

MECÁNICA DEL MEDIO CONTINUO:
UNA INICIACIÓN

JUAN H. CADAVID R.



Cadavid R., Juan H.

Mecánica del medio continuo: una iniciación / Juan H.

Cadavid. R. -- Medellín : Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2009.

394 p. : il. ; 24 cm. -- (Colección académica)

Incluye bibliografía.

ISBN 978-958-720-021-8

1. Mecánica continua 2. Mecánica de fluidos 3. Elasticidad
4. Cinemática I. Tít. II. Serie.

531.1 cd 21 ed.

A1186606

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

MECÁNICA DEL MEDIO CONTINUO:

UNA INICIACIÓN

Primera edición: enero de 2009

© Juan H. Cadavid R.

© Fondo Editorial Universidad EAFIT

Cra.49 No. 7 sur-50

www.eafit.edu.co/fondoeditorial

E-mail: fonedit@eafit.edu.co

ISBN: 978-958-720-021-8

Diseño de colección: Miguel Suárez

Imagen de carátula: Deformación plástica de un textil hiperelástico (como la Lycra).

Simulación numérica realizada en el Laboratorio de Mecánica Aplicada de la Universidad EAFIT por los profesores Manuel García y Mario Gómez.

Editado en Medellín, Colombia

Para mis padres, con inmensa gratitud

CONTENIDO

PRÓLOGO.....	XI
PARTE I. EL MEDIO CONTINUO.....	1
CAPÍTULO 1	
GÉNESIS	3
1.1. NECESIDAD DEL CONCEPTO DE MEDIO CONTINUO	4
1.1.1 PROBLEMA CENTRAL DE LA MECÁNICA.....	4
1.1.2 SISTEMA DE PARTÍCULAS.....	7
1.1.2.1 ELEMENTOS DE MECÁNICA DE UN SISTEMA DE PARTÍCULAS ...	7
1.1.3 SISTEMAS DE POCAS Y MUCHAS PARTÍCULAS	26
1.2 MEDIO CONTINUO	27
1.2.1 DEDUCCIÓN DEL CONCEPTO	27
1.2.2 VALIDEZ DE LA HIPÓTESIS DE CONTINUIDAD	29
1.2.3 EL MEDIO CONTINUO Y LA INGENIERÍA	32
1.3 EJERCICIOS	32
CAPÍTULO 2	
OPERATIVIDAD	35
2.1 EL MEDIO CONTINUO Y EL CONTINUO MATEMÁTICO	37
2.2 MODELACIÓN DEL MEDIO CONTINUO	38
2.3 ESCALARES, VECTORES Y DIÁDICAS	41
2.3.1 ESCALARES	41
2.3.2 VECTORES.....	42
2.3.2.1 OPERACIONES ENTRE VECTORES.....	44
2.3.3 DIÁDICAS.....	46
2.3.3.1 INTRODUCCIÓN	46
2.3.3.2 DIÁDAS	47
2.3.3.3 DEFINICIÓN DE DIÁDICA	48
2.3.3.4 DIÁDICAS ESPECIALES	51
2.3.3.5 OPERACIONES CON DIÁDICAS.....	52

2.3.3.6 REPRESENTACIÓN COMO MATRIZ	58
2.4 CAMPOS	66
2.4.1 CAMPO ESCALAR.....	66
2.4.1.1 DIFERENCIACIÓN DE CAMPOS ESCALARES.....	67
2.4.2 CAMPO VECTORIAL.....	70
2.4.2.1 DIFERENCIACIÓN DE CAMPOS VECTORIALES	72
2.4.2.2 OPERACIONES DIFERENCIALES VECTORIALES	77
2.4.3 CAMPO DIÁDICO	81
2.4.3.1 DIFERENCIACIÓN DE CAMPOS DIÁDICOS	82
2.5 TRANSFORMACIÓN DE VECTORES Y DIÁDICAS.....	85
2.5.1 TRANSFORMACIÓN DE VECTORES	85
2.5.2 TRANSFORMACIÓN DE DIÁDICAS.....	88
2.6 EJERCICIOS	89

PARTE II. MECÁNICA..... 93

CAPÍTULO 3

CINÉTICA.....	94
3.1 FUERZAS EN EL MEDIO CONTINUO	95
3.1.1 FUERZAS EXTERNAS EN EL MEDIO CONTINUO	95
3.1.1.1 FUERZAS DE CUERPO	96
3.1.1.2 FUERZAS DE SUPERFICIE.....	96
3.1.1.3 RESULTANTE DE FUERZAS EXTERNAS EN EL MEDIO CONTINUO	97
3.1.2 FUERZAS INTERNAS EN EL MEDIO CONTINUO.....	97
3.2 TENSIÓN.....	102
3.2.1 DEFINICIÓN	102
3.2.2 DIÁDICA DE TENSIONES	103
3.2.3 CUBO DE TENSIONES	105
3.2.4 ESTADO DE TENSIONES PARTICULARES.....	106
3.2.4.1 ESTADO GENERAL DE TENSIONES	106
3.2.4.2 ESTADO PLANO DE TENSIONES	106
3.2.4.3 CONVENCION DE SIGNOS PARA LAS TENSIONES	107
3.2.4.4 OTROS ESTADOS DE TENSIONES	109
3.2.5 TRANSFORMACIÓN DE TENSIONES.....	110
3.2.5.1 MÉTODO ALGEBRAICO	111
3.2.5.2 MÉTODO DEL CÍRCULO DE MOHR.....	113

3.2.5.3 UTILIDAD DE LA TRANSFORMACIÓN DE TENSIONES.....	125
3.3 SEGUNDA LEY DE NEWTON PARA UN MEDIO CONTINUO.....	140
3.3.1 SEGUNDA LEY DE NEWTON PARA TRASLACIÓN EN UN MEDIO CONTINUO	141
3.3.2 SEGUNDA LEY DE NEWTON PARA ROTACIÓN EN UN MEDIO CONTINUO	150
3.4 EJERCICIOS	155

CAPÍTULO 4

CINEMÁTICA.....	159
4.1 BASES DE LA CINEMÁTICA DEL MEDIO CONTINUO.....	161
4.1.1 CONCEPTO DE RECORRIDO.....	163
4.1.2 CONCEPTO DE DEFORMACIÓN	168
4.1.2.1 CUERPO DEFORMABLE	171
4.2 RELACIONES CINEMÁTICAS EN EL CUERPO DEFORMABLE (MEDIO CONTINUO).....	172
4.2.1 LEY DEL MOVIMIENTO DE UN PUNTO MATERIAL.....	173
4.2.2 VELOCIDAD DE UN PUNTO MATERIAL.....	178
4.3 DEFORMACIONES PEQUEÑAS	185
4.3.1 DEFORMACIÓN INDEPENDIENTE DEL TIEMPO	186
4.3.1.1 RECORRIDO.....	186
4.3.1.2 DEFORMACIÓN ELEMENTAL.....	187
4.3.1.3 DEFORMACIÓN UNITARIA	194
4.3.1.4 CONVENCION DE SIGNOS PARA LA DEFORMACIÓN.....	199
4.3.1.5 RELACIÓN ENTRE LA DEFORMACIÓN Y EL RECORRIDO	200
4.3.2 DEFORMACIÓN DEPENDIENTE DEL TIEMPO	209
4.3.2.1 RELACIÓN ENTRE EL CAMPO DE DEFORMACIONES DEPENDIENTE DEL TIEMPO Y EL DE VELOCIDADES	210
4.3.2.2 RELACIÓN ENTRE EL CAMPO DE ACELERACIONES Y EL DE VELOCIDADES	217
4.3.3 CLASIFICACIÓN DEL ESTADO DE DEFORMACIONES	219
4.3.4 DEFORMACIONES Y VELOCIDADES DE DEFORMACIÓN VOLUMÉTRICAS Y DISTORSIONALES.....	220
4.3.5 TRANSFORMACIÓN DE LA DEFORMACIÓN Y DE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN	224
4.4 EJERCICIOS	226

PARTE III. TIPOS DE MEDIO CONTINUO	231
--	-----

CAPÍTULO 5

SÓLIDOS	233
5.1 ECUACIONES CONSTITUTIVAS.....	234
5.1.1 DEFINICIÓN DE ECUACIÓN CONSTITUTIVA.....	234
5.1.2 CLASIFICACIÓN DEL MEDIO CONTINUO	236
5.2 MEDIO CONTINUO SÓLIDO.....	237
5.2.1 PRUEBA DE CARGA EN TRACCIÓN.....	237
5.2.1.1 CONSIDERACIONES SOBRE EL RESULTADO DE LA PRUEBA.....	239
5.2.1.2 VALIDEZ DE LOS RESULTADOS DE LA PRUEBA DE CARGA	245
5.2.2 TIPOS DE MEDIO CONTINUO SÓLIDO	246
5.2.3 ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE UN SÓLIDO	248
5.2.4 INTRODUCCIÓN A LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD LINEAL.....	249
5.2.4.1 GENERALIDADES.....	249
5.2.4.2 HIPÓTESIS DE PARTIDA	249
5.2.4.3 FORMA GENERAL DE LOS COEFICIENTES DE ELASTICIDAD LINEAL.....	249
5.2.4.4 ECUACIONES CONSTITUTIVAS DE LA ELASTICIDAD LINEAL.....	251
5.2.4.5 CONSTANTES DE LA ELASTICIDAD LINEAL.....	261
5.2.4.6 SEGUNDA LEY DE NEWTON PARA UN SÓLIDO ELASTOLINEAL..	263
5.3 EJERCICIOS	272

CAPÍTULO 6

FLUIDOS	277
6.1 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUIDOS	279
6.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.....	281
6.2.1 PROPIEDADES TERMODINÁMICAS.....	282
6.2.1.1 PRESIÓN	282
6.2.1.2 TEMPERATURA.....	285
6.2.1.3 DENSIDAD.....	287
6.2.1.4 ECUACIONES DE ESTADO	287
6.2.2 VISCOSIDAD.....	299
6.2.3 TENSIÓN SUPERFICIAL.....	301
6.2.4 PRESIÓN DE VAPOR.....	304
6.2.5 COMPRESIBILIDAD	305
6.3 ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE UN FLUIDO	309
6.3.1 FLUIDOS NEWTONIANOS	309

6.3.1.1 LEY DE VISCOSIDAD DE NEWTON.....	309
6.3.1.2 LEY DE VISCOSIDAD DE STOKES	315
6.3.1.3 SEGUNDA LEY DE NEWTON PARA UN FLUIDO NEWTONIANO INCOMPRESIBLE.....	317
6.3.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS.....	325
6.3.2.1 FLUIDOS NO NEWTONIANOS INDEPENDIENTES DEL TIEMPO ...	326
6.3.2.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS DEPENDIENTES DEL TIEMPO	329
6.3.3 FLUIDOS LAMINARES Y TURBULENTOS	330
6.3.3.1 FLUJO LAMINAR.....	331
6.3.3.2 FLUJO TURBULENTO.....	332
6.4 CONCLUSIONES.....	339
6.5 EJERCICIOS	339

CAPÍTULO 7

VISCOELÁSTICOS.....	345
7.1 INTRODUCCIÓN A LA RESPUESTA DUAL.....	347
7.1.1 VISCOELASTICIDAD Y VISCOPLASTICIDAD	347
7.1.2 REOLOGÍA.....	348
7.1.2.1 DEFINICIÓN	348
7.1.2.2 REOLOGÍA O VISCOELASTICIDAD	350
7.1.2.3 NÚMERO DE DÉBORA.....	351
7.2 ECUACIONES CONSTITUTIVAS PARA EL MEDIO CONTINUO	
VISCOELÁSTICO	352
7.2.1 CONCEPTOS BÁSICOS	352
7.2.1.1 FLUJO PLÁSTICO.....	352
7.2.1.2 RELAJACIÓN	354
7.2.1.3 RECUPERACIÓN	354
7.2.2 FENOMENOLOGÍA	354
7.2.2.1 PRUEBA DE FLUJO PLÁSTICO	355
7.2.2.2 PRUEBA DE RELAJACIÓN.....	356
7.2.3 ALGUNAS ECUACIONES CONSTITUTIVAS.....	357
7.2.3.1 MODELO DE MAXWELL	358
7.2.3.2 MODELO DE KELVIN-VOIGT	364
7.2.3.3 OTROS MODELOS.....	369

APÉNDICE A

LOS SISTEMAS DE UNIDADES.....	371
A.1 INTRODUCCIÓN.....	371

A.2 PRINCIPALES SISTEMAS DE UNIDADES	371
A.2.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.....	371
A.2.2 DIMENSIONES Y UNIDADES	373
A.2.3 SISTEMAS DE UNIDADES EN LA INGENIERÍA	373
A.2.4 FUERZA MASA Y PESO	374
APÉNDICE B	
TAXONOMÍA DE LA MECÁNICA	377
APÉNDICE C	
MOVIMIENTO RELATIVO.....	379
LISTA DE SÍMBOLOS.....	381
BIBLIOGRAFÍA.....	387

PRÓLOGO

La gran tarea de la vida es justificarse. Justificarse es celebrar un rito. Siempre.

Cesare Pavese, *El oficio de vivir*

La *mecánica del medio continuo* permaneció en el anonimato durante mi formación académica, y envuelta en misterios y enigmas a lo largo de otras etapas vitales. En los cursos de física no se hacía referencia alguna a ella, aunque –la verdad sea dicha– tampoco a las otras *mecánicas*. Las metodologías de enseñanza utilizadas en aquel tiempo se ocupaban poco (preocupaban, menos) de las minucias metodológicas y de la búsqueda de conexiones entre contenidos.

Supe al menos que existía cuando me topé con un texto sobre el tema en alguna biblioteca. Se trataba de la *Mecánica del medio continuo*, de George Mase (serie Schaum). Al hojearlo quedé atrapado en la deslumbrante belleza de sus formalismos y asombrado por una complejidad que se insinuaba desmesurada a los ojos de quien a la sazón apenas incursionaba por las primeras asignaturas de ciencia básica.

Aquel suceso fortuito se sumió poco a poco en el olvido. Sin embargo, comenzaron a ocurrir hechos un tanto aislados que alertaron mi atención. Entre otros regresan a mi memoria tres situaciones:

1. La rudimentaria distinción cinemática entre sólido y fluido que le sirvió al profesor de la asignatura de *mecánica de fluidos* para abrir la primera clase del semestre.
2. La frecuente repetición de temas idénticos en las materias de mecánica de fluidos, *resistencia de materiales* (como llamaban antaño a la *mecánica de sólidos*) y *mecánica de suelos*.
3. La terminología usada en la mecánica de fluidos que me evocaba bastante la que había escuchado en el curso de *dinámica*.

A partir de aquellos episodios comencé a intuir que se presentaba una suerte de desconexión entre la dinámica y las tres mecánicas citadas.

Durante el tiempo en que me desempeñé como ingeniero civil (en consultoría) permanecieron vivas aquellas inquietudes epistemológicas, un tanto reñidas con ese tipo de

ocupación. Hoy creo que el haber tenido a la ingeniería hidráulica como campo de aplicación predominante en esos años contribuyó en gran medida a su pervivencia.

En aquella época intenté comprar el libro de Mase, pero me dijeron que había sido discontinuado (seguramente por falta de interesados), de manera que nunca logré adquirirlo (la versión que tengo actualmente es una fotocopia). Tuve que irme a Europa para reencontrarlo y para darme cuenta de que la mecánica del medio continuo existía y se empleaba (además). Allí observé que figuraba como asignatura ordinaria en los currículos del pregrado de ingeniería, y que el texto de Mase se utilizaba (en Italia).

Al tratar con estudiantes e ingenieros de aquel continente hallé que poseían una envidiable formación en *mecánica* (en el sentido fundamental y general del término).¹ Comprendí que la nuestra estaba llena de vacíos metodológicos y que los docentes se limitaban a transmitir contenidos aislados. Sí bien es cierto que la enseñanza debe impartirse fragmentada (y dosificada) durante el pregrado –por razones más que todo pedagógicas– debería ser imperativo informarle al estudiante sobre la conexión lógica de las diversas partes (por ejemplo, los cursos) en que se encuentra dividida una determinada área del conocimiento. Al convertirme en docente unos años después me volví obsesivo con relación a este aspecto (tan sólo espero que mis discípulos hayan captado ese mensaje).

Tras la experiencia europea entendí que faltaba el curso de mecánica del medio continuo,² entre el de dinámica y los de las tres mecánicas. Fue en aquel tiempo que comencé a llamarla *el eslabón perdido de la mecánica*, pues se saltaba, silenciosa e impunemente de la dinámica hasta las tres mecánicas. Absurdo desde donde se le mire.

En consonancia con una idea y un esfuerzo por formar ingenieros fuertes en el área de mecánica he trabajado como docente de planta en la estructuración y fortalecimiento de su enseñanza en la Universidad EAFIT. Una meta muy importante en toda esta labor fue el conseguir la inclusión de la mecánica del medio continuo, piedra angular de ese empeño, dentro del currículo del pregrado.

En tanto llegaba esta oportunidad, los cursos de mecánica de fluidos y de dinámica resultaron ser campos abonados para sembrar algunas ideas, sobre todo relacionadas con la filiación de la mecánica. Así mismo, escenarios adecuados para entregar algunas nociones mínimas de mecánica del medio continuo (en particular en la asignatura de mecánica de fluidos donde se incluía en su parte introductoria). Hacía un énfasis especial en la segunda ley Newton, una valiosa herramienta que permite allanar la exposición de muchos elementos.

La feliz ocasión para implantar en el currículo esta materia se dio con la reforma curricular que entró en vigencia en el primer semestre de 1994, en el programa de ingeniería civil de la Universidad EAFIT.³

¹ Lo que en inglés denominan *mechanics* para diferenciarlo de *mechanical*. En el mismo sentido en francés: *mécanique* y *mécanicien*.

² A este respecto puede verse el Apéndice B de este libro.

³ Un tiempo después el programa de ingeniería mecánica también lo hizo.

Un primer reto para la elaboración de un programa de esta asignatura consistió en el manejo y adaptación de la complejidad con que se presenta su temática en la literatura clásica. El problema es que no parece haber habido un intento consistente y coherente para divulgarla, como sucede con otras ramas de la ciencia, por ejemplo con la *mecánica cuántica*. Es decir que sus contenidos no se entregan filtrados, salvo en muy pocas ocasiones, para acercarlos al público llano menos especializado y sobre todo carente del alto nivel matemático que requiere.⁴

Con el tiempo he terminado por pensar que la mecánica del medio continuo nació –y se quedó– *adulta*.

A mi modo de ver este argumento daría razón a la tradicional invisibilidad histórica de este curso en los currículos del pregrado en Colombia. Se habría decidido, supongo, que se trataba de algo inalcanzable para el estudiante de este nivel, y por ello se le relegó al anonimato, sin esfuerzos por adaptarla a tal grado de formación.

Una selección descuidada de los temas podría llevar a crear un programa inadecuado. Seguramente en una falla de esta especie reside la explicación al origen de alguna leyenda negra que ronda por los ambientes académicos del pregrado (y no necesariamente en Colombia). Al extremo que socarronamente se deforma su nombre en el de ¡*mecánica del miedo continuo!*

En aquellos inicios se disponía –como únicos espejos– de dos obras que se acercaban bastante al nivel que se quería dar al programa. El libro del italoamericano Enzo Levi (*Elementos de mecánica del medio continuo*) y del colombiano Jorge Alberto Naranjo (*Introducción a la mecánica del continuo*), precursor este último de su introducción en el currículo del pregrado en Antioquia y quizás en Colombia (¿?). Se trata como –sus nombres así parecen sugerirlo– de textos elementales, pero de orientación y discurrir un tanto diferentes. Digo esto consciente de que siempre estará en discusión qué tan elemental puede ser una obra de mecánica del medio continuo.

Con esa cabeza de playa que representaba una materia inmersa en un currículo, consideré que el paso siguiente debería ser mi propio aporte bibliográfico, el cual aspiraba a que sirviera al mismo tiempo como material de apoyo para la enseñanza y divulgación de la mecánica del medio continuo. Ello se concretó en el libro que usted lector tiene ahora en sus manos.

El título que lleva esta obra, *Mecánica del medio continuo una iniciación*, pretende reflejar ese propósito, pero también tornar los contenidos esenciales más asequibles, al desarrollarlos con un nivel mínimo de complejidad. A pesar de ello, es evidente que el público objetivo del mismo debe poseer buenos conocimientos de física y matemática. En la práctica se trataría de ingenieros y estudiantes.

Mi formación es la de un ingeniero civil, que ha cultivado el estudio de la física y de la matemática de manera personal e informal como complemento, por lo demás natural, a su

⁴ En suma no se hizo nunca divulgación con el tema. Como sí con el de la relatividad, mecánica cuántica, etc., mucho más complejos.

orientación profesional. Es claro que me he apoyado notablemente en estas ramas de la ciencia básica para argumentar en el presente trabajo.

Esto lleva indefectiblemente a especular un poco sobre su filiación epistemológica. No se trata de un texto de física, pero tampoco de ingeniería, aunque es conveniente resaltar que el desarrollo histórico de la mecánica del medio continuo ha terminado por ligarla más a la primera que a la segunda. Podría decir –para satisfacer a los que nos gusta ubicar todo– que se ha estructurado como una obra para ingenieros, pero con continuas alusiones a la física.⁵ De todas maneras usted lector está invitado a sacar sus propias conclusiones.

No podría haber escrito desde otra perspectiva que la de la ingeniería civil, y sería presuntuoso de mi parte pensar, y afirmar, que es un libro *neutro*, dirigido a la ingeniería en general. Estimo que el enfoque para la civil lo hace bastante apropiado para la formación de un profesional de esta rama de la ingeniería, pero no descarto que de él pueda nutrirse un ingeniero o estudiante de alguna otra. Me alegraría sobremanera que esta última intención se concretara, pero sólo el uso y el tiempo podrán decir qué tanto se logró.

Para conseguirlo he tratado de redactar de una manera *imparcial* en las cuestiones esenciales que atañen a la ciencia de la mecánica. Para ello me he ceñido al lenguaje de la física y de la matemática. No obstante es conveniente advertir que hay algunas referencias –sobre todo en forma de ejemplos– a la geotecnia,⁶ que en virtud de su carácter práctico, considero podrían ser asimiladas sin mayor dificultad por alguien ajeno a la ingeniería civil. En las partes relacionadas con los tipos de medio continuo, esto es, al hablar de *sólidos*, *fluidos* y *viscoelásticos* he procurado mantener la redacción dentro de la misma línea y con las precauciones ya citadas.

La complejidad matemática es un aspecto bien difícil de dosificar en trabajos de esta índole. A este respecto quisiera traer a colación un hecho aleccionador. El cosmólogo inglés Roger Penrose en su obra *La nueva mente del emperador*, la cual discute sobre las bases y límites de la computación, anuncia al comienzo que tratará de usar la mínima cantidad posible de ecuaciones. En la medida que avanza el desarrollo del libro uno advierte que los formulismos matemáticos aparecen poco a poco.

A la utilización del análisis tensorial puede achacársele, en mucha parte, las dificultades para abordar la mayoría de los textos de mecánica del medio continuo, aún si se le emplea únicamente con sistemas cartesianos de coordenadas. El cálculo de tensores se encuentra un escalón más allá en la formación matemática del ingeniero y puede entenderse como una generalización del cálculo estándar, la cual busca tomar en cuenta la transformación de una propiedad física tras una rotación de los ejes coordenados.⁷ La mecánica del medio continuo debe servirse de él para determinar propiedades físicas (expresadas como vectores, diádicas, etc.) en sistemas coordenados que han sido girados con relación a una

⁵ Por lo demás esta situación no es única. La ingeniería y la física se traslapan a menudo y no se sabe dónde comienza una y termina la otra.

⁶ Otra rama de la ingeniería civil, sin relación con ninguna otra ingeniería.

⁷ Quizás por esta razón el italiano Gregorio Ricci-Curbastro –uno de sus precursores– lo haya denominado *cálculo diferencial absoluto*.

orientación dada del espacio. En este sentido su uso es indispensable e inevitable. Más allá de esto, se utiliza en forma extendida en muchos libros por la potencia de su notación, la cual permite comprimir la escritura de complejas ecuaciones. Esta última parte, si se quiere, se puede eludir. Y así se hace en este texto.

Lo que en buena parte de la literatura clásica es tratado como tensor aquí es operado como vector y diádica, básicamente. En mi opinión los tensores no son entidades matemáticas aparte, sino más bien una propiedad de la que gozan algunas de las mencionadas entidades. Curiosamente en algunos tratados se distingue vector de tensor, lo que no parece muy correcto.

Este trabajo tiene su origen más remoto en otro que vio la luz en el primer semestre de 1997, como producto de un período sabático. Los entusiastas ojos de entonces osaron llamarlo “libro”, pero los pragmáticos de hoy en día preferirían dejarlo en unas “buenas notas de clase”, si acaso. Se denominó *Elementos de mecánica del medio continuo, teoría & aplicaciones*. Nunca se publicó para la calle, pero sí ha sido usado regularmente como texto guía de los cursos de esta materia en la carrera de ingeniería civil de EAFIT.

La presente obra no es pues más que el resultado de una reestructuración y mejoramiento de aquella inicial, que ocupaciones deontológicas obligaron a que se le construyera de forma esporádica. Sólo en abril del año de 2006 se acometió esta etapa final, la cual terminó a finales del mes de septiembre de 2007.

La estructura del trabajo original, que plasmaba en un texto el programa de la asignatura, se ha mantenido en éste. En él se distinguen tres partes. En la primera se examina el concepto de medio continuo, en tanto que la segunda se ocupa propiamente de la mecánica (dinámica) de esta idealización. La tercera plantea su diversificación en mecánica de sólidos, fluidos y viscoelasticidad. Es decir, arriba a la aplicación ingenieril que constituye su objetivo último.

Se halla dividida en un total de siete capítulos inmersos dentro de esas tres partes. La primera, “Medio continuo”, se subdivide en dos capítulos: “Génesis”, donde se le muestra al lector la necesidad de la noción de medio continuo. Para ello se le ubica en esa mecánica esencial que trata con la *partícula* y el *cuerpo rígido*, para desembocar en la de un *sistema de partículas*, en que aparece el problema concreto. En “Operatividad” se exponen las particularidades del tratamiento matemático del medio continuo. Podría parecerle a uno que otro lector como un repaso, pero incorpora también algunas atractivas novedades. Surgen allí unas entidades de las que usted lector amable, con seguridad, no habrá oído hablar mucho por ahí y me atrevo a decir ¡que nada! Se trata de las *díadas* y *diádicas*; inexplicablemente olvidadas, al extremo de que en muchos tratados se les ignora y se les substituye por el tensor.

La segunda parte, “Mecánica”, se ocupa de la *cinética* en el Capítulo 3. Allí se mira el concepto de fuerza desde la óptica de la mecánica del medio continuo, para llegar a las nociones de *fuerza de cuerpo* y *fuerza de superficie*, de la que deriva el de *tensión*, uno de los dos pilares de la mecánica del medio continuo. Así mismo, se deduce la segunda ley de Newton para el movimiento de traslación. En el Capítulo 4, o “Cinemática”, se demuestra

que es necesario reevaluar la concepción clásica del reposo. De ahí se arriba al concepto de *deformación* –el segundo pilar de la mecánica del medio continuo– y aparece el de *cuerpo deformable*, por contraste con el de cuerpo rígido. En una segunda parte del capítulo se construye una cinemática basada en la hipótesis de pequeñas deformaciones, que es de la que se vale la ingeniería.

En la parte final, “Tipos de medio continuo”, se juntan la tensión y la deformación para conformar las llamadas *leyes constitutivas*, que permiten integrar la segunda ley de Newton para traslación y clasificar el medio continuo, a partir de su comportamiento mecánico, en “Sólidos” (Capítulo 5), “Fluidos” (Capítulo 6) y “Viscoelásticos” (Capítulo 7).

Cada capítulo se articula alrededor de una abundante información conceptual (en esto marca diferencia con respecto a la literatura clásica,⁸ de ejemplos resueltos y numerosos ejercicios propuestos.

Al final de este cuerpo central el lector podrá encontrar tres apéndices. El “Apéndice A” revisa rápidamente el delicado problema de las unidades. En el B se suministra una clasificación de la mecánica, en tanto que en el “Apéndice C” se hace una sucinta explicación sobre el concepto de movimiento relativo.

Con relación a la bibliografía entregada resulta conveniente hacer alguna precisión. Se anexa diversificada –más allá de la estricta de la mecánica del medio continuo– lo que podría parecerle a algún lector exagerado e inusual. Esto tiene una explicación: no siempre los tratados clásicos son generosos en detalles relacionados con la mecánica en general, las mecánicas de sólidos, fluidos y viscoelasticidad o con el soporte matemático necesario, de suerte que es preciso acudir a los libros más especializados.

Se han incluido así mismo unas referencias a artículos de revistas, los cuales tienen que ver más que todo con los temas de reología y la viscoelasticidad. También unas referencias epistemológicas que deseo citar expresamente, porque su lectura me aclaró aspectos muy ligados a la motivación de esta obra y a los fundamentos de la mecánica.

Escribir un libro de mecánica del medio continuo constituye un gran reto para quien se enfrenta a esta tarea. Pienso que uno de los mayores es involucrar un montón de temáticas, que cabrían dentro de la idealización del medio continuo y que por sí mismas bastarían para desarrollar por aparte extensos tratados (¡como de hecho lo hacen!). Este aspecto concierne especialmente a la tercera parte de este texto.

Por otro lado hay en este trabajo una intención manifiesta de proporcionar las bases de la mecánica del medio continuo. Una muy buena porción de él se dedica, por tanto, a la labor de fundamentar, lo que no permitió extenderme de la manera que hubiera querido en contenidos que encajan dentro de la tercera parte de esta obra. Acorde a estas restricciones (de espacio básicamente) fue necesario dejar por fuera temas relativos al campo electromagnético, y minimizar los relativos a la termodinámica. Estos últimos se abordan limitadamente en el Capítulo 6.

⁸ Excepto la obra del profesor Jorge Alberto Naranjo.

El libro ha sido redactado en un estilo que pretende privilegiar lo didáctico y escapar de las escuetas y sucintas presentaciones de la mayoría de la literatura clásica, donde cada autor pareciera escribir únicamente para sus avezados colegas. Dentro de este espíritu, he tenido particular cuidado en las deducciones formales, donde la parte algebraica se trata con amplio detalle. Así mismo abunda en repeticiones, comentarios en el texto y especialmente en notas de pie de página. Aquí quiero reflejar mi sentir desde dos perspectivas: la del aprendiz que fui y la del docente que soy, y que por esta razón al leer algunas obras encuentro a veces contenidos débilmente sustentados.

Para concluir quisiera dejar constancia de mi agradecimiento a quienes con su ayuda contribuyeron a que este proyecto saliera adelante:

1. A la Universidad EAFIT. En particular al Decano de la Escuela de Ingeniería, profesor Alberto Rodríguez G. y al Jefe del Departamento de Ingeniería Civil EAFIT, profesor Julián Vidal V., quienes otorgaron todo el apoyo necesario, en términos de tiempo y logística. Todo dentro de un empeño y una política para dotar a la Escuela de Ingeniería de un saber y estilo propio de enseñar.

2. A Jorge Alejandro Úsuga, estudiante de último semestre de ingeniería civil, quien a lo largo de un año y medio se encargó de la elaboración en *Autocad* de buena parte de los dibujos y gráficos de este libro (los cuales habían sido hechos originalmente con *Paintbrush*), y en paralelo desarrolló la delicada misión de darle al texto una detenida y juiciosa lectura, la cual condujo a detectar diversos problemas en su estructura lingüística, así como incoherencias y puntos oscuros del ámbito conceptual y, claro, los infaltables problemas tipográficos, etc.

A Laura María Correa P., estudiante de octavo semestre de ingeniería civil, quien colaboró, desde finales de julio de 2007, en el proceso final de edición, con la lectura paralela del texto y corrección de algunos dibujos.

Al profesor del Departamento de Ingeniería Civil Juan David Gómez C. que con su ojo avizor y portentoso rigor escudriñó a fondo la teoría para detectar problemas e inconsistencias. De esta labor, que el asumió *motu proprio*, resultaron valiosas sugerencias, que redundaron en un texto más claro.

Juan H. Cadavid R.
Medellín, Antioquia
Septiembre de 2007

*En un mundo de fin de siglo,
donde la belleza y la fantasía
están prohibidas porque no son
rentables.*

Eduardo Galeano