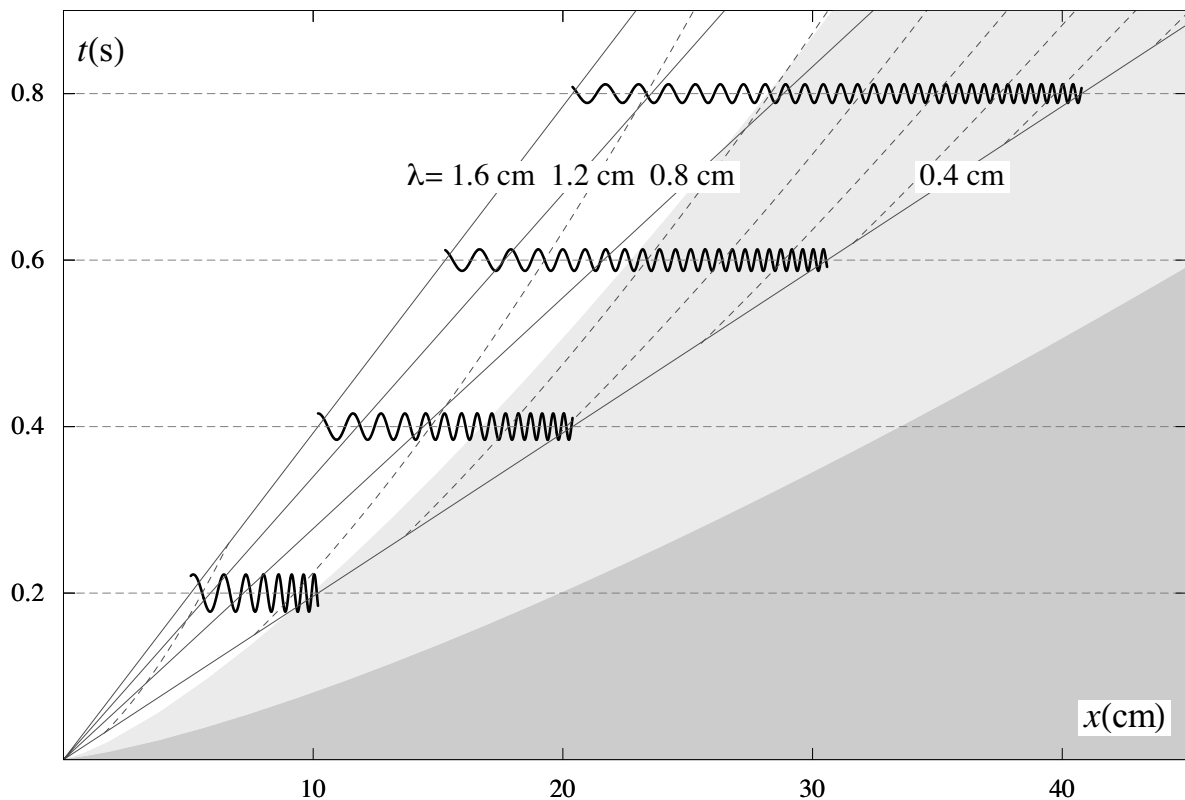


# INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE FLUIDOS

JULIO GRATTON



## PRÓLOGO

Las presentes notas son el texto del curso Estructura de la Materia 1. Me he basado en buena medida en las notas del curso “Mecánica de Fluidos”, redactadas hace ya algunos años por el Prof. Roberto Gratton y el Prof. Javier Diez de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, sin embargo he incorporado varios tópicos nuevos, y ampliado considerablemente la discusión de otros.

Agradezco a los colegas que han tenido paciencia conmigo y se han prestado muy amablemente a discutir aspectos de los temas del curso, en particular los Prof. Fernando Minotti, Javier Diez y Roberto Gratton.

Pido disculpas por las erratas que seguramente se han deslizado en esta edición, y agradeceré que se me ponga al corriente de las que se encontraran.

Como bibliografía básica del curso puedo indicar los siguientes textos:

1. G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge Univ. Press, 1980.
2. L. D. Landau y E. M. Lifschitz, *Fluid Mechanics*, Pergamon Press, 1959.
3. A. Sommerfeld, *Mechanics of Continuous Media*, Academic Press, 1950.
4. E. Guyon, J-P. Hulin y L. Petit, *Hydrodynamique Physique*, CNRS, 1991.
5. D. J. Acheson, *Elementary Fluid Dynamics*, Oxford 1990.
6. D. J. Tritton, *Physical Fluid Dynamics*, Van Nostrand, 1977.

Como bibliografía de consulta sugiero los siguientes libros

7. R. H. Flowers y E. Mendoza, *Propiedades de la Materia*, Limusa.
8. W. H. Li y S. H. Lam, *Principles of Fluid Dynamics*, Addison Wesley, 1964.
9. L. I. Sedov, *Similarity and Dimensional Methods in Mechanics*, Infosearch, 1959.
10. R. B. Whitham, *Linear and Non Linear Waves*, Springer, 1977.
11. Ya. B. Zel’dovich y Yu. P. Raizer, *Physics of Shock Waves and High Temperature Hydrodynamic Phenomena*, Academic Press, 1967.
12. H. A. Barnes, J. F. Hutton y K. Walters, *An Introduction to Rheology*, Elsevier, 1989.
13. H. Lamb, *Hydrodynamics*, Dover, 1945.
14. J. J. Stoker, *Water Waves*, Wiley-Interscience, 1957.

Julio Gratton

Buenos Aires, octubre de 2002.

# INDICE

<b>1. Nociones básicas sobre los fluidos</b>	<b>1</b>
Comportamiento mecánico de los fluidos	1
Hipótesis del continuo	3
Fuerzas de volumen y de superficie en un fluido	6
Propiedades generales de las fuerzas de superficie	6
El tensor de los esfuerzos	8
Resultante de las fuerzas de superficie sobre un elemento de volumen	11
Simetría del tensor de los esfuerzos	12
Descomposición del tensor de los esfuerzos	15
Presión en un fluido en reposo	17
<b>2. Hidrostática</b>	<b>20</b>
Principio de Arquímedes	20
Equilibrio en líquidos con estratificaciones de densidad	20
Equilibrio de la atmósfera	23
Estabilidad del equilibrio atmosférico	25
Condiciones de contorno en interfases	27
Tensión superficial	28
Contorno de equilibrio entre dos fluidos en reposo	31
Forma de una gota líquida	33
Línea de contacto triple y ángulo de contacto	33
Características de los coeficientes de tensión superficial	34
Cohesión de líquidos	36
<b>3. Cinemática</b>	<b>38</b>
Campo de velocidad	38
Elementos materiales	39
Líneas de corriente y trayectorias	39
Descripción Euleriana y Lagrangiana	40
Conservación de la masa	41
Derivada total de integrales materiales	42
Movimiento relativo en el entorno de un punto	43
<b>4. Ecuaciones básicas de la dinámica de fluidos</b>	<b>48</b>
Ecuación de conservación de la cantidad de movimiento	48
La hipótesis del equilibrio termodinámico local	50
La ecuación de Euler	52
Relaciones constitutivas para fluidos Newtonianos	52
La ecuación de Navier-Stokes	53
Ecuación de la energía	54
Propiedades termomecánicas de fluidos reales	57
Fluidos no Newtonianos	59

<b>5. Flujos ideales</b>	<b>64</b>
Ecuaciones generales de los flujos ideales	64
Formas de la ecuación de Euler para flujos barotrópicos	65
Ecuaciones de evolución de la vorticidad	68
La ecuación de Helmholtz	69
Teorema de Kelvin	71
Movimientos vorticosos	73
Flujos viscosos, no barotrópicos y con fuerzas de volumen no conservativas	75
Clasificación de las diferentes clases de flujos	77
<b>6. Flujos ideales incompresibles e irrotacionales</b>	<b>79</b>
El potencial de velocidad	79
Flujos incompresibles bidimensionales y la función corriente	82
Unicidad del potencial de velocidad y de la función corriente	83
Flujos potenciales incompresibles elementales	89
Flujo potencial en la proximidad del vértice de un diedro	95
Flujo alrededor de un cilindro circular	96
Fuerzas sobre un obstáculo en un flujo potencial	102
Potencial complejo	110
Comentarios sobre los flujos potenciales	121
<b>7. Flujos viscosos</b>	<b>126</b>
Ecuación de Navier-Stokes	126
Ecuación de la vorticidad	126
Difusión de la velocidad y la vorticidad	127
Flujos con vorticidad inicial nula y el origen de la capa límite	131
Significado del número de Reynolds	133
Número de Reynolds y semejanza dinámica	134
Aplicación del Principio de Semejanza al arrastre de cuerpos esféricos	136
<b>8. Flujos viscosos unidireccionales y capa límite</b>	<b>140</b>
Flujos unidireccionales	140
Flujo entre dos placas planas y paralelas	141
Conducto de sección circular: flujo de Poiseuille	143
La capa límite laminar	144
Teoría de Prandtl de la capa límite	147
Autosemejanza de la capa límite cuando la velocidad exterior es uniforme	150
Fuerza de arrastre viscoso	154
<b>9. Ondas superficiales de gravedad</b>	<b>156</b>
Ondas superficiales	156
Ondas superficiales de gravedad	156
Ecuaciones básicas	156
Ondas elementales monocromáticas	158
Ondas capilares	162
Ondas superficiales en capas de profundidad finita	165

Efecto de la viscosidad sobre las ondas superficiales	168
La relación de dispersión y la dispersión de trenes de ondas	168
Patrones de ondas de superficie producidos por una fuente puntiforme instantánea	180
Patrones de ondas en corrientes estacionarias	182
Patrón de ondas capilares alrededor de una línea de pesca	188
Arrastre por emisión de ondas	190
<b>10. Ondas en el seno de un fluido</b>	<b>193</b>
Las ecuaciones de la dinámica de gases	193
Perturbaciones compresivas de pequeña amplitud	194
La solución general de D'Alembert para pulsos sonoros planos	197
Soluciones elementales de la ecuación de ondas	202
La velocidad del sonido	203
El espectro de las ondas sonoras	204
Propiedades de las ondas sonoras	205
Las condiciones de incompresibilidad	209
Ondas internas de gravedad en fluidos estratificados	214
Las oscilaciones de Brunt-Väisälä y la estabilidad de un fluido estratificado	218
Las ondas de Lamb	220
Las ondas de superficie	221
Ondas internas en una estratificación exponencial	222
<b>11. Ondas de amplitud finita</b>	<b>229</b>
Ondas hiperbólicas	229
Ondas dispersivas	231
La onda de creciente como ejemplo de onda hiperbólica no lineal	235
La ecuación de Korteweg-de Vries para las ondas dispersivas no lineales en un canal	262
Soluciones periódicas y aperiódicas de la ecuación de Korteweg-de Vries	268
Conclusiones	273