A HISTÓRIA DA BIOMECÂNICA

J. A. Simões
Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro, 3810-193 Aveiro

RESUMO

A biomecânica é uma área específica da mecânica que visa a aplicação de princípios da física (mecânica) no estudo de estruturas vivas. O estudo de estruturas vivas sempre fascinou o Homem, e foi com os trabalhos desenvolvidos por grandes nomes da ciência, entre outros, Galileo Galilei, Leonardo da Vinci e Borelli, que se estabeleceu o início da ciência da biomecânica, sendo tarefa impossível saber quem foi o fundador da mesma. É ao século XV que se pode atribuir as primeiras investigações de carácter biomecânico. Desde então, as áreas de investigação no âmbito da mesma alargaram-se a diferentes domínios, como por exemplo ao estudo de esforços em estruturas anatómicas e ao estudo da locomoção do Homen e de animais. Actualmente, a biomecânica assume uma importância relevante na melhoria da qualidade de vida das pessoas, estando hoje muito direccionada para o estudo de soluções de determinadas patologias. Este trabalho tem como objectivo fazer uma retrospectiva da história da biomecânica, desde a antiguidade até aos dias de hoje. É dada especial ênfase às temáticas de investigação desenvolvidas e aos protagonistas que fizeram a História da Biomecânica.

INTRODUÇÃO

A biomecânica é uma área de investigação que consiste no estudo de estruturas vivas, aplicando diversos princípios da física (mecânica). Existem imensas definições de Biomecânica. Segundo Hay [1], a biomecânica pode ser definida como sendo a ciência que analisa as forças que actuam numa estrutura biológica e os efeitos produzidos por elas. Correia da Silva [2] prefere evitar qualquer definição para biomecânica, mas aponta o facto de que, no seu sentido lato, a biomecânica engloba todas as situações em que os conceitos e métodos da mecânica são utilizados no tratamento de problemas científicos e técnicos levantados pelo estudo da matéria viva e dos sistemas biológicos. A diferença da (bio)mecânica relativamente à mecânica reside no facto da primeira abordar problemas com uma "variável" adicional – a vida da estrutura, que naturalmente introduz maior complexidade na análise dos problemas.

Os problemas da biomecânica são hoje objecto de imensa investigação. Existem centros de investigação e desenvolvimento dedicados unicamente ao estudo desta especialidade, que têm contribuído para o avanço significativo das ciências da saúde. Contudo, o panorama português no que diz respeito à biomecânica é muito diferente do da maioria dos países europeus. De facto, poucos e pequenos grupos de investigação, pertencentes a centros de investigação e a Universidades, materializam a investigação

no âmbito da biomecânica.

Para além de ser uma área de investigação relativamente recente, o desenvolvimento da biomecânica em Portugal tem sido muito incipiente, reflectindo, quiçá, a nossa reduzida dimensão. Contudo, em 1974, Correia da Silva [2], no âmbito da sessão de Biomecânica do 1° Congresso Nacional de Mecânica Teórica e Aplicada, esboçou uma breve panorâmica do estado, então actual, da biomecânica. Nesse artigo, Correia da Silva faz a separação da biomecânica em dois ramos: a biomecânica dos componentes e a biomecânica dos sistemas. Na primeira divisão, engloba a caracterização de estruturas, órgãos e tecidos como componentes simples (tecido ósseo, partes do esqueleto, tecido cartilaginoso costal e articular, tecido conjuntivo, tendões, pele, tecido muscular, vasos sanguíneos, etc.). Na segunda divisão, o autor refere os variadíssimos mecanismos de interacção entre os diferentes elementos constituintes, como por exemplo os mecanismos químicos e nervosos de controlo e estabilização de uma realidade fisiológica [2]. Na referida sessão de Biomecânica, o autor apresenta um artigo sobre a investigação biomecânica no Instituto Gulbenkian de Ciência [3]. Terá sido o início da investigação em Biomecânica em Portugal?

Os congressos de Mecânica Aplicada e Computacional (antes designados por Mecânica Computacional) têm sido o lugar onde se tem discutido a temática da biomecânica (alguns exemplos do V congresso são apresentados nas referências 4, 5 e 6). O último congresso, o VI, realizado em Aveiro, contou com duas sessões de biomecânica. É muito natural que os artigos apresentados nesse congresso reflictam o estado de arte actual da biomecânica em Portugal [7 a 14].

No que se refere à biomecânica ortopédica, nomeadamente ao estudo de implantes e próteses de anca, e de acordo com o conhecimento do autor, tem sido tema de investigação de dois grupos: um do Instituto Superior Técnico de Lisboa e o outro resultante da colaboração do autor com o grupo do Laboratório de Óptica e Mecânica Experimental (LOME) do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Universidade do Porto. O primeiro grupo tem desenvolvido trabalho numérico dedicado aos estudo do intracrescimento e fixação do tecido ósseo à prótese de anca [15 a 17]. O trabalho do autor com o LOME tem focado na aplicação de técnicas experimentais convencionais e ópticas no estudo do processo de transferência de carga na interface osso-implante [18 a 20]. O autor também tem-se dedicado ao estudo e aplicabilidade de uma prótese de anca com rigidez controlada (gradativa) [21].

Neste artigo faz-se a descrição, não demasiado aprofundada, da História da Biomecânica. A Comissão Organizadora do 4° Encontro da Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões (APAET), realizado em Bragança, decidiu incluir uma sessão dedicada à biomecânica. A inclusão da temática da biomecânica num encontro deste género tem actualmente razão plenamente justificada, e permite, também, dar o devido reconhecimento e importância que a biomecânica tem assumindo nestes últimos anos em Portugal. Deste modo, sendo a primeira vez que um encontro da APAET inclui este tema, decidi abordar a História da Biomecânica, focando cronologicamente os trabalhos mais relevantes que decisivamente afirmaram o desenvolvimento da biomecânica, assim como os seus ilustres protagonistas (pensadores, filósofos, cientistas, investigadores...).

A História da Biomecânica pode ser descrita de acordo com os diferentes períodos da História da Humanidade, que segundo a referência [1], pode ser na seguinte forma:

- Antiguidade (650 a. C. – 200 d.C.);
- Idade Média (200 – 1450.);
- Renascença Italiana (1450 – 1600);
- Revolução Científica (1600 – 1730);

- Iluminismo (1730 – 1800);
- Século da Locomoção (movimento) (1800 – 1900);
- Século XX e início de século XXI.

ANTIGUIDADE (650 a.C. – 200 d.C.)

O conhecimento actual da matemática, astronomia, mecânica, física, medicina, etc., resultou em grande parte do engenho natural das civilizações antigas, entre as quais se destacam as Maias, Egípcias, Fenícias, Mesopotâmias e Grega. A História da Ciência começa na civilização Grega. De facto, foram os gregos que deixaram os primeiros relatos sobre aspectos relativos à inquisição da natureza do mundo que nos rodeia.

O período da Antiguidade pode, cronologicamente, ser descrito em quatro segmentos temporais: a filosofia natural, a idade de ouro, a idade helénica e a conquista pelo império romano. Este é o período da História em que não se fazia distinção entre o conhecimento empírico e o mito. A cultura grega foi a primeira a fazer a sua separação, introduzindo o conceito de "inquisição científica" [1]. Tales (624 – 546 a. C.), matemático e filósofo grego da escola jónica, foi quem estabeleceu a "filosofia natural" no estudo e compreensão da natureza, separando o conhecimento adquirido pela inquisição da mitologia.

Pitágoras (669 – 576 a. C.), filósofo e matemático grego, apresentou um pensamento matematicamente orientado, tendo sido um dos primeiros pensadores a estabelecer as bases da Ciência tal como ela é hoje entendida no Mundo Ocidental [1]. O mesmo elaborou o pensamento de que "...todas as coisas têm forma, todas as coisas são formas, e todas as formas podem ser definidas por números." [22].

Sócrates (470 – 399 a. C.), pensador da antiga Grécia, ensinou que não se podia perceber o mundo que nos rodeia sem primeiro perceber a nossa própria natureza [22]. Outros pensadores como Hipócrates (460 – 370 a. C.), um cidadão grego, que foi bastante crítico sobre a ciência racional, acreditava no "princípio da casualidade" e Platão (427 – 347 a. C.), que introduziu o conceito de que a realidade era revelada pelas ideias e que a natureza não era a fonte do verdadeiro conhecimento, fizeram a idade de ouro do período da Antiguidade. Platão definiu problemas e conceitos importantes da filosofia ocidental, da psicologia, da lógica e da política. Acreditava que a matemática, sistema de ideias puras, era a melhor ferramenta para adquirir o conhecimento. A sua conceptualização da matemática como força viva da ciência foi o elemento necessário ao "nascimento" e desenvolvimento da mecânica [1].

Ao contrário de Platão, Aristótles (384 – 322 a. C.), outro pensador da idade de ouro, acreditava que a realidade era captada pelos sentidos e não pelas ideias, estas consideradas "abstracções relativas a conceitos mentais" [1]. Aristótles tinha um talento nato para a observação e era fascinado pela anatomia e estrutura de seres vivos. Segundo Bruce Martin [22], Aristótles pode ser considerado o primeiro "biomecânico". O seu livro *De Motu Animalium* (Sobre o Movimento dos Animais) descreve movimentos de animais. Os conceitos foram desenvolvidos e formulados com base na observação directa, realizando um processo de experimentação limitativo. Aristótles postulou que o movimento e locomoção eram o resultado da respiração através do coração. O coração era considerado como a fonte estrutural da inteligência humana [1].

Aristótles demarcou-se do pensamento de Platão que, em detrimento da matemática, enfatizou a ciência do senso comum. Contudo, o seu discurso de lógica silogística e conclusões feitas com base em postulados formulados, introduziu no mundo moderno da ciência o método dedutivo.

O período helenístico surgiu como consequência dos triunfos de Alexandre o

Grande, que tinha sido aluno e foi seguidor de Aristótles. Neste período, é criado o museu de Alexandria, que se tornou um centro para a investigação científica especializada, nomeadamente para o desenvolvimento da anatomia e fisiologia. Foi durante este período que o médico Herófilo (Calcedónia, na Bitínia, c. 335 a. C., Alexandria?) afastando-se de todo o dogmatismo, instaurou a anatomia moderna, com base na observação e na experiência, nomeadamente na dissecação e identificação de órgãos. Estabeleceu a anatomia do olho e do fígado. O mesmo, sugerindo o cérebro como o centro da inteligência humana, contrariou a tese de Aristótles [1].

Com a queda da Grécia e o surgimento do Império Romano, a filosofia natural sobrepôs-se à tecnologia. Galeno (131 – 201 a.C.) foi um brilhante anatomista da época, tendo publicado mais de 500 tratados de medicina. O livro *De Uso Partium* (No uso das partes) é o primeiro texto descritivo sobre a estrutura e função de órgãos no diagnóstico e terapia do corpo humano [1]. Outra publicação, não menos relevante, foi o livro *De Motu Musculorum* (No movimento dos músculos). O trabalho publicado neste livro estabeleceu as fundações da ciência da miologia (músculo), identificando a actividade dos músculos como resultado de sinais cerebrais. Os estudos de Galeno foram realizados em cães, porcos e macacos, pois na altura foi desencorajado a dissecação de cadáveres humanos. Este facto levou a que tivesse cometido alguns erros, mais tarde corrigidos por outros investigadores, entre outros, por Leonardo da Vinci e André Vesálio.

Os pensadores da antiguidade foram efectivamente os pioneiros em estudos de carácter biomecânico. Tales foi o primeiro a separar a religião da ciência. Pitágoras, Aristótles e Arquimedes (287 – 212 a.C.) foram os primeiros a conceber uma teoria coerente sobre o movimento com base em princípios mecânicos e na matemática. Outros, como Hipócrates (460 – 377 a. C.), Erasístrato (Julis, ilha de Quios, 257 a. C.) e Galeno, foram os fundadores de conceitos anatómicos e neuro-fisiológicos do corpo humano. Aristótles foi o primeiro a analisar de modo científico o movimento e acção dos músculos do homem [1].

IDADE MÉDIA (200 – 1450)

A idade média foi o período de menores progressos da ciência. Este facto deveu-se à forte predominância da Igreja sobre o Estado, contribuindo para o declínio acentuado da ciência. O facto mais marcante da época foi o ressurgimento, e consequente aplicação, dos conceitos de Aristótles. Os textos do mesmo foram na altura traduzidos para árabe. Este é o período da História em que o estudo do movimento do corpo humano mudou de uma perspectiva científica para uma perspectiva artística.

RENASCENÇA ITALIANA (1450-1600)

O período da Renascença Italiana é identificado como o período da liberdade de pensamento e expressão, pois a influência da Igreja tinha então diminuído significativamente. A filosofia da antiga Grécia, a literatura e a arte emergiram novamente, assim como as filosofias aristotélica e platónica. Um dos factos mais marcantes da Renascença terá sido a preservação dos elementos científicos necessários ao período seguinte: a revolução científica do século XVII [1].

É neste período que surgem grandes nomes da História relacionados com a mecânica, entre outros, Leonardo da Vinci (1452 – 1519) (figura 1), André Vesálio (1514 – 1564) e Nicolau Copérnico (1473 – 1543).

Leonardo da Vinci foi um homem de imenso talento, nomeadamente na pintura, um excepcional engenheiro militar e civil, e por que não um biomecânico? A sua contribuição para a biomecânica resultou da aplicação de princípios mecânicos (físicos) no estudo da anatomia humana, designadamente através de ilustrações de

juntas/articulações, músculos, ossos, ligamentos, tendões e cartilagem. A figura 2

Fig 1 – Leonardo da Vinci (1452 – 1519).

ilustra um dos muitos desenhos feitos por Leonardo da Vinci [23]. Os estudos realizados por da Vinci permite-nos observar desenhos de estruturas da articulação do ombro e da anca e os pontos de inserção e posição relativa de músculos. A acção mecânica como resultado de forças actuantes ao longo dos filamentos dos músculos foi também demonstrada. Leonardo da Vinci contribuiu significativamente para a definição de órgãos do corpo humano, tendo, como referido, detectado diversos erros cometidos no trabalho de Galeno.

André Vesálio era físico e foi considerado como o maior anatomista do período da Renascença [1]. O seu frutuoso trabalho foi auxiliado pelo facto de ter tido a possibilidade de dissecar cadáveres humanos, alguns de criminosos executados. Parte do seu trabalho está publicado no *livro De Humani Corporis Fabrica Libri Septem* (Na estrutura do corpo humano). Tal como da Vinci, também Vesálio corrigiu alguns erros cometidos por Galeno. Contudo, levou alguns séculos até que o mundo aceitasse o facto de Galeno ter cometido tais erros.

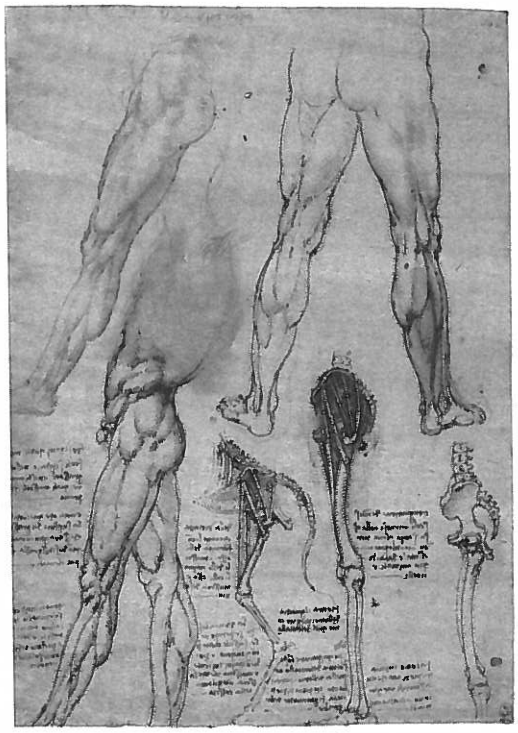

Fig 2 – Exemplo de um dos imensos desenhos de anatomia realizado por Leonardo da Vinci [23].

Na altura em que Vesálio revolucionava o estudo da anatomia humana, por ter identificado os erros cometidos por Galeno, Copérnico publicitava o seu conceito sobre o universo heliocêntrico, publicado no livro *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Na revolução das esferas celestes) [1, 22]. O trabalho de Copérnico teve também a sua importância para o desenvolvimento da biomecânica, pois, para além de revolucionar a ciência da astronomia, revolucionou a ciência em geral ao re-introduzir o pensamento matemático em detrimento da física de senso comum de Aristótles.

REVOLUÇÃO CIENTÍFICA (1600-1730)

O período da Revolução Científica deve-se a nomes como Galileu Galilei (1564 – 1642), Johannes Kepler (1571 – 1630), Rene Descartes (1596 – 1650), Giovanni Borelli (1608 – 1679) e Isaac Newton (1642 – 1727). Também se deve

ao facto de ter sido uma época de grande liberdade intelectual. É neste período que se estabelecem sociedades científicas, que muito impulsionaram a ciência e os métodos científicos, tendo por base a evidência empírica através da experimentação, após o domínio da visão Aristotélica do mundo.

Galileu Galilei (figura 3) tem sido apelidado de "pai da mecânica", e para Ascenzi [24] "pai da biomecânica". De facto, Galileu fez contribuições importantes para o desenvolvimento da biomecânica. Ser ou não "pai da biomecânica" é, e será, assunto de alguma controvérsia. Os trabalhos de Galileu passaram numa fase inicial pelo estudo de corpos inanimados, para mais tarde estudar os movimentos de animais. Os temas do seu livro não publicado (*De Animaliam Motibus* – O movimento dos animais) abordam temas como o salto humano, a locomoção de cavalos e de insectos e apresenta as condições para manter o corpo humano suspenso num líquido [1]. Outra contribuição de Galileu teve a haver com o estudo da estrutura do osso, onde se interessou pelos seus aspectos mecânicos [22]. A título de exemplo, Galileu observou que a massa dos animais aumentava de forma não proporcional ao seu tamanho, e que o ossos também aumentavam de forma não proporcional, adaptando-se aos esforços a suportar 22].

A genealidade de Galileu, quer como teórico matemático, quer como experimentalista observador, permitiu a mais fundamental contribuição para a ciência: o método científico, que consiste na análise de factos de forma crítica, a reprodução do(s) fenómeno(s) experimentalmente, a determinação da(s) causa(s)-efeito(s) e nas conclusões sobre o que foi observado [22].

Santorio (1561 – 1636), colega de Galileu, foi o cientista que criou as bases do estudo do metabolismo através da aplicação de métodos mecânicos quantificáveis. Os trabalhos desenvolvidos consistiram na tentativa de medição da quantidade de "respiração insensível" perdida através dos pulmões e da pele e foi publicado no livro *De Medicina Statica* [1].

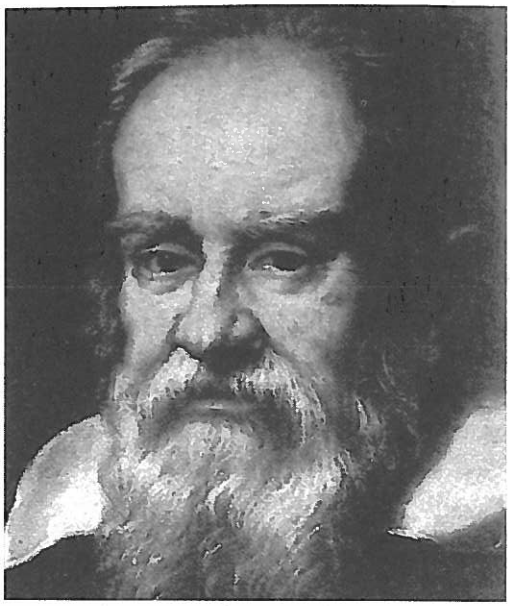

Fig 3 – Galileu Galilei (1564 – 1642).

William Harvey (1578 – 1657), considerado como o primeiro "biomecânico do coração", foi influenciado pela teoria de Aristótles relativamente ao coração como a sendo a estrutura principal da inteligência humana. Também Harvey aplicou conhecimentos de mecânica para descobrir a natureza mecânica do sistema vascular. O livro publicado por Harvey, *De Motu Cordis*, descreve a circulação de sangue em animais através dos sistemas arterial e venenoso. Foi um dos primeiros a aplicar o método científico nas suas actividades como físico, anatomista e fisiologista [1].

René Descartes foi também um dos fundadores da "filosofia mecânica" [1]. As metodologias de investigação de Harvey, Santorio e Borelli, emergiram das bases matemáticas da mecânica concebidas por Descartes, que serviram de suporte à mecânica no século XVIII [1]. Descartes publicou, em 1624, o tratado dedicado á fisiologia (*L'homme*), que aborda a teoria de que o movimento é coordenado pelo sistema nervoso.

Borelli foi aluno de Galileu e, ao contrário de Ascenzi [24], muitos

investigadores consideram-no o "pai da biomecânica". Este título é principalmente devido ao trabalho de Borelli publicado no livro *De Motu Animalium* (figura 4). Neste, Borelli descreve matematicamente movimentos (nado, salto, corrida e voo) e apresenta estudos sobre os músculos e movimentos do corpo humano. As descrições de Borelli sobre a natureza fisiológica dos músculos baseiam-se nas diversas causas e origens dos movimentos do corpo e na natureza da contracção e função dos músculos, assim como a sua relação com a direcção das fibras musculares e força resultante produzida. Borelli também descreveu sobre a fadiga dos músculos e especulou sobre o conceito de dor. Todo o seu trabalho incorporou uma perspectiva filosófica-mecânica, contribuindo decisivamente para o desenvolvimento futuro da biomecânica [1].

Marcello Malpighi foi um dos pioneiros na utilização do microscópio, sendo apelidado do "pai da embriologia". Malpighi, Borelli e Descartes foram figuras chave no tipo de abordagem à medicina, realçando a importância que a mecânica, em vez da química, assumia no conhecimento do funcionamento do corpo humano [22].

A contribuição do trabalho de Newton (1642 – 1727) para a ciência é sobejamente conhecida. Com naturalidade, a biomecânica sofreu fortes avanços com as leis do movimento publicadas no seu trabalho – *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1686). Relativamente aos estudos de biomecânica, Newton determinou a posição do centro de gravidade do corpo humano, mediu volumes de ar inspirado e expirado. Também demonstrou que a inspiração depende da actividade muscular e que a expiração depende da elasticidade dos tecidos [16].

Outros acontecimentos, não menos importantes, tiveram influência decisiva no desenvolvimento da biomecânica durante este período [1]:

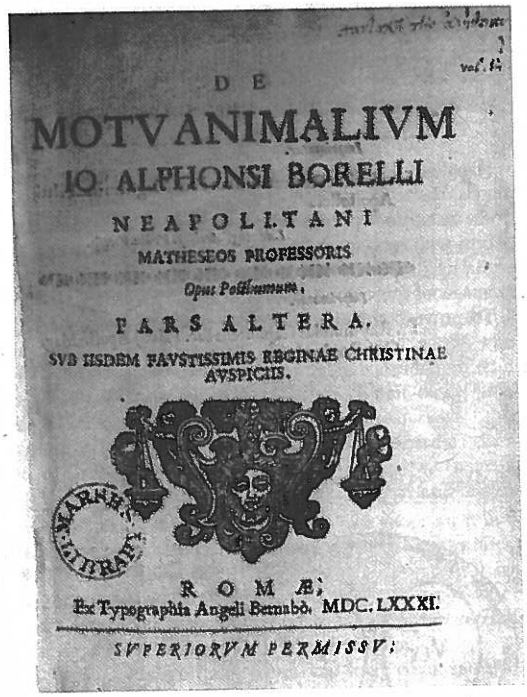
DE
MOTV ANIMALIVM
IO. ALPHONSI BORELLI
NEAPOLITANI
MATHESEOS PROFESSORIS
Opus Posthumum.
PARS ALTERA.
SVB ISDEM FAVSTISSIMIS REGINAE CHRISTINAE AVSPICIIS.
ROMÆ,
Ex Typographia Angeli Bernabò. MDC. LXXXI.
SVPERIORVM PERMISSV.

Fig 4 – Capa do livro *De Motu Animalium* de Alfonso Borelli [25].

- Swammerdam (1637 – 1680) descobriu em 1663 que os músculos mantém o volume uniforme quando contraídos;
- William Coone (1633 – 1684) estudou o processo de contracção muscular, que envolve um sinal desde do cérebro ao músculo;
- Niels Stentson (1638 – 1686) descobriu diversas estruturas musculares;
- Francis Glisson (1597 – 1677) concebeu a teoria de "irratibilidade", que discute a aptidão dos músculos para reagir a influências externas;
- Clopton Havers (1655 – 1702) descobriu a composição do osso, composto por filamentos orgânicos e inorgânicos e por placas envolvendo cavidades tubulares. Esta descoberta só foi possível devido à utilização do microscópio.

Tal como o telescópio revolucionou a ciência da mecânica, também o microscópio revolucionou a ciência da fisiologia.

ILUMINISMO (1730 – 1800)

No século XVII estabelece-se a designada "filosofia mecânica". Foi graças a Newton que a filosofia natural foi pelos cientistas que abordaram a temática do movimento. A matemática era vista como uma ferramenta poderosa para a descrição de fenómenos da natureza. Contudo, a religião ainda tinha forte influência nalguns estudiosos que tomaram diferentes posições sobre diversos conceitos científicos então apresentados.

É no século XVIII que a matemática se afirma como elemento fundamental do método científico. A descoberta e aplicação da electricidade no estudo dos músculos foi um factor de investigação muito importante [1]. É neste período que surgem "grandes" matemáticos. Leonhard Euler (1707 – 1783), que foi aluno de Johann Bernoulli, está conotado como um dos matemáticos e cientistas mais brilhantes da História. Euler desenvolveu muito trabalho teórico, nomeadamente na descrição do movimento oscilatório, na análise do problema da encurvadura de vigas e colunas, na definição do conceito de conservação de energia e aplicou as leis de Newton a corpos rígidos e a fluídos [1].

Jean le Rond d'Alember (1717 – 1783) é o autor do tratado *Traité de Dynamique*, que contém princípios que foram fundamentais para o desenvolvimento da biomecânica cinética. Joseph Louis Lagrange (1736 – 1815) foi um ávido discípulo da matemática, tendo publicado o tratamento diferencial de problemas mecânicos no livro *Méchanique Analytique* [1].

Neste período é de salientar a teoria da "forma segue a função" (*form follows function*) de Marie Xavier Bichat (1771 – 1802), que proliferou nas mentes dos fisiologistas. Albrecht von Haller (1708 – 1777), verdadeiro seguidor da teoria do vitalismo, foi um fisiologista interessado na estrutura e forma dos músculos. Von Haller, nos estudos levados a cabo, concluiu que os músculos podem contrair por aplicação de estímulos mecânicos, eléctricos, térmicos e químicos. O facto dos músculos contraírem através de estímulos eléctricos interessou os fisiologistas, pois ficaram convencidos de que os nervos transportavam electricidade em forma de fluído, ressurgindo, embora não aceite, o conceito *spiritus animalius* de Galeno [1].

Os acontecimentos mais marcantes do período do Iluminismo permitiram o rápido crescimento da ciência da fisiologia muscular. Estes foram [1]:

- Baglivi (1688 – 1706) diferenciou o tipo de estrutura e função entre músculos moles (revestimento de órgãos) e estriados (esqueleto e coração);
- James Keill (1674 – 1719) mediu o número de fibras de diversos músculos e determinou a força necessária por fibra para realizar trabalho sob uma massa constante;
- Daniel Bernoulli (1700 – 1728) reviu a explicação mecânica sobre o modo de contracção dos músculos;
- Charles Dufay (1698 – 1739) teorizou sobre o facto dos seres vivos conterem propriedades eléctricas;
- Nicholas André (1658 – 1742) introduziu o termo "ortopedia" e o pensamento de que as deformações esqueléticas resultavam de desequilibros musculares;
- Em 1750, Jallabert publicou o primeiro texto sobre a electroterapia, após ter revitalizado músculos paralisados com electricidade;
- Robert Whytt (1714 – 1766) demonstrou, pela primeira vez, a localização de zonas de reflexão simples e acções de reflexão da corda espinal;
- John Hunter (1728 – 1793) definiu o conceito de que os músculos são estruturas adaptadas à auto locomoção e são a única parte do corpo para tal.

Este período foi designado por Iluminismo porque lançou as verdadeiras

Este período foi designado por Iluminismo porque lançou as verdadeiras bases mecânicas da biomecânica. Por esse facto, o conhecimento mais pormenorizado sobre a dinâmica dos movimentos humanos aumentou e iniciou-se a investigação sobre a natureza de biomateriais [1]. Tal foi possível graças à dedicação de investigadores pela experimentação, exploração de conceitos como força, conservação de momento e energia, e pela formulação matemática no estudo de problemas da mecânica, bioquímica e electricidade na estrutura e função dos músculos. De facto, o "século da locomoção" não poderia ter existido se não tivessem surgido mentes iluminadas [1].

SÉCULO DA LOCOMOÇÃO (1800-1900)

Depois de Borelli, não existem muitos sinais na literatura de actividade relacionada com a biomecânica até à última metade do século XIX, que Benno Niggs chamou de "século da locomoção" (*the gait centuary*) [22].

A novela Emile de Jean Jacques Rousseau (1712 – 1778), o invento da máquina a vapor por James Watt (1736 – 1819) e a invasão da bastilha foram os eventos do século XVIII que moldaram os acontecimentos da ciência no século XIX [1]. Neste século, a fotografia desempenhou um papel importante no estudo da locomoção, passando de uma ciência intuitiva para uma ciência mensurável e quantificável. A ideia de investigar a locomoção através da cinematografia, figura 5, foi sugerida pelo astrónomo francês Janssen [22], mas só foi cientificamente utilizada por Etienne Marey, pioneiro na análise do movimento moderno, que pela primeira vez correlacionou forças reactivas do chão com o movimento.

A investigação moderna da locomoção humana deve-se em parte ao trabalho realizado pelos irmãos Eduard (1795 – 1881) e Wilhelm Weber (1804 – 1891), publicado no tratado *Die Mechanik der Menschlichen Gewerkzeuge* (Mecânica das ferramentas de locomoção humana). Este

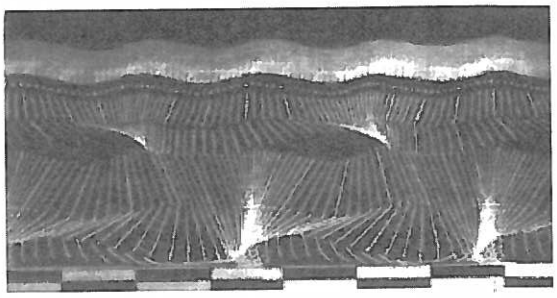

Fig 5 – Cinematografia na análise da locomoção humana [22].

trabalho foi baseado em observações e nos sentidos e intuição dos cientistas [1].

Etienne Jules Marey (1838 – 1904) foi provavelmente o primeiro a estudar o problema da locomoção numa base quantificativa e não unicamente observacional. Foi autor de diversas invenções dedicadas especificamente para quantificar analiticamente o movimento de uma vasta gama de espécies. Do equipamento projectado, há a salientar uma mesa dinamométrica, que foi o primeiro prato de forças produzido, hoje muito utilizado na determinação de forças reactivas do movimento. Marey foi a primeira pessoa a sincronizar medições cinemáticas com forças [1].

Edweard Muybridge (1830 – 1904) produziu imensas imagens que documentaram os movimentos de seres humanos e de animais. O seu trabalho foi inicialmente publicado no livro *Horses in Motion*. Mais tarde, Muybridge publicou *Animal Locomotion*, *Animals in Locomotion* e *The Human Figure in Motion* [1]. Estes documentos, embora apresentando algumas incorrecções, mostram o valor da fotografia no estudo da locomoção.

Foi em 1891, através de Wilhelm Braune e Otto Fischer, que se realizou o primeiro estudo matemático tridimensional do movimento humano [1].

No século XIX assistiu-se ao rápido desenvolvimento e crescimento da biologia, principalmente devido ao interesse gerado pelas teorias da evolução das espécies de Charles Darwin (1809 – 1882). Neste

período há o surgimento de áreas de estudo integradas como a bioengenharia. Du Bois Reymond (1818 – 1922) e Guillaume Duchenne (1806 – 1875) foram os pioneiros na electromiografia. Reymond melhorou o processo de medição da corrente eléctrica. Duchenne investigou músculos superficiais através da aplicação de eléctrodos, que eram utilizados para medir a actividade dos mesmos. O seu trabalho foi publicado no livro *Physiologie des Mouvements*, que foi considerado como um dos melhores livros de todos os tempos [1].

O desenvolvimento da engenharia mecânica, nomeadamente em França e Alemanha, permitiu o conhecimento mais aprofundado da fisiologia do osso durante o século XIX. Este facto levou a que se criasse a ciência da osteopatia, que se tornou uma disciplina de especialidade nas escolas de medicina [1, 22].

Durante o século da locomoção, os seguintes eventos foram os mais relevantes no desenvolvimento da biomecânica [1]:

- Breithaupt (1791 – 1873) fez estudos sobre a estrutura e função dos ossos (1855);
- Volkmann (1862) concebeu a relação matemática do inverso entre o aumento de pressão e o crescimento do tecido ósseo;
- G. H. Meyer (1867) definiu a relação entre a arquitectura trabecular e a sua função;
- C. Culmann (1821 – 1881) aplicou princípios da engenharia mecânica à fisiologia do osso;
- Julius Wolff formulou a lei conhecida pelo seu nome – lei de Wolff (1870) que, de forma simples, reúne os conceitos sobre a fisiologia do osso.

De forma simplista, a lei de Wolff [26] diz que o osso reconstitui-se de forma a uniformizar os níveis de tensão na estrutura óssea. De facto, na relação tensão-estrutura biológica, a lei de Wolff é certamente a mais famosa, embora o seu significado e fundamentação possa ser discutível. Em 1981, Roesler apresentou em pormenor a história da lei de Wolff. É uma história interessante e instrutiva, que se recomenda aos interessados nestas matérias. Uma rápida descrição das conclusões de Roesler sobre a lei de Wolff é seguidamente apresentada [27].

Foi no ano de 1866, quando G. H. Meyer, no encontro *Zuricher Naturforschende Gesellschaft*, apresentou um artigo sobre a estrutura do osso esponjoso do fémur. Meyer demonstrou que o osso esponjoso é uma estrutura de trabéculas com arquitectura bem definida e orientada, e que dependia da função "biomecânica" do fémur. Nesse encontro estava presente um matemático, de nome C. Culmann, que tinha, nesse mesmo ano, publicado um livro sobre estática gráfica. Nesse encontro, Culmann chamou a atenção para os desenhos das trajectórias apresentados por Meyer: as trajectórias eram idênticas às mesmas das direcções principais de tensão de estruturas típicas em consola. No ano seguinte, Meyer apresentou as trajectórias das direcções principais de tensão de uma estrutura semelhante ao de um fémur com idêntico carregamento, feitas então por um estudante de Culmann. A estrutura em causa era uma viga curva, semelhante a uma grua, que mais tarde viria a ser conhecida pela "grua de Culmann" (*Culmann's crane*) (figura 6).

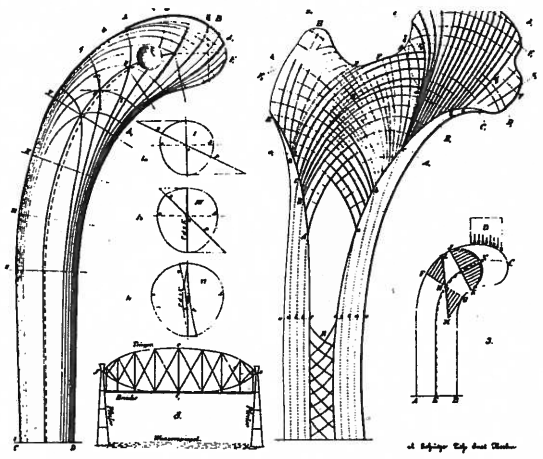

Fig 6 - A "grua de Culmann" apresentada por Wolff em 1870 (*Virchow's Archiv.*) [27].

Wolff publicou depois uma sequência de artigos em 1870, 1872, 1874, 1884, 1891, e um livro em 1892. A figura 7 foi apresentada por Wolff no artigo de 1870, podendo-se ver a arquitectura do osso esponjoso para diferentes geometrias de fémures.

No artigo publicado em 1884, Wolff definiu a "lei de transformação do osso" (*law of bone transformation*). As provas de Wolff, para além de se basearem na similaridade aproximada entre o padrão das trabéculas do osso esponjoso do fémur e da "grua de Culmann", mostram que as direcções principais de tensão em qualquer ponto são ortogonais, ou seja, onde as trabéculas se intersectam, as tangentes a essas nesse ponto fazem entre si ângulos rectos.

Esta foi a era do desenvolvimento acelerado do estudo da locomoção e movimento do Homem, forçando, necessariamente, a introdução de métodos matemáticos quantificativos e a integração de princípios de engenharia no estudo de sistemas biológicos e biomecânicos. Os estudos sobre a locomoção e actividade muscular foram melhorados com a utilização da corrente eléctrica. O estudo da composição e função do tecido ósseo, nomeadamente como este cresce e como pode ser descrito através de princípios da mecânica, foi objecto de muita investigação neste período da história da biomecânica.

SÉCULO XX E INÍCIO DE SÉCULO XXI

Descrever a história da biomecânica no século XX é tarefa difícil. O número de proeminentes biomecânicos deste século, nomeadamente na última metade, é demasiado grande para descrever neste artigo. Contudo, refere-se alguns dos eventos mais relevantes e descreve-se a importância que o método dos elementos finitos assumiu na investigação actual da biomecânica.

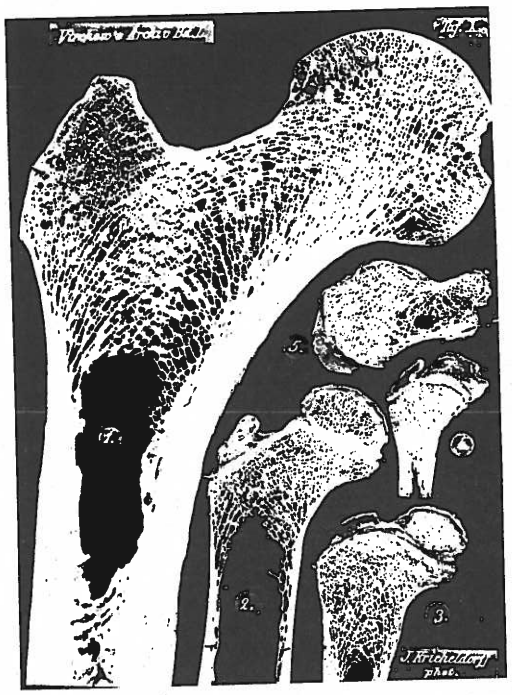

Fig 7 - Fotografia de estruturas de osso esponjoso para diferentes geometrias de fémures [27].

A biomecânica cresceu muito durante o século XX. Para tal, contribuíram as duas guerras mundiais e todo o desenvolvimento forçado de processos e de equipamento de engenharia, o interesse social e financeiro pelas competições desportivas e o investimento, nalguns casos massivo, na investigação. Entretanto, muitos centros de investigação multi-disciplinar foram sendo criados, permitindo empregar cientistas com experiência em diversas áreas do conhecimento, todos com o objectivo comum de perceber com rigor a locomoção do ser humano. Hoje em dia, os interesses são mais variados, mas tudo começou no interesse pelos movimentos produzidos pelo Homem.

A industrialização da 1ª Grande Guerra deu a oportunidade a Jules Amar para analisar as componentes física e psicológica de trabalhadores na determinação da eficiência dos movimentos humanos. O seu trabalho foi publicado em 1920 em *Human Motor* [1].

Nicholas Bernstein (1896 – 1966) conduziu uma análise mais compreensiva sobre a locomoção humana. O seu profundo conhecimento em bio-dinâmica

incluía a adequada manipulação de ferramentas de trabalho, estudo de movimentos de mulheres trabalhadoras e teorias sobre coordenação e controlo motor em adultos e crianças [1].

Archibald Vivian Hill (1886 – 1977), fisiologista inglês e prémio Nobel da Medicina e Fisiologia em 1922, desenvolveu trabalho teórico sobre a função e estrutura mecânica dos músculos humanos. O seu trabalho também se centralizou na contracção muscular e como a fisiologia dos músculos era relacionada com o funcionamento dos mesmos [1].

Elftman, em 1939, propôs a ideia de que os músculos regulam trocas de energia através da transmissão, absorção, libertação e dissipação de energia durante actividades físicas. O mesmo foi capaz de quantificar forças internas em músculos e articulações. A. F. Huxley (1924 -) foi o responsável por notáveis explicações sobre a contracção dos músculos. Em 1953 revelou a sua teoria sobre o deslizamento dos filamentos musculares para explicar a contracção muscular. A aplicação da física à fisiologia dos músculos foi também importante para o desenvolvimento da difracção do raio-X e da microscopia electrónica [1].

O desenvolvimento de métodos matemáticos, nomeadamente os de análise pelos elementos finitos, permitiu, nas últimas décadas do século XX e início do século XXI, o estudo de variados tipos de problemas da biomecânica, e é hoje uma ferramenta de simulação de enormes potencialidades. Paralelamente, a aplicação da micro tomografia axial computadorizada permitiu a geração de estruturas ósseas com grande resolução, melhorando as simulações numéricas. De facto, o método dos elementos finitos assumiu, e assume, uma importância relevante no estudo de problemas da biomecânica. O trabalho publicado por Van Rietbergen *et al.* [28] é um excelente exemplo de uma aplicação biomecânica do método dos elementos finitos. Nesse artigo, os autores determinaram e compararam os níveis fisiológicos de deformação em tecido ósseo de fémures humanos saudáveis e osteoporóticos, usando o que designaram de técnica de micro elementos finitos (μFE). A figura 8 ilustra os modelos virtuais de elementos finitos de um fémur saudável e de um fémur osteoporótico. Os modelos eram compostos por 97 milhões e 71 milhões de elementos 3D, do tipo tijolo, respectivamente. Para processar os elementos finitos, foram utilizados 30 processadores e 17 GB de memória de um computador SG/Cray Origin2000.O tempo total de CPU rondou cerca de 30 000 horas, sendo o tempo de "relógio de parede" da ordem de 6 semanas por cada simulação. Estamos, certamente, perante o método dos elementos finitos do século XXI!

Actualmente, alguma investigação está relacionada com a Engenharia dos Tecidos, nomeadamente na substituição biológica de articulações, ou outros órgãos do corpo humano [29]. A descoberta de bio-moléculas e do processo de formação e crescimento de células, tecidos e órgãos, abriu o caminho para o desenvolvimento de processos de cura que estão para além do conhecimento da medicina dependente de conceitos e princípios da mecânica. No campo da ortopedia, grande parte do esforço de investigação está a ser centralizada no desenvolvimento de implantes biológicos. Pretende-se com estes a regeneração ou substituição de estruturas biológicas defeituosas.

A biomecânica rapidamente integrou-se na sociedade e organizou-se à escala global no século XX. Surgiram cursos dedicados à biomecânica e começaram as conferências/congressos. O primeiro seminário internacional de biomecânica foi organizado por J. Wartenweiler e patrocinado pela *International Council of Sport and Physical Education* da UNESCO, e teve lugar em Zürich, Suiça, entre 21 a 23 de Agosto de 1967 [1]. Este seminário, bi-annual, mudou, em 1975, de nome para Congresso Internacional de Biomecânica. Na altura, os temas discutidos foram: locomoção, mecânica muscúlo-esquelética, ergonomia,

biomecânica desportiva e biomecânica clínica [1]. Em 1973, estabelece-se a Sociedade Internacional de Biomecânica (*International Society of Biomechanics* – ISB), presidida por J. Wartenweiler [1]. Outro fórum de reunião de biomecânicos foi o primeiro congresso mundial de biomecânica, em 1989, presidido por Y. C. Fung e realizado em S. Diego, nos Estados Unidos da América. Os seguintes eventos (segundo e terceiro) realizaram-se em Amsterdão, Holanda (1994) e em Hokkaido, Japão (1998) respectivamente. O quarto congresso realizar-se-à em Calgary, Canada, em Agosto de 2002.

A Sociedade Europeia de Biomecânica (*European Society of Biomechanics - ESB*) foi fundada em 1976 num encontro organizado em Bruxelas, que reuniu 20 cientistas de 11 países, e partiu da iniciativa do Professor Franz Burny. A biomecânica foi definida pela sociedade como sendo "o estudo das forças que actuam e são geradas num corpo e nos efeitos destas nos tecidos, fluídos ou materiais colocados dentro do corpo". O objectivo preconizado pela ESB consiste em "encorajar, criar, promover e desenvolver investigação, progresso e informação no que diz respeito à ciência da Biomecânica" [30].

O tema da biomecânica na Europa foi abordado por diversos investigadores, devendo-se realçar os artigos de Fung [31], Huiskes [32] e Prendergast [25]. As actas do 12° congresso da Sociedade Europeia de Biomecânica traduzem, de algum modo, a investigação realizada actualmente na Europa. A participação portuguesa resumiu-se a somente dois trabalhos [15 e 33].

Finalmente, o interesse pela biomecânica é ancestral. O nosso interesse pela biomecânica deriva da mesma fonte da de Aristótles – curiosidade á cerca de nós mesmos. A única diferença é que as nossas actividades científicas são especializadas na biomecânica, enquanto os interesses de Aristótles centravam-se numa pequena parte do estudo da ciência em geral [16].

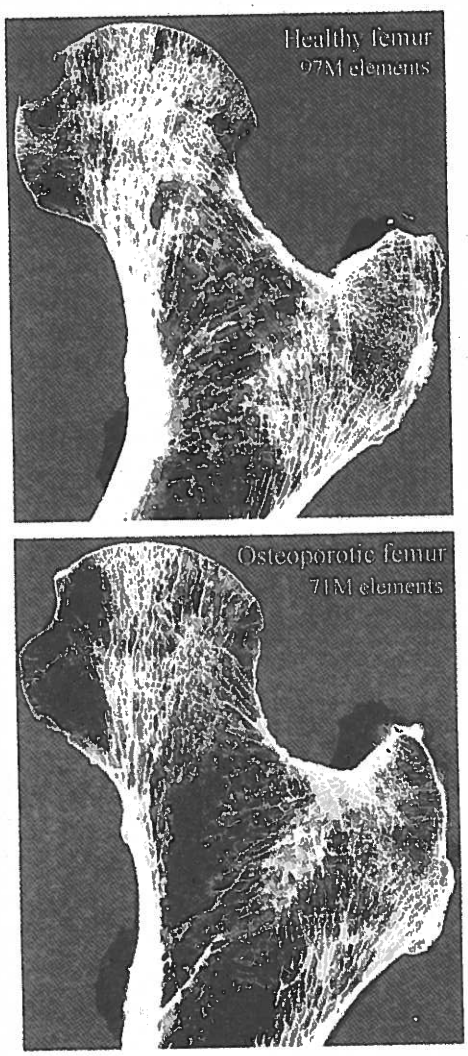

Fig 8 – Modelos de elementos finitos de dois fémures [28].

As disciplinas científicas tiveram uma maior expressão no século de Borelli, quando os cientistas se organizaram, cultivando e promovendo a ciência, nomeadamente o método científico. Borelli foi um dos elementos chave na *Accademia del Cimento*, a primeira instituição devotada somente à experimentação científica. Este facto terá institucionalizado e profissionalizado a ciência, estimulando simultaneamente a criação de disciplinas fronteira [22].

Muitas das aplicações desenvolvidas no campo da medicina, na indústria em geral e no design de equipamento desportivo, beneficiaram do conhecimento generalizado e adquirido no âmbito da investigação biomecânica levada a cabo, melhorando

aspectos relacionados com a segurança, com a saúde, com o desempenho mecânico de próteses e implantes e no estudo de factores ergonómicos na concepção de equipamento. O melhoramento das nossas vidas, no que diz respeito a aspectos de segurança e saúde, deve-se à biomecânica e a todos aqueles que, de uma forma ou outra, contribuíram para o desenvolvimento da mesma.

AGRADECIMENTOS

O trabalho apresentado neste artigo foi elaborado no âmbito do projecto POCTI/36345/EME/2000, financiado pela Fundação Ciência e Tecnologia.

REFERÊNCIAS CITADAS

[1]. http://dante.med.utoronto.ca/skeletalmuscle /history.htm (Muscle History).

[2] - Da Silva, K. M. C., 1974, "Biomechanics Research at the Gulbenkian Institute of Science", 1º Congresso Nacional de Mecânica Teórica e Aplicada.

[3] - Da Silva, K. M. C., 1974, "Sessão de Biomecânica: Abertura de Sessão", 1º Congresso Nacional de Mecânica Teórica e Aplicada.

[4] - Miranda, P. S. e Rodrigues, H., 1997, "Desenvolvimento de um modelo computacional tridimensional do fémur com prótese da articulação da anca para análise estrutural linear elástica", V Encontro Nacional de Mecânica Computacional, pp. 469-478, Universidade do Minho, Guimarães.

[5] - Pires, E. B., Salvado, R. e Dinis, P. B., 1997, "Um modelo de elementos finitos para o comportamento dos músculos esqueletais", V Encontro Nacional de Mecânica Computacional, pp. 39-50, Universidade do Minho, Guimarães.

[6] - Carvalho, J. A., Pires, E. B. e Martins, J. A. C., 1997, "Análise de tensões e deformações em tecidos moles passivos do corpo humano", V Encontro Nacional de Mecânica Computacional, pp. 503-514, Universidade do Minho, Guimarães.

[7] - Ambrósio, J., Abrantes, J. e Lopes, G., 2000, "Spatial Reconstruction of the Human Motion Using a Single Camera and the Kinematic Constraint Equations of the Biomechanical Model", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 273-283, Aveiro.

[8] - Simões, J. A. e Vaz, M. A., 2000,"Análise Experimental de Tensões no Domínio da Biomecânica", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 233-242, Aveiro.

[9] - Rebelo, F., Ferreira, C. e Correia da Silva, K., 2000,"Síntese de Padrões Motores do Membro Superior Optimizados para Aplicações em Design Ergonómico", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 181-190, Aveiro.

[10] - Soares, E., Costa, C., Palma, D. e Rosa, Agostinho, 2000," Cell Cluster Dynamics Simulator", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 191-200, Aveiro.

[11] - Rodrigues, H. e Guedes, J. M., 2000," Modelos de Optimização da Microestrutura de Materiais Porosos Aplicados ao Estudo da Adaptação Óssea", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 145-153, Aveiro.

[12] - Fernandes, P. R., Folgado, J. e Miranda, P. S., 2000," Modelos Computacionais para o Projecto de Próteses Ortopédicas", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 135-144, Aveiro.

[13] - Trabucho, L., 2000," Análise de Algumas Questões em Optimização de Topologia e em Elasticidade Adaptativa", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 211-220, Aveiro.

[14] - Silva, M. e Ambrósio, J., 2000," Consequências da Filtragem e Consistência Cinemática dos Pontos Anatómicos na Dinâmica Inversa do Movimento Humano", IV Congresso Nacional de Mecânica Aplicada e Computacional, 17 a 18 de Abril, Paulo V. Real e José Grácio (Eds.), pp. 167-179, Aveiro.

[15] - Fernandes, P. R., Folgado, J., Jacobs, C. and Pellegrini, V., 2000, "A contact model with ingrowth control for bone remodelling around cementless stems", 12th Conference of the European Society of Biomechnics, P. J. Prendergast, T. C. Lee and A. J. Carr (Eds.), Dublin, pp. 150.

[16] – Fernandes, P. R. e Folgado, J., 2001, Modelos Computacionais e Experimentais para a Análise e Projecto de Próteses da Anca", 4º Encontro de Análise Experimental de Tensões e Mecânica Experimental, 17 a 19 de Outubro, pp. 119-211, Bragança.

[17] – Fernandes, P. R., Folgado, J., Jacobs, C. and Pellegrini, V., 2001, "Bone ingrowth on cementless femoral stems – A comparison study for two stem geometries", J. *Biomechanics*, Vol. 34, Suppl. 1, *Proc. of the BioMechanica IV*, K. Ito, M. Morlok, E. Schneider e M. Wimmer (Guest Editors), Davos, Suiça, 23 a 25 de Setembro, pp. 18.

[18] – Simões, J. A., Vaz, M. P., Chousal, J. A., Taylor, M. e Blatcher, S., 1997, "Speckle interferometry to measure the strain distribution within porous materials", *International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics*, ATEM'97, 25-26 July, The Japan Society of Mechanical Engineers and Materials and Mechanics Division, JSME-MMD, pp. 423-428, Wakayam, Japão.

[19] – Simões, J. A., Monteiro, J., Vaz, M. A., Taylor, M. e Blatcher, S., 1998, "Study with speckle interferometry of bone-implant interface conditions", *Proc. of the 11th International Conference on Experimental Mechanics*, 24-28 August, Oxford, United Kingdom, Experimental Mechanics, I. M. Allison, ed., A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 851-855.

[20] – Simões, J. A., Morais, A., Monteiro, J., Vaz, M. A. e Taylor, M., 2001, "Numerical and experimental investigation of bone-implant interfaces", *J. Biomechanics*, Vol. 34, Suppl. 1, *Proc. of the BioMechanica IV*, K. Ito, M. Morlok, E. Schneider e M. Wimmer (Guest Editors), Davos, Suiça, 23 a 25 de Setembro, pp. 85-86.

[21] – Simões, J. A., 1998, "Estudo da Componente Femoral da Prótese de Anca com Rigidez Controlada", Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto.

[22] - http://asb-biomech.org/historybiomech/ (Presidential Lecture presented at the 23rd Annual Conference of the American Society of Biomechanics, University of Pittsburgh, 1999).

[23] – Clayton, M., 1992, "Leonardo da Vinci: The Anatomy of Man", Drawings from the Collection of Her Majesty Queen Elizabeth II, The Museum of Fine Arts, Houston, A Bulfinch Press Book, Little, Brown and Company, Boston, Toronto, London.

[24] – Ascenzi, A., 1993, "Biomechanics and Galileo Galilei", J. Biomechanics, 26 (2), pp. 95 – 100.

[25] - Prendergast, P. J., 2000, "Biomechanics in Ireland and Europe: Opening Address to the Delegates of the 12th Conference of the European Society of Biomechanics", 12th Conference of the European Society of Biomechnics, P. J. Prendergast, T. C. Lee and A. J. Carr (Eds.), Dublin, pp. 1-4.

[26] - Wolff, J., 1989, "The law of bone remodelling (book review)", J. Biomechanics, 22, 2, pp. 185.

[27] - Fung, Y. C., 1993, "Biomechanics: Mechanical Properties of Living Tissues", Springer-Verlag.

[28] - Van Rietbergen, B., Eckstein, F., Koller, B., Huiskes, R., Baaijens, F. P. T. and Rüegsegger, P., 2000, "Trabecular bone tissue strains in the healthy and osteoporotic human femur, 12th Conference of the European Society of Biomechnics, P. J. Prendergast, T. C. Lee and A. J. Carr (Eds.), Dublin, pp. 19.

[29] - Bittmann, P., 1996, "Tissue Engineering – Biological Joint Replacement", Sulzer Technical Review, 1, pp. 25 – 27.

[30] - Council of the European Society of Biomechanics, 2000, "Record of the european Society of Biomechanics", 12th Conference of the European Society of Biomechnics, P. J. Prendergast, T. C. Lee and A. J. Carr (Eds.), Dublin, pp. 457-459.

[31] - Fung, Y. C., 1968, "Biomechanics: Its scope, history, and some problems of continuum mechanics and physiology", Appl. Mech. Rev., 21, pp. 1 - 20.

[32] - Huiskes, R., 1998, "Biomechanics, a forceful science", Netherlands Tijdscrift voor Orthopaedie, 5, pp. 27-34.

[33] - Simões, J. A., Monteiro, J., Chousal, J., Vaz, M. e Taylor, M., 2000, "Strain patterns adjacent to bonded and debonded bone-implant interfaces: a holographic study of an idealised proximal femur", 12th Conference of the European Society of Biomechnics, P. J. Prendergast, T. C. Lee and A. J. Carr (Eds.), Dublin, pp. 201.

REFERÊNCIAS DE CONSULTA GERAL

Bramly, S., 1991, "Discovering the Life of Leonardo da Vinci: A Biography", Edward Burlingame Books.

Dicionário Enciclopédico, Koogan Larousse Seleções, Seleções do Reader's Digest, 3ª Edição, Vol. 2, 1980.

Nogg, B. M. e Herzog, W., "Biomechanics of the Musculo-Skeletal System", University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, John Wiley & Sons, Toronto, 1994.

Persaud, T. V. N., "A History of Anatomy", University of Manitoba, Manitoba, Canada, Charles C Thomas, Springfield, Illinois, 1997.

Rachet, G., 1992, "Civilização Grega", Dicionário Temático Larousse, Círculo de Leitores.

http://sunsite.dk/cgfa/vinci/vinci_bio.htm (Leonardo da Vinci (1452 – 1519)).

http://www.usd.edu/~jarichar/HIST.html (History of Biomechanics and Kinesiology).

http://yunus.hacettepe.edu.tr/~saritan/biom_hist.htm (Biomechanics: Galileo, Harvey, Borelli, young and Helmholtz).

http://www.bae.ncsu.edu/bae/courses/bae590f/1995/dikeman/history.html (The History of Biomechanics Sports Medicine).

http://www.utm.edu/research/iep/a/aristotl.htm (The Internet Encyclopedia of Philosophy, Arsitotle (384 – 322 BCE.) Overview).