MEMÓRIAS
DA
ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE
LISBOA

CLASSE DE CIÊNCIAS

TOMO XLV

Regularização fluvial do Baixo Mondego

ARMANDO LENCASTRE

ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE LISBOA

LISBOA • 2018

Regularização fluvial do Baixo Mondego

Armando Lencastre†

Estes estudos foram iniciados, sob minha orientação, ainda eu pertencia ao quadro permanente do LNEC, como Chefe de Divisão de Hidráulica Fluvial e Urbana.

Após a minha saída do LNEC, em 1968, foi-me pedido que assumisse a orientação dos estudos, já no exercício de profissão liberal na minha sociedade Hidroprojecto. Foram muitos os colaboradores nesta tarefa.

O Rio Mondego é um pequeno rio comparado com os grandes rios da Península Ibérica. É, no entanto, o maior curso de água integralmente em território português. Nasce na Serra da Estrela, a uma altitude de 1547 m e, após um percurso de 227 Km, desagua no Oceano Atlântico, junto da Figueira da Foz. A sua bacia hidrográfica, tem uma área de 6671 Km^2.

Até Coimbra, o rio Mondego é um rio de montanha, com um leito encaixado num vale estreito e por vezes profundo, com importantes quedas de nível e uma forte capacidade de transporte sólido. Neste trecho confluem o Dão, o Alva e o Ceira.

Do ponto de vista agrícola e florestal, predominam: os bosques e florestas (pinheiro bravo fundamentalmente); as terras aráveis (utilização agrícola em sequeiro) e os terrenos incultos, sobretudo na zona mais elevada.

A erosão média na bacia do Mondego (até Coimbra) era de cerca de 2000 litros por Km^2 e por ano, cerca de 5 vezes a média do continente.

Desde a época da construção do Convento de Santa Clara-a-Velha o leito do Mondego, em Coimbra, terá subido cerca de 15m.

A jusante de Coimbra, o vale constitui uma extensa planície aluvionar onde, o rio construía o seu próprio leito, cavando nos sedimentos por ele transportados e depositados. É o **Baixo Mondego**.

Os principais afluentes são: Ançã, Foja, Cernache, Ega Arunca e Pranto.

A altitude varia entre 50 e 400 m.

Na planície do Baixo Mondego ocorriam frequentemente cheias que, invadiam os campos, com altas velocidades, depositando os seus sedimentos.

A situação, foi pela primeira vez estudada globalmente pelo Padre Estêvão Cabral da Companhia de Jesus Estêvão Cabral que, no final do século XVIII, projectou e fez construir novo leito quase em linha recta na zona central da planície aluvionar. Este projecto de Estêvão Cabral consta da Memória Económica da Academia Real das Ciências de Lisboa de 1791, publicada em 1929. Esta obra veio provocar desequilíbrio no leito do rio: a substituição de um leito sinuoso por um leito rectilíneo, fez com que as inclinações do "Rio Novo" fossem muito maiores do que as do "Rio Velho". E a natureza começa a repor as

inclinações naturais. As cotas do leito baixam a montante e sobem a jusante, diminuindo consequentemente a capacidade de transporte do rio. Entre 1872 e 1930 o leito do rio subiu 2,32 m em Lares, 1,50 m em Montemor e apenas 0,30 m em Coimbra.

A situação, no início dos nossos estudos, era a seguinte:

– em muitos pontos o leito do rio estava acima dos campos;

– durante a estiagem, grande parte dos leitos não passavam de extensos areais;

– o material sólido transportado era fundamentalmente constituído por areia.

A inundação começava para o caudal em Coimbra de 200 m^3/s cuja duração, em ano médio era de 45 dias.

PLANO GERAL (1970)

Em face do exposto, impunha-se um plano Geral para a bacia, isto porque, sendo o rio uma unidade geomorfológica, não se poderia tratar da zona de jusante ignorando-se o que se passa a montante. Este Plano foi elaborado pelos Serviços Hidráulicos sob a orientação do Eng.º Rui Alves da Silva Sanches.

Os caudais em Coimbra teriam então valores indicados no quadro.

– caudal de estiagem (vários dias)	< 1 m^3/s
– caudal médio anual	80 m^3/s
– cheia de 25 anos	2900 m^3/s
– cheia de 100 anos	3700 m^3/s
– cheia de 1000 anos	5000 m^3/s
– erosão média	2 $m^3/Km^2/ano$

De acordo com este Plano Geral:

– Promoveu-se a arborização e a correcção torrencial na cabeceiras;

– A construção de pequenas barragens nas zonas de montanha.

– A construção de grandes barragens – **Sistema Aguieira – Raiva – Fronhas projectado, construído e gerido pela EDP**.

Aproveitamento da Aguieira

O aproveitamento da Aguieira cria uma albufeira com a capacidade total de 430 milhões de metros cúbicos e, em exploração normal, a albufeira situa-se entre as cotas 117 e 126 m.

Tem dois descarregadores de cheias com capacidade de vazão de 1000 m^3/s cada um.

A Central tem três grupos turbo-bomba, reversíveis, de 100 MW cada; o caudal turbinado é da ordem dos 500 m^3/s para os três grupos; o caudal bombado é no máximo de 460 m^3/s.

A energia produtível, em ano médio, deverá rondar os 260 GWh, não considerado as bombagens.

O escalão da Raiva

O escalão da Raiva é constituído por barragem: do tipo gravidade, com duas comportas de segmento, com 34 metros de altura; sendo a central incorporada na barragem e equipada com dois grupos bolbo com uma potência de 20 MW. O caudal turbinado é da ordem dos 150 m^3/s para os dois grupos.

O escalão da Raiva contribui com um acréscimo de energia, em ano médio, de 50 GWh.

Os caudais turbinados na Aguieira durante o período de maior consumo de energia, são armazenados na Raiva e bombeados para a Aguieira durante os períodos de menos consumo, aproveitando o excesso de produção na rede, principalmente nos aproveitamentos a fio de água, no Rio Douro.

A barragem de Fronhas

A barragem de Fronhas controla os caudais do Alva na defesa contra cheias, transferindo-os através de túnel para a Aguieira, reforçando apreciavelmente a produtividade desta central.

O túnel de ligação entre as albufeiras de Fronhas e Aguieira tem uma extensão total de cerca de 8 Km e permite uma transferência de 309×10^6 m^3 em ano médio, o que permite um reforço de produção energética de 50,2 GWh, em ano médio, nos escalões de Aguieira e Raiva.

Resumindo, para jusante da Aguieira há que considerar o seguinte:

– Caudal de cheia descarregado na Aguieira 2.000 m^3/s

– Caudal de estiagem turbinada na Raiva 2x75 m^3/s

Após a construção da Barragem da Aguieira e de Fronhas convém distinguir, para efeito de sistematização:

– a parte de montante da bacia, dominada pelas albufeiras de Aguieira e Fronhas com área de 37500 Km^2 equivalente a 56% do total;

– a parte entre a Raiva e Coimbra, com 1207 Km^2 (18% do total), correspondendo à secção de Coimbra a bacia de 4957 Km^2 ou seja 74% do total;

– a zona a jusante de Coimbra com área de 1714 Km^2 (26% do total) que foi o objectivo dos Estudos por mim orientados.

AÇUDE – PONTE EM COIMBRA

O açude tem como objectivos principais:

– permitir derivar o caudal para a rega superficial, por gravidade

– armazenar cerca de $0,6 \times 10^6$ m^3 que permitem uma autonomia de 7 horas para a rega.

Os objectivos secundários são:

– servir de base a uma ponte rodoviária para um tráfego diário de cerca de 10 000 veículos por dia; a um passeio de peões, a condutas de água, de esgoto e a cabos eléctricos;

– criar um lago artificial em Coimbra, com melhoria de condições climáticas e paisagísticas.

Os condicionamentos impostos ao açude resultam fundamentalmente da segurança indispensável na cidade de Coimbra e da garantia da passagem do caudal sólido para jusante; há também que assegurar a passagem de peixes nos períodos de fecho das comportas.

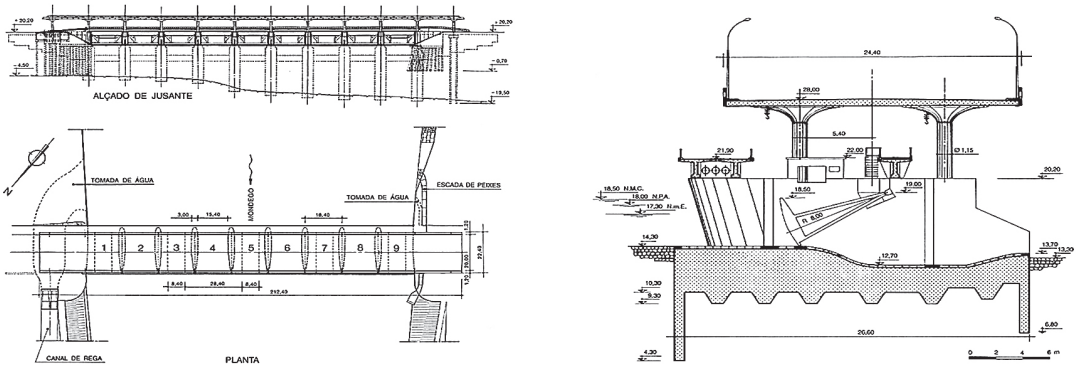
As sobreelevações introduzidas pelo açude, são:

CAUDAL (m3/s)	SOBREELEVAÇÕES (m) – NÚMERO DE VÃOS		
	9	8	7
1200	0,06	0,12	0,21
2000	0,13	0,24	0,44

A manobra das comportas é automática por níveis, com gerador local de energia. Há duplicação de todos os circuitos e aparelhos, comando à distância e comando local com accionamento manual.

– Admite-se a avaria de duas comportas sem risco para a cidade de Coimbra.

As características do açude em Coimbra constam da Figura 1.



Planta e alçado

Corte transversal

Figura 1
Açude-ponte em Coimbra.

Para garantir a passagem do caudal sólido, o açude é do tipo móvel, isto é, tem comportas em toda a secção do rio: 9 comportas de 15,40 m de comprimento por 4,20 m de altura, suportadas por pilares de 3 m de espessura cuja fundação pode atingir 20 m abaixo do leito do rio.

Para garantir a passagem de peixes estabeleceu-se uma escada de peixes, para as espécies já existentes (lampreia e enguia) e para outras espécies com que no futuro se pretenda povoar o rio.

OBRAS COMPLEMENTARES EM COIMBRA

A construção do Açude em Coimbra cria um plano de água permanente à cota 18, impedindo o bom escoamento dos esgotos da cidade e ainda os níveis freáticos.

Para resolver a situação construiu-se um colector pluvial, um colector doméstico e um dreno ao longo da Av. Fernão de Magalhães.

Os esgotos domésticos vão ligar á Estação de Tratamento localizada no bloco suburbano.

Os acessos rodoviários à ponte, estão indicados na figura.

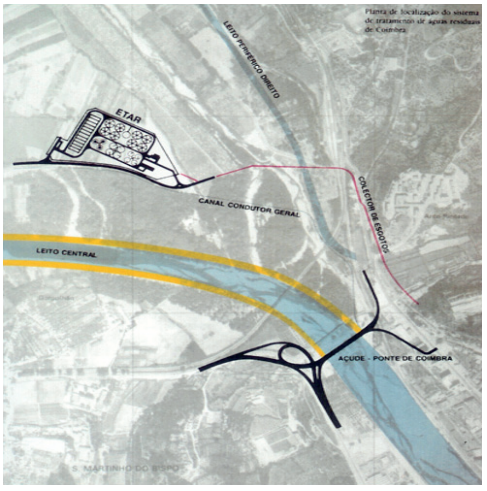


Figura 2
Localização do Açude-ponte e obras complementares.

O antigo Mosteiro de Santa Clara parcialmente soterrado e submerso, foi recuperado.

REGULARIZAÇÃO FLUVIAL E DEFESA CONTRA CHEIAS

No estudo, concluiu-se que seria mais vantajoso abandonar os leitos secundários e concentrar os caudais que chegam a Coimbra num único leito regularizado: assegurava-se assim mais facilmente a estabilidade do leito e reduzia-se a construção de diques e a sua conservação.

Assim, regularizou-se todo o leito aberto no Séc. XVIII, e criaram-se dois Leitos Periféricos, Esquerdo e Direito que recebem os afluentes das margens.

Porem, por razões de transporte sólido, encostou-se o leito central à margem esquerda do Campo, de modo a recolher as águas do Ega e sobretudo do Arunca.

O troço abandonado do Rio Velho constitui uma óptima infraestrutura para desportos aquáticos.

O Leito Central, numa extensão de 36 Km, garante o escoamento dos caudais líquidos e dos caudais sólidos afluentes a Coimbra, das bacias dos afluentes laterais a jusante de Coimbra.

O Leito Central tem uma secção transversal composta por um leito menor, de fundo móvel e margens fixas, e por um leito maior, de fundo e margens fixas.

No dimensionamento do Leito Central, as incertezas inerentes aos valores estimados dos caudais sólidos por arrastamento médios e dos caudais dominantes afluentes lateralmente, a jusante de Coimbra, têm pouco significado em face das outras incertezas do cálculo.

Na Figura 3 apresenta-se um esquema dos valores considerados no dimensionamento do Leito Central.

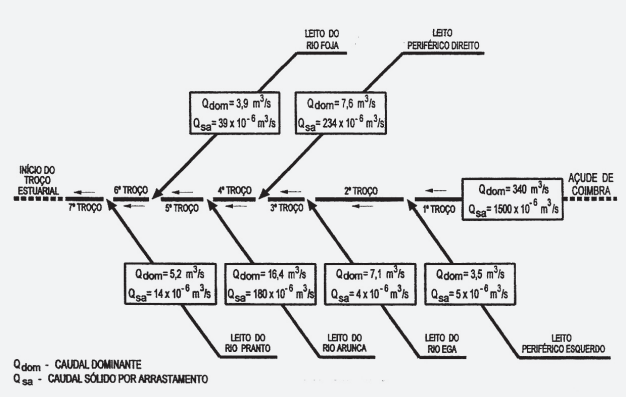


Figura 3
Caudais dominantes e caudais sólidos por arrastamento afluentes ao leito central.

O dimensionamento de leitos regularizados com fundo móvel é um problema técnico-económico multifacetado e relativamente complexo.

Há que considerar aspectos de estabilidade hidráulica e estrutural das obras, em particular no que respeita à resistência à erosão dos revestimentos dos diques e dos taludes do leito menor e no que se refere à estabilidade das fundações dos diques.

A escolha entre várias soluções tecnicamente possíveis foi feita com base em critérios de carácter **económico**, tendo em conta condicionamentos urbanísticos e rede de vias de comunicação.

A largura do leito maior deveria ser o menor possível. Porem por razões de estabilidade estrutural, e também por razões paisagísticas, a altura dos diques não deveria exceder os 5,00 m.

Houve ainda que prever uma folga destinada a encaixar pequenas variações do nível de superfície livre devidas à ondulação provocada pelo vento, ou variações locais da rugosidade do escoamento.

De salientar a necessidade de reduzir a inclinação do leito nos primeiros 8 Km, para garantir um equilíbrio do fundo móvel. Esta redução foi obtida à custa de 11 quedas de 0,5 m cada uma.

Para o dimensionamento do leito menor utilizou-se o conceito de *caudal dominante* ou seja o caudal que, escoando-se em regime permanente, é equivalente, do ponto de vista de modelação do fundo móvel, à sucessão de caudais líquidos variáveis que ocorrem ao longo do ano.

Este caudal dominante tem o valor de 340 m^3/s em Coimbra e de 380 m^3/s no Estuário.

O dimensionamento foi feito tendo em consideração as Teorias do Regime para prédimensionamento e comparação; e um modelo matemático para afinamento final, baseado nas leis de transporte sólido (MEYER-PETER).

O valor do caudal sólido em Coimbra era de 7,5 l/s. Após as obras de correcção de cabeceiras e da construção da Aguieira estimou-se um valor de 1,5 l/s.

Para a determinação dos caudais sólidos afluentes a jusante de Coimbra criaram-se estações de medição nos principais afluentes.

O perfil transversal tipo do leito tem uma largura que varia entre 88 m e 142 m; a profundidade é variável de 3,70m a 4, 5 m (Figura 4).

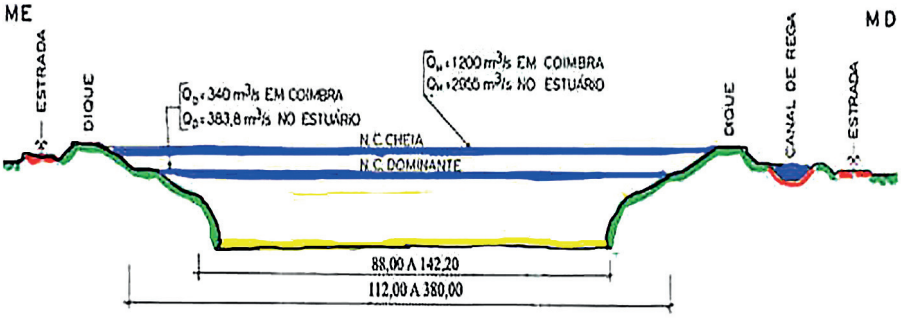


Figura 4. Secção do Leito Central.

O quadro reúne os cálculos realizados

Método	Raio hidráulico (m)	Largura média (m)	Velocidade média (m/s)	Inclinação do fundo (x 10 -3)	Coeficiente de Stricker (m 1/3/s)
Lacey	2.23	89.18	1.55	0.501	40.83
Blench	2.13	109.93	1.44	0.505	38.71
Simons e Albertson	3.94	86.84	0.99	0.048	57.28
Modelo matemático	3.75	98.45	0.82	0.314	28.70

O leito maior que, de acordo com o Plano Geral, deveria conter a cheia centenária foi, sob minha proposta, dimensionada para conter a cheia de 25 anos 1200 m^3/s em Coimbra e cerca de 3000 m^3/s no estuário; o leito menor tem larguras que variam de 112 m a 380 m e é limitado por diques com alturas variáveis de 2,70 m a 4,60 m.

Nos troços rectos a golena e os diques foram revestidos de vegetação, do tipo prado permanente, podendo por isso ser explorados para forragens (375 ha). O leito maior será ocupado pelo escoamento em média 20 dias por ano.

Os taludes do leito menor, e a golena e diques do leito maior em curvas, são revestidos com enrocamentos.

As dimensões das obras do leito central são:

– comprimento	35 815 m
– volume de escavação	16×10^6 m^3
– volume de aterro (diques)	7×10^6 m^3
– volume de enrocamento (revestimentos)	$0{,}55 \times 10^6$ m^3
– área de revestimentos vegetais	$0{,}50 \times 10^6$ m^2

Inundação controlada dos campos

Como os diques são submersíveis, em princípio, em cada 25 anos, previu-se inundação dos campos, de jusante para montante, a partir de determinadas secções criteriosamente escolhidas, por forma a minimizar os efeitos das inundações e a destruição dos diques. Previu-se para isso a compartimentação dos campos, aproveitando os canais de rega, caminhos e estradas.

Construíram-se quatro descarregadores laterais, de 200 m^3/s cada, entrando sucessivamente em funcionamento de jusante para montante.

REGA E ENXUGO

A área total do perímetro de rega é de 15 000 ha.

O volume anual de água em ano médio a derivar para a rega é de cerca de 140 a 150 $\times 10^6$ m^3, consoante se adoptar a rega por aspersão ou a rega superficial.

A rede primária de rega dos campos do Baixo Mondego é constituída fundamentalmente por três canais principais de rega.

O primeiro canal, tem início imediatamente a jusante da tomada de água da margem direita da Barragem móvel.

Foram utilizados os leitos abandonados como rede natural e principal de enxugo.

A rede primária está dimensionada para 4,2 l/s.ha.

A rede principal e as estações elevatórias serão dimensionadas tendo em conta o armazenamento possível nas redes de enxugo.

GESTÃO DO SISTEMA

Para auxílio de gestão dos sistemas, construíram-se os seguintes modelos, entre outros.

– Modelo matemático para simulação do escoamento não permanente entre Aguieira e Coimbra

Estes modelos foram baseados na integração das equações de Saint-Venant.

Modelo matemático para o estudo do transporte sólido e do perfil longitudinal do leito

Para prever o impacto das barragens na evolução do perfil do leito do rio, foi desenvolvido um modelo matemático. Este simula a interacção entre o perfil longitudinal e o transporte de sedimentos, do rio.

O modelo tornará possível gerir e regularizar a remoção de areias do leito do rio, bem como prever a sua evolução nos perfis transversais dos pilares das pontes e de outras estruturas hidráulicas.

Modelo matemático para simulação de uma rotura da barragem da Aguieira

Na parte inferior do vale, para avaliar os efeitos da cheia, considerou-se um modelo bidimensional com condições-fronteira variáveis. Os valores de descargas em Coimbra foram tomados como condições-fronteira de montante; as condições-fronteira de jusante foram o nível da maré, perto do estuário do rio.

Podemos observar que alguns dos vales marginais começam a estar inundados, enquanto outros permanecem ainda secos.

Para este problema foram feitos diversos mapas das condições de cheia, de modo a fornecer linhas orientadoras essenciais para as autoridades locais do vale, de modo a poder estabelecer, em caso de acidente na barragem, os procedimentos e acções imediatas a tomar.

Modelos matemáticos num sistema de previsão hidrológica

Estes modelos visam assegurar a defesa da parte baixa da cidade de Coimbra.

Para isso, é necessário conhecer não só a propagação da cheia da Raiva, como atrás se referiu, mas também prever a cheia em Coimbra a partir da precipitação na zona não controlada da bacia do Mondego, a jusante da barragem da Aguieira.

As razões são as seguintes: o caudal máximo de protecção, em Coimbra é de 2000 m^3/s; mas como só o Ceira, que não é controlado, pode debitar 800 m^3/s, é necessário reduzir a descarga da Aguieira e Fronhas para 1200 m^3/s;

Ora, o tempo que decorre desde que começa a chover na bacia do Ceira, até que a ponta de cheia atinge Coimbra, é sensivelmente igual ao tempo de propagação da cheia entre Aguieira e Coimbra.

Para que a acção seja eficaz é, portanto, necessário actuar na Aguieira imediatamente após se ter conhecimento de que a cheia se começou a formar no Ceira, isto é, quando ocorre uma determinada precipitação. A Fig. mostra a Bacia Hidrográfica do Ceira.

Neste sentido, foram preparados dois modelos:

– modelo para conversão da precipitação em escoamento, a ser utilizado na parte superior da rede hidrográfica; este modelo funciona simultaneamente com base nas medições de precipitação e nas previsões da mesma; o modelo foi testado e os resultados são apresentados no gráfico da Fig.
– modelo de conversão dos caudais assim obtidos em caudais medidos em Coimbra.

Haverá um efeito de interacção entre os modelos de previsão hidrológica a utilizar e o sistema de recolha de elementos, sua transmissão e processamento, para que melhores resultados possam ser obtidos.

Além destes instrumentos matemáticos projectaram-se também os meios físicos necessários para uma boa gestão.

Conflitos de interesse – O Acidente

As múltiplas utilizações, apresentam objectivos contraditórios e condicionantes. Essas condicionantes implicam que se assegure a retenção de uma quantidade de água suficiente para a produção de energia, irrigação e manutenção dos caudais mínimos prescritos, ao mesmo tempo que se assegura uma capacidade disponível para a protecção contra cheias.

Em 27 de Janeiro de 2001, ocorreu na Bacia do Mondego uma *cheia natural* que, sem regularização pelas Barragens da Aguieira e de Fronhas, teria atingido 2800 m^3/s, a que corresponde um período de retorno ligeiramente inferior a 25 anos; com uma gestão adequada, esta cheia deveria originar, em Coimbra, uma *cheia amortecida* ligeiramente inferior a 1200 m^3/s. Acontece que a cheia em Coimbra foi de 2000 m^3/s, a que corresponde um período de retorno de mil anos. Além disso, o dique da margem esquerda, na zona do atravessamento da auto-estrada, estaria cerca de um metro abaixo da cota devida e começou a ser galgado. Se tivesse sido reparado de emergência com sacos de areia, e não com material a granel utilizado, ter-se-ia evitado a catástrofe que inundou os campos, destruiu os diques, destruiu bens e pôs em risco vidas.

O acidente ocorreu por gestão inadequada das cheias, da manutenção dos diques e da sue reparação de emergência. Teria bastado que uma só das três gestões referidas tivesse sido feita de forma adequada para que o desastre não se tivesse verificado. Isto aconteceu apesar do esforço e dedicação manifestados por todos os técnicos dos organismos intervenientes: Estado, EDP, Associação de Regantes. Todos estes esforços, ao que parece, falharam por insuficiências institucionais, na gestão dos conflitos de interesses.

(Comunicação apresentada à Classe de Ciências
na sessão de 4 de fevereiro de 2010)