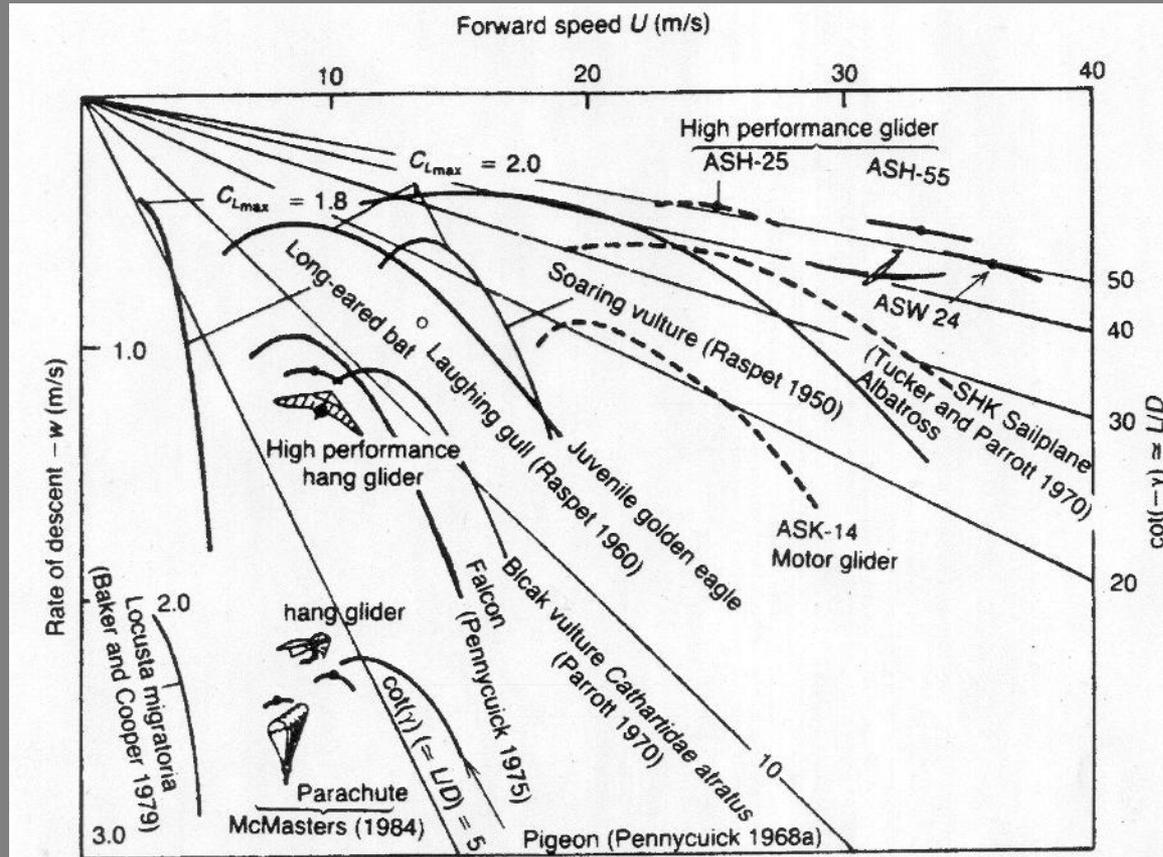


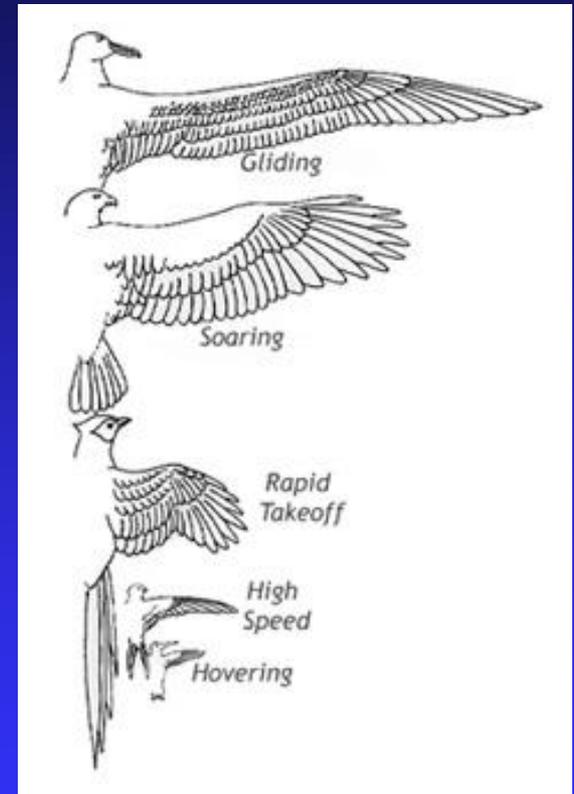
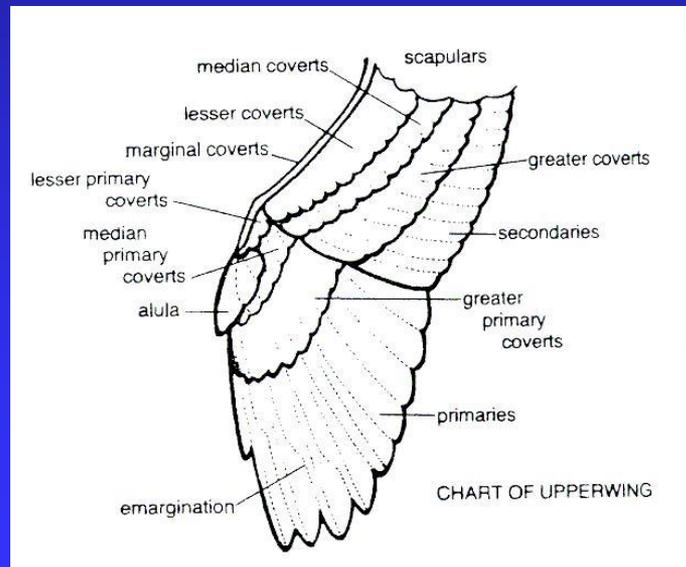
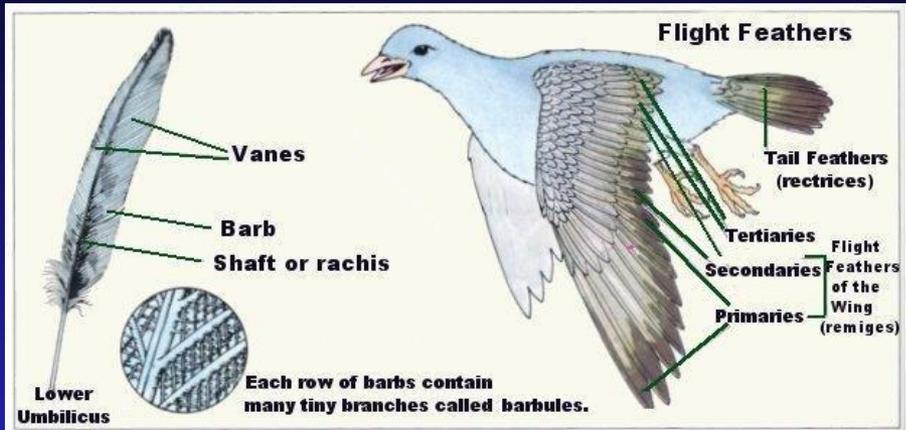












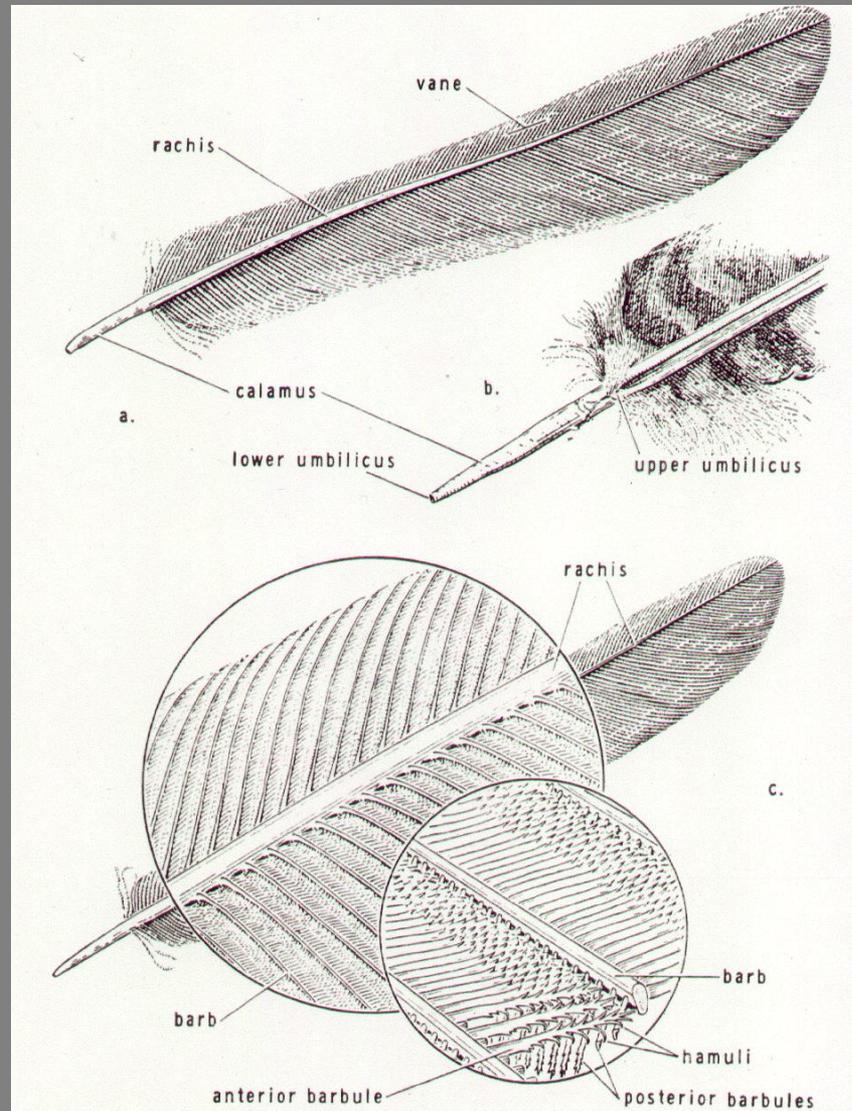
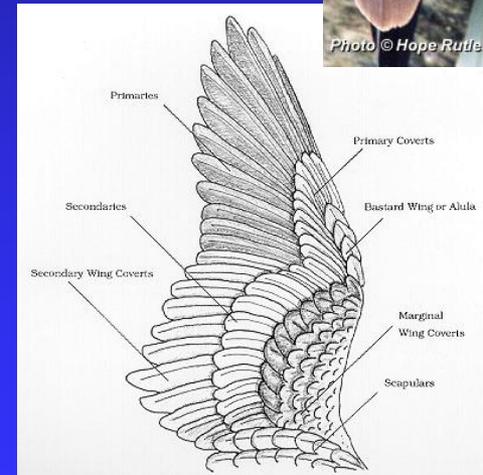
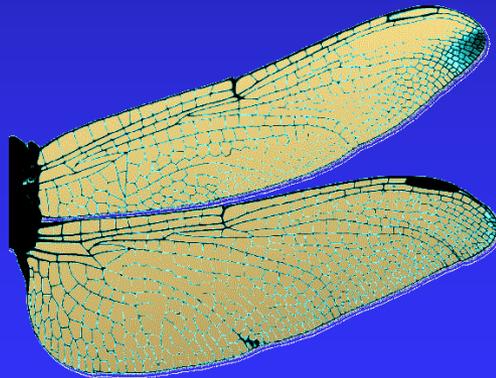


Figure 6-11. A typical flight feather and the nomenclature of its parts: a, general view; b, detail of the base of the feather; c, detail of the vane. (Van Tyne, J., and Berger, A. J.: *Fundamentals of Ornithology*. New York, John Wiley & Sons Inc., 1959.)



Photo © Hope Rutledge



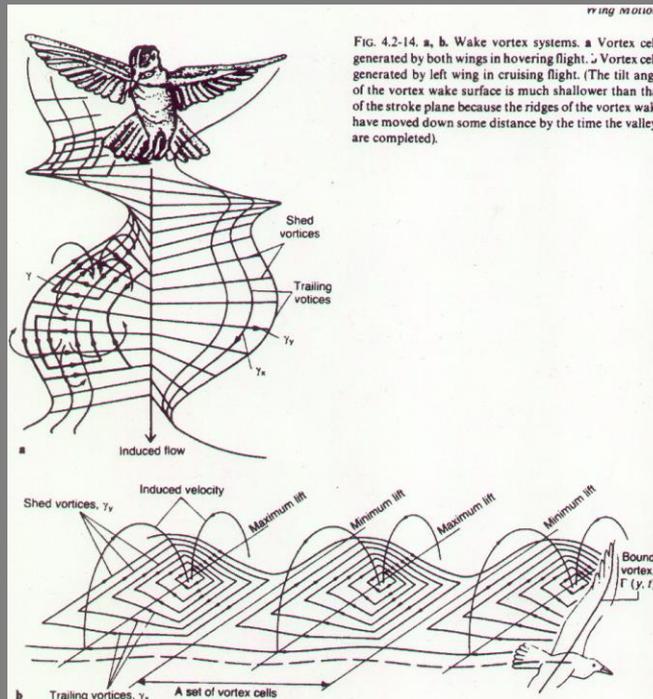
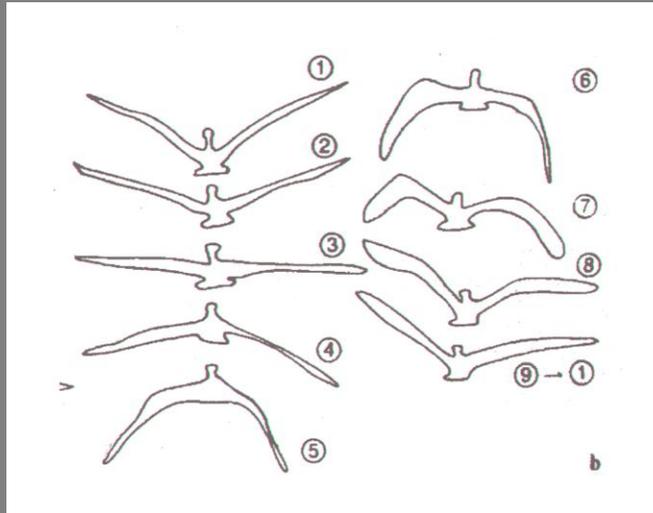
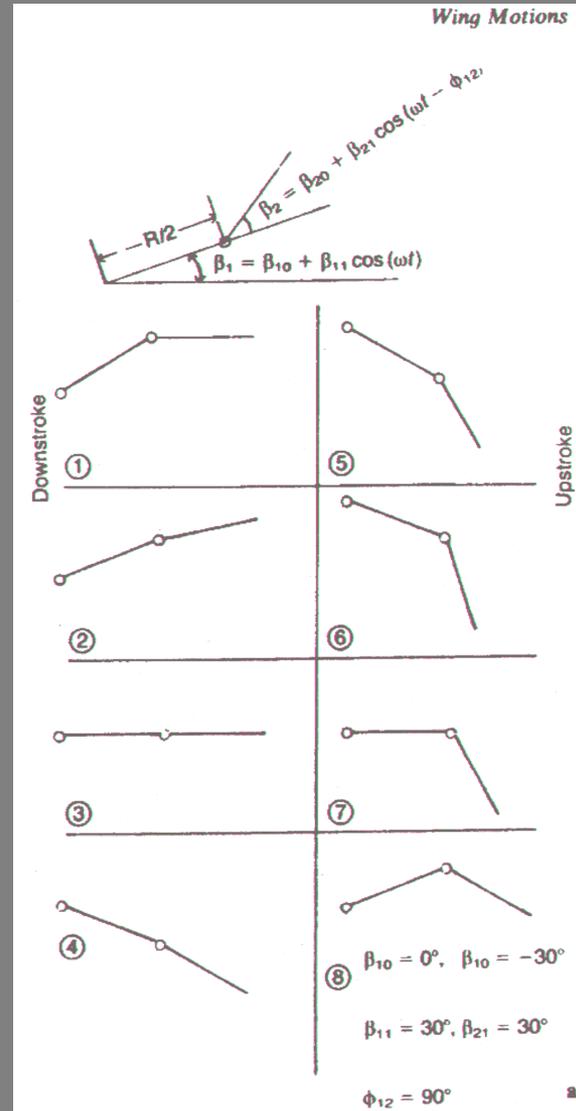
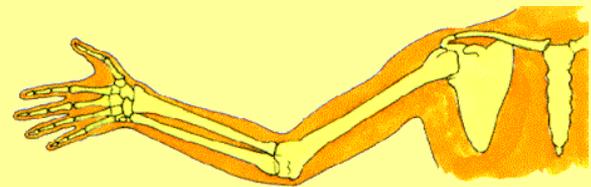
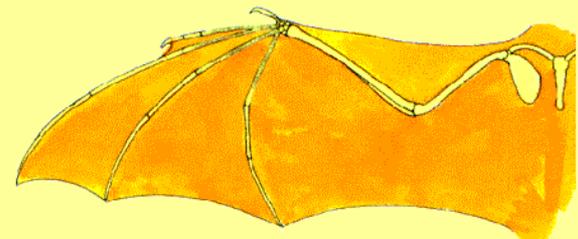
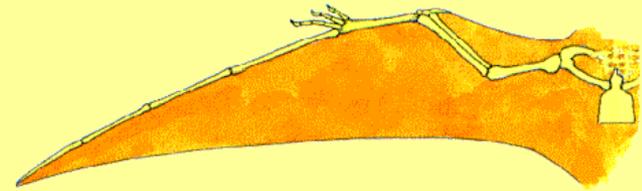
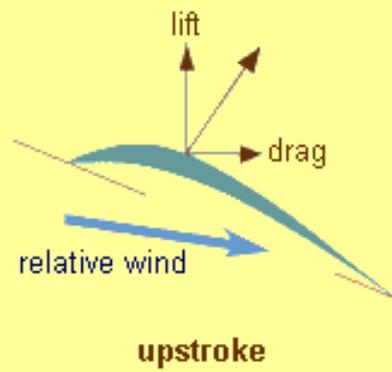
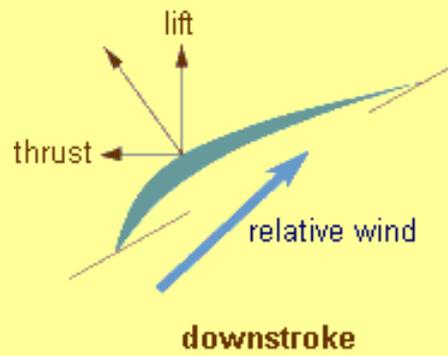


FIG. 4.2-14. a, b. Wake vortex systems. a. Vortex cells generated by both wings in hovering flight. b. Vortex cells generated by left wing in cruising flight. (The tilt angle of the vortex wake surface is much shallower than that of the stroke plane because the ridges of the vortex wake have moved down some distance by the time the valleys are completed).







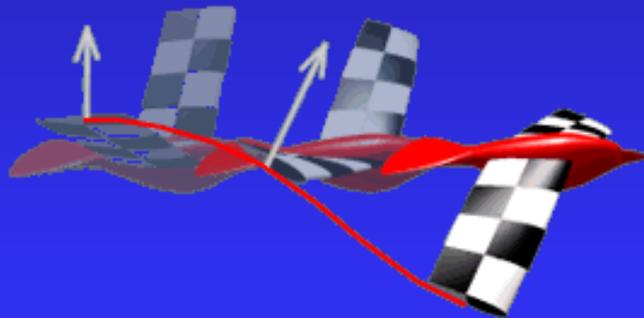
flapping

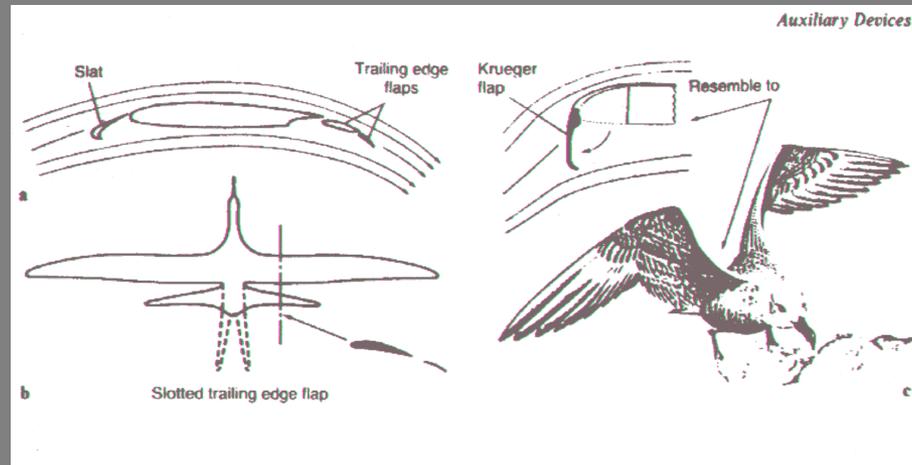
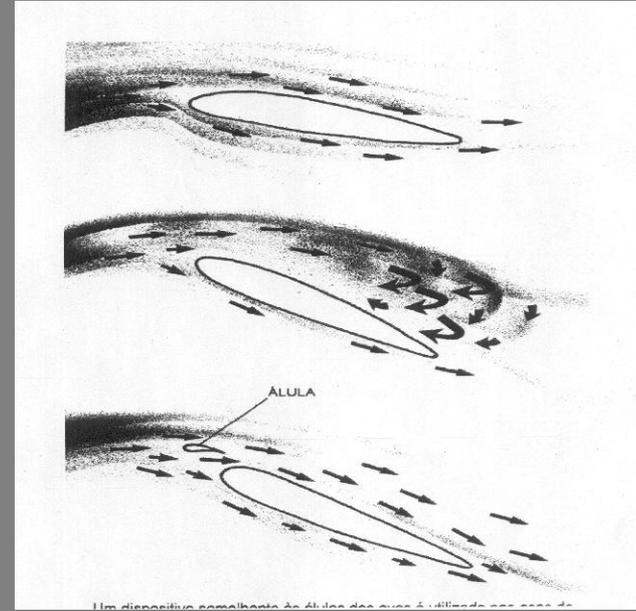


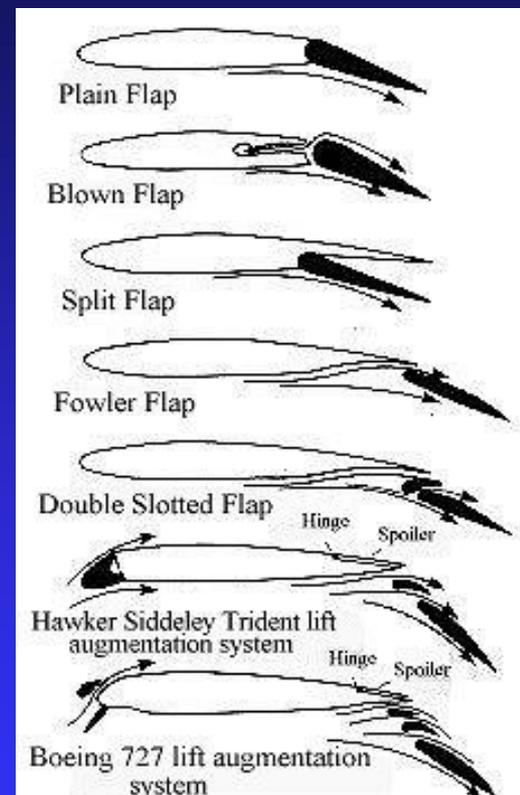
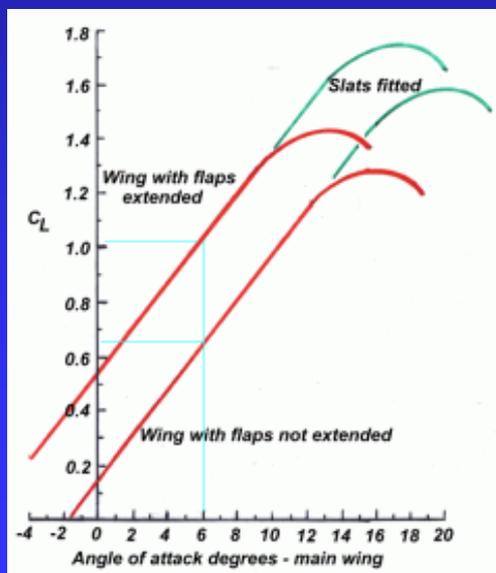
twisting

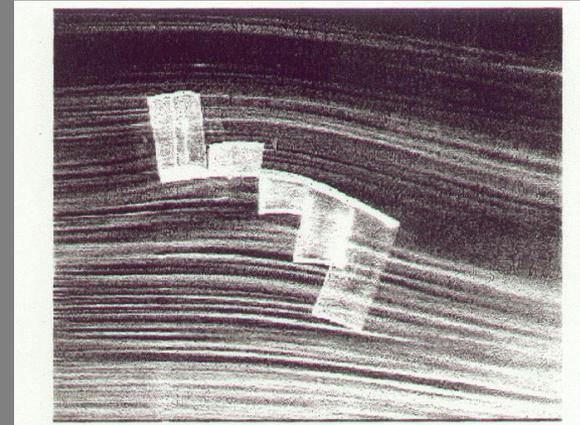
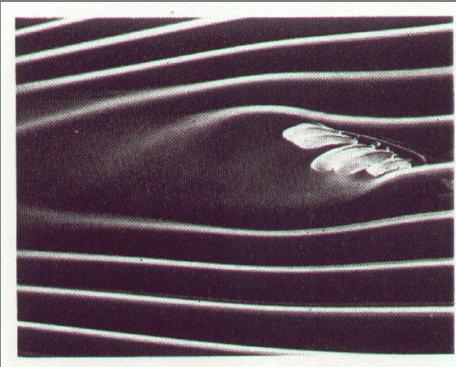
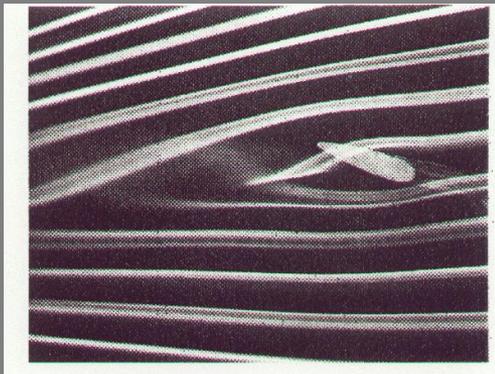
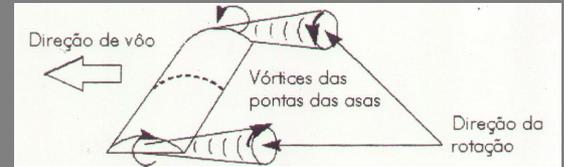


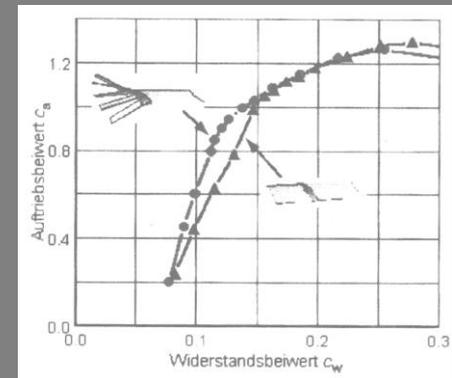
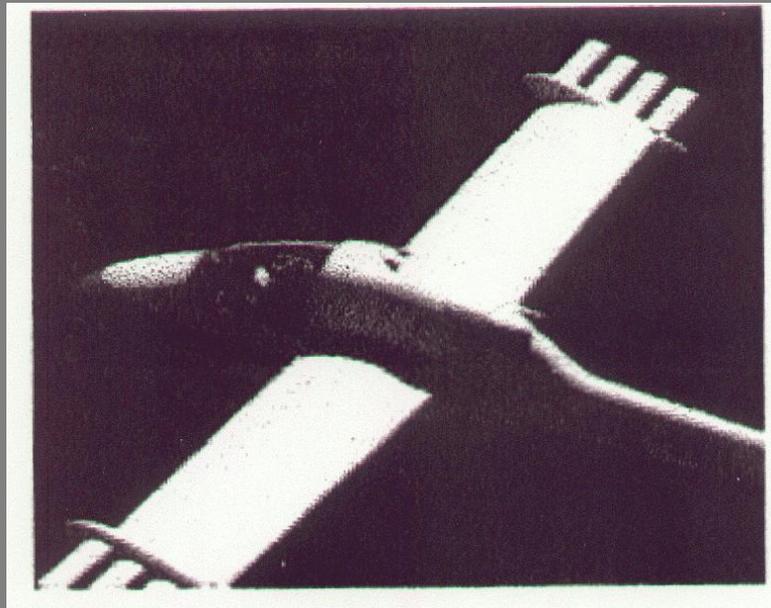
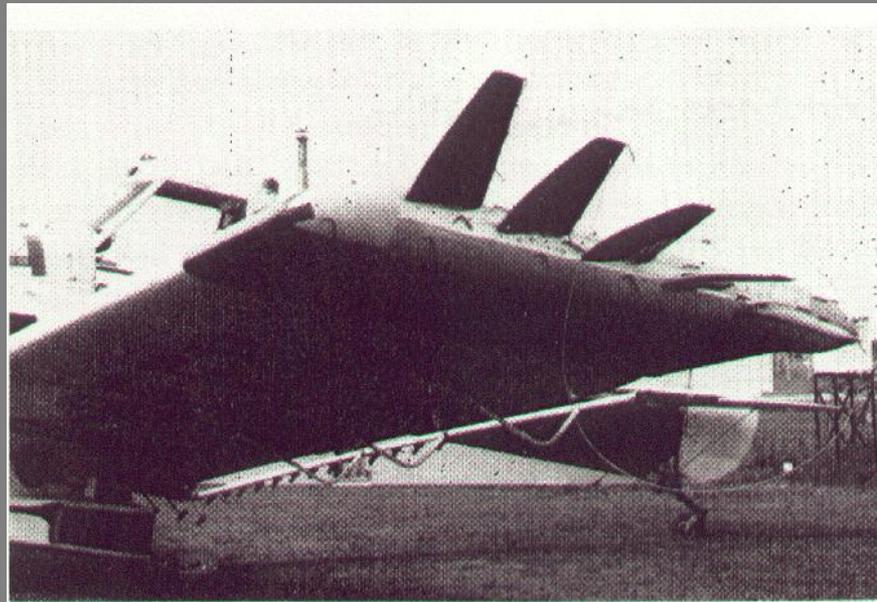
folding

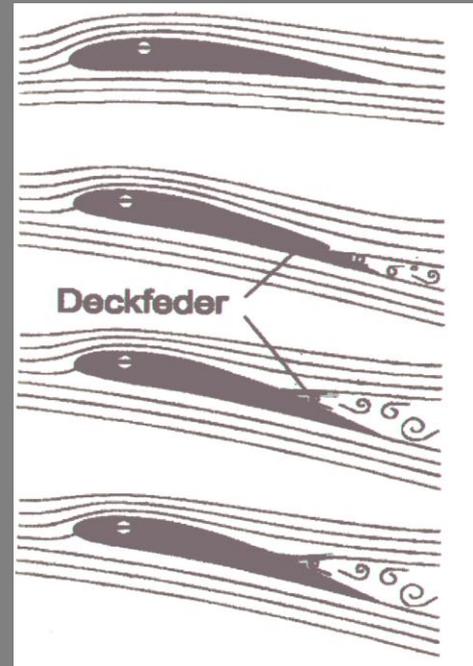
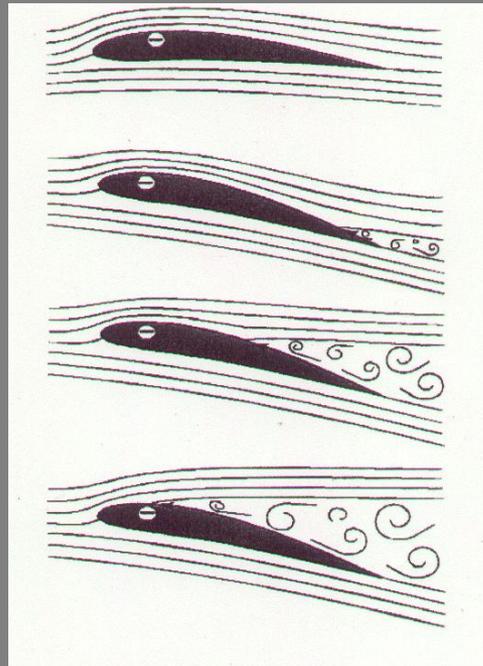
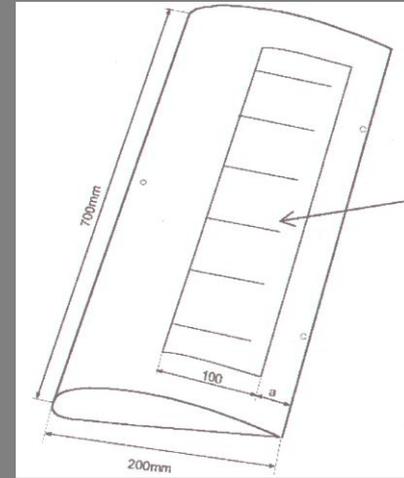
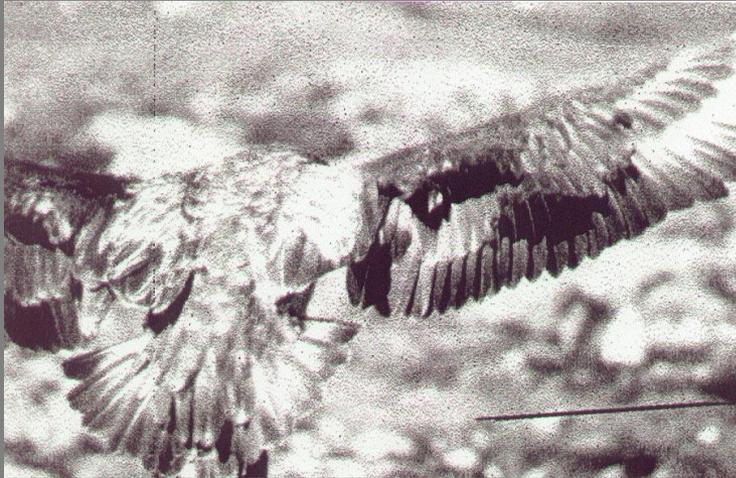


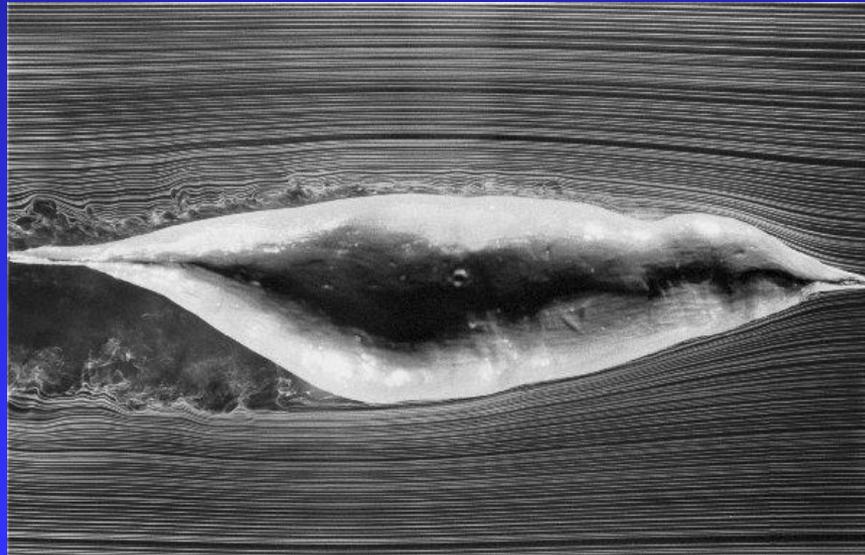
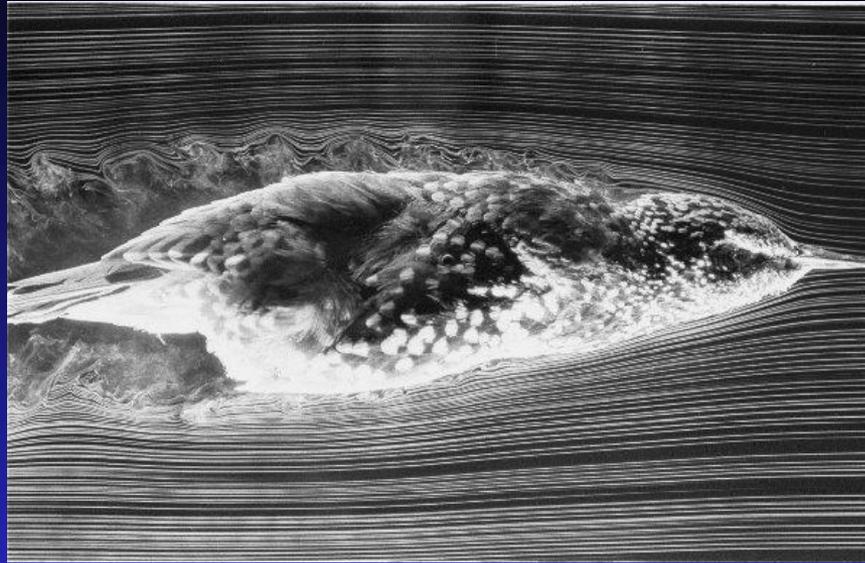














Conclusão

Apesar de grandes personalidades terem desfilado por essas páginas, muitas outras, de semelhante proeminência, não puderam ser citadas. Sendo um problema de imenso interesse para matemáticos, físicos e engenheiros, a mecânica dos fluidos arrastou para sua bruma de fascinação cientistas do naipe de Horace Lamb, Lorde Kelvin, Lorde Rayleigh, W. Froude, G. Kirchoff, Gustave Eiffel, Frederick Lanchester, Wilhelm Kutta, Nikolai Zhukovsky, Albert Einstein, Werner Weisenberg, S. Chandrasekhar, Richard Feynman, Enrico Fermi, Antonio Ferri, Max Munk, A. Sommerfeld, W. Tolmien, S. Goldstein, James Lighthill, George Batchelor, Alan Townsend, V. Arnold, P. Y. Chou, Hans Liepmann, T. Theodorsen, E. Jacobs, L. Kovasznay e S. Corrsin para mencionar apenas uns poucos. Alguns desses nomes ofereceram importantes contribuições ao assunto, outros falharam fragorosamente. Talvez em outra ocasião tenhamos a oportunidade de discorrer em mais detalhe sobre isso. De qualquer forma, este curto texto procurou oferecer ao leitor uma suscita visão do desenvolvimento da mecânica dos fluidos à luz de seu desenvolvimento histórico. Este objetivo, acredito, foi cumprido. Finalizo, deixando para reflexão uma famosa frase de Sir Horace Lamb. Ela diz:

“I am an old man now, and when I die and go to Heaven there are two matters on which I hope enlightenment. One is quantum electro-dynamics and the other is turbulence of fluids. About the former, I am really rather optimistic”.