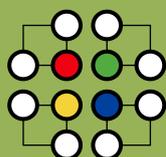


ENSINO EXPERIMENTAL DAS CIÊNCIAS

MATERIAIS DIDÁCTICOS . 1



eec
ensino experimental
das
ciências

ENSINO EXPERIMENTAL DAS CIÊNCIAS

MATERIAIS DIDÁCTICOS

1

As opiniões expressas nos textos apresentados nesta publicação são da responsabilidade dos autores e não reflectem necessariamente a opinião do Departamento do Ensino Secundário ou do Ministério da Educação

Ensino Experimental das Ciências Materiais Didáticos 1

Coordenação

J. M. Serra

Autores

A. Mateus

Elisa Maia

J. Maia Alves

J. M. Serra

M. Arminda Pedrosa

Índice

- 7 Nota de abertura
- 9 1. Introdução
- 19 2. Planificação de Actividades Práticas de Ciências e Estruturação Conceptual
M. Armanda Pedrosa
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
- 43 3. Equipamentos e técnicas
- 45 3.1. Absorção de luz em sólidos e líquidos
J.M.Serra
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 55 3.2. Uma discussão em torno da transferência de calor
J.M.Serra
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 73 3.3. Perfis de temperatura, intensidade luminosa ambiente e transmitância da água na corta da Mina de São Domingos
J.Maia Alves
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 85 3.4. Comportamento mecânico de materiais: da colher de sopa às dobras do Pomarão
A.Mateus, J.Maia Alves
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 115 3.5. Densidade e separação gravítica de sólidos
A.Mateus, J.Maia Alves
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 129 4. Recomendações para uma correcta utilização de equipamentos e técnicas padrão
- 131 4.1. Kits de La Motte da série STH para análise de sólidos
Elisa Maia
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 137 4.2. O Espectrofotómetro
J.M.Serra
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 145 4.3. Caixa de deformação qualitativa
A.Mateus
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa
- 153 4.4. Os planos, mapas, cartas e fotografias aéreas como recursos didácticos
A.Mateus
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Nota de Abertura

DOMINGOS FERNANDES

Director do Departamento do Ensino Secundário

Materiais Didácticos I

A presente colecção, que o Departamento do Ensino Secundário faz chegar a todos os professores, surge como resultado do projecto Formação no Ensino Experimental das Ciências – Formação de Acompanhantes Locais das Ciências, promovido por este Departamento em parceria com as Associações Científicas e Associações de Professores que integram a Comissão de Acompanhamento do Ensino das Ciências. Esta Comissão integra representantes do Departamento de Educação Básica, da Unidade Ciência Viva do Ministério da Ciência e da Tecnologia, da Associação Portuguesa de Geólogos, da Ordem de Biólogos, da Associação Portuguesa de Professores de Biologia e Geologia, da Sociedade Portuguesa de Química, da Sociedade Portuguesa de Física e da Sociedade Portuguesa de Ciências da Educação.

Materiais I é a primeira de um conjunto de cinco brochuras que ilustra os projectos desenvolvidos pelos 32 professores-formandos durante as duas primeiras acções de formação que decorreram nas Escolas Secundárias Ginestal Machado e Sá da Bandeira, em Santarém, e nas Minas de S. Domingos, em Mértola, num total de treze dias, nos meses de Junho e Julho de 1999.

A lógica que preside a estas acções promovidas pelo DES na área do Ensino Experimental das Ciências é a de que nas escolas secundárias deveremos promover uma relação com o conhecimento e com o saber que seja eminentemente concreta e prática em vez de verbal ou retórica. Por isso, este é um aspecto central no desenvolvimento profissional dos professores.

Materiais I ilustra uma forma diferente de abordar o currículo. Visa contribuir para o desenvolvimento de competências científicas e didácticas com vista à concretização de actividades práticas numa perspectiva investigativa.

Aos autores desta brochura, bem como aos Acompanhantes Locais das Ciências que empenhadamente se envolveram neste projecto, aqui deixamos, em nome de todos os que dele poderão vir a beneficiar, o nosso obrigado pela contribuição prestada.

Lisboa, Julho de 2000

1

Introdução

1. Introdução

Na sequência das duas primeiras acções de formação oferecidas no âmbito do "Programa de Formação no Ensino Experimental das Ciências", conceptualizaram-se e implementaram-se diferentes percursos investigativos com o propósito de responder a diversas questões, pontos de partida inestimáveis para a promoção de ensino e aprendizagem em Ciências com forte ligação ao Mundo real (exterior a contextos escolares). No caso presente, utilizou-se, como objecto de problematização, a Mina de S. Domingos (Mértola) e sua área envolvente. Os aspectos relacionados com a sequência e planificação das actividades realizadas, bem como com a pertinência e articulação dos problemas levantados (de âmbito disciplinar, multidisciplinar e interdisciplinar), foram objecto de explicitação sumária e de apreciação global no Tomo 1 da Brochura apropriadamente intitulada "Concepção e Concretização das Acções de Formação", onde também se dá conta da pluralidade dos métodos utilizados e dos resultados obtidos. Importa agora apresentar e discutir de forma geral as principais técnicas, equipamentos e materiais didácticos usados e especificamente concebidos no decurso das acções de formação, mostrando que os mesmos se afiguram úteis (não sendo porém únicos) para, adequadamente, observar e medir *in situ* e desenvolver actividades experimentais que permitam testar as diversas hipóteses de trabalho formuladas nos percursos investigativos empreendidos, desde o campo ao laboratório.

As controvérsias associadas à designação "Programa de Formação no Ensino Experimental das Ciências" repercutem-se necessariamente nas abordagens que se podem conceber para a sua concretização, bem como na orientação e implementação das actividades. No contexto do desenvolvimento deste Programa, merecem destaque as próprias concepções de trabalho experimental dos formadores que, longe de serem consensuais, foram alvo de reflexão e discussão com o propósito de se estabelecer uma plataforma de entendimento comum, posteriormente expressa no documento de trabalho "Percursos Experimentais" (Anexo 1). As interpretações e apropriações deste documento, condicionadas pelas concepções individuais nele pressupostas e a ele subjacentes, serão (foram), por isso, diferentes de pessoa para pessoa, reflectindo-se, como se esperaria, nas actividades

desenvolvidas durante as acções de formação. Neste contexto, os documentos que se seguem pretendem ajudar os professores a compreenderem o essencial de alguns dos procedimentos adoptados e técnicas exploradas, tentando estimular a transferência do documento "Percurso Experimentais" para o Ensino Secundário.

A partir deste momento, centraremos a nossa atenção nas actividades desenvolvidas no campo e na Escola Sá da Bandeira (Santarém) e nos recursos para tal preparados e utilizados.

No campo:

- a localização e extensão do sistema a estudar envolveu o manuseamento de cartas topográficas na escala 1:25000 e da bússola; informações complementares foram obtidas através da consulta de outros documentos cartográficos temáticos (e.g. cartas geológicas, de gravimetria, de magnetometria, de geoquímica de solos); tais recursos revelaram-se imprescindíveis ao desenvolvimento dos percursos investigativos de alguns grupos de trabalho, os quais procederam ainda à medição *in situ* de diversos elementos estruturais geológicos (recorrendo à bússola) e à determinação da resistência mecânica oferecida pelas rochas aflorantes (fazendo uso de um penetrómetro portátil);

- a medição do pH das soluções aquosas retidas quer na antiga corta mineira, quer nas diferentes represas e tapadas, foi necessária na execução de diversos percursos experimentais, utilizando-se diversos tipos de papel indicador e o METROHM-620-Meter; com este equipamento alguns grupos de trabalho também mediram a temperatura das referidas soluções aquosas;

- mediu-se a temperatura atmosférica e superficial – em meio aquoso e sólido – em diversos locais da corta mineira, utilizando equipamentos portáteis e termopares especialmente construídos para o efeito; alguns grupos de trabalho fizeram medidas de ciclos de temperatura diária;

- mediram-se perfis de temperatura, intensidade luminosa ambiente e transmitância da água retida na corta mineira abandonada, em função da profundidade, recorrendo a uma sonda equipada com fototransistores, LEDs e termístor, propositadamente construída para o efeito;
- procurou-se ainda avaliar *grosso modo* a variabilidade composicional das soluções aquosas retidas nas represas, medindo-se a concentração em alguns iões com o auxílio de um espectrofotómetro portátil e recorrendo a ensaios químicos expeditos por via húmida;
- discutiram-se e utilizaram-se diferentes métodos de amostragem de rochas (incluindo sedimentos naturais e artificiais), soluções aquosas e de material biológico; os exemplares colhidos, devidamente acondicionados e etiquetados, foram subseqüentemente sujeitos a análise laboratorial.

Na Escola Secundária Sá da Bandeira (Santarém), as actividades desenvolvidas repartiram-se por quatro espaços diferentes, três deles laboratoriais, havendo a necessidade de gerir a utilização comum de vários equipamentos e de partilhar algumas das técnicas ou metodologias específicas previamente desenvolvidas por alguns grupos de trabalho.

Durante uma semana de trabalho intenso,

- prepararam-se ou seleccionaram-se os protocolos adequados à análise qualitativa e quantitativa de aniões e catiões por via húmida;
- traduziram-se os protocolos necessários à utilização e adaptação do *Kit* de La Motte da série STH, adequando-os aos percursos experimentais específicos;
- realizaram-se ensaios pirognósticos – à chama e em pérolas de bórax – para identificação de catiões em agregados de minerais previamente pulverizados;

- fizeram-se cromatografias em papel, em giz, e em coluna sólida para separação de carotenos e clorofilas em tecidos vegetais;
- utilizaram-se os espectrofotómetros de leitura directa HACH DR/2000 e de feixe duplo JENWAY 6100, visando a obtenção dos espectros de absorção de carotenos, clorofilas e de soluções aquosas artificialmente coradas, bem como a determinação da concentração em alguns metais (e.g. Cu^{2+}) apresentada por soluções naturais com base nas radiações por estas absorvidas;
- conceberam-se e construíram-se dispositivos experimentais para a medida de perfis de absorção luminosa em soluções aquosas coradas, por forma a determinar os respectivos coeficientes de absorção linear e proceder à sua comparação com os dados colhidos *in situ*;
- desenvolveram-se dispositivos experimentais apropriados ao estudo dos perfis de temperatura em colunas de areia colorida e em soluções aquosas coradas, visando o estudo dos processos de transferência de calor envolvidos e respectivos balanços térmicos;
- prepararam-se e utilizaram-se diferentes meios de cultura de bactérias e de espécies de algas (e.g. meio de pH ácido AGM e de agar nutritivo NA);
- separaram-se as fracções granulométricas constituintes de sedimentos naturais e artificiais com o auxílio de uma série de peneiros da série B.S. (*British Standard Fine Mesh Series*) e de outras técnicas auxiliares, com o intuito de caracterizar a sua constituição mineralógica;
- determinou-se a densidade de alguns exemplares de rochas e construiu-se um dispositivo experimental que permitisse evidenciar os princípios físicos que estão na base das técnicas de obtenção de concentrados hidrogravíticos;

- **construiu-se um dispositivo** adequado ao estudo experimental da deformação tractiva de ligas metálicas, permitindo i) observação dos regimes elástico e plástico de deformação; ii) determinação do módulo de Young;

- **realizaram-se ensaios** qualitativos e quantitativos de deformação analógica de rochas, recorrendo à caixa padronizada TECTODIDAC MT 15472 e a dispositivos diversos especialmente construídos para o efeito.

Apresentar e discutir detalhadamente todas as técnicas, equipamentos e protocolos experimentais acima mencionados, representa uma tarefa árdua e dificilmente concretizável em curto intervalo de tempo. Conduziria, além disso, a um extenso volume, fastidioso (porque parcialmente repetitivo de procedimentos disponíveis em livros específicos e acessíveis), e passível de ser tomado por um "manual de instruções", o que seria indesejável porque desajustado das perspectivas que inspiram designadamente o desenvolvimento das acções de formação. Deste modo, seleccionaram-se os recursos, técnicas e equipamentos que, durante as acções de formação, se revelaram inovadores e/ou se afiguram mais problemáticos relativamente a transferências para situações escolares comuns, discutindo-se adicionalmente as potencialidades e limitações da sua utilização em "percursos experimentais" em contextos educativos. As opções tomadas condicionaram em larga medida a estrutura do texto que agora se apresenta, o qual dá corpo ao tomo 1 da Brochura 2 (Materiais Didácticos).

No primeiro capítulo abordar-se-ão os princípios subjacentes à utilização de mapas de conceitos e de V heurísticos de Gowin aquando da realização de "percursos experimentais". Discutir-se-á brevemente o potencial formativo e educativo destes recursos, apresentando-se exemplos ilustrativos seleccionados do que realmente se desenvolveu, nomeadamente no âmbito dos grupos de trabalho de Química. Destacar-se-á a importância, para a compreensão e integração de conhecimento teórico e processual, de aprender a utilizar estes recursos no desenvolvimento de "percursos experimentais".

O segundo capítulo será dedicado a equipamentos e técnicas exploradas no âmbito do programa de formação, procurando testar algumas das hipóteses de trabalho formuladas a propósito de certas questões. Nele apresentar-se-ão:

- os dispositivos experimentais desenvolvidos com o propósito de caracterizar a absorção de luz e da transferência de calor em sólidos e líquidos, contextualizando teoricamente os princípios subjacentes à sua conceptualização e subsequente análise de resultados;

- os procedimentos experimentais concebidos com a intenção de caracterizar perfis térmicos em colunas de água, ensaiando a sua aplicação a um caso real – caracterização da coluna de água retida na corta mineira abandonada de S. Domingos;

- os dispositivos experimentais usados na determinação do módulo de Young de ligas metálicas e na construção de modelos de deformação analógica, discutindo:

i) os diversos fundamentos teóricos implícitos nas abordagens empreendidas no âmbito da análise do comportamento mecânico de materiais;

ii) os principais problemas inerentes à extrapolação dos resultados laboratoriais para a realidade geológica;

iv) as vantagens em utilizar as observações e as medições realizadas no terreno na definição das condições de fronteira a impor aos modelos experimentais;

v) quais os procedimentos a adoptar para que, de forma simples e gradual, se possam introduzir correctamente os parâmetros condicionantes da deformação naturalmente acomodada pelas rochas;

- os problemas inerentes à determinação da densidade de sólidos, contextualizando o método utilizado e discutindo sumariamente as suas vantagens e limitações, bem como a pertinência educativa deste tipo de actividades experimentais; adicionalmente, explicitar-se-ão os resultados obtidos e os

princípios subjacentes à concepção do dispositivo construído por forma a evidenciar os princípios físicos dos processos de separação gravítica em misturas de proporções variáveis de clastos com densidades diferentes.

O derradeiro capítulo compreenderá, na sua essência, uma série de recomendações relacionadas com equipamentos e técnicas padrão vulgarmente utilizadas em actividades experimentais promovidas nas escolas secundárias, nomeadamente:

- o *Kit de La Motte* para análise de solos da série STH, salientando a necessidade de se proceder à tradução dos protocolos experimentais implícitos nos vários ensaios propostos, compreendendo os cuidados a ter na sua utilização e na interpretação dos resultados obtidos e ainda, se necessário, sabendo implementar e testar as adaptações consideradas pertinentes à resolução de problemas específicos;

- os *espectrofotómetros*, apresentando sumariamente os princípios subjacentes ao seu funcionamento, calibração e utilização, por forma a garantir o conforto necessário à sua utilização futura em percursos investigativos/educativos de natureza diversa;

- a *caixa TECTODIDAC MT 15472* (Pierron Entrepise), enumerando e avaliando as vantagens pedagógicas e didácticas inerentes ao seu uso, sem deixar de enumerar e discutir os cuidados a ter na concepção e análise dos resultados adquiridos em cada experiência (permitindo explorar de forma gradual e objectiva as potencialidades do equipamento); e, por fim,

- a *utilização de planos, mapas, cartas e fotografias aéreas* como recursos didácticos, salientando o valor educativo e cognitivo das abordagens que, no âmbito da Cartografia, se podem fazer a nível do ensino secundário, varrendo transversalmente diferentes áreas do conhecimento científico.

2

Planificação de Actividades
Práticas de Ciências
e Estruturação Conceptual

2. Planificação de Actividades Práticas de Ciências e Estruturação Conceptual

M. ARMINDA PEDROSA

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

1. Introdução

Neste capítulo, *Vês heurísticos de Gowin* e *mapas de conceitos* serão actores principais. Elaborados no decurso do "Programa de Formação no Ensino Experimental das Ciências", a sua apreciação requererá informação adicional relativa a perspectivas de trabalho prático nele adoptadas, organização, sequência e calendarização de actividades, bem como clarificação de significados de algumas palavras-chave adoptadas. Para tal, recomenda-se, a consulta das Brochuras 1 e 3, da presente série de publicações, e a leitura de secções em que especificamente se tratam estes aspectos. Importará, contudo, esclarecer e salientar que explicitamente se considerou *trabalho prático*, englobando actividades de campo, experimentais e laboratoriais (ver ofício-circular n.º 34/99 de 16 de Março, que publicitou o referido Programa). Por outro lado, perspectivou-se *trabalho prático* associando-o a problemas para cuja resolução se pretenda contribuir. Assim, *trabalho prático* emergiu de questionamentos relativos a fenómenos e objectos da Mina de S. Domingos, Mértola, e suas envolvências (ver Brochura 1), tendo em vista identificar e explicitar problemas. Integrou actividades diversificadas, concebidas, planeadas e executadas no Programa e emergentes da conjugação de esforços na procura de contributos válidos para os resolver. Esta perspectiva pressupõe e exige, desde logo, clarificação dos problemas para cuja resolução se pretende contribuir, sua clara identificação e adequada explicitação. Requer, simultaneamente, previsão e planeamento de actividades, cuja concretização se prevê necessária para o efeito, e de meios necessários à sua implementação. Da articulação de umas (actividades) e de outros (meios) resultarão, realizando-se percursos investigativos (que pressupõem identificação, controlo e manipulação de variáveis), contributos para resolução de problemas.

Porém, a clarificação de um problema originalmente identificado conduz, frequentemente, à sua redefinição, emergindo assim novos problemas (sub-problemas do original). Consequentemente, a sua resolução requererá não um, mas vários percursos investigativos - tantos quantos os problemas identificados e

seleccionados. Em diversas fases do Programa estimulou-se e mediou-se trabalho cooperativo em grupos, tendo em vista clarificar e definir problemas e sub-problemas, cuja resolução, ainda que parcial, fosse exequível no Programa. Identicamente, procurou estimular-se a concepção e planeamento de actividades a desenvolver no Programa, adoptando orientações gerais constantes do documento "Percurso Experimentais". Este documento de trabalho, apresentado como Anexo 1 no fim deste capítulo, pretendeu contribuir para clarificar e operacionalizar algumas orientações estratégicas. Corresponde a uma síntese de consensos relativos a *trabalho experimental* viabilizados entre os formadores, na fase preparatória do Programa.

Os aspectos e perspectivas de trabalho *prático experimental*, sumariamente referidos, definem traços gerais do contexto em que se introduziu *Vês de Gowin* (VG) e *Mapas de Conceitos* (MC). Apresentam-se, em 2. *Vês de Gowin* e *Mapas de Conceitos – recursos para (re)conceptualizar actividades experimentais*, alguns dos pressupostos e propósitos que fundamentam perspectivas e orientações subjacentes à sua utilização no ensino das Ciências. Referem-se recursos, derivados de estudos empíricos e coincidentes com bibliografia pré-seleccionada, sugeridos no grupo de Química, especificamente destinados a promover, na implementação de "Percurso Experimentais", a articulação e integração de conhecimento teórico-conceptual com conhecimento metodológico-processual.

Neste contexto, apresentam-se também algumas referências bibliográficas que poderão ajudar a compreender e aprofundar algumas das tendências actuais do ensino das Ciências, nas quais estes recursos heurísticos surgem e se vão consolidando. Os VG e MC, construídos em diversos momentos do Programa, apresentam-se em 3. *Vês de Gowin* e *Mapas de Conceitos Construídos para Desenvolvimento de "Percurso Experimentais"*. Apresentam-se também, sumaria e sequencialmente, resumos das perspectivas que se foram construindo no grupo de Química (e nos quatro grupos em que posteriormente este se subdividiu), para melhor se poder apreciar a sua pertinência e utilidade, designadamente na planificação reflectida de actividades práticas.

Finalmente, em 4. *Reflectindo ... Em Jeito de Conclusão*, exprimem-se algumas das reflexões sugeridas por *o que se fez e como se fez*. Estas devem ler-se tendo em conta o seu contexto, particularmente de proximidade dos eventos a que se referem, e de pressão para se ultimarem diversos documentos que integram a presente série de publicações. Um e outra dificultam a necessária e desejável reflexão sobre os vários percursos formativos e investigativos, concebidos e concretizados. Os registos feitos ao longo do Programa, designadamente relatórios, ensaios e reflexões críticas, serão inestimáveis para análises aprofundadas do que se fez, como se fez, porque se fez, como se poderia melhorar, que condições e meios seriam para tal necessários, enfim, para, identificando aspectos mais ou menos positivos, negativos e suas eventuais causas, se proporem e fundamentarem alternativas, plausíveis e credíveis, para consolidação e aprofundamento de percursos formativos iniciados no Programa.

2. Vês de Gowin e Mapas de Conceitos – Recursos para (Re)Conceptualizar Actividades Práticas Experimentais

Como se depreende da sua leitura, as perspectivas de trabalho prático inspiradoras do documento "Percurso Experimentais" são incompatíveis com meros exercícios convergentes para elucidar a teoria, comuns em cursos de estatuto elevado (Hodson, 1993). De algum modo pretendeu-se, e pretende-se, que constituísse, e constitua, um recurso para operacionalizar a construção de caminhos de complexa integração dialética de conhecimento conceptual e processual, designado por Bachelard como "...uma fina dialéctica que sem cessar vai da teoria à experiência para voltar da experiência à organização fundamental dos princípios" (Rosmorduc, 1983, pág. 62).

Para os professores de Ciências esta integração será tanto mais difícil e complexa quanto menores forem as suas vivências, bem sucedidas, de integração daquelas dimensões. A generalidade das suas experiências, enquanto estudantes, terá sido de exposição a vastos conteúdos científicos e a execuções laboratoriais padrão e, maioritariamente, descontextualizadas. Tais experiências, desvalorizando, ou não promovendo, o relacionamento com conhecimento conceptual, terão proporcionado aprendizagens limitadas acerca da utilidade dos processos científicos fora da escola, bem como acerca da sua aplicação em situações observadas, ou observáveis, em quotidianos, ou cenários específicos, exteriores à escola (Gallager, 1991). Por outro lado, a maioria dos professores não terá tido oportunidade de se envolver em programas de investigação em Ciências e/ou em Didáctica das Ciências, exceptuando-se experiências episódicas, eventualmente, em programas de Mestrado. Igualmente pouco prováveis, em actividades lectivas correntes, terão sido as oportunidades de orientar actividades práticas, olhando para objectos exteriores à escola numa perspectiva investigativa.

Nesta conformidade, explorar e valorizar diferentes olhares sobre os mesmos objectos, como pretendeu o Programa a que se vem aludindo, requer a criação de condições para os professores participantes, em equipas, realizarem percursos investigativos, respeitando e valorizando saberes e competências, reconhecendo assim complementaridades indispensáveis ao desenvolvimento de trabalho cooperativo. Estratégias deste tipo são promissoras de desejáveis mudanças no ensino das Ciências por, entre outros aspectos, poderem estimular dialogicamente a construção de saberes requeridos para transpor aprendizagens então realizadas para cenários escolares comuns. De entre as mudanças desejáveis, destacam-se as passíveis de promover cultura científica. É fundamental que o ensino das Ciências se dirija explicitamente à (re)construção de conhecimento científico necessário para descrever, interpretar e explicar fenómenos do mundo material e experiências do quotidiano, promovendo o que Shulman (1987, citado em Fouad, & BouJaoude, 1997) designa de *cultura científica de nível elevado*. Nesta perspectiva, *bons professores de ciências* transformam a sua compreensão das ciências, de modo a que o seu conhecimento se torne acessível e compreensível para os alunos. Todavia, segundo o mesmo autor, ensino deste tipo - *bom ensino de ciências* -, requer profundo conhecimento de conteúdos, sustentado e enformado por modelos de ensino apropriados - incluindo ciclicamente compreensão, transformação, instrução, reflexão e avaliação.

A ideia de cultura científica de nível elevado interliga-se com a de aprendizagens significativas, em oposição a aprendizagens memorísticas (Novak & Gowin, 1996, p. 23). Assim, promover padrões desejáveis de cultura científica exige, necessariamente, a integração de componentes teórica e prática no ensino das Ciências, obrigando a significativas mudanças. Estimular estas requer formação continuada de professores, dirigida também à concepção e construção de recursos, materiais e estratégicos, coerentes com inovações ambicionadas. Entre estas mudanças destaca-se estimular o estabelecimento de relações entre objectos e cenários quotidianos exteriores à escola e conteúdos curriculares de Ciências do Ensino Secundário.

É neste contexto que ao grupo de Química, naturalmente, se sugeriu alguma bibliografia pré-seleccionada, especificamente para auxiliar no planeamento e implementação de "Percurso Experimentais", e que veio a revelar-se relevante para, estimulando aprendizagens significativas, ajudar a integrar dimensões teóricas e experimentais de Ciências (White & Gunstone, 1992; Calvet, M. 1997; Goldsworthy & Feasey, 1997). Simultaneamente, aproveitando e explorando relações com os projectos em que os professores-formandos estavam empenhados, afloraram-se alguns problemas específicos de aprendizagem (e.g. Pedrosa & Dias, 2000). Beneficiando da circunstância de trabalho intensivo com professores, condicionado por preocupações com a qualidade das aprendizagens dos alunos, pretendeu estimular-se a tomada de consciência de alguns dos problemas nesta área, encurtando distâncias entre investigação em Didáctica das Ciências e professores (Pedrosa, 1999) e promovendo questionamento de inspiração construtivista e metacognitiva (ver Brochura 1, capítulo 2). Facultaram-se exemplares de mapas de conceitos e outros recursos (e.g. Pedrosa *et al*, 1997) preparados pelo grupo de Química no âmbito do projecto de investigação PCSH/C/CED/879/95. O facto de estes materiais terem sido utilizados em turmas comuns do 10º ano de escolas do nosso sistema educativo (Pedrosa *et al*, 1999) poderá resultar em acréscimo de credibilidade e relevância. Expectativas de viabilidade de articulação e integração curriculares - expectativas de exequibilidade - poderão também aumentar a confiança e entusiasmo de professores-formandos para, em futuros próximos, os transporem para as suas actividades lectivas.

3. Vês de Gowin e Mapas de Conceitos Construídos para Desenvolvimento de "Percurso Experimentais"

As professoras-formandas aderiram e tentaram construir VG e, mais tarde, reconhecendo o potencial e complementaridade de MC, entusiasmaram-se e arriscaram também, para este efeito, estrear-se nesta tarefa. A construção de VG foi relevante em fases diversas dos "Percurso Experimentais", desde logo na clarificação de problemas a investigar no âmbito do grupo de Química - identificação e definição de novos problemas – e, conseqüentemente, de outros percursos investigativos, tantos quantos os identificados e seleccionados. Foi também importante, conjuntamente com MC, no planeamento da parte destes percursos realizada em laboratórios da Escola Secundária de Sá da Bandeira.

Apesar de ser novidade a utilização prática destes recursos com propósitos de futuras transposições didácticas, o envolvimento das professoras na sua construção estimulou reflexões e discussões indispensáveis à realização, em grupo, dos percursos investigativos, aparentemente com níveis adequados de satisfação e de conforto. O seu planeamento centrou-se não só no *que fazer*, como também e principalmente, no *porque fazer*. Assim, as actividades que os integraram mobilizaram e integraram conhecimento teórico e processual, bem como competências requeridas ao desempenho das tarefas necessárias, com preocupações de rigor e eficiência.

Por se tratar de instrumentos que se revelaram muito úteis e porque aparentemente não integravam a panóplia dos correntemente utilizados no quotidiano das professoras-formandas participantes, apresentam-se VG e MC construídos em momentos diferenciados do Programa, decorrentes das interpretações, discussões e apropriações realizadas pelos diversos grupos. Para melhor se poder apreciar da sua pertinência e utilidade, designadamente na planificação reflectida de actividades práticas, apresentam-se, sumária e sequencialmente, resumos das perspectivas que, no grupo de Química e subseqüentes quatro sub-grupos, se foram construindo. Apresentam-se, em traços gerais, aspectos relevantes dos contextos em que cada um daqueles recursos foi construído, recorrendo preferencialmente a registos documentais então apresentados.

Às professoras-formandas de Química apresentou-se e distribuiu-se o documento de trabalho "Percurso Experimentais" para, interactiva e articuladamente, clarificar a questão originalmente formulada e se planearem actividades a desenvolver, tendo em vista contribuir para encontrar respostas. Clarificada e redefinida a questão originalmente formulada (e apresentada na sessão plenária de 99/06/26, SOBREVIVER NO "BURACO". COMO? - ver Anexo II), formularam-se questões mais específicas. Disponibilizou-se, com idêntico propósito, material bibliográfico contendo exemplos de VG (Calvet, 1997), construídos em contextos de Ciências escolares, e sugestões de ferramentas auxiliares de planificação experimental utilizadas em pequenos projectos implementados, também, em contextos de Ciências escolares (Goldsworthy & Feasey, 1997). Simultaneamente, facultaram-se MC preparados e utilizados em projectos de investigação-acção com professores de Ciências (Pedrosa et al, 1999).

Relativamente à clarificação da primeira questão a investigar, processou-se interactivamente, formulando hipóteses, discutindo e articulando algumas teorias e conceitos, particularmente os constantes dos currículos de Química do Ensino Secundário, prevendo procedimentos e processos necessários para procurar respostas às perguntas formuladas. Desta actividade resultou a selecção de material para recolha e armazenamento de amostras, sua rotulagem, preparação e efectivação de registos de observações e de dados recolhidos *in situ*, apresentados em Anexo 3, bem como a construção do VG apresentado na Figura 1.

No terceiro período de sessões presenciais, designado por Momento III (vide documentos preparatórios e calendários do Programa), que decorreu em espaços laboratoriais da Escola Secundária de Sá da Bandeira, Santarém, as professoras-formandas de Química distribuíram-se por quatro grupos de trabalho, duas por grupo, de acordo com as suas preferências. Os quatro projectos, planeados e desenvolvidos durante uma semana, emergiram de questões integradas na Figura 1 e de outras anteriormente surgidas e registadas nos cadernos de campo das professoras-formandas. De entre estas seleccionou-se : *Porque é que a vegetação aparece com caules cinza-metalizado e folhas verdes, com destaque para a figueira com figos (com localização devidamente especificada)?* Revisitou-se e retomou-se, por variadas razões, esta questão. 1) Pelo interesse que tinha já despertado; 2) Porque procurar respostas requereria que, a partir de contextos aparentemente insólitos em Química escolar, se revisitasse, discutisse e articulasse conceitos curriculares, se recorresse a procedimentos necessários e relevantes para desenvolver a dimensão experimental de Química no Ensino Secundário, os quais se não previam necessários no desenvolvimento de outros projectos; 3) Porque o percurso investigativo a planear a partir dela poderia revelar-se contexto rico em pretextos para interacções interdisciplinares, particularmente com um dos grupos de Biologia, ou seja, pareceu promissor para construir interdisciplinaridade.

Finalmente, seleccionaram-se quatro questões orientadoras, explicitadas nos VG das figuras 2.1, 3.1, 4.1 e 5.1, e discutiram-se alguns aspectos metodológicos (inovadores) para planeamento dos "Percurso Experimentais". Para planear e decidir o *que fazer* e *porque fazer*, os quatro grupos procederam a pesquisa bibliográfica e decidiram construir VG e MC. Estes transcrevem-se nas figuras 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 5.1 e 5.2.



Figura 1- V de Gowin construído pelo grupo de Química e apresentado na sessão plenária de 99/07/07



Figura 2.1- V de Gowin construído no planeamento do projecto relativo à questão "Que tipo de iões existem em "águas"?" (amostras recolhidas nos locais referidos na Figura 1)

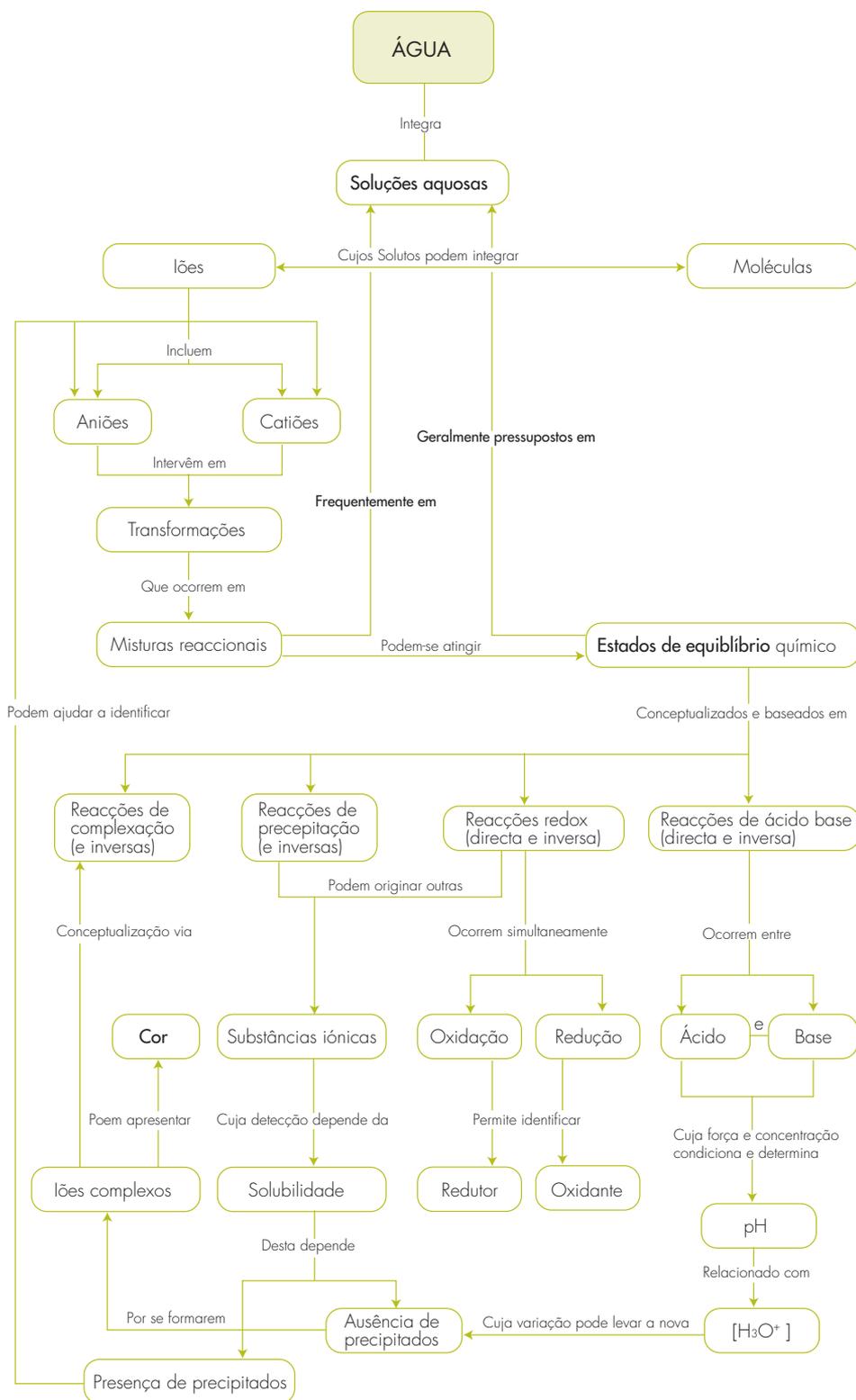


Figura 2.2- Mapa de conceitos construído no planeamento do projecto relativo à questão "Que tipo de iões existem em "águas"? (amostras recolhidas nos locais referidos na Figura 1) - apresentado em 99/07/24



Figura 3.1- V de Gowin construído no planeamento do projecto relativo à questão "Como se caracterizam materiais sólidos (precipitados)"? (amostras recolhidas nos locais referidos na Figura 1)

O conteúdo de *Procedimentos no VG* desta figura 3.1 é idêntico ao da categoria correspondente na figura 1; difere do desta (que se refere a uma fase anterior do Programa, interligada mas distinta) apenas por não incluir amostras de materiais dos restantes projectos (de Química). Deve esclarecer-se que a actividade do grupo que implementou este projecto, nesta fase do Programa, foi mais diversificada do que a expressa naquela categoria da figura 3.1. Este grupo realizou um conjunto de ensaios laboratoriais que, apesar de planeados, não chegou a incluir no correspondente VG.

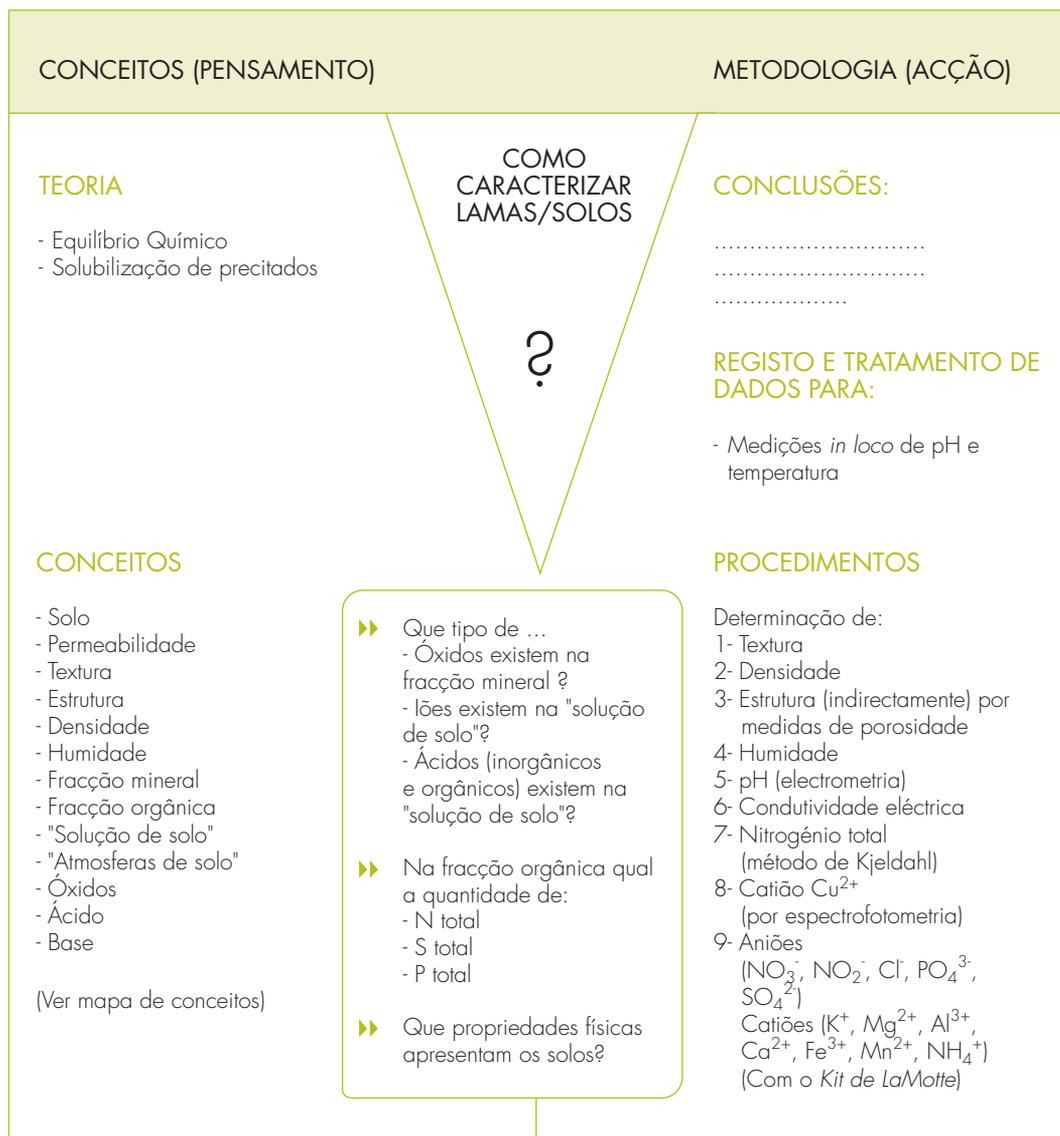


Figura 4.1- V de Gowin construído no planeamento do projecto relativo à questão "Como caracterizar lamas e solos"? (amostras recolhidas nos locais referidos na Figura 1)

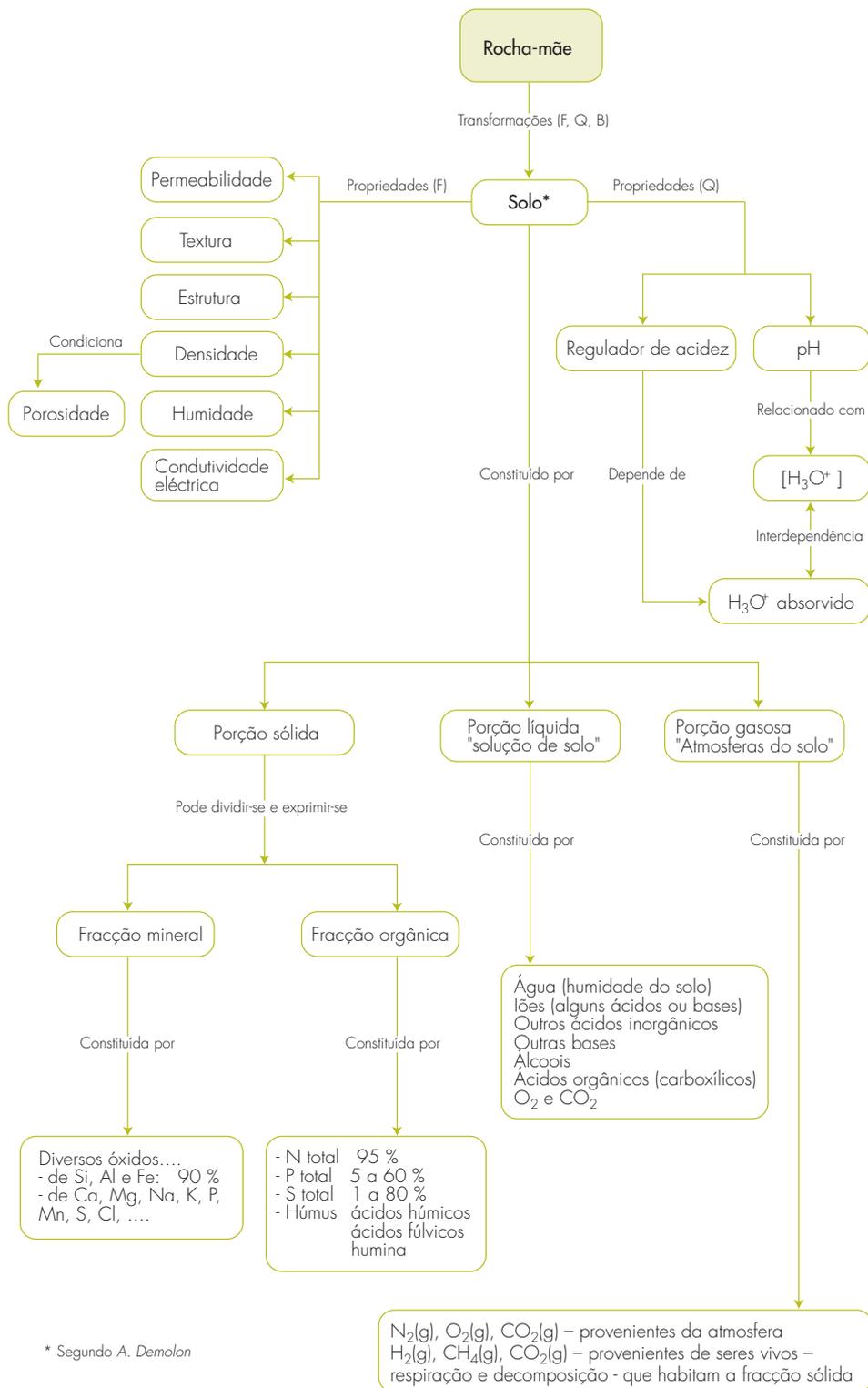


Figura 4.2- Mapa de conceitos construído no planeamento do projecto relativo à questão "Como caracterizar lamas e solos"? (amostras recolhidas nos locais referidos na Figura 1)



Figura 5.1- V de Gowin construído no planeamento do projecto relativo à questão "a figueira...dará informação sobre contaminação do espaço envolvente"? (amostras recolhidas nos locais referidos na Figura 1)

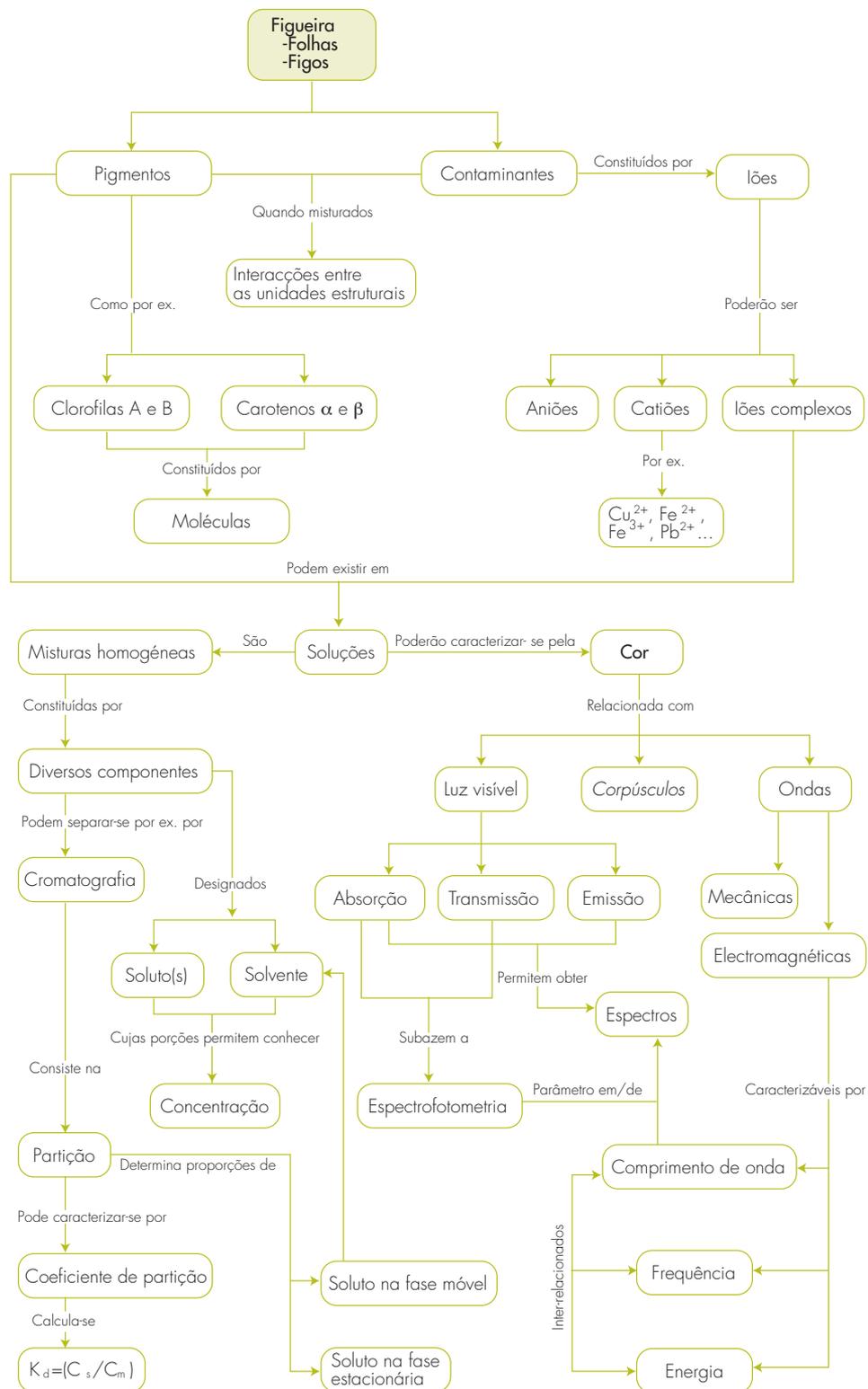


Figura 5.2- Mapa de conceitos construído no planeamento do projecto relativo à questão "a figueira...contaminações"? (amostras recolhidas nos locais referidos na Figura 1)

Nas Figuras 1, 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 5.1 e 5.2, apresentaram-se os diversos VG e MC construídos pelas professoras-formandas. Correspondem às versões efectivamente construídas no decurso do Programa, algumas das quais integraram o painel do grupo de Química, apresentado na sessão plenária de 99/07/24.

Trata-se, pois, de instrumentos de trabalho, recursos estratégicos utilizados para ajudar a articular e integrar dimensões teóricas e práticas de Ciências. Pretendeu-se que estimulassem e promovessem integração e articulação de conhecimentos teóricos necessários ao desempenho, informado e reflectido, de competências práticas e facilitassem, no futuro próximo, transposições de aspectos inovadores do Programa para situações lectivas correntes das professoras-formandas.

4. Reflectindo ... Em Jeito de Conclusão

Os VG e MC apresentados na secção anterior correspondem, como já se referiu, aos que foram efectivamente construídos no contexto e para efeitos do desenvolvimento do Programa. Como documentos de trabalho, devem considerar-se recursos estratégicos, ferramentas auxiliares na integração de conhecimento teórico e processual julgado relevante para ajudar a responder às perguntas formuladas nos "Percurso Experimentais". Para facilitar a sua apreciação, incorporou-se, ao longo deste capítulo, informação relevante relativa aos contextos em que se foram desenvolvendo. Tratando-se de documentos construídos na fase de planeamento, permanecem em aberto as secções *Conclusões* e as relativas a *Registo e Tratamento de Dados*, apresentando-se apenas referências gerais a medições ou a ensaios, ficando, também, em aberto registos ou dados propriamente ditos.

Por outro lado, em "*Procedimentos*" os graus de desenvolvimento aparecem diversificados nos VG construídos pelos quatro grupos (Figuras 2.1, 3.1, 4.1 e 5.1). Tendo-se optado pela fidelidade àqueles documentos de trabalho, os procedimentos efectivamente planeados e implementados não correspondem necessariamente aos constantes das figuras apresentadas. De um modo geral, realizou-se bem mais do que o que se infere dos VG.

As discrepâncias entre o que efectivamente se realizou e o expresso nos VG de planeamento devem-se à diversidade e ao número de tarefas que os grupos optaram por realizar em períodos manifestamente muito curtos. Apesar destas discrepâncias decidiu-se respeitar o trabalho das professoras-formandas, apresentando VG e MC tal como elas os construíram, aproveitando a circunstância para destacar o carácter provisório destes recursos estratégicos e heurísticos de planeamento - porque inacabados e porque requerem reflexão e revisão.

Como exemplo da necessidade de repensar os recursos apresentados, atente-se nas três perguntas formuladas para especificar a questão central da Figura 3.1. Aparecem confusas, ambíguas e passíveis de interpretações problemáticas, pelo que carecem de clarificação e reformulação. Novamente, a título de exemplo, se os objectos de estudo são *precipitados*, que ideia se pretende exprimir, ou transmitir, com *Solúveis em água*? Expressões como esta requerem cuidada reflexão e conseqüente reformulação, para eliminar, ou reduzir, ambigüidades ou imprecisões. O aparecimento de algumas delas estará certamente associado às fortes pressões de tempo que atravessaram todo o Programa, conjuntamente com a diversidade e novidade de tarefas propostas, designadamente construção de VG e MC. Porém, as dificuldades de gestão de tempo para implementação de "Percurso Experimentais" variaram de grupo para grupo, como de resto era esperado.

Se, por uma ou outra razão, se pretender ajuizar das condições em que se construíram os instrumentos heurísticos aqui apresentados, importa tentar imaginar e reconstruir a dinâmica do Programa e a variedade de actividades que foram articulando e estruturando. É necessário tentar recriar as circunstâncias concretas em que o Programa se desenvolveu. Destacam-se as impostas pela calendarização de actividades com fortes constrangimentos temporais e espaciais, decorrentes,

designadamente, de deslocações frequentes e de conseqüentes mudanças nos ambientes de trabalho. A leitura de alguns capítulos do Tomo 1 da Brochura 1 afigura-se indispensável para melhor se apreciar o ritmo alucinante do Programa – configurando aparente contradição entre tal ritmo e os propósitos de se estimular e promover planeamento e implementação de actividades reflectidas.

Embora se não pretenda aqui, e de momento seja prematuro, avaliar recursos e estratégias adoptados no desenvolvimento dos "Percurso Experimentais", a construção dos recursos heurísticos, VG e MC, pareceu útil e afigura-se promissora: 1) pelo entusiasmo e empenho manifestados pelas professoras-formandas na sua construção; 2) por as professoras-formandas a terem transposto, ou melhor, terem transposto a sua construção como estratégia de planeamento para percursos experimentais que, presentemente, implementam com os seus alunos. Crê-se que a generalizada preocupação, embora latente, de as aprendizagens realizadas no Programa poderem vir a ser úteis e frutuosas na sua actividade profissional, terá contribuído decisivamente para que as professoras-formandas arriscassem inovar, enfrentando também o desafio que a construção destes recursos configurou.

Apesar do sucesso aparente associado à construção destes recursos, nos contextos e com os propósitos referidos, importa reflectir sobre a experiência deste Programa e tê-la em conta em futuras iniciativas de formação com propósitos semelhantes. Teria sido benéfico e desejável a previsão e criação de condições para, considerando a informação recolhida (resultante de pesquisa bibliográfica e de ensaios laboratoriais para responder às questões orientadoras dos projectos desenvolvidos), se discutir, fundamentada e criticamente, informação considerada rigorosa, relevante, completa, limitada ou insuficiente. Avaliar os percursos experimentais realizados, designadamente discriminando e qualificando, com base naqueles critérios, a informação recolhida, criaria oportunidades valiosas para cada grupo ajuizar da robustez ou fragilidade, relevância ou irrelevância, de conhecimentos mobilizados e construídos em todo o processo, e de repensar, introspectiva e retrospectivamente, os "Percurso Experimentais" implementados. A operacionalização da dimensão formativa destas estratégias, cognitivas e metacognitivas (e.g. Rodriguez, 1998), poderia fazer-se revisitando VG e MC construídos, repensando-os e reformulando-os. Avaliar-se-iam, assim, graus de consecução das diversas fases dos "Percurso Experimentais" realizados, reformular-se-iam VG e MC, redefinindo, reflectida e fundamentadamente, planeamentos e ensaios laboratoriais que o requeressem.

Seria igualmente desejável que se alargassem os processos de avaliação dos percursos experimentais a outros grupos disciplinares, partilhando-os e discutindo-os com eles, repensando "Percurso Experimentais" realizados, também para construir e aprofundar dimensões interdisciplinares emergentes do Programa, com referência e particular atenção aos currículos das Ciências no Ensino Secundário. Por um lado, no sentido de se explorar para integrar e articular diferentes disciplinas com os actuais currículos, por outro, fundamentadamente propor articulações e integrações curriculares desejáveis. Explorar este aspecto reveste-se da maior importância pela mais valia que tal contribuição deveria configurar em próximas revisões curriculares. Construir e aprofundar interdisciplinaridade foi, de resto, um dos aspectos que se pretendeu desenvolver no Programa, tendo ficado

aquém das expectativas de formandos e de formadores. A exposição e vivência de abordagens inovadoras para aprender Ciências e para as ensinar, a escassez, ou mesmo ausência, de abordagens multidisciplinares e interdisciplinares em vivências anteriores de formadores e de formandos, seja no papel de aprendizes seja no de professores, bem como algumas carências de formação disciplinar, científicas e didáticas, serão apenas alguns dos múltiplos factores que terão contribuído para que a dimensão interdisciplinar do Programa não tenha, em geral, correspondido às expectativas.

Agradecimentos: reportando-nos aos Percursos em que a construção dos recursos aqui apresentados se integraram, exprimimos apreço pelo generalizado empenho e entusiasmo e, agradecemos a cooperação das professoras-formandas. Devemos reconhecimento especial, pela disponibilidade para lerem versões anteriores deste capítulo, ao António Veríssimo e à Helena Dias; agradecemos-lhes as críticas, discussões e sugestões.

Referências:

- Calvet, M. (1997). La comunicación escrita en el trabajo experimental, *Alambique Didáctica de las Ciencias Experimentales*, 12, 63-73.
- Fouad, A.; BouJaoude, S. (1997). An Exploratory Study of the Knowledge Base for Science Teaching, *Journal of Research in Science Teaching*, 34 (7), 673-699.
- Gallagher, J. J. (1991). Prospective and practicing secondary school science teachers' knowledge and beliefs about the philosophy of science, *Science Education*, 75, 121-133.
- Goldsworthy, A.; Feasey, R. (1997). *Making Sense of Primary Science Investigations* (revised edition). ASE (Ed).
- Hodson, D. (1993). Re-thinking Old Ways: Towards A More Critical Approach To Practical Work In School Science, *Studies in Science Education*, 22, 85-142.
- Novak, J. D. & D. B. Gowin (1996). *Aprender a Aprender*. Lisboa, Plátano Edições Técnicas.
- Pedrosa, M. A. (1999). Learning Outcomes on Matter and its Transformations: Implications for Research and Science Teacher Professional Development. in O. de Jong et al (Eds.), *Bridging the gap between theory and practice: What research says to the science teacher*, ICASE, 227-243, 1999.
- Pedrosa, M. A.; Dias, M. H. (2000). Water in Context: Many Meanings for the Same Word, *CERAPIE* (Chemistry Education: Research And Practice In Europe), publicação electrónica (revista por pares) http://www.uoi.gr/conf_sem/cerapie, 1 (1).
- Pedrosa, M. A.; Dias, M. H.; Lopes, J. M.; Santos, M. P. (1997). *Água ... Que substância tão especial!*. Universidade de Aveiro (Ed.).
- Pedrosa, M. A.; Dias, M. H.; Martins, M. I. (1999). Inter-relações CTS e Concepções Alternativas – Um Caso em Química Escolar. in ENCIGA (ed.), *XII Congresso dos Ensinantes de Ciências*, 95-102.
- Rodriguez, A. J. (1998). Strategies for Counterresistance: Toward Sociotransformative Constructivism and Learning to Teach Science for Diversity and Understanding, *Journal of Research in Science Teaching*, 35(6), 589-622.
- Rosmorduc, J. (1983). *De Tales a Einstein. História da Física e da Química*. Lisboa, Colecção Universitária 4, Editorial Caminho.
- White, R. T.; Gunstone, R. F. (1992). *Probing Understanding*. London, Falmer Press.

Anexo 1

Percursos Experimentais

Esquemática e sinteticamente, explicitam-se etapas, a considerar interactiva e dialecticamente, em abordagens investigativas transponíveis para contextos escolares de ensino das ciências:

1. Identificação e caracterização de problemas despertados pela apreciação in loco da MSD, passíveis de reflexão e tratamento para efeitos de formação e desenvolvimento profissional tendo em vista a contextualização do ensino das ciências, pela consideração explícita de interrelações CTS, a valorização de percepções e conhecimento prévio dos aprendizes e a integração de efectivas abordagens investigativas para aprendizagens significativas e promoção de cultura científica.
2. Selecção de sistema(s), ou de aspectos parcelares, a investigar e sua fundamentação.
3. Identificação de conhecimento relevante e de fontes de informação para tratamento subsequente às escolhas feitas em 2.
4. Formulação de hipóteses a testar em laboratório, campo, sala de aula, etc.
5. Elaboração de um plano de investigação e distribuição de tarefas específicas pelos membros do pg, se necessário.
6. Previsão de dados a recolher e/ou de resultados a obter.
7. Execução de plano(s) de investigação, se e quando necessário.
8. Confronto entre previsões e dados e/ou resultados.
9. Interpretação das discrepâncias identificadas em 8.
10. Redefinição e reformulação de etapas que, decorrendo de 8 e 9, se julguem necessárias ou importantes, e nova execução de plano(s) de investigação, se e quando necessário.

Na circunstância da presente Acção (Ensino Experimental de Ciências), cada pg deve, para cada percurso experimental concebido e executado:

- I. Organizar os registos efectuados num documento que destaque a relevância da investigação realizada, sintetize e fundamente recursos, metodologias e técnicas utilizados no desenvolvimento do percurso experimental e avalie criticamente, com referência às hipóteses de trabalho formuladas em 4., os resultados obtidos e as conclusões que o percurso experimental possa sustentar, ou outros percursos experimentais que possa sugerir.
- II. Comunicar ao gg o conteúdo do documento a que se refere I. participando no debate que se seguirá.

A organização da Acção deve, pois, ter em conta estes aspectos, prevendo tempo, espaços e materiais para a concretização do anteriormente preconizado.

Anexo 2

“Sobreviver no Buraco...Como?”



Anexo 3

Catalogação e informação recolhida nos diversos locais - primeira apreciação. Em cada local de recolha de água recolheram-se também lamas e, nos casos julgados de interesse potencial para desenvolvimento de percursos experimentais, outros materiais com aparência distinta.

Local		Toma	Rótulo	Aparência	Medidas	
Tapada/outra...	Paragem # esq.				pH	T/° C
Grande Corta	1		Q 1.1 Q00.1	Água	2,15	20
	2		Q00.2	Água Lama	2,31 e 2,32	20
1º ou principal	1				2,33	20
	3		Q 0.1.1a Q 0.1.1b	Água	2,30	20
		Rec. plástico Rec. vidro	Q 01.2	Água Lama	2,30 "	20 "
"	1		Q 1.2	Água c/ espuma - a quando da colheita		
"	1		Q 1.3	Lama		
Entre tapadas	2		Q 2.1	Água	2,18	20
	2		Q 2.2	Lama		
"	2		Q 2.3.1	Precipitados amarelados		
"	2		Q 2.3.2	Precipitado branco-azulado		
"	3		Q 3.1	Peq. curso de água entre tapadas	2,28	20
Cascata	4			Água - medidas no local; não se recolheu amostras (baixa profundidade).	2,31	20
	4		Q4.1	Estalactite		
	5		Q5.1	Estalactite		
	5			Água - medidas no local; não se recolheu amostras (baixa profundidade).	2,34	20
	6			Água - medidas no local; não se recolheu amostras (baixa profundidade).	2,37	20
"	7		Q7.1	Água	2,09	20
"	7		Q7.2	Lama		
"	7		Q7.3	Precipitados (2 sacos) amarelados e azulados		
"	8		Q8.1	Figureira: tronco, folhas e figos		
"	9		Q9.1	Cinzas		
"	9		Q9.2	Sólidos amarelados e avermelhados		
"	10		Q10.1	Solução aquosa vermelho-acastanhado	1,80	20,4
"	10		Q10.2	Lamas		
"	10		Q10.3	Precipitados diversas cores (3 no mesmo saco)		
"	11		Q11.1	Solução aquosa amarelada	2,08	20,4
"	11		Q11.2	Lamas		
"	11		Q11.3	Precipitados branco-esverdeados		
"	12		Q12.1	Precipitados azul claro		
"	12		Q12.2	Precipitados verdes		

3

Equipamentos e Técnicas

3.1 Absorção de luz em sólidos e líquidos

J.M.SERRA

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Introdução

A escolha do estudo das propriedades ópticas de sólidos e líquidos no âmbito da Acção de Formação no Ensino Experimental das Ciências resultou do impacto visual que a zona da Mina de S.Domingos teve no grupo de formandos. Este impacto, de resto, estende-se a quem quer que visite estas paragens como o atesta este fragmento do jornal "O Público" de 16/07/99:

"É um arco-íris de morte aquele que se vislumbra nas minas de S.Domingos, no Alentejo, onde os tóxicos transformaram a paisagem num delírio de cores"

O contraste entre a alegria das cores e a quase ausência de vida, de solos e águas poluídas, levou um grupo de formandos a eleger o estudo da cor e da luminosidade como condicionante da vida em meio aquático. Neste contexto assume particular relevância o estudo da absorção de luz.

O texto que se segue não pretende de forma alguma substituir os livros de texto que tratam estes assuntos, mas indicar caminhos passíveis de serem explorados do ponto de vista experimental em contexto escolar. Não é possível, num espaço tão exíguo como o deste texto, tocar em todos os aspectos relevantes ou fazer discussões completas e aprofundadas sobre este assunto sem que nos fique a sensação de que muitas outras coisas ficarão por dizer. Daí ser extremamente importante a existência na escola de um espaço de discussão das experiências já realizadas ou a realizar ou dos resultados obtidos.

Um sistema de medida

De todo o espectro electromagnético, desde as ondas de rádio, com comprimentos de onda da ordem de 10^3 m até aos raios *gamma*, com comprimentos de onda

de 10^{-12}m , apenas uma apertada janela (de 7×10^{-7} a 4×10^{-7}) é por nós directamente percebida; é aquilo a que chamamos luz. Os nossos olhos são aliás uns óptimos detectores de luz e estão adaptados a esta zona do espectro como se pode ver na Figura 1.

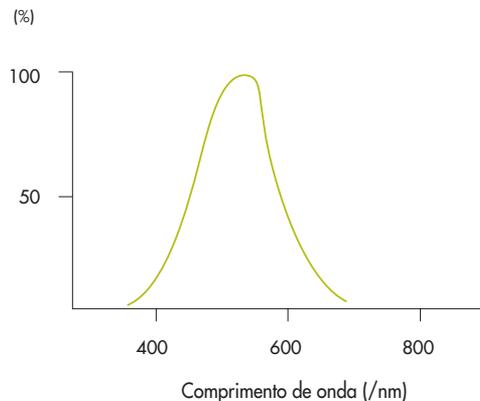


Figura 1- Sensibilidade relativa do olho aos vários comprimentos de onda. A curva refere-se à visão adaptada à luz, designada por "photopic".

Os nossos olhos possuem, com efeito, um sistema duplo para detecção da luz de diferentes intensidades, mas só um destes sistemas fornece informação sobre a cor dos objectos. A luz é colectada em células receptoras de dois tipos distintos: os bastonetes e os cones. Apenas estes últimos são sensíveis à cor e subdividem-se por sua vez em três subtipos. Cada um destes subtipos apresenta um espectro de absorção com máximos em 450 nm, 540 nm e 580 nm. Estes máximos correspondem ao azul, verde e vermelho, ou seja, o que designamos por cores primárias, a partir das quais podemos formar qualquer outra cor.

É, pois, a esta zona do espectro electromagnético que nos iremos restringir neste texto.

A primeira questão que se põe quando pensamos em estudar a luz e algumas das suas propriedades é: como a podemos medir?

Veremos em 4.2 um exemplo de utilização de um sistema de medida de luz integrado num instrumento mais complexo – o espectrofotómetro. Mas vamos por agora centrar a nossa atenção em torno do sistema de medida propriamente dito. O componente fundamental deste sistema é um transdutor - um dispositivo que converte uma grandeza (a luz) noutra grandeza (uma corrente eléctrica); neste caso é um fototransistor de silício.

O esquema eléctrico de um sistema de medida que pode ser utilizado para medir intensidades luminosas está indicado na Figura 2. A resposta relativa de um detector deste tipo pode encontrar-se em 4.2.

O circuito indicado na Figura 2 é um amplificador de transresistência (converte uma corrente em tensão), cuja tensão de saída é dada por

$$V_o = -R_L I_L \quad (1)$$

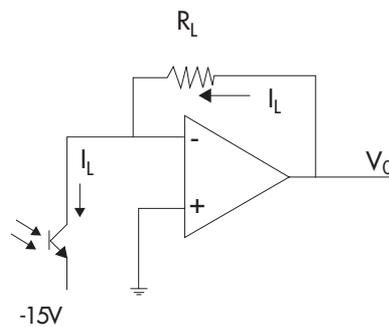


Figura 2- Esquema eléctrico do circuito detector de luz.
O Amplificador operacional é um LF356.

Os fotões que incidem no fototransistor dão origem a uma corrente I_L . Para tensões colector-emissor constantes (>2 V)

$$I_L = kI_{lum} \quad (2)$$

onde k é uma constante de proporcionalidade e I_{lum} a intensidade luminosa.

Uma vez que não fluem correntes nas entradas do amplificador operacional, essa corrente passa por R_L . Por sua vez a entrada inversora do operacional constitui nesta configuração uma terra virtual, pelo que a tensão neste ponto é zero. A queda de tensão em R_L é igual a V_o e vem, portanto, dada pela expressão acima.

Variando a resistência R_L , é possível variar a amplificação (sensibilidade à luz) do circuito.

O detector fornece um sinal que é um integral das intensidades colectadas em todos os comprimentos de onda a que é sensível. Este sistema permite a realização de experiências muito simples, como veremos nos exemplos que se seguem. No caso do espectrofotómetro, é usado para além do circuito de amplificação de luz, um monocromador que selecciona apenas um comprimento de onda. Obtém-se, então, o que podemos designar por detector espectral.

A primeira experiência

Como varia com a distância a intensidade luminosa emitida por uma lâmpada? Tomemos uma lâmpada que radia uma potência P . Esta radiação emitida propaga-se no espaço com uma distribuição aproximadamente esférica, admitindo que o filamento é pontual. Mesmo não sendo pontual, a uma distância muito superior ao seu comprimento, essa aproximação é válida.

À medida que nos afastamos da fonte de luz, a intensidade por unidade de área vai assim decrescendo, segundo:

$$I_L = \frac{P}{4\pi D^2} \quad (3)$$

Uma vez que esta intensidade é convertida em corrente eléctrica no detector teremos finalmente uma tensão de saída no amplificador

$$V = R_L I_L \propto R_L \frac{1}{D^2} \quad (4)$$

Se pretendermos obter experimentalmente esta lei num laboratório normal, com luz natural ambiente, como poderemos distinguir a luz do sol, mesmo que difusa e que entra pelas janelas, da luz emitida pela nossa lâmpada?

Repare-se que, quando nos deslocamos no laboratório, alteramos as condições de iluminação efectiva no detector, devido a reflexões diferentes, o que levaria a uma variação da luz medida que não tem que ver com o que pretendemos medir.

Claro que podemos optar por realizar a experiência no escuro. Mas isso também não é muito prático.

Uma forma simples de descontar o efeito da luz ambiente consiste em efectuar duas medidas em cada ponto; a primeira com a lâmpada acesa e a segunda com a lâmpada apagada. Sendo o nosso sistema de medida linear (ou seja, um sistema em que por exemplo, aumentar para o dobro a luz detectada corresponde a aumentar para o dobro a tensão de saída do amplificador), torna-se então fácil descontar o efeito da luz ambiente.

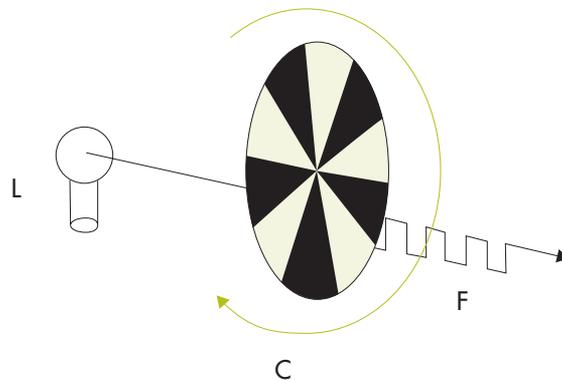


Figura 3 – Ilustração da técnica de medida usando um talhador ("chopper").
L- Lâmpada; C- Talhador

Em vez de apagar e acender a lâmpada, podemos usar uma espécie de ventoinha com pás que corta periodicamente a luz proveniente da lâmpada. Neste caso passaremos a ter um sinal variável (com a frequência do talhador) à saída do amplificador. O valor que nos interessa é dado pela amplitude do sinal.

Esta técnica de talhamento ou "chopping" é bastante usada em muitos sistemas de medida, nomeadamente nos que incluem amplificadores lock-in. Uma outra alternativa seria a de variar a intensidade da lâmpada com uma frequência de algumas dezenas de hertz e medir a amplitude do sinal detectado pelo fototransistor.

A segunda experiência

A motivação para a realização desta experiência surgiu da necessidade de estudar a variação da luminosidade em função da profundidade da água da "corta" da Mina de S.Domingos. Uma descrição detalhada do sistema de medida e resultados obtidos na lagoa da "corta" encontra-se em 3.3.

Como simular este sistema no laboratório?

Uma primeira aproximação consiste em usar a configuração indicada na Figura 4. A radiação solar presente na Mina é aqui substituída por uma lâmpada de halogéneo de 20 W.

Existem, no entanto, diversos aspectos que têm que ver com o procedimento experimental e que importa considerar:

Uma vez que pretendemos estudar a variação da luminosidade em função da profundidade, parece lógico usar um recipiente cilíndrico cheio com o líquido a analisar e efectuar medidas da intensidade luminosa a profundidades cada vez maiores.

Qual a possível dificuldade neste tipo de medida?

Tendo em conta o que se disse durante a discussão da primeira experiência, facilmente se depreende que, se o feixe de luz da lâmpada não for um feixe de raios paralelos, o aumento progressivo da distância lâmpada-detector dará origem a uma diminuição suplementar da intensidade detectada que não tem nada a ver com aquilo que se pretende medir.

A alternativa consiste em manter a distância lâmpada-detector ao longo de toda a experiência. O aumento da profundidade é conseguido acrescentando cada vez mais líquido ao recipiente cilíndrico.

Como definir o ponto de profundidade zero?

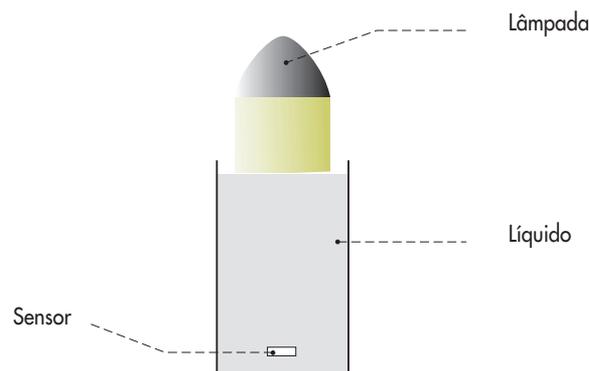


Figura 4 – Esquema da montagem usada para a medição da absorção de luz em profundidade.

Será a medida da intensidade colectada no fototransistor quando não existe líquido nenhum?

Sabemos que a intensidade de luz transmitida por um corpo homogéneo decresce exponencialmente com a sua espessura de acordo com a relação

$$I = I_0 e^{-\alpha x} \quad (5)$$

onde (alfa) é o coeficiente de absorção do material e I_0 a intensidade do feixe em $x=0$ ou seja, o valor da intensidade do feixe que penetra no material. Ora a questão está precisamente aqui! O feixe de luz, ao atingir a superfície do líquido vai reflectir-se parcialmente. Portanto, a intensidade do feixe que efectivamente entra no líquido vem diminuída da fracção que é reflectida na superfície. Se tomássemos como ponto de profundidade nula a medida obtida no circuito detector sem nenhum líquido, observaríamos um degrau na curva da absorção em função da profundidade, que se deve exclusivamente ao coeficiente de reflexão do líquido e não ao que pretendemos medir. O primeiro ponto deve, por conseguinte, ser obtido com o sensor apenas levemente imerso no líquido.

A terceira consideração deriva do facto de estarmos a efectuar medidas com uma fonte de luz contínua. Qual o tipo de erros que podemos antecipar?

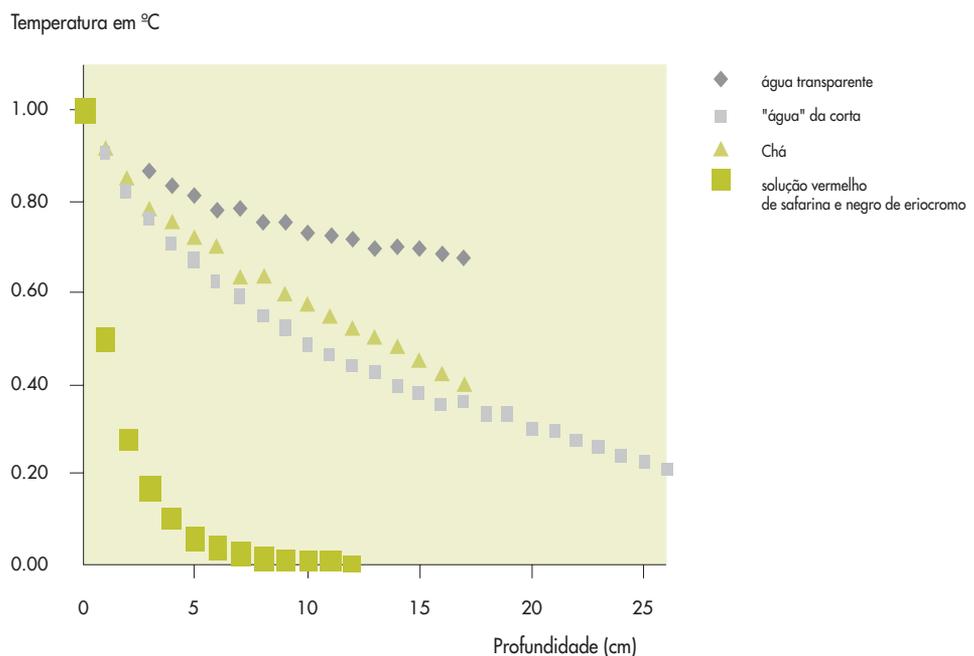


Figura 5 – Medidas da variação da intensidade luminosa em função da profundidade para diversas soluções. A "água" da corta refere-se a água recolhida na corta da Mina de S.Domingos.

O primeiro tem que ver com o envelhecimento da lâmpada. A intensidade emitida poderia ter variado entre o primeiro ponto medido e o último. As lâmpadas usadas têm uma vida média de 3000 horas e as experiências de absorção não duram mais do que uma hora, o que faz com que este aspecto não seja relevante. Um segundo tipo de erro pode ser mais crítico e resulta do facto de existir luz natural no laboratório, proveniente do Sol, que não conseguimos distinguir da nossa fonte. Uma forma de conseguir isolar as duas contribuições consiste em efectuar as medidas a uma dada profundidade, primeiro com a lâmpada acesa e depois com a lâmpada apagada. Desta forma, por subtracção, eliminamos a fonte "parasita". Esta é a técnica que já abordámos anteriormente.

Apresentam-se na Figura 5 alguns resultados obtidos em laboratório usando o sistema de medida atrás descrito.

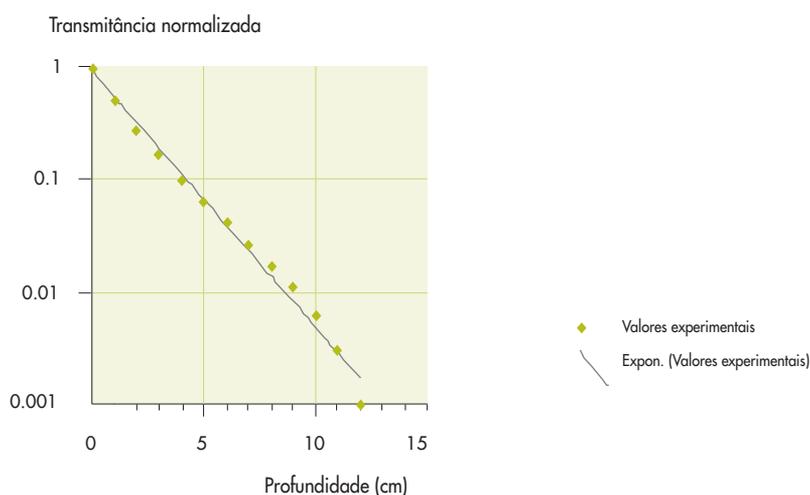


Figura 6 – Gráfico semi-logarítmico mostrando a variação exponencial da transmitância com a profundidade para uma das soluções. O ajuste aos dados experimentais dá $\alpha=0.525 \text{ cm}^{-1}$

A observação dos resultados indicados na Figura 5 mostra-nos que podemos distinguir perfeitamente líquidos com absorções muito diferentes (os casos extremos são a água límpida e a solução vermelho de safranina e negro de eriocromo). A curva do gráfico apresentado na Figura 6 mostra claramente a variação exponencial da transmitância com a profundidade e permite a determinação do coeficiente de absorção achando o declive da recta. No entanto, nem sempre é possível observar um comportamento exponencial do tipo indicado na eq(5).

Podemos apontar duas razões para esses desvios. Uma delas tem que ver com as condições experimentais e a outra tem que ver com o facto de usarmos um feixe policromático e não monocromático.

Quanto à primeira, repare-se que foi usado um recipiente cilíndrico, neste caso com um diâmetro de 8 cm aproximadamente. Uma vez que o feixe de luz não é um feixe de raios paralelos, existe a possibilidade de reflexões na parede do recipiente que são "apanhadas" pelo detector.

Quanto à segunda, lembremos que a eq(5) se refere a um feixe monocromático. O coeficiente de absorção depende do comprimento de onda, pelo que, no caso de usarmos um feixe policromático (como neste caso) poderemos observar um comportamento mais complexo, em que temos uma atenuação rápida dos comprimentos de onda para os quais o coeficiente de absorção é maior e, depois, uma cauda mais longa, correspondente aos comprimentos de onda menos atenuados. A título de exemplo, se usarmos um feixe com dois comprimentos de onda, obtemos uma curva da atenuação descrita por duas exponenciais.

Conclusão

Vimos neste pequeno texto alguns exemplos de utilização de um sistema de medida de intensidades luminosas, que foi utilizado tanto em trabalho de campo como em projectos experimentais no âmbito da Acção de Formação no Ensino Experimental das Ciências. Embora aplicado, neste caso, ao estudo da absorção de luz em líquidos, este sistema pode facilmente ser usado para ilustrar o princípio de funcionamento de inúmeros dispositivos hoje presentes nos nossos dias, desde o telecomando da televisão, passando pelas comunicações por fibra óptica, até aos leitores dos códigos de barras dos produtos do supermercado. Pensamos que esta pode ser uma ferramenta muito útil no sentido de trazer o mundo real para o laboratório.

Referências

- V.P. Coletta, "College Physics", Mosby 1994
- D.Haliday, R Resnick, " Physics", John Wiley & Sons, 1977
- Pires A.C.C.F., Ferreira D.M.S.R., Relatório da Acção de Formação em Ensino Experimental das Ciências promovida pelo Departamento do Ensino Secundário do Ministério da Educação, 1999

3.2 Uma discussão em torno da transferência de calor

J.M.SERRA

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Introdução

O texto que se segue, abordando tópicos como a medida de temperatura e transferência de calor, é consequência de uma escolha, por parte de um grupo de formandos da Física, como sendo a sua contribuição para um estudo multidisciplinar em torno da Mina de S.Domingos, objecto de estudo escolhido para a Acção de Formação no Ensino Experimental das Ciências. Não se pretende aqui delinear experiências completas, mas sim discutir conceitos e fornecer pistas para a resolução de problemas experimentais que vão surgindo à medida que se realizam as experiências.

Assim sendo, serão usados no texto alguns exemplos do trabalho desenvolvido por esse grupo, embora o texto não se esgote evidentemente neles.

Uma observação que durante a visita à Mina chamou a atenção desse grupo residiu na imensa variedade de cores e texturas presentes no terreno da Mina. Puderam então verificar, medindo, que a temperatura à superfície desses materiais era bastante diferente de uns para os outros. Concluíram que a diversidade de temperaturas superficiais tinha a sua origem em diferentes propriedades de absorção da radiação solar.

Ao efectuarem as medidas no campo, puderam igualmente observar que a temperatura variava à medida que se passava da superfície para o interior desses materiais. Bom, disseram, isto é porque conduzem o calor de maneira diferente.

Com efeito, muitas situações no nosso dia a dia envolvem frases como: isto nunca mais aquece; o leite já está frio...

Estas questões suscitam outras: o que é o calor? Como se transfere de um corpo para outro ou dentro do mesmo corpo?

Neste texto abordaremos precisamente alguns exemplos que visam ajudar à compreensão das respostas a essas perguntas. Não se pretende fazer aqui uma abordagem exaustiva deste assunto quer por razões de espaço, quer porque não é esse o objectivo que nos move. Para tal remetemos os leitores interessados para a bibliografia indicada nas referências.

O que é o calor e como se transfere?

Começaremos por uma definição que constitui uma resposta a uma dessas questões.

"O calor é energia em trânsito devido a diferenças de temperatura"

A resolução da segunda parte da interrogação acima posta leva-nos ao problema de como analisar sistemas em que estão envolvidas trocas de calor.

Começaremos por distinguir os processos de transferência de calor. Estes processos podem envolver transporte de massa ou não. Por exemplo, num sólido os processos de transferência de calor mais importantes não envolvem transporte de massa, enquanto que nos gases e líquidos é o contrário.

1- Quando num material existe um gradiente de temperatura, o calor flui da região de temperatura mais elevada para a de temperatura mais baixa. Neste caso falamos de transferência de calor por condução. A lei de Fourier indica-nos de que forma o fluxo de calor depende do gradiente de temperatura existente:

$$F = -k \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Ou seja, o fluxo de calor é proporcional ao gradiente de temperatura. A constante de proporcionalidade é designada de condutividade térmica.

2- Em muitas situações temos um sólido em contacto com um fluido (por exemplo água ou ar) a uma temperatura diferente. Diremos que, nesse caso, a transferência de calor é por convecção. O fluxo de calor vem, neste caso, dado por:

$$F = h(T - T_{\text{fluido}}) \quad (2)$$

onde h é designado por coeficiente de convecção.

3- O terceiro modo de transferência de calor é designado de radiativo ou por radiação, uma vez que qualquer superfície a uma temperatura diferente do zero absoluto emite energia sob a forma de ondas electromagnéticas. O fluxo de calor vem aqui dado por:

$$F = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{viz}^4) \quad (3)$$

em que T_{viz} representa a temperatura da vizinhança do sistema que engloba o corpo radiante, ε a emissividade e σ a constante de Stefan.

Em muitas situações, como veremos nos exemplos aqui abordados, apenas um destes modos de transferência de calor é significativo, levando a simplificações do nosso problema.

A medida de temperatura

Todas as medidas de temperatura apresentadas neste texto foram obtidas usando termopares como sensores de temperatura. Neste caso foram usados (fabricados pelo grupo de formandos) termopares de Níquel-NíquelCrómio (Ni-NiCr) em conjunto com multímetros digitais preparados para medirem temperaturas (Kiotto Mod.). Mencionamos aqui esta marca, não por serem especiais, mas como uma mera indicação. Existem, no entanto, diversos modelos e marcas no mercado disponíveis para este fim.

Uma das componentes fundamentais do trabalho experimental reside na capacidade de criar, inventar, adaptar os instrumentos ou sensores de medida. Nesta acção de formação procurou-se precisamente desenvolver tais capacidades.

Um dos exemplos é o dos termopares. Como fabricá-los?

O sistema usado está representado na Figura 1. Os dois fios que constituirão o termopar são ligados a um dos terminais da fonte de alimentação, enquanto que um outro fio liga o mercúrio ao outro terminal da fonte. No momento em que os fios do termopar tocam o mercúrio dá-se um curto-circuito que leva ao aparecimento de uma faísca no local do contacto. Regulando a tensão da fonte de alimentação consegue-se uma faísca suficientemente forte para fundir os dois fios e formar a junção do termopar. O óleo colocado por cima do mercúrio evita a libertação de eventuais vapores de mercúrio.

Note-se que usando os multímetros, apenas precisamos de fabricar uma junção uma vez que a junção fria está no próprio aparelho e é compensada electrónicamente para variações da temperatura ambiente.

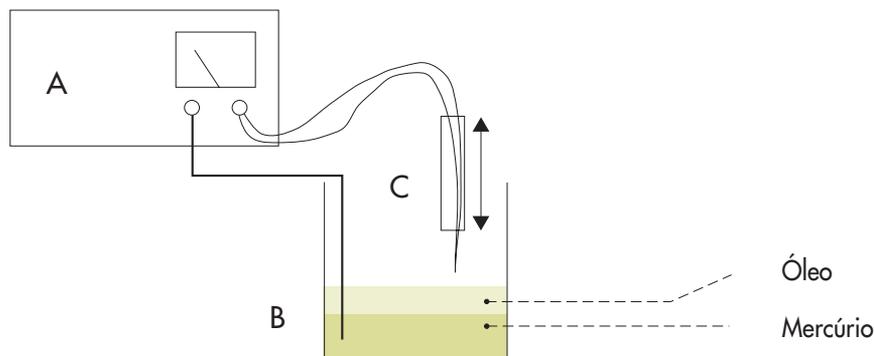


Figura 1- Sistema usado para o fabrico de termopares. O tubo de vidro (C) é usado para não queimar os dedos quando se faz o curto-circuito no mercúrio. A fonte de alimentação pode ser um autotransformador que dê até 25 volt e uma corrente de 10 ampere.

Do campo para o laboratório

Ao longo desta acção foi desenvolvido trabalho experimental, tanto no campo (veremos em 3.3 um exemplo), como em laboratório, este último com o objectivo de estudar sistemas mais simples mas cuja compreensão é fundamental para o estudo dos casos reais, nomeadamente os desenvolvidos na Mina de S.Domingos.

Começamos então pela observação, complementada por medidas concretas de temperatura no terreno, de que materiais mais escuros, quando expostos ao sol, atingiam temperaturas superiores.

Como simplificar em laboratório um tal sistema?

Consideremos duas pequenas chapas de cobre pintadas, uma de branco e outra de preto, expostas a uma fonte de calor radiativa. Pretende-se com isto ver o seu comportamento quando sujeitas a uma fonte de calor. Ao escolher estas cores estaremos a extremar os efeitos a observar, o que facilitará a interpretação dos resultados.

Qual será a nossa fonte de calor?

No caso real da Mina é o sol; no laboratório escolheu-se uma lâmpada de halogéneo de 500W, cuja temperatura de filamento é de aproximadamente 3400K, e que constitui o nosso "sol" de laboratório. A experiência a realizar fica então muito simples. As duas placas são iluminadas pela lâmpada e medem-se as temperaturas de equilíbrio atingidas. Mantendo a mesma potência na lâmpada e variando a sua distância às placas poderemos ver como varia a temperatura final de equilíbrio das placas.

○ que caracteriza este equilíbrio?

○ facto de a temperatura não variar, embora a energia radiada pela lâmpada continue a incidir nas placas, diz-nos que a quantidade de calor que é absorvida deve ser igual à que é perdida pela placa. Com efeito sabemos que uma quantidade de calor Q fornecida a um corpo de massa m e calor específico c faz variar a temperatura deste de ΔT de acordo com

$$Q = mc\Delta T \quad (4)$$

Ou seja, Q deve ser nulo nas condições de equilíbrio estacionário.

Como Q é a resultante de processos de absorção e perdas de calor, esta equação mais não é do que uma afirmação do princípio de conservação de energia.

A primeira experiência

Sintetizam-se na tabela abaixo alguns resultados obtidos tanto no terreno da Mina (às 13 horas) como no laboratório.

Tabela 1

No campo		No laboratório	
Tipo de solo	Temp./°C	Cor da placa	Temp./°C
Solo Branco	44,0	Branca	50
Solo Castanho	46,5	Preta	90
Escória Clara	54,5		
Escória Escura	65,0		

Analisemos então os resultados obtidos no laboratório com esta experiência muito simples que consistiu em iluminar as duas chapas com um projector de halogéneo e esperar que a sua temperatura estabilizasse.

Neste caso foi a placa preta que atingiu a temperatura mais alta.

Poderíamos, antes de realizada a experiência, prever que assim seria forçosamente?

Esta questão leva-nos a analisar mais cuidadosamente como se estabelece o equilíbrio dinâmico de temperatura na placa.

Na fase inicial do aquecimento o calor absorvido é maior do que o calor perdido pela placa. A temperatura tende pois a subir. Mas como o ar que circunda a placa está à temperatura ambiente começam também a aumentar as perdas para o ambiente. A placa que absorve mais calor pode ser a que mais perdas tem, pelo que o equilíbrio poderia ser atingido para uma temperatura inferior à temperatura de equilíbrio da placa branca.

Um olhar mais detalhado

Para tentarmos quantificar algumas grandezas envolvidas neste problema voltemos à nossa condição de equilíbrio estacionário que nos diz que o calor absorvido por unidade de tempo deve ser igual ao calor perdido por unidade de tempo.

$$Q_{\text{entrada}}^{\circ} = Q_{\text{saída}}^{\circ} \quad (5)$$

Pegando na equação (4), que se aplica a um corpo de massa m (e uma superfície A), podemos dizer que por unidade de tempo teremos:

$$Q^{\circ} = \frac{Q_{\text{entrada}} - Q_{\text{saída}}}{\Delta t} = \frac{Q}{\Delta t} = mc \frac{\Delta T}{\Delta t} \quad (6)$$

No limite de tempos infinitesimalmente pequenos teremos:

$$Q^{\circ} = mc \frac{dT}{dt} \quad (7)$$

Antes de retomarmos o nosso sistema de laboratório, admitamos, por enquanto, que não temos uma lâmpada a fornecer calor, mas apenas a nossa placa aquecida imersa num fluido (neste caso ar) a uma temperatura inferior à da placa.

Como variará a temperatura da placa ao longo do tempo?

Admitindo que podemos desprezar as perdas por radiação (o que é verdade para temperaturas da placa inferiores a 200°C e com ar a 20°C), as perdas de calor das placas são devidas sobretudo às perdas de calor por convecção.

A quantidade de calor perdida por unidade de tempo vem então

$$Q^{\circ} = FA = hA(T - T_{\text{fluido}}) \quad (8)$$

onde A é a superfície da placa.

A aplicação da conservação de energia diz-nos que

$$hA(T - T_{\text{fluido}}) = mc \frac{dT}{dt} \quad (9)$$

A resolução desta equação diferencial leva-nos a:

$$\frac{(T - T_{\text{fluido}})}{(T_i - T_{\text{fluido}})} = \exp\left[-\left(\frac{hA}{mc}\right)t\right] \quad (10)$$

onde T_i é a temperatura a que se encontra a placa no instante em que a colocamos no fluido. Esta equação mostra-nos que a temperatura na placa deve cair exponencialmente para a temperatura a que se encontra o ar. Repare-se ainda que o termo da exponencial tem de ser adimensional. Isto significa que mc/hA deve ter dimensões de tempo. Vamos designá-la por constante de tempo térmica, já que este tipo de comportamento é análogo ao que encontramos por exemplo na descarga de um condensador. Também aí definimos uma constante de tempo característica do circuito RC.

Voltemos agora ao caso da iluminação com a lâmpada.

Já sabemos que, se a temperatura estabiliza, é porque existe um balanço entre os processos de absorção e perda de calor. A nossa fonte de calor é um filamento incandescente que radia energia; as perdas de calor são devidas a transferência de calor para o ar circundante.

Podemos desde já escrever a condição de conservação de energia aplicada a este caso, adicionando o termo relativo à absorção de radiação pela placa

$$-hA(T - T_{\text{fluido}}) + \epsilon\sigma A(T_{\text{fil}}^4 - T^4) = mc \frac{dT}{dt} \quad (11)$$

Chegamos novamente a uma equação diferencial cuja solução pode ser mais ou menos trabalhosa. Mas agora é apenas uma questão de matemática. O importante foi sermos capazes de exprimir matematicamente um problema físico.

A solução aproximada é da forma:

$$T = (T_{final} - T_{inicial}) \left(1 - e^{-t/\tau}\right) + T_{inicial} \quad (12)$$

Onde τ é o tempo característico de que falámos atrás.

No entanto mesmo sem resolvermos esta equação podemos adiantar que na situação de equilíbrio estacionário se tem:

$$-hA(T - T_{fluido}) + \epsilon\sigma A(T_{fil}^4 - T^4) = 0 \quad (13)$$

Admitindo que o valor fornecido pelo fabricante das lâmpadas para a temperatura do filamento é correcto, apenas desconhecemos duas variáveis – ϵ e h . Mas vimos anteriormente que, se tivermos apenas a placa quente a arrefecer ao ar, poderíamos determinar h (ver eq(10)).

Temos aqui um exemplo de como, sem resolver propriamente uma equação complicada, uma análise dos princípios físicos que determinam o funcionamento de um sistema nos permite chegar a grandezas físicas relevantes (o coeficiente de convecção e a emissividade) para o sistema em estudo.

A segunda experiência

Mas voltemos uma vez mais às observações deste grupo, que, cauteloso nas suas experiências, teve o cuidado de medir a evolução de temperatura nas duas placas ao longo do tempo, porque pensaram: se as duas placas estão inicialmente à mesma temperatura e no final estão a temperaturas diferentes, como será que a sua temperatura varia ao longo da exposição ao "sol"?

Vejamos o que se passa no instante em que ligamos a lâmpada. Nesse momento a temperatura da placa é igual à do ar e sabemos também que a temperatura do filamento é muito maior do que a da placa. Não temos nestes instantes iniciais perdas de calor na placa, já que ela está sensivelmente à temperatura do ar.

A nossa equação de conservação de energia eq(11) reduz-se então a:

$$\epsilon\sigma T_{fil}^4 = mc \frac{dT}{dt} \quad (14)$$

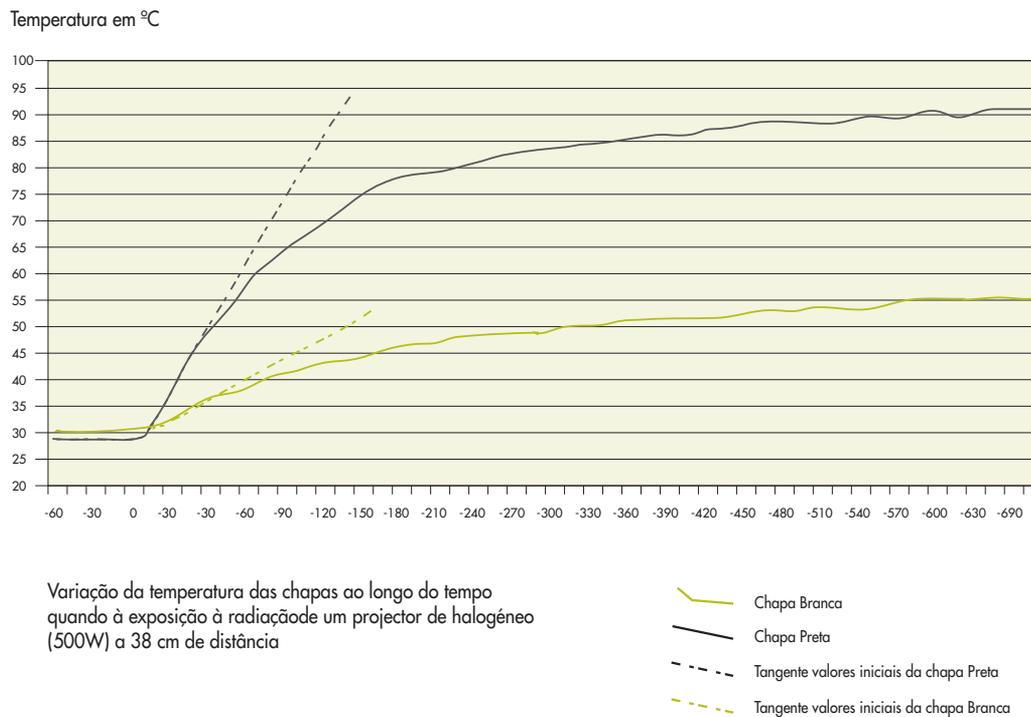


Figura 2 – Evolução da temperatura das placas ao longo do tempo

O primeiro membro desta equação tem constantes apenas. Em consequência podemos afirmar (basta integrar esta equação) que a temperatura da placa deve ser uma função linear no tempo, mais propriamente uma recta.

Vemos assim que o declive desta recta, que traduz a subida inicial de temperatura da placa, nos dá uma indicação sobre a potência absorvida pela placa.

A comparação do declive inicial das curvas, para as placas branca e preta, permite-nos agora responder a uma das questões postas atrás: qual absorve melhor o calor radiado pela lâmpada?

A terceira experiência

Peguemos agora numa das observações feitas e já atrás referenciada de que a temperatura dos vários materiais (nomeadamente areias de cor e grão diverso), expostos ao sol varia com a profundidade.

Como simular este sistema no laboratório?

É razoável admitir que, numa extensão do mesmo material exposto ao sol, a temperatura será a mesma em todos os pontos à mesma profundidade. Isto

significa, de acordo com a lei de condução de calor de Fourier, que nesta zona não existe condução de calor na horizontal, mas apenas na vertical. Esta é a observação fundamental que nos permite imaginar um modelo de laboratório representativo do que se passa no terreno.

O sistema desenvolvido no laboratório por este grupo está esquematizado na Figura 3.

A radiação "solar" incide à superfície e o isolamento térmico lateral garante que não existem fluxos de calor radiais.

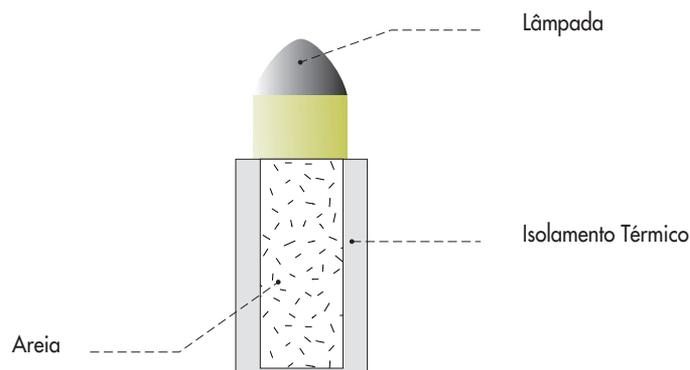


Figura 3 - Modelo laboratorial para simulação dos processos de absorção de calor das areias da Mina de S. Domingos.

Como estudar neste sistema as propriedades de transporte de calor em profundidade?

A lei de Fourier (eq(1)) diz-nos que, se soubermos o gradiente de temperatura e o fluxo de calor incidente na superfície, poderemos imediatamente determinar a constante de proporcionalidade- a condutividade térmica.

No caso da Figura 4, sabendo a temperatura nas duas superfícies T1 e T2, podemos calcular o fluxo de calor usando a equação de Fourier

$$F = -k \frac{dT}{dx} \quad (15)$$

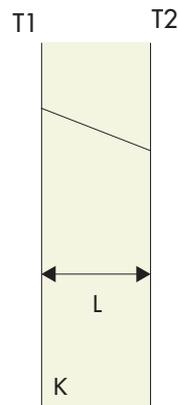


Figura 4 – Distribuição estacionária de temperatura numa parede de espessura L, com temperaturas superficiais T1 e T2 e condutividade térmica K.

ou em termos de quantidade de calor transmitida através de uma área A de parede

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} = \left(\frac{kA}{L} \right) (T1 - T2) \quad (16)$$

Esta última equação leva-nos a introduzir um conceito muito útil. Tal como a corrente eléctrica (transporte de carga) depende de um potencial e de uma constante de proporcionalidade (R), no caso de um componente puramente resistivo (a chamada lei de Ohm)

$$I = R(V1 - V2) \quad (17)$$

também um fluxo de energia (calor) depende de um potencial (a temperatura) e de uma constante de proporcionalidade. Por analogia designamos, então, o termo L/kA a resistência térmica do material.

Este conceito permite-nos tratar muitos problemas de transferência de calor usando esta analogia. Facilmente se mostra que, para uma parede composta como a indicada na Figura 5, a resistência térmica total é a soma das resistências térmicas de cada secção. O mesmo se aplica à associação em paralelo de resistências térmicas.

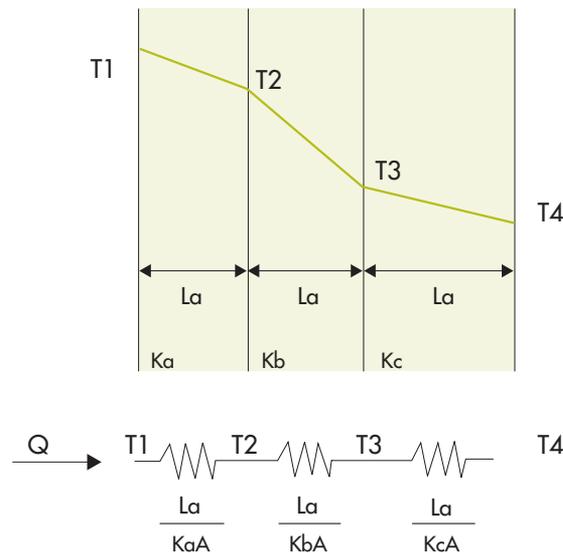


Figura 5 - Condução de calor através de uma parede de área A e condutividades térmicas k_a, k_b e k_c .

Voltemos agora ao sistema que estávamos a analisar e que visa reproduzir os diferentes solos da Mina (Figura 3).

A medida da temperatura no topo, a meia profundidade e no fundo não apresenta nenhuma dificuldade e está indicada na Figura 6.

A evolução da distribuição de temperatura em profundidade mostra-nos que o calor se está a propagar em direcção ao fundo. O que acontecerá então quando o calor aí chegar?

A resposta óbvia é que a temperatura no fundo irá subir.

Por outro lado já sabemos que a temperatura à superfície tenderá a estabilizar ao fim de algum tempo. A distribuição de temperatura indicada na Figura 4 e na base da qual se pretende extrair a condutividade térmica pressupõe que as temperaturas estejam estabilizadas (mas não significa que sejam uniformes!) em todo o material. Portanto precisamos de manter constante a temperatura no fundo do vaso. Como consegui-lo?

Uma forma simples é colocar o fundo do vaso em contacto com água corrente, que extrairá o calor, mantendo a temperatura constante.

No entanto as dificuldades ainda não terminaram. É que também necessitamos de saber o fluxo de calor injectado à superfície das areias e aqui as coisas complicam-se,

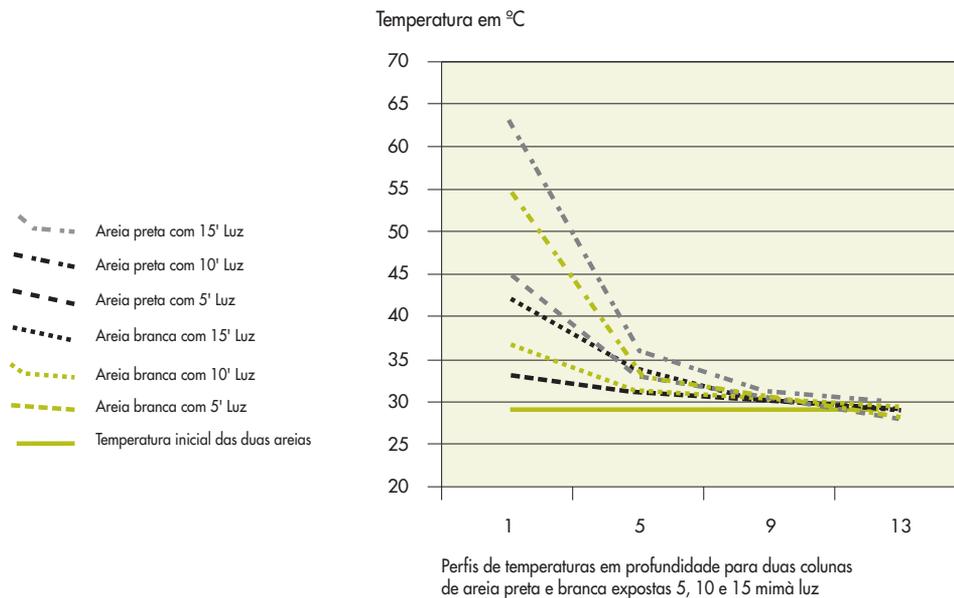


Figura 6 - Evolução temporal da distribuição de temperatura no interior dos vasos com areia.

já que as areias de diferentes cores irão absorver a radiação das lâmpadas de forma diferente. Para resolver isto vamos usar um disco de um material de que conhecemos a condutividade térmica, colocado sobre a areia. Medindo a temperatura na face superior e inferior e usando a equação de Fourier podemos então calcular o fluxo de calor. Em alternativa poderíamos considerar a subida linear de temperatura, como já vimos atrás.

A montagem experimental com as alterações sugeridas fica como indicada na Figura 7.

Repare-se que estamos na configuração indicada na Figura 5, que tem subjacente um princípio muito importante: não havendo condução lateral de calor (por isso usámos um isolador lateral), o fluxo de calor no disco deve ser igual ao fluxo de calor na areia.

O exercício que temos vindo a fazer poderia ainda ser estendido à interface disco-areia.

Com efeito a condução de calor do disco para a areia faz-se sobretudo pelos pontos de contacto. No caso da areia, a sua textura granular faz com que a transferência de calor se faça sempre através dos pontos de contacto entre os grãos.

Uma maior compactação da areia ou a utilização de uma areia húmida permitiria reduzir a sua resistência térmica, ou seja, aumentar a condutividade térmica.

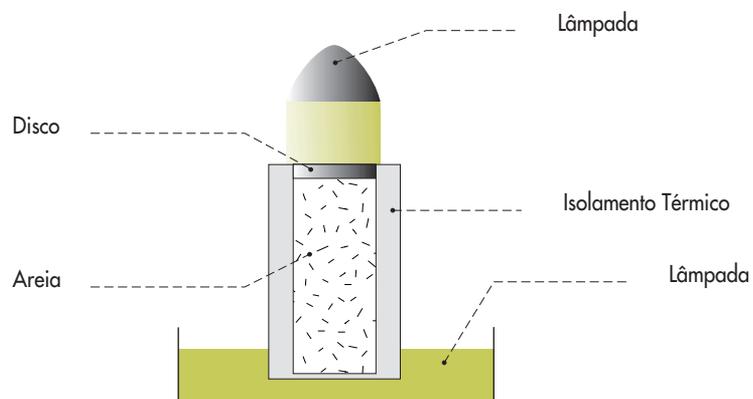


Figura 7- Alterações sugeridas à configuração indicada na Fig.3 com o objectivo de contornar as dificuldades encontradas.

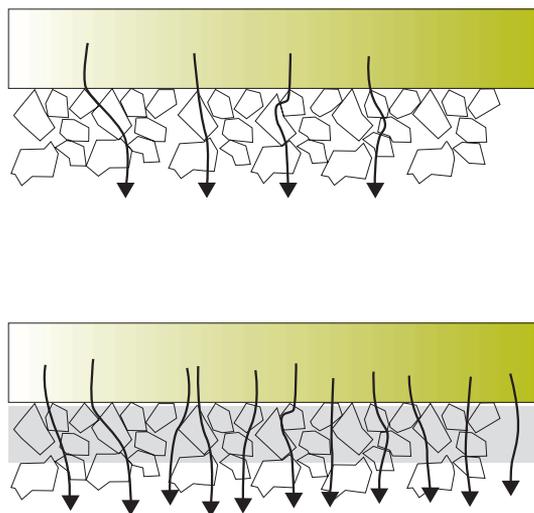


Figura 8 - Modelo microscópico da interface de contacto sólido-areia. A utilização de areia húmida junto ao sólido melhora a condução de calor.

Usando o analogia eléctrica, isso equivalia a reduzir a resistência em série (aumentar a compactação ou reduzir o grão) ou a pôr uma resistência em paralelo (usar água na areia).

Na realidade todas as superfícies sólidas de contacto são mais ou menos rugosas, pelo que os conceitos aqui abordados aplicam-se plenamente a esses casos.

A quarta experiência

Uma das questões que mais interesse suscitou em torno da água retida na corta da Mina foi a da possível existência de correntes de convecção no seu interior, que se traduziriam por zonas com temperatura constante em profundidade, devido ao efeito de mistura das águas associado aos movimentos de convecção. No capítulo 3.3 podem ver-se precisamente alguns resultados obtidos na corta da Mina de S.Domingos e sua discussão.

Como surgem as correntes de convecção?

Estas correntes estão associadas a variações da densidade do fluido com a temperatura.

Com base na Figura 9, vemos que a presença de um elemento de aquecimento numa zona de uma sala aquece o ar nessa zona diminuindo a sua densidade. O ar quente, sendo menos denso, tende a ser empurrado para cima pelo ar mais frio, mais denso. Estabelece-se desta forma um padrão de correntes de convecção no fluido.

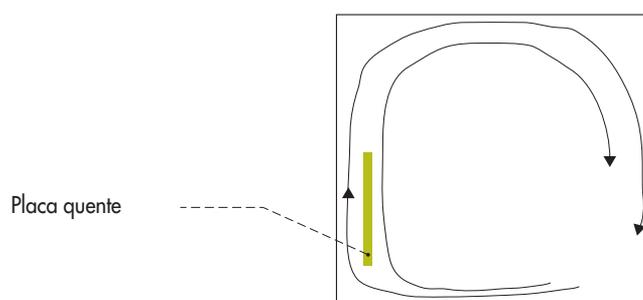


Figura 9 – Aparecimento de correntes de convecção induzidas por uma placa aquecida.

No caso que nos interessa não temos uma sala com ar, mas um lago com um fluido, e portanto dever-se-á aplicar o que acima se disse para o ar da sala. Procurou-se modelar um "lago" no laboratório usando para isso uma tina com água, exposta a um projector de halogéneo de 500W.

O objectivo é observar, utilizando um corante, a formação de correntes de convecção em duas situações distintas:

- 1- O corante é colocado na água apenas junto ao fundo da tina.
- 2- O corante é espalhado uniformemente na água.

Para além de visualizar o aparecimento dessas correntes na água das tinas, quando sujeitas a radiações de características semelhantes na sua superfície, pretende-se medir o perfil de temperaturas em profundidade.

Os resultados obtidos podem ver-se na Figura 10.

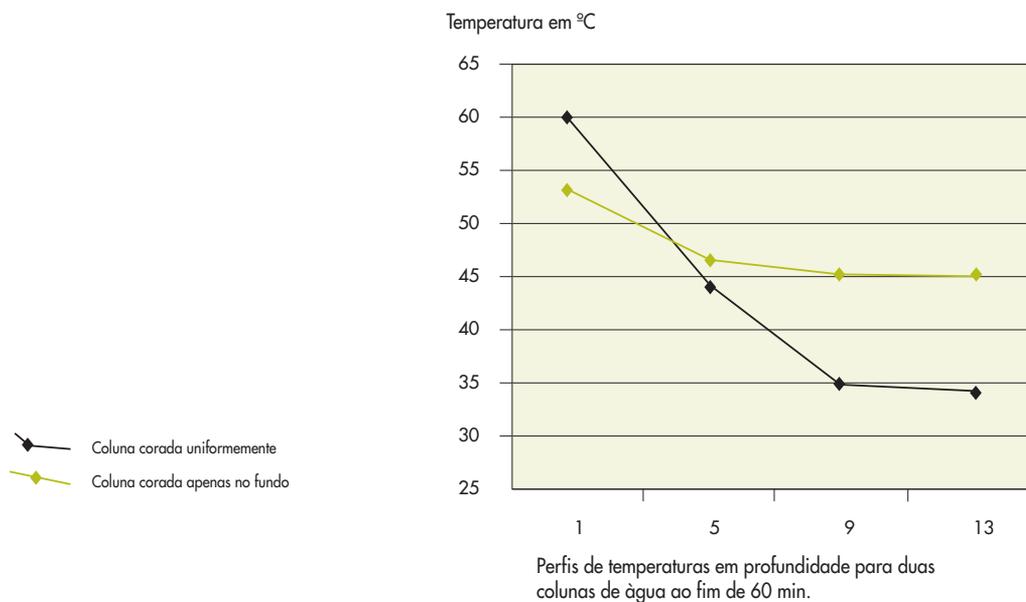


Figura 10 - Distribuição de temperatura em profundidade para duas situações distintas

No caso em que o corante estava espalhado apenas no fundo da tina, a absorção de radiação faz-se junto à superfície e na zona fortemente corada. A água da zona junto ao fundo sofre assim um aquecimento adicional. Sendo menos densa, começa a subir. Por outro lado dado, que a água absorve fortemente os infravermelhos, a zona junto à superfície sofre um aquecimento acentuado. No entanto, dado que a parte mais quente já está em cima, não surge nenhuma instabilidade, ou seja, a água nesta zona mantém-se estratificada. A conjugação destes dois efeitos dá então origem a uma zona estratificada junto à superfície e uma zona homogeneizada em temperatura junto ao fundo.

No caso da tina com água corada uniformemente a absorção de radiação é feita apenas junto à superfície, e, portanto, não leva ao aparecimento de correntes de convecção. Neste caso a temperatura diminui à medida que nos dirigimos para o fundo.

Conclusão

Com base em experiências reais e na análise dos processos físicos envolvidos procurou-se mostrar uma forma de abrir caminhos motivadores e que possibilitem uma compreensão aprofundada da "Física" que está por detrás de...

Um texto como este é sempre redutor do impacto que a realização, melhoramento, e a discussão dos resultados de uma experiência pode ter na aquisição de conhecimentos por parte de quem os realiza.

Citando um dos elementos deste subgrupo:

"Uma ideia ganhou força: Não há nada como experimentar!"

Referências

F.Incropera, D. DeWitt "Fundamentals of Heat Transfer and Mass Transfer", John Wiley & Sons, 1996

J.P.Fonseca, L.Pinto "Absorção de Energia e Balanços Térmicos na Corta da Mina de S.Domingos", Relatório do subgrupo de Física, desenvolvido no âmbito da Acção de Formação no Ensino Experimental das Ciências, 1999

3.3 Perfis de temperatura, intensidade luminosa ambiente e transmitância da água na corta da Mina de São Domingos

J.MAIA ALVES

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Motivação

Num lago de uma região mediterrânica como a nossa, durante o verão, ou, de uma maneira geral, durante todo o ano nos oceanos, as colunas de água apresentam perfis de temperatura muito característicos e, na sua essência, análogos ao representado na figura 1.

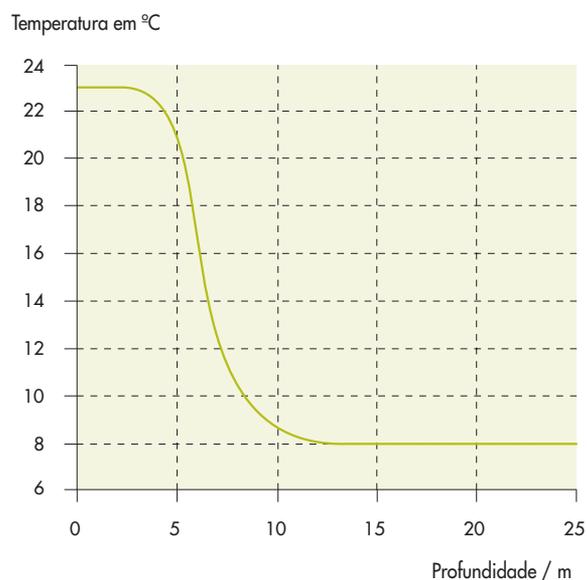


Figura 1 - Perfil de temperatura típico de um lago de uma região mediterrânica durante um situação de verão.

Da análise dessa figura depreende-se facilmente que, junto à superfície, se desenvolve um primeiro nível com temperatura aproximadamente constante (pelo facto de a energia luminosa estar a ser absorvida em todo o nível e, ainda, por se tratar de uma região em que a acção do vento conduz à mistura eficiente da água). Seguidamente, entramos numa região intermédia do perfil, designada por termoclina, na qual a temperatura da água decresce de forma acentuada com o incremento da profundidade (aumentando, conseqüentemente, a sua densidade). Finalmente, a profundidades suficientemente elevadas, encontramos um horizonte de água abaixo do qual a temperatura se mantém praticamente constante (esta é, naturalmente, a região mais fria da coluna de água). Com um perfil de temperatura deste tipo, no qual os níveis mais densos se encontram sempre a maior profundidade, não existirá motivo para se verificar a existência de circulação vertical de água, ou seja, à excepção do nível superficial do perfil, toda a restante coluna de água do lago encontrar-se-á estratificada e isolada do contacto com a atmosfera.

Suponhamos agora que evoluímos para uma situação de inverno. Nestas circunstâncias os níveis mais superficiais da coluna de água serão progressivamente arrefecidos. Deveríamos, portanto, atingir uma situação em que o perfil de temperatura se inverteria, ou seja, a água mais quente estaria no nível profundo e a mais fria junto à superfície. Esta situação é, no entanto, instável, já que corresponde a um perfil de densidades invertido, gerando-se, conseqüentemente, correntes de convecção (admitindo a não existência de outros parâmetros que afectem a densidade da água como, por exemplo, a presença de perfis de salinidade como os que se estabelecem nos oceanos e em diversos ambientes lacustres), com a água superficial a mergulhar em direcção ao fundo, e a água profunda a ascender à superfície. Desenvolvem-se assim condições para a mistura da água constituinte dos diferentes níveis, o que conduz à homogeneização da temperatura da coluna de água (e, naturalmente, à homogeneização da sua composição, incluindo, por exemplo, a redistribuição dos conteúdos em nutrientes). Obter-se-á nestas condições um perfil de temperatura caracterizado pelo facto de a temperatura ser essencialmente independente da profundidade¹. O mesmo se observará durante o verão caso a água seja suficientemente transparente e constitua uma coluna pouco profunda, possibilitando assim que a absorção de energia ocorra sobretudo no fundo².

A existência, ou não, de correntes verticais de convecção em colunas de água é extremamente importante, já que isso determina, por exemplo, as condições de isolamento dos níveis de água mais profundos relativamente à atmosfera, condicionando, conseqüentemente, a sua oxigenação. Não é difícil perceber que este facto tem implicações importantes a nível biológico. O mesmo se pode dizer

- ¹ De facto, e porque a variação da densidade da água com a temperatura é anómala, é possível que uma situação como esta seja estável desde que a temperatura da água seja toda ela inferior a 4°C, já que nessa região de temperaturas se verifica um aumento da densidade com o aumento de temperatura. Esta situação designa-se por estratificação de inverno e é encontrada em lagos situados em regiões frias. Acima dos 4°C a variação da densidade com a temperatura passa a ter um andamento normal, ou seja, a diminuir com o aumento da temperatura, razão pela qual se verifica a estratificação de verão.
- ² Estas duas situações foram simuladas em laboratório e os resultados obtidos são relatados em outro capítulo deste volume.

do perfil de intensidade luminosa ambiente, o qual determinará a possibilidade de, a uma dada profundidade, ocorrer fotossíntese. No caso da Mina de São Domingos, a existência, ou não, destas correntes verticais acarreta implicações suplementares, já que elas podem condicionar: i) a formação de suspensões coloidais; e/ou ii) o desenvolvimento de diversas reacções químicas nos níveis mais profundos da coluna de água que, induzindo a formação de precipitados, podem contribuir, por exemplo, para a impermeabilização do fundo da corta, reduzindo assim significativamente a migração e dispersão de numerosos agentes poluentes. Não é, pois, de estranhar que a motivação para realizar a medição de perfis de temperatura e intensidade luminosa ambiente na corta da Mina de São Domingos tenha surgido durante a acção de formação em Ensino Experimental das Ciências, durante as actividades de campo desenvolvidas na região de Mértola, tendo sido fruto de discussões interdisciplinares, envolvendo formandos e formadores das áreas da Física, Geologia, Biologia e Química. Foi então unanimemente reconhecida a importância de encontrar uma resposta para as dúvidas surgidas sobre se a água acumulada na corta mineira abandonada se encontraria, ou não, estratificada em temperatura e, assim, obter informações sobre a existência ou não de correntes verticais de convecção significativas.

Para terminar, uma breve referência às razões que suportam o interesse em medir a transmitância luminosa da água, para além do conjunto de grandezas já referido. Existem, com efeito, vantagens em efectuar essa medição, especialmente na eventualidade de se encontrar perfis anómalos, quer de temperatura, quer de intensidade luminosa ambiente, pois, na posse de dados de transmitância da água, a interpretação dos perfis será realizada com maior segurança. Os resultados da transmitância luminosa da água representam de alguma forma o "fiel da balança", uma vez que, sendo obtidos por uma via independente e sendo passíveis de correlação com os restantes, concorrem para um banco de dados cuja coerência interna permitirá ajuizar a razoabilidade da interpretação efectuada. Tal procedimento (obtenção de resultados independentes mas directamente relacionáveis com as variáveis que pretendemos estudar), é frequentemente utilizado em Ciência, porquanto permite aumentar substancialmente a confiança nos resultados experimentais e respectiva interpretação.

O dispositivo experimental

Concluída a motivação para o estudo que nos propusemos efectuar, passemos agora à descrição do dispositivo experimental desenvolvido. A concepção e construção do dispositivo foram, como sempre acontece quando se pretende efectuar medições em Ciência, condicionados por diferentes factores, de entre os quais salientamos:

- necessidade de realizar medidas debaixo de água;
- características químicas dessa mesma água (fortemente corrosiva);
- grande amplitude de variação esperada para a intensidade luminosa;
- pequena amplitude de variação esperada para a temperatura;
- impossibilidade de instalar no local (por razões logísticas e de segurança) qualquer plataforma flutuante de apoio.

Relativamente aos dois primeiros pontos atrás mencionados importa dizer que eles foram determinantes na forma como se projectou a sonda onde se acoplaram os elementos sensores. O primeiro implicou que os sensores fossem completamente encapsulados para evitar a passagem de corrente entre os seus terminais através da água; o segundo condicionou a selecção dos materiais utilizados no seu encapsulamento. Saliente-se ainda que a necessidade de utilizar um cabo de alimentação adequadamente revestido para o fim em vista (à prova de água) determinou a selecção de um tipo de cabo que se revelou extremamente pesado, prejudicando a aquisição de dados como adiante descreveremos (além das consequências inerentes à dificuldade de o transportar para o local onde foi instalada a base para leitura das medições).

Face à pequena amplitude de temperaturas que prevíamos encontrar, optou-se pela utilização de um termistor como elemento sensor de temperatura, privilegiando assim a sua elevada sensibilidade e consequente simplicidade em termos de condicionamento de sinal face à sua não linearidade (que não prevíamos ser, nestas condições, dramática e que, aliás, não constitui um problema uma vez obtida uma boa curva de calibração). Já relativamente à intensidade luminosa ambiente, previa-se uma variação desde a superfície até ao fundo ao longo de várias ordens de grandeza. Por esse motivo optou-se por utilizar como sensor um fototransistor montado numa configuração que garantisse uma diferença de potencial colector-emissor constante (para garantir a sua linearidade) seguido de um amplificador de transresistência, cujo ganho se poderia fazer variar em seis ordens de grandeza. Relativamente às medidas de transmitância, optou-se por realizá-las em três bandas do espectro visível (verde, amarelo e vermelho), tentando desta forma detectar alguma variação importante da cor da água com a profundidade.

Na figura 2 encontra-se representada esquematicamente a sonda construída em acrílico para servir de suporte a todos os sensores. O seu projecto foi feito por forma a garantir o mais possível a estanquicidade do conjunto, tendo sido os espaços abertos no seu interior (necessários para a instalação do cabo, sensores e respectivas ligações) subsequentemente selados com resina epoxídica, para minorar os efeitos da sobrepressão provocada pela imersão. Embora não tenham sido efectuadas medidas a grandes profundidades³, não foi detectado, nem durante as medições, nem posteriormente, qualquer sinal que indicasse terem ocorrido problemas de penetração de água.

A sonda foi construída a partir de uma chapa de acrílico com 30mm de espessura (com aproximadamente 200X200mm²), na qual foram abertos os furos para a passagem do cabo principal de ligação à superfície e para a colocação dos diferentes sensores. A ligação dos sensores ao cabo principal foi efectuada, ou através de furos (caso do termistor e do fototransistor vertical) posteriormente preenchidos com resina epoxídica, ou através de rasgos fresados na espessura da chapa. Estes rasgos foram também posteriormente colmatados com resina e, além

³ Note-se que, à partida, não se conhecia exactamente a que profundidade se poderia ir já que não possuíamos qualquer topografia da corta mineira abandonada nem tinha havido tempo para previamente sondar o local.

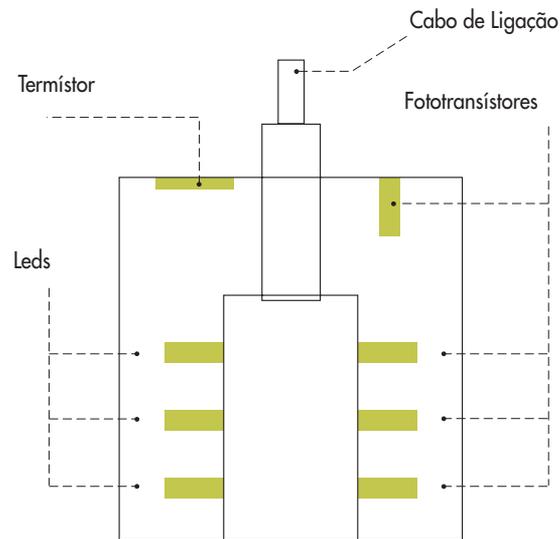


Figura 2 - Representação esquemática da sonda desenvolvida para a medição de perfis de temperatura, intensidade luminosa ambiente e transmitância da água na corta da Mina de São Domingos

disso, protegidos pela colagem de uma tira de chapa acrílica com 6mm de espessura. Chapas deste tipo foram igualmente coladas em frente dos fototransistores e díodos emissores de luz por forma a permitir a passagem de luz em boas condições. Os furos onde foram instalados os fototransistores e os díodos emissores de luz foram revestidos interiormente com cartolina preta por forma a melhorar a direcção da sua emissão/recepção, minorando assim a possibilidade de leituras cruzadas no caso das medidas de transmitância. O termistor foi totalmente embebido em resina epoxídica, mantendo-o em contacto térmico tão eficiente quanto possível com a chapa de cobre de 3mm de espessura utilizada para fazer o fecho do respectivo orifício (também efectuado por colagem). A opção de realizar todas estas selagens por colagem em vez de se utilizar uma técnica mais reversível (como seja a vedação com recurso a juntas tóricas de borracha) deveu-se em grande parte à falta de tempo para a realização das peças que tal opção implicaria. Acresce que, não se prevendo uma utilização prolongada do equipamento, se considerou ser pouco provável vir a verificar-se a necessidade de substituição de algum dos sensores, única situação em que a opção da colagem se revela claramente desaconselhável.

Na figura 3 representa-se o esquema eléctrico das ligações dos sensores no interior da sonda. Uma vez que o cabo de ligação à superfície continha um total de sete condutores, os díodos emissores de luz tiveram de ser montados em série, correndo, contudo, o risco de ficarmos impossibilitados de efectuar qualquer medida de transmitância no caso de avaria de um deles, o que, felizmente, não veio a suceder.

Ligação à superfície

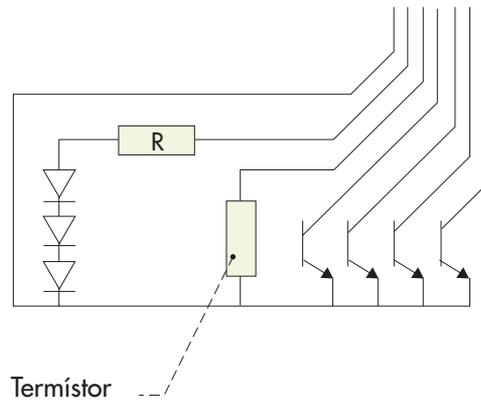


Figura 3 - Representação esquemática das ligações dos sensores no interior da sonda desenvolvida para a medição de perfis de temperatura, intensidade luminosa ambiente e transmitância da água na corta da Mina de São Domingos.

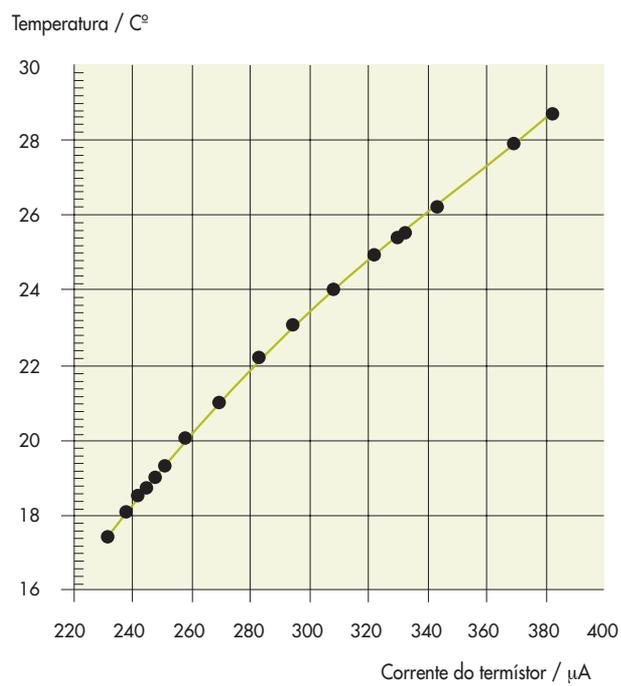


Figura 4 - Curva de calibração do termistor.

Esta opção teve ainda por consequência a impossibilidade de efectuar um ajuste individual da corrente em cada um dos díodos por forma a que os sinais provenientes dos três detectores fossem o mais semelhantes possível. O conjunto formado pelos díodos emissores de luz era ligado remotamente a partir da superfície quando se pretendia fazer as medições de transmitância. Os colectores dos fototransistores foram ligados a quatro amplificadores de transresistência independentes, cuja descrição se encontra efectuada no capítulo 3.1.

O termistor utilizado, com um coeficiente de temperatura negativo, foi escolhido por forma a que a sua resistência, na gama de temperaturas pretendida, fosse suficientemente elevada (da ordem das dezenas de $\kappa\Omega$) para, nas condições de alimentação utilizadas (12V), o autoaquecimento ser desprezável. Na prática mediram-se correntes inferiores a $400\mu\text{A}$, o que significa que a potência dissipada no sensor foi sempre inferior a 5mW . Na figura 4 encontra-se a curva de calibração do termistor na qual se representa a temperatura em função da corrente no sensor para uma diferença de potencial de 12V aos seus terminais.

Instalação do sistema de medida no local

As dificuldades enfrentadas para se efectuar a instalação do sistema de medida na corta da Mina de São Domingos estão bem patentes na fotografia da figura 5. A topografia das margens impediu a instalação de qualquer estrutura rígida de onde a sonda pudesse ser descida suficientemente longe da margem para atingir alguma profundidade significativa, uma vez que a acessibilidade aos níveis mais próximos da superfície da coluna de água é má. De facto, os "degraus" remanescentes da extracção mineira a céu aberto, ou apresentam actualmente acentuada assimetria ou encontram-se pura e simplesmente cobertos por escombros de escórias que, em certos locais, evidenciam forte instabilidade. Este facto levou à solução alternativa de esticar um cabo de nylon entre as duas margens, no qual se fez correr uma roldana que serviu de ponto de apoio para suspender o cabo na vertical de uma zona onde se atingiu a profundidade (quase abissal!) de 3m.

A impossibilidade de avançar mais em direcção ao interior da corta foi então ditada pela inexistência de um comprimento suficiente de cabo de nylon (que aliás já tinha sido acrescentado com materiais disponíveis nas imediações !...), o que mostra bem o "rigor" com que todos os passos da instalação no local do equipamento de medida tinham sido previstos a partir de Lisboa !....

Em seguida, já completamente conformados com a profundidade a atingir, constatou-se que, devido ao excessivo peso do cabo eléctrico desde a roldana até à margem, era virtualmente impossível conseguir que a sonda iniciasse o seu trajecto de descida. Na impossibilidade de continuar a aumentar o peso utilizado para baixar a sonda (o que, aliás, tinha já sido feito para lá dos limites do

4 Claro que não seria absolutamente necessário que tal acontecesse uma vez que apenas estávamos interessados em dados de transmitância relativa à água potável normal, sendo no entanto aconselhável que assim fosse para evitar que as medições fossem efectuada em condições de sensibilidade muito diferentes.



Figura 5 - Pormenores da corta da Mina de São Domingos e da instalação do sistema de medida.

razoável, recorrendo a "material sofisticado" existente no local), por manifesta falta de robustez do cabo de nylon, optou-se por uma solução inspirada nas ancestrais técnicas de arrasto: a sonda foi trazida até à margem e aí mantida, enquanto a roldana foi recolocada na sua posição; recolhendo então o cabo eléctrico, foi possível obrigar a sonda a efectuar o trajecto até à vertical da roldana arrastando pelo fundo o que, naturalmente, comprovou não só o conhecimento por parte dos presentes das lei Físicas que governam o equilíbrio de forças, como ainda a robustez com que a sonda tinha sido projectada.

A descrição de todo este processo, embora possa parecer despropositada no contexto em que é feita, tem três objectivos. Em primeiro lugar, justificar o facto de apenas ter sido efectuada uma única série de medições (no sentido ascendente, por ser o único em que era possível controlar eficientemente o posicionamento da sonda); efectivamente, a demora de todo o procedimento anteriormente descrito impossibilitou a realização prevista de três medições ao longo do dia (uma ao nascer do dia, outra coincidente com a máxima altura do sol e, finalmente, uma outra ao entardecer). Em segundo lugar, mostrar até que ponto o desenvolvimento de trabalho de campo está dependente de factores que, não sendo convenientemente programados (como foi o caso, por manifesta falta de tempo para efectuar uma visita ao local depois de ter sido tomada a decisão de efectuar as medições), podem comprometer seriamente os resultados de todo o trabalho desenvolvido previamente (como foi o de conceber e desenvolver a sonda para efectuar as medições). Finalmente, o de chamar a atenção para a importância de

estar suficientemente à vontade para ser capaz de improvisar em resposta às dificuldades que necessariamente surgem no decurso de qualquer trabalho experimental digno desse nome (no campo ou no laboratório), ou seja, de actividades que não se resumam a meras repetições de procedimentos avulsos, desprovidos de qualquer objectivo e executados sem qualquer necessidade de pensar.

Resultados obtidos

Nas figuras 6 e 7 apresentam-se os resultados obtidos para os perfis de temperatura e intensidade luminosa ambiente. A medida da profundidade foi efectuada através de um conjunto de marcas no cabo, tendo sido introduzidas as correcções devidas ao facto de os sensores se encontrarem a diferentes profundidades.

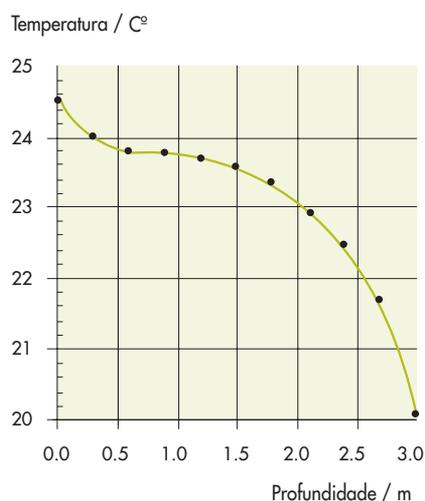


Figura 6 - Perfil de temperatura medido na corta da Mina de São Domingos. A medição foi efectuada cerca das 13h, tendo durado cerca de 30m.

Não tendo sido possível efectuar o conjunto de três medições que tinha sido previsto, decidiu-se efectuar uma única medida (de baixo para cima). Optou-se, então, por efectuar esta medida a uma "hora típica" (correspondente a uma incidência da radiação solar aproximadamente normal à superfície da água).

A primeira conclusão que podemos retirar do perfil de temperatura obtido (figura 6) é a de que, à excepção da região até cerca de 0.6m abaixo da superfície, se trata de um perfil de temperatura muito semelhante ao que apresentámos na figura

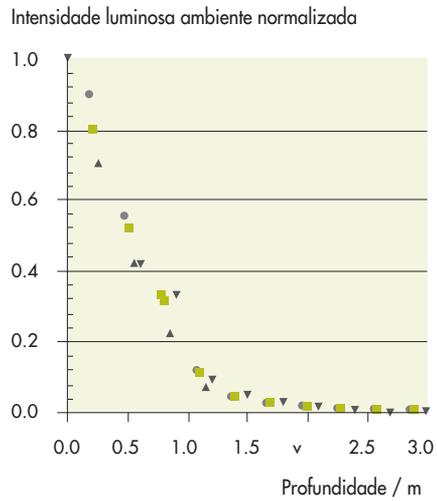


Figura 7 - Perfil de intensidade luminosa ambiente medido na corta da Mina de São Domingos. A medição foi efectuada cerca das 13h, tendo durado cerca de 30m.

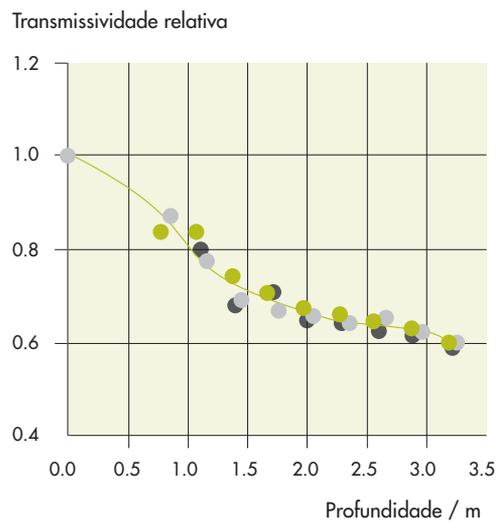


Figura 8 - Perfis de transmitância relativa à água límpida (potável) medidos na corta da Mina de São Domingos. Os diferentes símbolos referem-se às respectivas bandas utilizadas.

1, embora não se tenha atingido (como seria de esperar face à profundidade máxima a que trabalhamos) nenhuma região no fundo da coluna de água caracterizada por temperatura constante. Os primeiros 0.6m de coluna de água são, de acordo com as medições apresentadas na figura 7, responsáveis pela absorção de cerca de 60% da intensidade luminosa ambiente, sendo os restantes 40% praticamente absorvidos até cerca de 1.5m de profundidade. Não admira, pois, que a coluna de água se encontre completamente estratificada abaixo dessa profundidade.

A existência de estratificação no nível mais próximo da superfície pode dever-se, por um lado, ao facto de, como é sabido, a água absorver fortemente na banda dos infravermelhos, e ainda à circunstância de estarmos num local onde não se fazem sentir nem ventos nem ondulação que provoquem uma eficiente mistura. Todavia, já não nos parece tão facilmente explicável a presença (que nos parece inequívoca) de um patamar de temperatura entre os 0.6m e os 1.2m, sobretudo pelo facto de tal acontecer em simultâneo com a existência daquele nível estratificado mais superficial. Uma primeira possibilidade para justificar a existência deste patamar é a de existirem correntes de convecção nessa região da coluna de água, o que, de alguma forma, significará que o aquecimento é mais eficiente na base desta região. Embora as medidas de transmitância relativa à água límpida (potável) que se apresentam na figura 8 pareçam poder compatibilizar-se com esta interpretação (já que mostram um aumento do coeficiente de absorção da luz da ordem de 20% entre o topo e o fundo⁵), não nos parece que tal possa verificar-se, uma vez que a 1.5m de profundidade a intensidade luminosa é virtualmente nula. Outra possibilidade, talvez mais plausível, é a de o patamar encontrado ser o que resta, à hora a que foram efectuadas as medições, de uma homogeneização nocturna de temperatura induzida pelo arrefecimento superficial da coluna de água retida na corta, e que tende a inverter o perfil de temperaturas desde a superfície até 1.5m de profundidade. Gerar-se-ão então correntes de convecção nocturnas, num ciclo diário, que misturarão toda essa água, homogeneizando portanto a sua temperatura. Infelizmente não foram recolhidos dados da temperatura nocturna do ar durante o dia em que foram efectuadas as medições para se saber se é ou não possível que tal aconteça (de facto, este mecanismo só se afigura viável desde que o arrefecimento nocturno determine para a temperatura atmosférica um valor abaixo da temperatura medida no patamar). No entanto, a sequência de temperaturas obtidas para a água na superfície da corta no primeiro momento da acção de formação parecem validar fortemente esta hipótese, já que revelam um arrefecimento de 25.0°C para 23.9°C entre as 13:00h e as 18:45h, seguido de um aquecimento até aos 25.4°C ocorrido até às 23:15h. Este aquecimento é provavelmente provocado pela corrente ascensional da água do referido patamar, já que dificilmente se pode invocar outro mecanismo para o explicar.

5 Esta medição foi efectuada subtraindo a leitura correspondente à radiação ambiente da que se obtinha ligando os díodos emissores de luz. Tal como a figura documenta, não foram detectados comportamentos diferentes para as diferentes bandas de comprimentos de onda utilizadas, o que se compatibiliza bem com os espectros traçados em laboratório para a água da corta. Note-se, no entanto, que os únicos dados que consideramos realmente fiáveis são os que correspondem à banda do vermelho, o que se deve ao facto de existirem dúvidas relativamente aos dados obtidos próximo da superfície para as outras bandas (que são de alguma forma incompatíveis com as determinações posteriores feitas em água potável).

É manifesta a importância que o conjunto das três medidas que tinham sido programadas teriam para validar ou não a interpretação apresentada. É importante salientar que as diferenças de temperatura encontradas entre a superfície e o patamar são inferiores a 1°C e que, além disso, foi efectuada uma única medida no sentido ascendente. Não é pois de excluir a possibilidade (que consideramos no entanto remota) de a placa de cobre utilizada para cobrir o sensor estar a ser aquecida directamente pela radiação solar quando nos aproximamos da superfície, não se encontrando em equilíbrio térmico com a água com que se encontra em contacto; nessas circunstâncias obteríamos medidas de temperatura que (erradamente) levariam a concluir da existência do nível superficial estratificado.

Somos assim levados a afirmar que nos parece provável que ocorra na corta da Mina de São Domingos o mecanismo proposto da convecção nocturna (nos dias em que se verifique um arrefecimento nocturno que faça com que a temperatura do ar seja inferior à temperatura de patamar do final do dia) mas que, claramente, esse facto deverá ser alvo de futura investigação.

Nota final

Não iremos discutir pormenorizadamente as consequências dos resultados experimentais obtidos na corta da Mina de São Domingos. A discussão deste assunto, que só poderá ser feita seriamente num contexto interdisciplinar e na posse doutro tipo de dados (sabendo, por exemplo, qual a composição química dos diferentes níveis da coluna de água), ultrapassa claramente o objectivo destas notas ou mesmo da acção de formação em si. Não queremos, no entanto, deixar de salientar que nos parece que o trabalho efectuado pode ser quase emblemático do que todos quisemos que fosse esta acção de formação. Efectivamente, para além de ser claramente interdisciplinar, o trabalho desenvolvido envolveu uma abordagem investigativa na verdadeira acepção da palavra, ou seja, compreendeu a concepção total da experiência (incluindo o desenvolvimento de um dispositivo experimental adequado aos meios disponíveis e passível de responder aos condicionalismos impostos para a realização das medidas), e conduziu a um conjunto de resultados inéditos que permitiram dar resposta à questão de partida sobre a possibilidade de se verificar ou não uma dada hipótese.

Referências

- Berner E.K., Berner R.A. (1996), *Global environment: water, air, and geochemical cycles*, Prentice-Hall Inc., New Jersey, U.S.A.
- Fonseca J.P., Pinto L. (1999), *Absorção de energia e balanços térmicos na corta da Mina de São Domingos*, Relatório da Acção de Formação em Ensino Experimental das Ciências promovida pelo Departamento do Ensino Secundário do Ministério da Educação
- Pires A.C.C.F., Ferreira D.M.S.R., *Relatório da Acção de Formação em Ensino Experimental das Ciências promovida pelo Departamento do Ensino Secundário do Ministério da Educação*

3.4 Comportamento mecânico de materiais: da colher de sopa às dobras do Pomarão

A.MATEUS, J.MAIA ALVES

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Um dos locais possíveis para iniciar uma reflexão séria sobre propriedades mecânicas dos materiais é a mesa de um restaurante. Certamente que no decorrer de uma qualquer refeição muita gente já observou sinais claros de deformação de materiais, por exemplo, ao manusear um garfo. Terá pensado sobre elas o suficiente? O que acontece a um garfo quando o utilizamos para segurar um bife enquanto o cortamos com uma faca? Decerto muita gente já reparou que ele se deforma. Normalmente quando se deixa de exercer força sobre ele a sua forma inicial é recuperada. Outras vezes (sobretudo se se tratar de uma cantina universitária) o garfo adquirirá um novo *design*, porventura passível de rebuscadas análises estéticas, mas certamente de utilidade duvidosa. Porquê esta diferença de comportamentos? E quanto à colher de sopa? Com certeza não foi produzida por abrasão a partir de um bloco maciço de aço inoxidável, por exemplo, porquanto os custos de um processo de fabrico como este seriam enormes. Uma das possibilidades é que tenha sido feita a partir de uma chapa por deformação (prensagem) contra um molde. Neste caso, o facto de a deformação se manter no tempo muito para além da duração da força aplicada tem a sua utilidade, já que seria complicado comer a sopa com uma espátula! Ainda no mesmo restaurante, um olhar à volta permitirá encontrar seguramente novas evidências de materiais que foram sujeitos a processos de deformação controlada para atingirem a forma que os adequa às aplicações pretendidas: os caixilhos de alumínio (fabricados por extrusão), as chapas de aço utilizadas em qualquer balcão (fabricadas por laminagem) ou os fios eléctricos (produzidos numa trefilaria). Já para não falar dos automóveis, cujas portas ou tejadilho, por exemplo, foram também obtidos por prensagem de chapas metálicas. Mas o mais espantoso é que quem, depois da sua refeição, resolver dar uma caminhada pelo campo encontrará provavelmente outras evidências de materiais que foram igualmente deformados (se bem que em condições mais difíceis de precisar). Este facto tornar-se-á muito claro se o itinerário escolhido percorrer uma região onde, à semelhança do que se passa no Pomarão, afloram formações rochosas que evidenciam dobramentos à escala meso- e macroscópica. As perguntas surgem então inevitáveis: Serão os mesmos mecanismos que estão aqui em jogo? Que forças deram origem a estas estruturas

naturais? Como é possível que estes materiais tenham comportamentos de alguma forma análogos aos que se observam nas ligas metálicas (e noutros materiais) que utilizamos no dia a dia?

Despoletada a interrogação com base na observação crítica, importa desde logo tornar claro do que estamos a falar, definindo de forma rigorosa o que entendemos por deformação. Do ponto de vista estritamente disciplinar da Física podemos definir deformação de um corpo como qualquer processo que altere a posição relativa de pelo menos dois pontos desse mesmo corpo. Ficam assim fora deste conceito todas as translações e rotações puras que se possam aplicar ao corpo, já que estas em nada contribuem para tal alteração. Embora em princípio concorde com esta definição, qualquer geólogo ficará rapidamente em apuros quando tenta aplicar uma translação ou uma rotação pura, por exemplo, à Europa. É que não será fácil fazê-lo sem que com isso induza deformação em vários domínios da placa Euro-asiática ou mesmo da placa Africana. É no fundo a própria noção de corpo que começa a levantar problemas: fará sentido, neste contexto, considerar um continente, ou melhor, uma placa litosférica, como um corpo isolado? E o próprio planeta Terra? Será lícito dizer que uma rotação em bloco não provoca nenhuma deformação quando temos conhecimento da existência de marés continentais (neste caso dependentes da existência de corpos celestes vizinhos) ou do achatamento polar? Não será portanto de estranhar que, na análise da deformação naturalmente acomodada pelas rochas, se fale em estruturas geradas por movimentos de translação ou de rotação. Este é apenas um primeiro exemplo do tipo de dificuldades introduzidas pelos factores de escala (neste caso espacial). Também a escala de tempo em que ocorrem as deformações geológicas levanta alguns problemas, embora aqui, como veremos adiante, existam paralelos muito esclarecedores com algumas situações em Física facilmente realizáveis em laboratório. Tais analogias não resolvem, no entanto, o problema-base de qualquer geólogo: não consta que tenha havido ou que possa haver possibilidades de este "assistir" em tempo real às vicissitudes experimentadas pelas rochas durante, por exemplo, os processos orogénicos, algo que naturalmente dificultará sobremaneira a sua análise de resultados. Mas voltemos à definição de deformação.

É mais ou menos intuitivo que existem diferentes processos de deformar um corpo. Em qualquer caso, porém, para o fazer, será sempre necessário aplicar-lhe forças cuja resultante se caracterizará por ter um módulo e um momento nulos (pois de outro modo dará origem a um movimento de translação ou rotação puros). A deformação resultante poderá corresponder a uma deformação pura em volume (preservando a forma do objecto), a uma deformação apenas de forma (como as que ocorrem nos líquidos que, em geral, são essencialmente incompressíveis) ou, de uma maneira geral, envolverá a alteração de ambas. Suponhamos, por exemplo, que aplicamos uma força de extensão a um fio ao longo do seu comprimento. Se imaginarmos um sistema de eixos em que o fio se encontre alinhado segundo a direcção OZ, é fácil mostrar que a deformação sofrida pelo fio ocorrerá a volume constante (em primeira aproximação) se as deformações relativas segundo¹ OX (ϵ_x) e segundo OY (ϵ_y) corresponderem a metade da deformação relativa segundo OZ (ϵ_z) (e forem naturalmente de sinal contrário), ou seja, se o coeficiente de Poisson do material - definido como $(\epsilon_x)/(\epsilon_z) = (\epsilon_y)/(\epsilon_z)$ - valer $-1/2$.

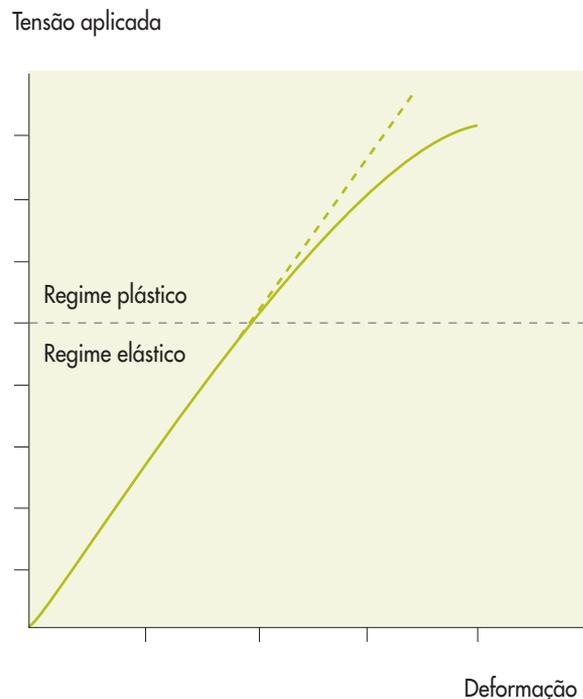


Figura 1 – Representação esquemática de uma curva típica de tensão/deformação.

Uma vez definido o que entendemos por deformação, importa prosseguir numa linha de sistematização das observações experimentais. Assim, dizemos que uma dada deformação ocorre em regime elástico quando, uma vez retirada a carga responsável pela deformação, o objecto em estudo recupera a sua forma inicial. Quando tal não se verifica, à semelhança do que acontece com o tal garfo da cantina universitária, dizemos que a deformação se processa em regime plástico. A distinção entre estas duas situações nem sempre é tão clara como seria desejável, o que significa que há necessidade de ser um pouco mais objectivo relativamente à distinção entre estes dois regimes de deformação. Somos assim conduzidos à necessidade de analisar o comportamento mecânico dos materiais à luz das curvas de tensão-deformação (definindo tensão como força aplicada por unidade de área). Uma destas curvas típicas, que se pode obter facilmente nas escolas secundárias para diferentes materiais, incluindo ligas metálicas (Pinheiro *et al.*, 1999), encontra-se representada na figura 1; a sua análise revela claramente a existência de dois regimes de deformação essencialmente distintos: enquanto na região das baixas tensões aplicadas é notória a existência de uma relação linear entre as tensões e as deformações (lei de Hooke), o mesmo não sucede acima de uma determinada tensão aplicada (que designaremos por tensão de cedência).

¹ Entende-se por deformação relativa o quociente $\Delta L/L_0$, única quantidade que, para uma dada tensão aplicada, corresponde à medida da extensão da deformação do material.

Verifica-se experimentalmente que, dentro da primeira destas regiões, as deformações ocorrem em regime elástico e, por esse motivo, denomina-se por constante elástica o coeficiente envolvido na lei de Hooke, ou seja, o quociente entre a tensão aplicada e a deformação que lhe corresponde². Para tensões aplicadas superiores à tensão de cedência, ultrapassamos o limite elástico do material em questão (nas condições experimentais em que o ensaio é realizado) e passamos a ter deformações plásticas, ou seja, não reversíveis. Estas deformações são superiores às que seriam de esperar se o regime elástico se mantivesse. É comum, na área das Engenharias, definir tensão de cedência do material como sendo aquela acima da qual a deformação plástica é significativa (naturalmente do ponto de vista das aplicações). Vemos assim que, mesmo através da análise das curvas de tensão-deformação, a definição rigorosa do ponto a partir do qual se entra no regime plástico não é nem óbvia nem consensual. Tal facto não nos parece no entanto significativo ao nível que nos pretendemos colocar no âmbito destas notas, já que acima de tudo nos parece importante que se tome consciência da existência destes dois regimes que têm forçosamente de ser o resultado macroscópico de diferentes realidades microscópicas (envolvendo a acção de distintos mecanismos de deformação).

São muitas as perguntas que alguém minimamente atento fará perante uma curva como a que se representa na figura 1. Como sempre acontece em Ciência, cada uma dessas perguntas, desde que bem feita, será uma ferramenta de valor inestimável para voltar a partir em exploração da realidade. E a primeira questão que, por norma, se levanta é extremamente simples: O que acontece se a tensão aplicada ao material continuar a aumentar? Surgirão novos regimes? A resposta a esta questão pode e deve ser obtida experimentalmente nas nossas escolas (Pinheiro *et al.*, 1999). Se mais uma vez prosseguirmos na linha da sistematização dos resultados experimentais, verificaremos a existência de dois tipos de materiais: os que apresentam comportamento dúctil, ou seja, os que conseguem acomodar grandes deformações plásticas antes da fractura (como é o caso do cobre ou do ferro puro), e, por outro lado, os que, não conseguindo fazê-lo, fracturam fragilmente depois de uma pequena deformação plástica (como é o caso de um conjunto muito diferenciado de aços catalogados como materiais que apresentam fractura frágil). Esta diferença de comportamentos pode ser apreciada de forma absolutamente espectacular realizando ensaios de tracção em fios de aço e de cobre (Pinheiro *et al.*, 1999), sendo inclusivamente possível observar o aparecimento, no caso do cobre, de um regime de fluência no qual o material deforma continuamente no tempo sob acção de uma tensão constante aplicada.

2 A constante elástica envolvida no exemplo anteriormente referido denomina-se por módulo de elasticidade ou módulo de Young. Existem outras constantes elásticas que se utilizam correntemente como sejam o módulo de compressibilidade, que nos dá conta da deformação em volume que o material sofre quando sujeito a uma tensão como a que ocorre no interior de um fluido (apenas com componentes perpendiculares às suas paredes), ou o módulo tangencial que dá conta do ângulo de deformação de um sólido sujeito a forças paralelas às suas paredes. De modo geral, ou seja, no caso de materiais cujas estruturas apresentam baixa simetria (como acontece com os cristais triclinicos), o número de constantes elásticas diferentes que caracterizam o material pode ser elevado, uma vez que existem muitas maneiras não equivalentes de deformar a estrutura. Não são esses, no entanto, os casos que aqui nos interessam já que estaremos sempre a trabalhar com materiais policristalinos que se comportam como isotropos, apresentando apenas duas constantes elásticas independentes.

Estes ensaios permitem igualmente a determinação do coeficiente de Poisson (pelo menos no caso do cobre).

A classificação dos materiais à luz do seu comportamento dúctil e frágil, passível de ser efectuada com base neste tipo de experiências, e o que ela implica, quer do ponto de vista das aplicações, quer na perspectiva das técnicas de transformação utilizadas na indústria, pode e deve ser discutida em ligação muito directa com a realidade que nos rodeia. A título de exemplo poderemos perguntar se a caixilharia de alumínio existiria como actualmente a vemos e utilizamos se, entre outras coisas, o alumínio não fosse um material suficientemente dúctil para permitir a sua extrusão, ou seja, a sua enformação plástica, forçando-o a passar plasticamente através de uma matriz (com formas que podem ser extremamente complexas).

A diferença substancial de comportamento entre o ferro puro e os aços é um bom motivo de reflexão, pois sabemos que os aços são, na sua essência, ligas de ferro às quais se adicionam pequenas quantidades de outros elementos de liga como o carbono, o cromo, o manganês, o titânio, *etc.*, conforme o tipo de aplicação que se pretende dar ao aço. Se levarmos mais longe a nossa investigação seremos forçados a concluir que mesmo materiais com igual composição terão comportamentos completamente distintos se forem sujeitos, por exemplo, a diferentes tratamentos térmicos. Estes dois resultados são, naturalmente, muito relevantes do ponto de vista da compreensão dos mecanismos que determinam, a nível microscópico, o comportamento mecânico dos materiais. A sua discussão ultrapassa, no entanto, claramente o âmbito do que deverá ser feito ao nível da escolaridade a que se dirigem as presentes notas.

De modo geral, podemos dizer que o comportamento elástico de um material depende de muitos parâmetros físicos, não obstante a natureza do material sujeito a tensão determinar frequentemente quais os que, em cada situação, se afiguram críticos. Pela sua importância na caracterização dos materiais com interesse geológico salienta-se a temperatura e o teor em humidade. A discussão detalhada da forma como a temperatura e o teor em humidade influenciam o comportamento desses materiais não pode, mais uma vez, ter lugar neste contexto. Existem, no entanto, "experiências" simples que todos já fizemos, ou às quais assistimos no dia-a-dia (talvez sem sequer reparar ou pensar sobre elas e, portanto, sem com isso obter nenhum benefício no que respeita à compreensão da realidade que nos cerca), revelando claramente que as propriedades mecânicas de alguns materiais dependem desses parâmetros. Todos nós, ao andar pelo campo, resolvemos, por um ou outro motivo, colher um pequeno ramo de uma árvore ou arbusto, e verificamos que, quanto menos seco ele se encontra, mais difícil se torna fazê-lo (o que não significa que tenhamos de fazer mais força para o dobrar!). Utilizando a linguagem que temos vindo a introduzir podemos dizer que, enquanto um ramo seco quebra fragilmente, um ramo "verde" (com elevado conteúdo em água) apresenta ductilidade de alguma forma irritante do ponto de vista de quem o pretende arrancar, já que facilmente acomoda significativa deformação plástica antes de partir (o que é aliás muito útil do ponto de vista da sua resistência ao vento por exemplo), adquirindo novas formas depois de sujeito aos nossos maus tratos. Tal não significa que não tenhamos de fazer eventualmente mais força para flectir o ramo seco; e é muito importante que estes dois aspectos da questão não se confundam. Relativamente à importância da

temperatura no comportamento mecânico dos materiais, também muitos de nós tiveram já a enorme satisfação de retirar de uma máquina de lavar louça um objecto de plástico que tenha estado sujeito a alguma tensão durante a lavagem a alta temperatura (do ponto de vista do plástico!), tendo assim sido transformado em mais uma inutilidade doméstica em cerca de uma hora. O factor tempo é aqui interessante, porque se tivéssemos colocado o mesmo objecto plástico entre dois objectos pesados, mesmo à temperatura ambiente, durante tempo suficiente, ele teria deformado exactamente do mesmo modo. Tal significa que, independentemente do que se passa a nível microscópico durante a deformação do referido objecto, precisamos de tempo para que o mesmo ceda plasticamente, dependendo o tempo de outros factores, como a temperatura.

Um exemplo espectacular da importância do tempo no comportamento mecânico pode ser observado com um material que se obtém misturando num recipiente cerca de 125ml de cola branca com outros 125ml de água, e noutro recipiente 125ml de água e uma colher de chá (aproximadamente 5ml) de borax em pó. Misturando em seguida o conteúdo dos dois recipientes e mexendo com uma colher ir-se-á gradualmente formando (agarrado à colher) um material polimérico constituído por longas cadeias com ligações cruzadas relativamente fracas. Este material é facilmente moldável com as mãos aplicando pouca força e, uma vez na forma de uma bola e colocado em cima de uma mesa, deformará sob a acção do seu próprio peso à medida que as ligações cruzadas entre as cadeias se vão lentamente soltando e religando noutros locais, exibindo assim comportamento perfeitamente dúctil. No entanto, se a mesma bola sofrer um impacto brusco (caindo, por exemplo), fragmentar-se-á em muitos pedaços, pois as ligações não terão tempo suficiente para se reajustar.

Tal como fomos repetidamente afirmando ao longo deste documento, não entrámos propositadamente na explicação do comportamento mecânico dos materiais em termos microscópicos. Dito de outra maneira, e a não ser no último exemplo, não demos explicação rigorosamente nenhuma do que se passa no "interior dos materiais" que faz com que uns sejam mais dúcteis que outros, ou que apresentem constantes elásticas mais elevadas (oferecendo, portanto, mais resistência à deformação no regime elástico). Limitámo-nos a deixar que o leitor intua que, enquanto em regime elástico não ocorrem alterações permanentes no material, a passagem para o regime plástico sublinha o início dessas mesmas alterações e que, portanto, neste último regime, os átomos adquirem de alguma forma diferentes arranjos, procurando novas posições de equilíbrio na estrutura do material. Uma discussão mais aprofundada destas questões só será viável se for acompanhada de um estudo, mesmo que elementar, do que é a matéria condensada (incluindo o estado sólido³ e outras estruturas com menor grau de ordem) que permita discutir de forma séria como é que esses rearranjos internos se podem fazer e quais os seus "custos energéticos".

Do exposto facilmente se deduz que, por maioria de razão, a caracterização reológica das rochas à luz dos comportamentos elástico, plástico, termoelástico,

³ Por estado sólido entende-se toda a porção de matéria com ordem a longa distância nas três direcções do espaço.

viscoplástico ou viscoelástico para diferentes condições ambientais e de tensão é, claramente, uma tarefa impossível de realizar ao nível do ensino básico/secundário. Tal não retira importância educativa a estes conceitos e não significa que a introdução dos mesmos não tenha lugar durante aqueles níveis de escolaridade. Nesta perspectiva, a realização de experiências com materiais facilmente manipuláveis em laboratório (e.g. ligas metálicas) que permitam o estudo de casos simples do ponto de vista da interpretação de resultados (macroscópicos) deve ser promovida, embora deixando bem claro que a extrapolação directa dos resultados assim adquiridos para a complexa realidade geológica se afigura impossível. A realização deste tipo de experiências, acompanhada de uma interpretação rigorosa dos resultados entretanto obtidos, possibilitará a compreensão dos diferentes regimes em que se pode efectuar a deformação mecânica de materiais, como também a medição de vários parâmetros mecânicos importantes (como sejam os módulos de *rigidez*, de *compressibilidade*, de *elasticidade* - ou de Young -, e o coeficiente de Poisson). O conhecimento adquirido por esta via, para além de permitir a compreensão de muitas das opções tomadas relativamente à escolha de numerosos materiais que nos rodeiam no dia-a-dia para a execução de diferentes tarefas, constituirá, sem qualquer dúvida, uma base fundamental sobre a qual será possível alicerçar muito do conhecimento sobre a deformação acomodada por corpos rochosos. Tal não significa (nunca é demais acentuar!) que no estudo do mais simples dos objectos geológicos (naturalmente mais ricos e complexos) não tenham de ser utilizadas outras "ferramentas" de observação e medição, para fazer face às diferentes escalas (de espaço e tempo) em que as deformações ocorrem e à heterogeneidade dos materiais envolvidos. Neste contexto, acresce referir que a caracterização do comportamento mecânico dos minerais e rochas reveste-se de particular importância na compreensão dos processos que directamente condicionam a nucleação e propagação das estruturas geológicas a várias escalas e, assim, na racionalização dos fenómenos tectónicos naturalmente desencadeados pela dinâmica própria do Planeta. O conhecimento adquirido por esta via permite adicionalmente compreender as razões que sustentam a utilização de minerais e rochas como matéria-prima em variadíssimas aplicações industriais e tecnológicas, bem como entender muitos dos problemas geotectónicos vulgarmente equacionados na projecção e construção das mais diversas obras de engenharia civil.

As observações de terreno devem constituir o ponto de partida para qualquer estudo da deformação naturalmente acomodada pelas rochas, em geral, e para o conjunto de experiências que, em particular, se pretende concretizar com vista à compreensão de alguns dos parâmetros que condicionam a geometria das estruturas observadas. Por *deformação* entende-se, em termos geológicos, todas as modificações experimentadas por um determinado corpo rochoso ao nível do seu posicionamento original, orientação, morfologia e volume, pelo que se afigura determinante caracterizar o conjunto das estruturas geradas para acomodar tais transformações. À escala meso- e macroscópica, a deformação de um corpo geológico diz-se *frágil* se perturbar irremediavelmente a coesão interna deste último; caso contrário, toma a designação de *dúctil* (em consonância, portanto, com as definições que anteriormente introduzimos). Significa isto que os conceitos frágil e dúctil apenas têm valor macrofísico; ou seja, nada nos dizem sobre o modo como se processa a acomodação da deformação e, conseqüentemente, nada nos

informam acerca da natureza descontínua ou contínua dos mecanismos de deformação responsáveis pela gênese das meso e macroestruturas geológicas. Desta forma, sem a introdução de outro tipo de parâmetros que possibilitem inferir os mecanismos de deformação activos em dado processo geológico (envolvendo fluxo cataclástico, fluência difusiva e/ou escoamento plástico), afigura-se falaciosa qualquer tentativa de caracterizar reologicamente as rochas (à luz do seu comportamento plástico, viscoplástico ou viscoelástico para diferentes condições ambientais e de tensão).

O exame estrutural da deformação naturalmente acomodada pelas rochas ou artificialmente gerada (quer em provetes de rocha, quer em materiais com comportamento mecânico análogo) compreende três abordagens distintas, se bem que complementares: 1) análise descritiva; 2) análise cinemática; e 3) análise dinâmica. A análise descritiva consiste no reconhecimento e descrição das estruturas geradas durante a deformação de um corpo geológico, visando medir as suas orientações e avaliar as suas geometrias (tendo em conta as relações espaciais estabelecidas entre linhas e superfícies reais ou imaginárias, perfeitas, identificáveis no terreno e passíveis de medição). A análise cinemática procura interpretar os movimentos responsáveis pelo desenvolvimento das estruturas formadas a diferentes escalas durante a deformação de um corpo geológico, sistematizando-os (*translação* - alteração de posicionamento; *rotação* - modificação da orientação; *distorção* - transformação morfológica; e *dilatação* - variação na dimensão) e avaliando o estado final de deformação (deformação finita bi- e tridimensional, homogénea ou heterogénea, longitudinal e/ou cisalhante, coaxial ou não coaxial). A análise dinâmica corresponde, por sua vez, ao exame das relações entre a tensão e a deformação, *i.e.*, à interpretação dos movimentos de deformação experimentados por um corpo geológico em termos das tensões responsáveis pela gênese das estruturas preservadas no registo geológico a diferentes escalas, reconhecendo adicionalmente a resistência oferecida por aquele corpo à deformação (e, por isso, necessitando do conhecimento de vários parâmetros mecânicos, como sejam os módulos de *rigidez*, de *compressibilidade*, de *elasticidade* - ou de Young -, e o coeficiente de Poisson).

Do exposto se depreende que as análises cinemática e dinâmica das estruturas geológicas desenvolvidas durante a deformação de um corpo geológico se firmam nos resultados da análise descritiva - a fonte primária dos dados (até porque, nos casos reais, o ponto de partida corresponde sempre ao estado deformado, sendo, portanto, desconhecidas as relações iniciais, bem como a cinemática e dinâmica dos processos que conduziram à alteração daquelas). Por isso, em termos de ensino, qualquer abordagem ao comportamento mecânico dos materiais geológicos deverá começar pelos aspectos relacionados com a análise descritiva das estruturas geradas durante a acomodação da deformação. A nível de ensino secundário, porém, existem vantagens pedagógicas e didácticas acrescidas se a análise descritiva recair complementarmente sobre resultados de experiências envolvendo materiais com comportamento mecânico análogo ao das rochas. Deste modo, é possível estudar a gênese e desenvolvimento das estruturas em diferentes estados de deformação progressiva, relacionando, para cada caso, a tensão com a deformação, se bem que as relações causa-efeito daqui emergentes representem sempre modelos muito simples da realidade geológica. A confrontação dos resultados assim adquiridos com as observações e medições

efectuadas em afloramentos paradigmáticos (e convenientemente registadas em caderno apropriado - *livro de campo*) afigura-se, conseqüentemente, de valor inestimável para a compreensão dos parâmetros que regem o comportamento mecânico das rochas e do modo como determinados processos geológicos conduzem à deformação da litosfera.

Com efeito, mesmo a nível introdutório, as actividades de campo devem ser conduzidas por forma a permitir a identificação e medição de todos os elementos geométricos que se revelem cruciais à análise cinemática elementar das estruturas em observação; daqui resultarão certamente dados fundamentais à promoção de discussões futuras sobre as condições de fronteira a impor aos modelos experimentais. Devem, igualmente, os resultados experimentais ser explorados do ponto de vista cinemático e dinâmico, sempre que tal se revele adequado (o que pode ser previamente acautelado através da discussão, concepção e realização de sucessivos ensaios - progressivamente mais complexos - sobre dispositivos controlados e desenvolvidos para o efeito). A subsequente averiguação da plausibilidade geológica dos resultados experimentais à luz dos dados de campo (observações e medições) deverá ser estabelecida convenientemente por forma a contemplar os problemas subjacentes aos efeitos de escala e do tempo requerido pelo desenvolvimento de determinada(s) estrutura(s). Tal permitirá introduzir gradualmente os diferentes parâmetros que determinam a deformação naturalmente acomodada pelas rochas em diversos processos geológicos, de onde se destacam as características mineralógicas e texturais das rochas, a abundância relativa de fluidos intersticiais e sua reactividade química, a pressão litostática, a temperatura e a taxa de deformação. Criam-se assim as condições para se dar os primeiros passos no sentido de avaliar (de forma rudimentar e, necessariamente, com muita prudência) a reologia dos corpos geológicos. Vejamos, pois, a título de exemplo, algumas abordagens deste tipo, tendo por base os procedimentos experimentais desenvolvidos com base numa série de questões formuladas em torno da deformação registada pelas litologias aflorantes na proximidade da Mina de S. Domingos (Pinheiro *et al.*, 1999).

Durante as actividades de campo caracterizaram-se sumariamente do ponto de vista mineralógico e textural diversas rochas metassedimentares detríticas e vulcanoclásticas e deu-se conta da natureza dúctil e frágil da deformação por elas acomodada. Identificaram-se e mediram-se diferentes estruturas à escala mesoscópica: i) planares (fracturas com ou sem movimentação associada e superfícies S , nomeadamente a estratificação - S_0 - e a xistosidade - S_1 -, bem como as relações angulares estabelecidas entre elas); ii) lineares (especialmente as que resultam da intersecção de superfícies S); e iii) dobramentos (dando particular atenção à orientação dos planos axiais e eixos dos dobramentos e às relações angulares estabelecidas entre S_1 e a charneira e flancos dos dobramentos, procurando ainda critérios indicadores de polaridade sedimentar). Reconheceram-se igualmente alguns elementos estruturais passíveis de utilização como critérios cinemáticos em planos de falha, tendo sido medida a respectiva orientação. Alguns dobramentos mesoscópicos foram subseqüentemente objecto de exame detalhado, conduzindo à medição sistemática do seu comprimento de onda e das espessuras apresentadas pelos diferentes horizontes estratigráficos em distintos domínios do dobramento. Sem preocupações de classificar os dobramentos observados, verificou-se que tal se poderia fazer com base em quatro parâmetros

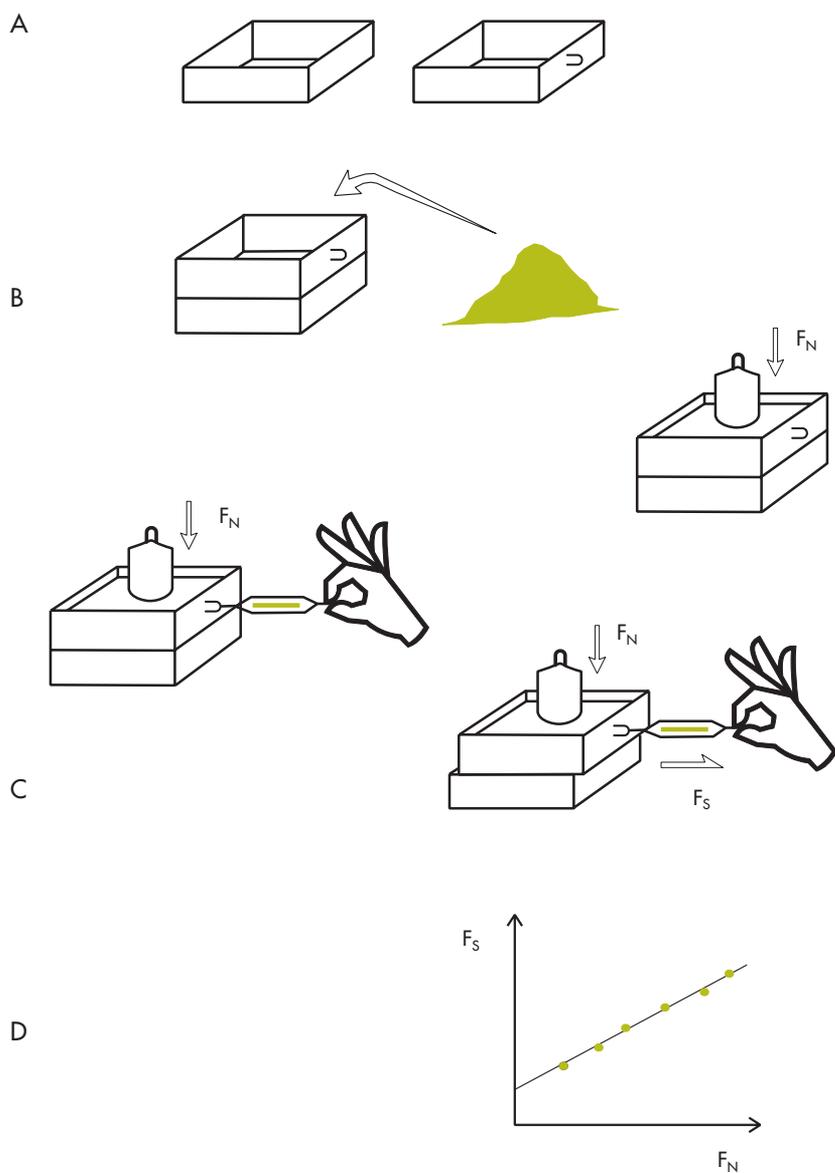


Figura 2 – Representação esquemática do dispositivo experimental denominado "caixa de rotura". A: caixilhos; B: sobreposição dos caixilhos, introdução do sedimento e subsequente compactação, após o que se coloca a placa rígida e um peso conhecido (F_N); C: fixação de um dinamómetro e aplicação de uma força tangencial (F_s); D: relação linear expectável entre F_N e F_s .

fundamentais: i) o sentido de fecho da dobra (antiforma ou sinforma - quando a inclinação dos flancos diverge a partir da charneira ou converge para esta, respectivamente); ii) a orientação do plano axial e eixo da dobra (vertical, inclinada ou deitada); iii) o ângulo de abertura da dobra (ampla, aberta, fechada, apertada e isoclinal); e iv) a natureza do perfil da dobra quando observada perpendicularmente ao seu eixo (paralela, similar, concêntrica e chevron). Ainda no terreno, discutiram-se os conceitos de anticlinal e de sinclinal, bem como o significado da vergência dos dobramentos (mostrando que o seu conhecimento permite deduzir a polaridade estratigráfica através das relações estabelecidas entre S_1 e S_0).

Face à informação colhida no terreno e aos resultados decorrentes das discussões que em seu torno se promoveram, conceptualizaram-se diferentes ensaios de deformação compressiva, utilizando areias, argila e plasticina como materiais de comportamento mecânico análogo ao das rochas metassedimentares e vulcanoclásticas. Tal analogia de comportamento foi testada em ensaios prévios, sujeitando os diferentes materiais, gradualmente e de forma independente, a distintas condições de tensão e fazendo variar algumas das variáveis em jogo. Para o efeito recorreu-se à caixa TECTODIDAC MT 15472 (descrita no capítulo IV.4 do presente volume) e a algumas experiências que passamos a descrever de forma sucinta.

Ensaio qualitativos sobre sequências de areias revelam que, para idênticas condições de tensão aplicada, se formam diferentes estruturas frágeis consoante se varia a granulometria, calibragem e índice de humidade dos sedimentos, bem como a espessura relativa dos mesmos. Quantitativamente, estes aspectos podem (e devem) ser apreciados, recorrendo a dois dispositivos experimentais complementares (em boa parte inspirados nos trabalhos pioneiros de M. K. Hubbert nos anos 40 e 50 do presente século).

O primeiro dispositivo consiste numa simples "caixa de rotura" composta por dois caixilhos de madeira polida exactamente iguais e que se sobrepõem, tendo o cuidado de verificar se estes deslizam facilmente um sobre o outro (fig.2A); o volume interior é subsequentemente preenchido por uma porção de areia (cuja granulometria e índice de humidade são conhecidos), uniformemente distribuída e posteriormente compactada; o topo da coluna de areia é então coberto na totalidade por uma placa rígida (de acrílico, por exemplo) sobre a qual se colocam diferentes pesos⁴ (fig.2B); fazendo uso de um grampo previamente colocado em um dos lados do caixilho superior, aplica-se uma força tangencial (F_S - quantificada com um dinamómetro) por forma a determinar o ponto de rotura da coluna de areia (denunciado pelo deslocamento relativo entre os dois caixilhos - fig.2C). Sucessivos ensaios sobre o mesmo material sujeito a diferentes forças normais (F_N) permite encontrar a relação linear entre F_N e F_S que, expressa graficamente, possibilita a determinação do ângulo de atrito interno (ϕ) da areia (no diagrama F_N versus F_S , a recta conterá a origem do referencial apenas se o atrito entre os caixilhos for nulo - fig.2D). Claro está que, alterando as

⁴ Tal assegura a distribuição da força (F_N) por toda a área interna dos caixilhos (A), permitindo adicionalmente calcular a tensão normal aplicada (σ).

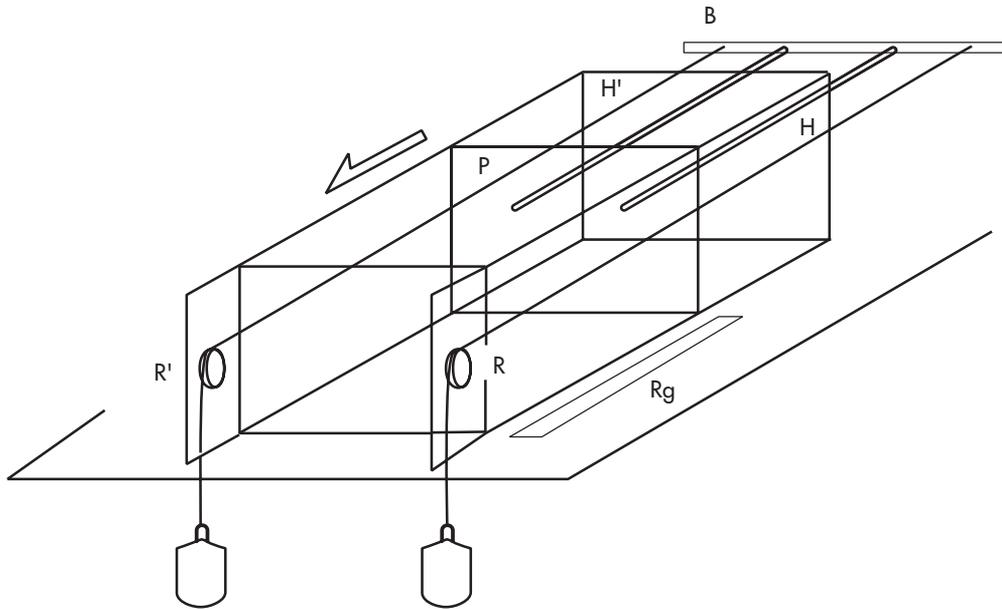


Figura 3 – Representação esquemática do segundo dispositivo experimental ("caixa acrílica para simulação de deformações compressivas"). P: placa amovível; H, H': hastes; B: barra; R,R': roldanas; Rg: régua.

características granulométricas e/ou o índice de humidade da areia, novas relações se estabelecerão entre F_N e F_S , algo que se afigura imprescindível à interpretação das experiências desenvolvidas com o auxílio do segundo dispositivo, nomeadamente no que diz respeito à previsão da orientação tomada pelas falhas no seio de uma sequência sedimentar detrítica sujeita a deformação.

O segundo dispositivo experimental consiste numa caixa de acrílico paralelepédica (fig.3) no seio da qual se coloca uma placa amovível (P) onde previamente se fixaram duas hastes paralelas (H e H') com o mesmo comprimento e a igual distância da base. Dado que as hastes intersectam um dos lados da

caixa, é possível fixar nas suas extremidades uma barra B na qual se prendem dois fios de aço que, passando pelas roldanas (R e R') colocadas na extremidade oposta da caixa, permitem suspender pesos e, assim, conhecer a força compressiva exercida perpendicularmente à placa amovível. Os deslocamentos desta última são medidos com uma régua graduada (Rg) previamente colocada na placa base da caixa, adjacente a uma das paredes laterais. Uma vez montada a caixa de deformação, o espaço compreendido entre a placa P e a parede oposta da caixa é preenchido com as areias anteriormente testadas.

A aplicação de uma força F perpendicularmente à placa P (de área conhecida, A ⁵) permite conhecer a tensão normal (σ) a que é sujeita a areia compactada, pois

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

Ao fim de um determinado tempo e para um certo valor de encurtamento, a superfície superior da coluna de areia evidencia um ligeiro arqueamento, precedendo a génese e propagação de descontinuidades com direcção perpendicular à direcção de compressão aplicada e inclinação muito próxima de ϕ (que integrarão uma família de estruturas paralelas com espaçamento quase regular). Tomando a distância inicial entre a placa P e a parede oposta da caixa acrílica (l_0) e a distância que separa estes dois planos no momento em que se individualizam as primeiras descontinuidades (l_1), calcula-se a deformação longitudinal extensional (e) acomodada pela areia através da expressão

$$e = \frac{(l_1 - l_0)}{l_0}$$

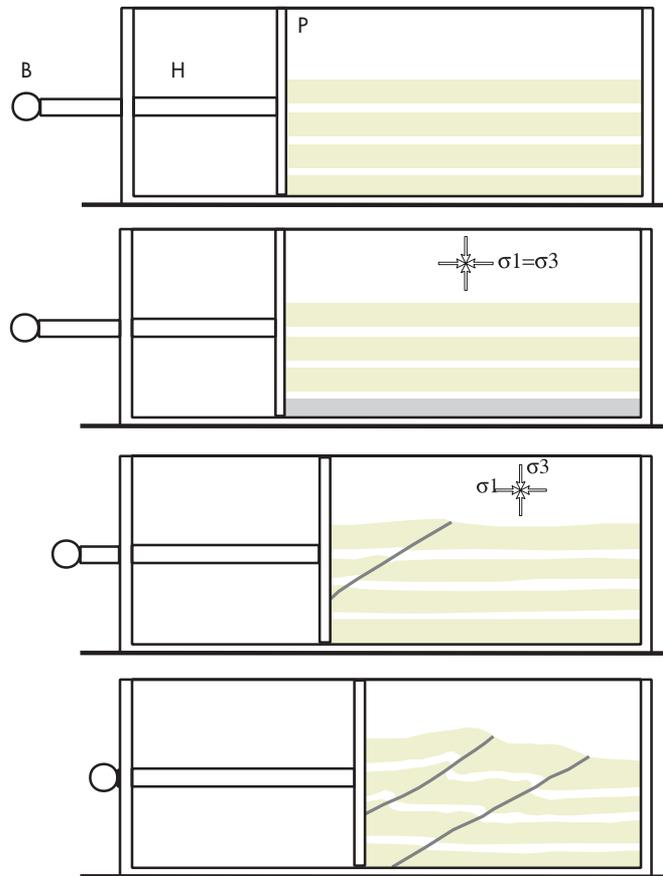
necessariamente negativa, já que, em virtude do encurtamento, $l_1 < l_0$; adicionalmente, determina-se a taxa de deformação ($\dot{\epsilon}$),

$$\dot{\epsilon} = \frac{|e|}{t}$$

uma vez que se conhece o tempo (t) durante o qual se processou a acomodação da deformação. Pretendendo, contudo, caracterizar as descontinuidades geradas por aplicação da força F ao fim de um determinado tempo, teremos de submeter a igual deformação longitudinal uma sequência de estratos artificialmente corados da mesma areia (fig.4A). A presença de marcadores internos permite, então, verificar que as descontinuidades apresentam movimento associado, sendo o

⁵ Entende-se por deformação relativa o quociente D_L/L_0 , única quantidade que, para uma dada tensão aplicada, corresponde à medida da extensão da deformação do material.

A



B

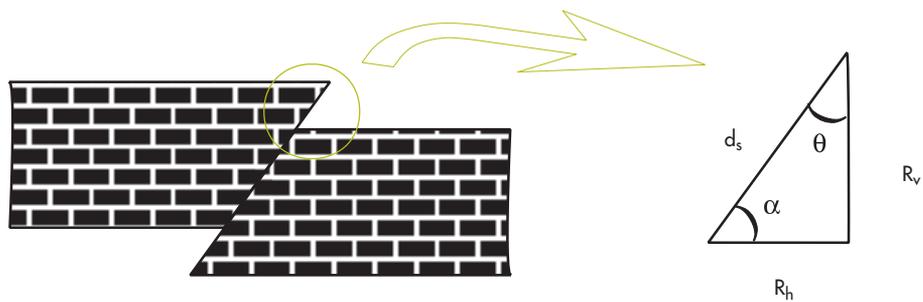


Figura 4 – A: Representação esquemática, vista de perfil, de um ensaio efectuado com a caixa acrílica sobre uma sequência de areias finas bem calibradas. B, H e P com o significado indicado na legenda da figura anterior; σ_1 e σ_3 , tensões normais compressivas máxima e mínima, respectivamente. B: Geometria (ideal e vista de perfil) dos deslocamentos em falhas inversas; R_h , componente horizontal; R_v , componente vertical; d_s , deslocamento.

deslocamento paralelo à linha de máxima inclinação do plano que materializa a descontinuidade. Trata-se, portanto, de falhas oblíquas que, mercê da subida relativa do "bloco suspenso" (i.e., bloco acima do plano de movimento), tomam a designação de falhas inversas; nestas circunstâncias, é possível relacionar o deslocamento ocorrido (d_s) com a inclinação do plano de falha (α) através das expressões

$$\operatorname{sen} \alpha = \frac{R_v}{d_s} \quad \text{e} \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{R_v}{R_h}$$

onde R_v e R_h representam as componentes vertical e horizontal do deslocamento, respectivamente (fig.4B).

Na vizinhança imediata das falhas, os estratos podem apresentar arqueamentos de grande raio de curvatura que, de forma geral, traduzem a resistência oferecida pelos dois compartimentos (acima e abaixo do plano de falha) ao deslocamento ocorrido. O reconhecimento deste tipo de estruturas (frequentemente designadas por dobras de arraste) reveste-se de particular significado, porquanto as mesmas representam marcadores cinemáticos de grande utilidade na interpretação do deslocamento associado a acidentes tectónicos identificados no terreno⁶ (pois nem sempre é possível reconhecer pontos homólogos nos compartimentos adjacentes ao plano de falha). O mesmo acontece com as estrias de escorregamento ou de arraste desenvolvidas durante a movimentação relativa, com atrito, entre os dois compartimentos acima referidos e, não obstante tais aspectos nos coloquem fora do âmbito deste tipo de experiências, importa referi-los, na medida em que justificam o desenvolvimento de ensaios complementares por forma a documentar algumas das relações geométricas passíveis de observação em casos reais.

Mas a exploração deste tipo de experiências não deve ficar por aqui (especialmente se, antes da execução das mesmas, houve o cuidado de introduzir os conceitos teóricos necessários à previsão e análise dos resultados). Efectivamente, com algum esforço adicional e, sobretudo, querendo ir mais longe, outros ensaios podem (e devem) ser realizados com o mesmo equipamento, fazendo variar, por exemplo: i) as características granulométricas do sedimento sujeito a deformação; ii) a quantidade de água intersticial; e iii) as tensões aplicadas. Daqui resultarão dados inestimáveis à compreensão das razões que levam ao aparecimento de sistemas conjugados de falhas (fig.5A), à percepção do papel desempenhado pelos fluidos aquosos na deformação natural das rochas (reduzindo a resistência oferecida pela rocha à fracturação), ao entendimento dos critérios macroscópicos de rotura (como, e.g., o de Navier Coulomb), entre outros aspectos. Neste contexto, a discussão em torno dos valores calculados para a taxa de deformação (ϵ) carece de particular cuidado, pois a sua interpretação correcta afigura-se essencial à compreensão de algumas das dificuldades em extrapolar os resultados experimentais para a realidade geológica - trata-se necessariamente de

⁶ Como aliás se tinha previsto após a observação, análise e discussão de estruturas similares durante as actividades de campo desenvolvidas na região de S. Domingos.

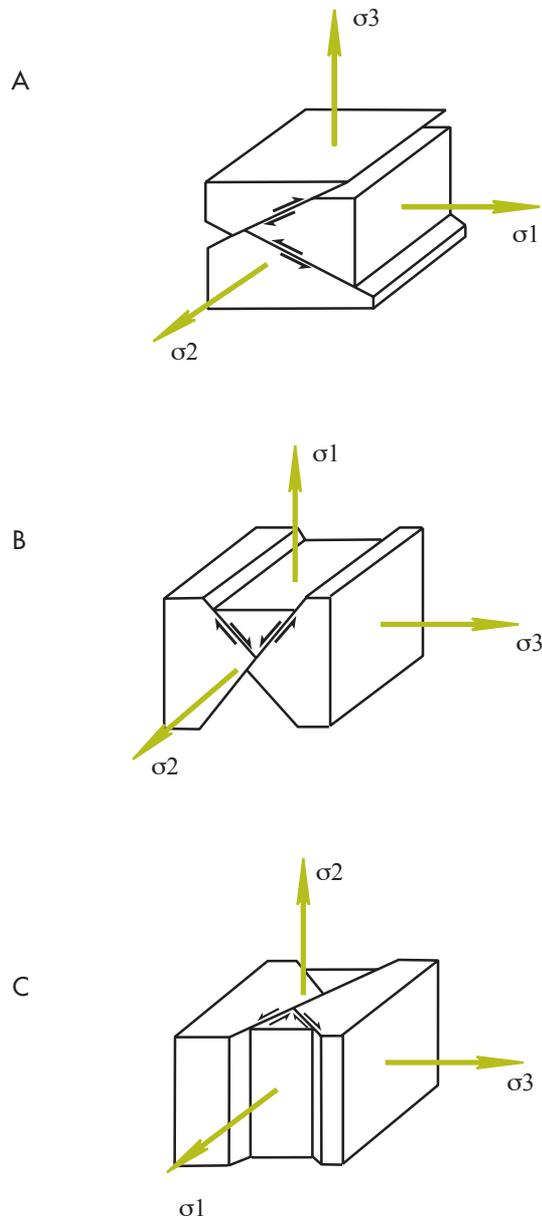


Figura 5 – Representação esquemática dos principais tipos de falhas. A: sistemas conjugados de falhas inversas; B: sistemas conjugados de falhas normais; C: sistemas conjugados de desligamentos. σ_1 , σ_3 e σ_2 tensões normais compressivas máxima, mínima e intermédia, respectivamente.

uma primeira abordagem ao problema, pelo que, antes de invocar todos os parâmetros que condicionam a evolução dos processos de deformação natural, importa tomar consciência do tempo geralmente envolvido na acomodação natural da deformação pelas rochas (geralmente com $\dot{\epsilon}$ em torno de 10^{-9} - 10^{-10} s⁻¹ para deformação induzida por eventos sísmicos e abaixo de 10^{-12} s⁻¹ para deformação devida a escoamento plástico sinorogénico⁷).

Experiências com graus de complexidade superiores aos que acabámos de referir podem ser ensaiadas subseqüentemente, dando mais um passo na aproximação à realidade geológica. Tal só se justifica, porém, após discussão adequada "do que acontece" quando: i) se sujeita um determinado tipo de areia a encurtamentos extremos; ou ii) se deforma uma série de estratos com diferentes índices de humidade e/ou características granulométricas distintas. Uma vez alcançado o nível de conforto necessário à manipulação das caixas de deformação, novos dispositivos poderão ser desenvolvidos, procurando outros arranjos tensoriais.

A adaptação mais simples que se pode fazer com base na caixa acrílica acima descrita decorre da alteração do posicionamento das roldanas R-R', bem como da fixação da barra B às hastes H-H', permitindo a aplicação de forças distensivas perpendicularmente à placa móvel P. Nestas circunstâncias é possível observar a formação de um outro tipo de descontinuidades (falhas normais, mercê da descida relativa do "bloco suspenso"), perpendiculares à direcção de extensão e apresentando uma inclinação equivalente ao ângulo complementar de ϕ (fig.5B). O cálculo de σ , ϵ (desta feita positivo) e dos deslocamentos ocorridos pode ser realizado com base nas expressões atrás referidas, e, uma vez asseguradas as devidas adaptações, a exploração dos resultados segue exactamente o mesmo percurso (apesar de as implicações mecânicas e respectivo significado geológico serem, neste caso, completamente diferentes).

Quando se pretende colocar em evidência os movimentos horizontais associados a superfícies de falha verticais (frequentemente designadas por desligamentos), novos dispositivos terão de ser construídos, assegurando a distribuição no plano horizontal das tensões normais de máxima e mínima compressão (fig.5C). A simulação mais simples que a este respeito pode ser realizada envolve a construção de um pequeno e simples dispositivo constituído por duas caixas de madeira iguais e desprovidas de um dos lados (fig.6A) que, previamente fixadas numa base de madeira (ou acrílico), permitem desenvolver deslocamentos laterais relativos⁸ (direitos ou esquerdos) sobre areia, argila ou plasticina. E, não obstante

7 Vejamos um exemplo muito simples (possível ponto de partida para diversas discussões, cálculos e ensaios experimentais), considerando a deformação de uma série de estratos constituídos por areia de comportamento mecânico já conhecido e comprimento, l_0 , igual a 20 cm. Se, ao fim de 30 minutos de ensaio, a deformação acomodada pela série detrítica denota um encurtamento de 15% ($l_1=17$ cm), então $\dot{\epsilon} = 8.33 \times 10^{-5}$ s⁻¹, valor este muito acima das taxas que traduzem os processos naturais de deformação das rochas. Admitindo para $\dot{\epsilon}$ um valor médio de 10^{-12} s⁻¹ e não alterando as condições experimentais, necessitaríamos de 1.5×10^{11} segundos (cerca de 4756 anos) para produzir igual encurtamento. Nestas circunstâncias, talvez seja bom recordar que as tensões responsáveis pela deformação natural se acumulam lenta mas persistentemente, apesar de excepcionalmente tal poder acontecer de forma quase instantânea (como no caso das variações de tensão induzidas pela queda de meteoritos de grande dimensão), o que, como já se referiu, implicará uma resposta diferente por parte dos materiais.

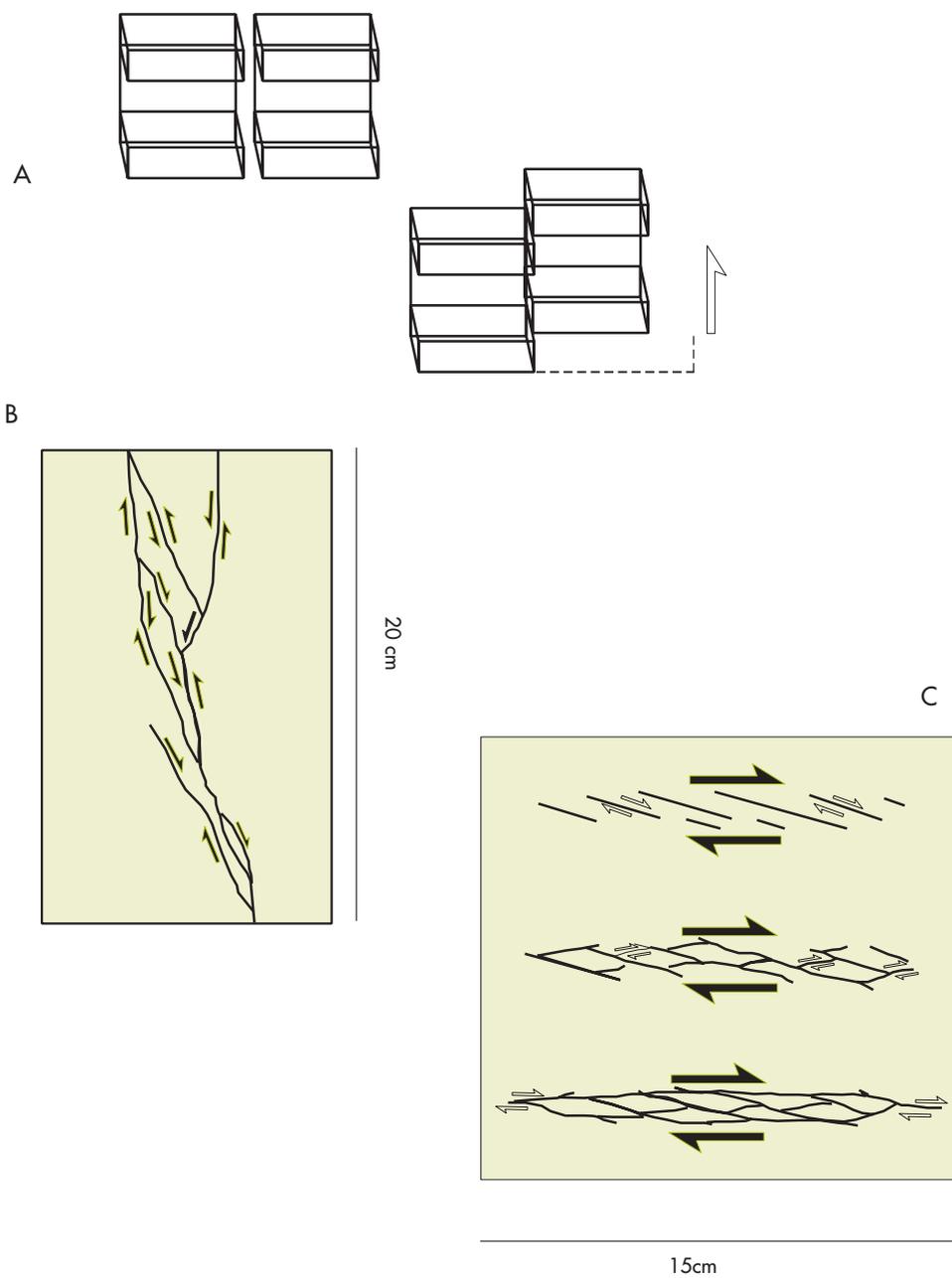


Figura 6 – A: Representação esquemática do dispositivo utilizado para simular roturas em desligamento (esquerdo ou direito). Aspectos gerais (ilustrados de forma muito esquemática) de padrões de falhas gerados experimentalmente em argilas com baixo índice de humidade – A, vista de perfil; C, vista de topo em três momentos diferentes do ensaio.

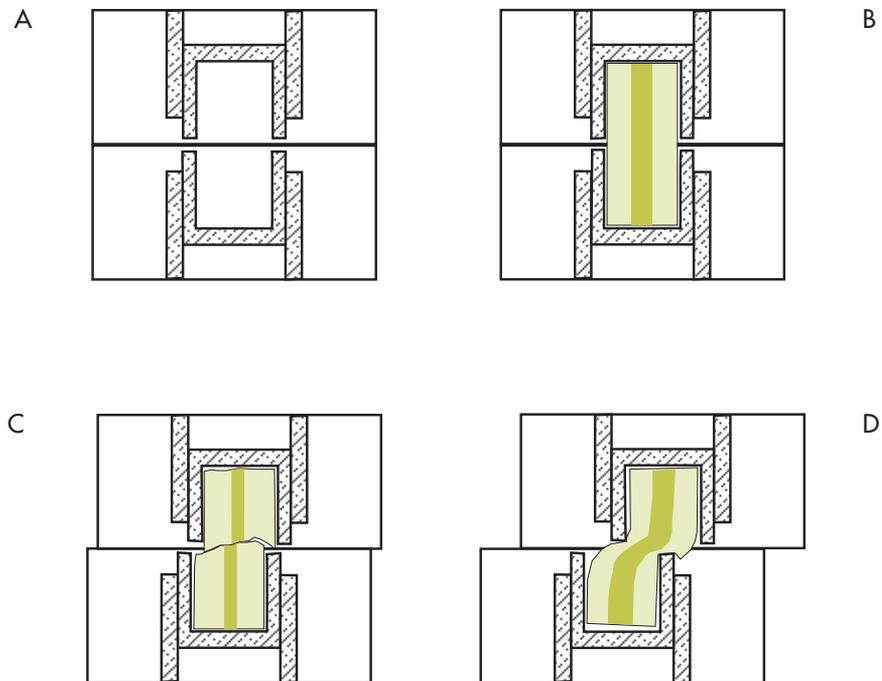


Figura 7 – Representação esquemática da caixa de deformação (A) utilizada para caracterizar o comportamento mecânico frágil e dúctil de uma barra de margarina (B) sob diferentes condições de temperatura ($\approx 10^{\circ}\text{C}$ – C; $\approx 30^{\circ}\text{C}$ – D). A barra de margarina foi previamente polvilhada por um pó colorido ao longo de uma faixa, a qual funcionou como marcador cinemático da deformação mesoscópica; não se gravaram marcadores de deformação na barra de margarina por forma a não introduzir descontinuidades passíveis de alterar a resistência do material; pelas mesmas razões, a medição da temperatura do núcleo da barra de margarina com um termómetro digital foi efectuada no fim dos ensaios.

a grande simplicidade do dispositivo utilizado, numerosas são as informações que, com a sua utilização, se adquirem, as quais podem constituir a base para numerosas discussões, abrangendo diferentes noções de crucial importância geológica.

A identificação e caracterização das diferentes descontinuidades planares que, neste tipo de ensaios, usualmente precedem o desenvolvimento da macrozona de falha, poderão, por exemplo, servir de pretexto para discutir: 1) as fracturas, enquanto entidades dinâmicas que, durante a sua propagação, interagem umas com as outras de forma variável, dependendo dos campos de tensão que se desenvolvem nas suas extremidades (fig.6B); 2) o fundamento das relações

8 A movimentação relativa entre as duas caixas poderá ser executada manualmente ou através da aplicação de pesos, depois de introduzidas as devidas adaptações no dispositivo experimental.

angulares que se estabelecem entre estruturas menores, subsidiárias da zona de fraqueza principal (formando, muitas vezes, arranjos geométricos com disposição escalonada - fig.6C); e 3) os factores que influenciam a natureza dúctil ou frágil do comportamento mecânico macroscopicamente evidenciado pelo material sujeito a deformação; a este propósito, diferentes simulações podem ser realizadas sobre "barras" de argila e/ou plasticina, variando os índices de humidade e/ou as taxas de deformação. A avaliação dos efeitos da temperatura requer a utilização de outro tipo de materiais, se bem que uma vulgar barra de manteiga ou de margarina (a priori representativa de um meio isótropo) possa servir como ponto de partida (fig.7); nestas circunstâncias, porém, importa ter especial cuidado quando se estabelece a analogia mecânica com as rochas, porquanto a cedência dúctil meso- e macroscópica não é sinónimo de escoamento plástico⁹ (ocorrendo geralmente este último sob temperaturas de deformação iguais ou superiores a 1/3 da temperatura de fusão da rocha).

Com base na síntese global de todos os ensaios referidos até ao momento é possível introduzir de forma simples e coerente os principais modos de rotura (fig.8), tendo contudo a consciência que tal representa uma aproximação muito grosseira aos problemas básicos vulgarmente tratados no âmbito da Mecânica de Fractura. Na sequência deste raciocínio, e sem esquecer que as actividades em discussão se destinam primordialmente ao ensino secundário, importa salientar que: i) o movimento acomodado por falhas naturais é quase sempre passível de decomposição vectorial (fig.9); e que ii) a distribuição e geometria apresentada por descontinuidades pré-existentes exerce forte influência nas condições de tensão que governam a rotura da massa rochosa sujeita a tensão. Mas se o primeiro aspecto pode ser facilmente documentado com base em observações e medições no terreno, complementadas com simples ilustrações sobre (por exemplo) blocos de esfervite previamente cortados para o efeito, o mesmo não acontece com o segundo aspecto. Aqui, mais uma vez, se recomenda a análise e discussão de resultados adquiridos em ensaios experimentais concebidos para o efeito onde, por exemplo: i) se introduz no seio do(s) estrato(s) de areia um rectângulo de acetato, fazendo variar a sua dimensão e/ou orientação; e/ou ii) se produz um simples corte no(s) estrato(s) de argila e/ou plasticina, variando a profundidade e orientação da incisão.

O recurso à caixa acrílica descrita anteriormente (fig.3), substituindo a areia por argila e/ou plasticina, permite igualmente simular a génese e propagação de um outro tipo de estruturas de grande importância na análise da deformação naturalmente acomodada pelas rochas: os dobramentos. O procedimento a adoptar nestes casos é, em tudo, semelhante ao descrito atrás, se bem que seja necessário untar com abundante vaselina (sólida, de preferência) as paredes da caixa de deformação para, assim, reduzir o atrito durante o encurtamento da argila e/ou plasticina; a colocação de uma placa de espuma sobre o(s) estrato(s) sob tensão permitirá, adicionalmente, confinar o meio em que os dobramentos se irão desenvolver.

⁹ Por escoamento plástico entende-se todos os mecanismos de deformação que concorrem efectivamente para a plasticidade intracristalina dos minerais constituintes das rochas.

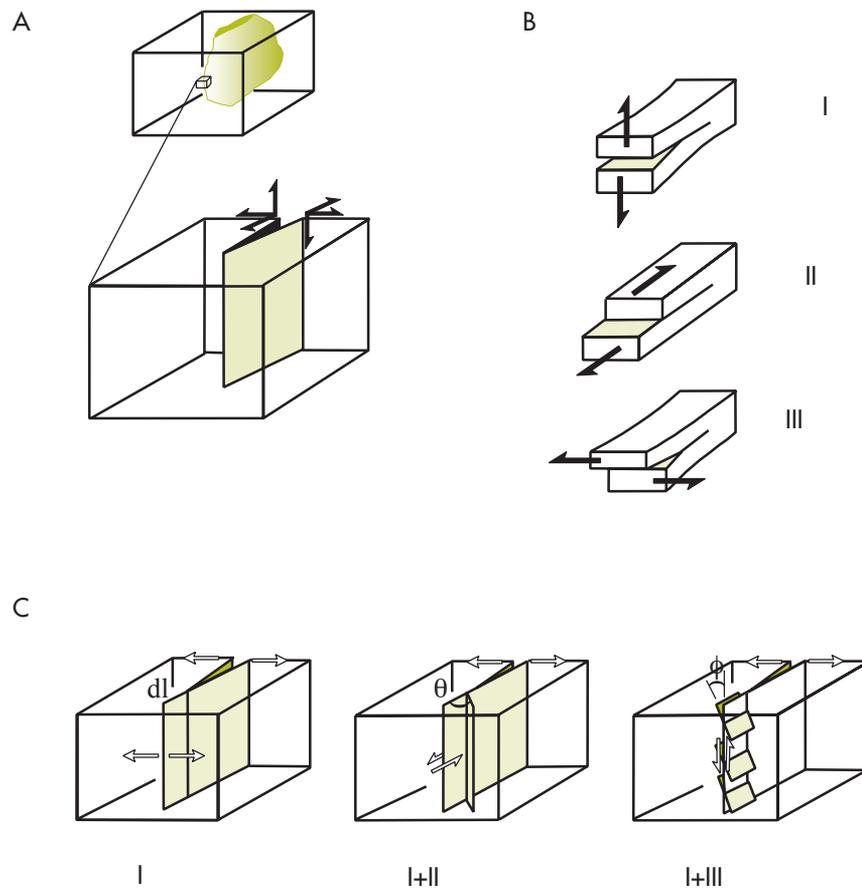


Figura 8 – A: Representação esquemática dos principais modos de rotura tendo em conta os deslocamentos puros ocorridos na extremidade de uma fractura: modo I – deslocamento de abertura perpendicular à superfície de fractura; modo II – deslocamento de cisalhamento paralelo à superfície de fractura e perpendicular à frente de propagação; modo III – deslocamento de cisalhamento paralelo quer à superfície de fractura, quer à frente de propagação. Em termos físico-matemáticos, a fractura desenvolve-se em meio isotropo elástico e é idealizada como uma descontinuidade pontiaguda sem espessura, constituída por duas superfícies aproximadamente paralelas que se intersectam na frente da fractura segundo uma linha recta. B: Configurações geométricas de fracturas ideais após uma extensão incremental dl , para modo I (a propagação ocorre sem mudança de direcção da fractura); modo misto I+II (a propagação ocorre com mudança de direcção da fractura) e modo misto I+III (a propagação envolve a segmentação da fractura).

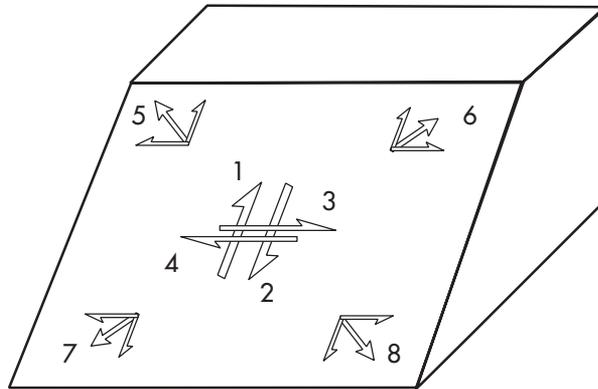


Figura 9 – Deslocamentos relativos sobre o plano de falha e respectiva decomposição vectorial. 1: movimentação inversa (ou cavalgante); 2: movimentação normal (de abatimento ou afundimento); 3: desligamento esquerdo; 4: desligamento direito; 5, 6, 7 e 8: deslocamentos compósitos.

A análise descritiva dos dobramentos (morfologia, arranjo espacial e relação com estruturas frágeis subsidiárias) pode ser realizada após sujeitar argila com diferentes índices de humidade e/ou plasticinas diversas (com viscosidade variável) a distintas condições de tensão. É, então, possível caracterizar a evolução dos dobramentos e estruturas frágeis subsidiárias para sucessivos encurtamentos (geralmente acima de 30%) com base em vários elementos geométricos. Antes, porém, importa realizar alguns ensaios qualitativos, por forma a familiarizar os alunos com as estruturas geradas, dando-lhes, adicionalmente, a oportunidade de: i) identificar os domínios de charneira (ou de fecho - região de máxima curvatura da superfície dobrada) e flancos das dobras (elementos da superfície dobrada articulados pela charneira); ii) medir a amplitude e comprimento de onda das dobras; e iii) determinar a orientação dos planos axiais (superfície imaginária, equidistante de ambos os flancos) e o mergulho dos eixos das dobras (linhas resultantes da intersecção dos planos axiais com o domínio de charneira). Mas, por forma a consolidar muitos aspectos observados no terreno e, simultaneamente, introduzir outro tipo de elementos geométricos imprescindíveis à análise descritiva e cinemática dos dobramentos, particular atenção deverá ser dada ao exame do perfil das dobras geradas experimentalmente e às interdependências estabelecidas entre a natureza do material sujeito a tensão e o estilo de dobramento. Para isso, torna-se importante desenvolver conjuntos diversos de ensaios, sujeitando às mesmas condições de tensão estratos únicos de argila e/ou de plasticina com

espessuras diferentes e/ou equivalentes, fazendo variar ainda os índices de humidade¹⁰; a estas experiências deverão suceder-se outras, envolvendo séries de estratos de argila e/ou plasticina.

A nível elementar, a análise do perfil das dobras (efectuada necessariamente segundo um plano perpendicular ao seu eixo), deverá privilegiar o estudo da variação da espessura apresentada pelos estratos nos diferentes domínios do dobramento, para além da caracterização das estruturas frágeis que subsidiariamente se desenvolvem durante o encurtamento da argila ou da plasticina (fig.10). Se a espessura (medida perpendicularmente à superfície de estratificação) permanecer constante, as dobras dizem-se paralelas; caso contrário denominam-se similares. As dobras concêntricas representam um tipo particular de dobramentos paralelos onde as superfícies dobradas adjacentes correspondem a arcos de círculo com um centro comum (vulgarmente designado por centro de curvatura da dobra). Mercê da sua geometria, as dobras paralelas ou concêntricas não podem afectar mais do que uma espessura finita da série de estratos, facto que se traduz por um decréscimo progressivo da sua amplitude à medida que nos afastamos dos centros de curvatura; conseqüentemente, encurtamentos ulteriores serão acomodados via génese de estruturas frágeis e/ou achatamento progressivo das dobras (fig.11A). Nas dobras similares, a espessura ortogonal apresentada pelos estratos varia de modo sistemático, mantendo-se, contudo constantes os valores de espessura medidos paralelamente aos planos axiais; não podendo acomodar mais deformação via redução gradual do ângulo de fecho, geram-se diversas estruturas frágeis que poderão formar sistemas com arranjo geométrico variável (fig.11B). É ainda possível considerar um terceiro tipo de dobras – ditas em *chevron* – que se desenvolvem preferencialmente em sequências de multi-estratos com espessura reduzida, mas relativamente constante; este tipo de dobramentos apresenta, por definição, flancos planares e charneiras rectas.

Como resultado de todas estas experiências, numerosas conclusões deverão emergir e poderão ser exploradas, nomeadamente no que diz respeito à: i) influência exercida pela variação de espessura e pelos contrastes de competência mecânica entre estratos adjacentes na amplitude e comprimento de onda dos dobramentos gerados (fig.11C); ii) possibilidade de os estratos deslizarem entre si (estratificações cinematicamente activas) e/ou de se desenvolverem descolamentos locais (em especial nos domínios de charneira); iii) formação de sistemas de dobramento harmónicos (quando as dobras desenvolvidas em estratos vizinhos se correspondem em comprimento de onda) ou desarmónicos, simétricos ou assimétricos (havendo, neste último caso, vantagens em caracterizar a vergência). Daqui se poderá partir para discussões acerca da resposta activa ou passiva dos estratos sujeitos a tensão, algo que permitirá introduzir, de forma simples, os

¹⁰ Recomenda-se vivamente que se comece por estudar independentemente os efeitos resultantes da alteração de uma das variáveis, mantendo fixas as restantes. Por exemplo, para iguais condições de tensão: 1) qual a geometria do dobramento apresentado por um estrato de argila e um estrato de plasticina com espessura equivalente ao fim do mesmo encurtamento?; 2) qual a geometria do dobramento apresentado por um estrato de argila e um estrato de plasticina com espessuras díspares ao fim do mesmo encurtamento ?; e 3) quais as modificações registadas pelos dobramentos previamente caracterizados em argila se o índice de humidade for alterado?.

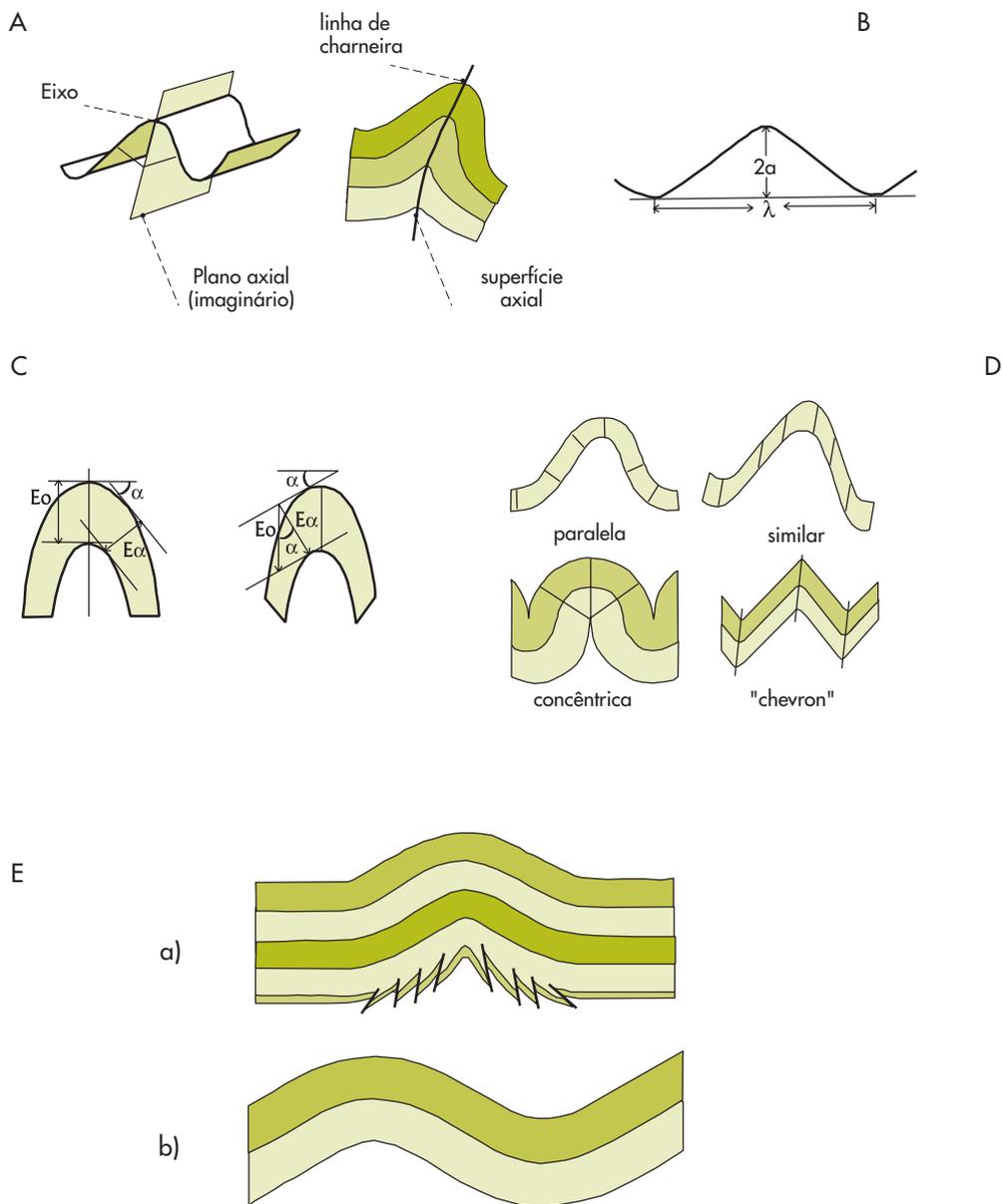


Figura 10 – Representação esquemática: A - do eixo, plano axial e superfície axial de uma dobra; B – do comprimento de onda (λ) e amplitude (a) de uma dobra; C – dos modos como se devem determinar as espessuras ortogonal (E_o) e vertical (E_α) em estratos dobrados de forma distinta; D – dos principais tipos de dobras vistas em perfil (paralela, similar, concêntrica e em *chevron*); E – de dobramentos a) concêntricos e b) similares em seqüências de estratos (podendo, em certas circunstâncias, conduzir ao rompimento dos estratos mais competentes e de menor espessura).

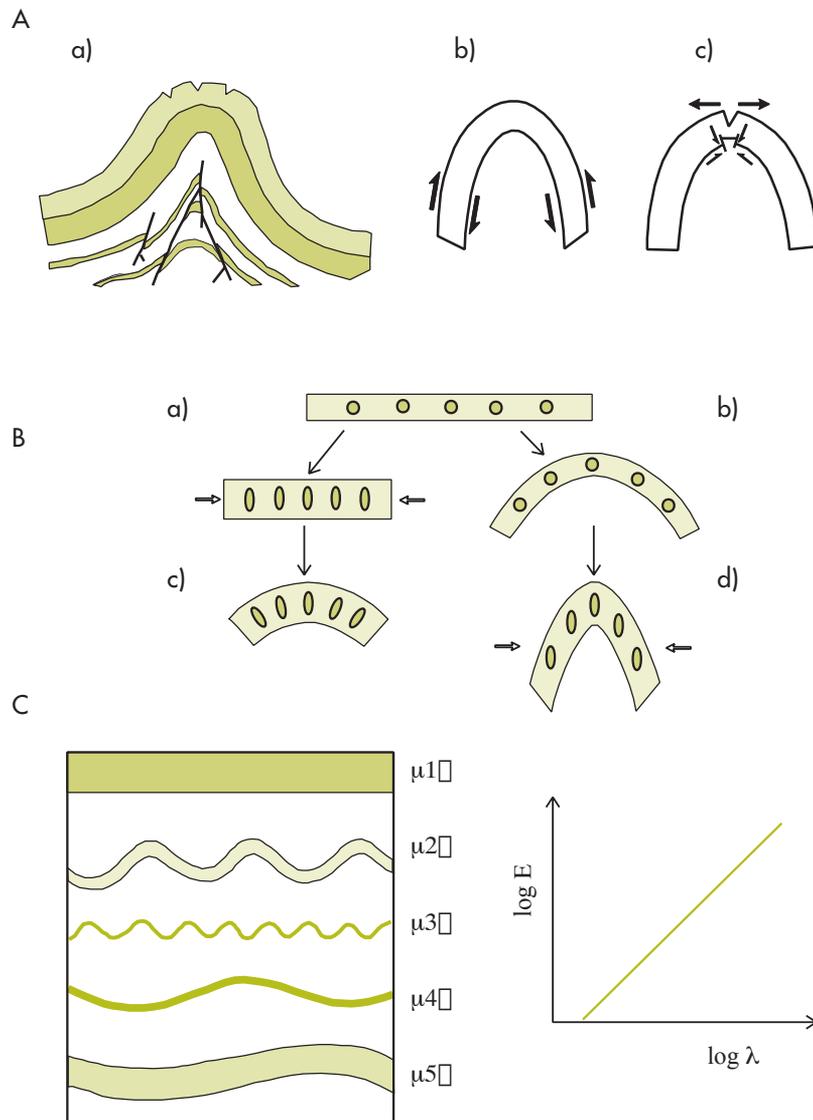


Figura 11 – A: a) falhas síncronas do dobramento de uma seqüência de estratos; b) dobra gerada por flexão e deslizamento entre estratos adjacentes, conduzindo a maior acomodação de deformação pelos flancos; c) dobra gerada por flexão e deslizamento entre estratos adjacentes, onde a deformação se concentra no domínio de charneira. B: deformação de um estrato de referência (onde previamente se inscreveram diferentes círculos – marcadores – cuja subsequente transformação permite obter as elipses de deformação finita); a) encurtamento paralelo ao estrato; b) flexão; c) flexão depois de a); d) achatamento homogêneo depois de b). C: dobramentos desarmônicos em estratos com espessuras e viscosidades (μ) diferentes no seio de uma "matriz" de viscosidade mais baixa (a viscosidade cresce de μ_1 a μ_5); apresenta-se ainda a relação linear expectável entre os valores logaritmizados de espessura e de comprimento de onda apresentado por dobras flexurais em estratos bem separados com viscosidade semelhante.

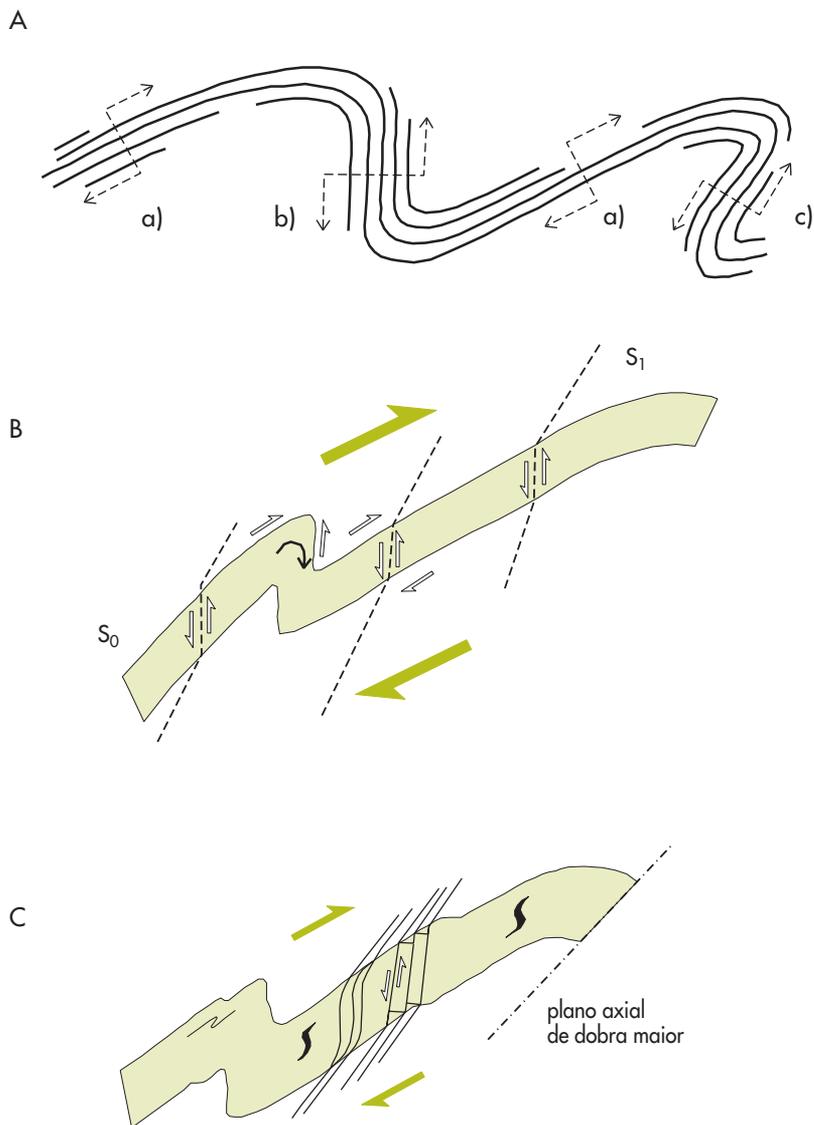


Figura 12 – A: reconstituição dos binários de tensão responsáveis pelo dobramento (inferidos com base nas estrias de fricção entre estratos adjacentes). B: Rotação externa associada ao movimento relativo dos estratos (S_0) em um flanco de dobra flexural, indicando a xistosidade (S_1) e uma charneira antiformal localizada para a direita. C: Representação esquemática de estruturas associadas ao flanco de um antiformal que podem ser utilizadas para a dedução do sentido de vergência.

principais mecanismos de dobramento (flexão, deslizamento flexural, cisalhamento flexural, cisalhamento simples heterogéneo, *kinking*), tornando também claras as limitações do dispositivo experimental utilizado na simulação de muitas estruturas naturais, em particular das geradas por deformação cisalhante. Ainda assim, a percepção de que as dobras obtidas poderão formar padrões de complexidade variável, exibindo frequentemente planos axiais curvos e eixos ondulantes, afigura-se de grande pertinência educativa, especialmente quando se pretende comparar os registos experimentais com diversas observações de campo à escala mesoscópica.

Não obstante as limitações do dispositivo experimental, existem vantagens acrescidas em desenvolver experiências sobre séries de estratos cujas espessuras respeitem a proporcionalidade encontrada em exemplos reais paradigmáticos (após medição sistemática deste parâmetro *in situ*), porquanto tal procedimento possibilita encontrar o factor de escala adequado à interpretação dos resultados experimentais, tornando-os análogos de alguns dobramentos mesoscópicos naturais. Conciliando as observações de campo com os dados experimentais, é também possível explorar convenientemente o significado dos descolamentos entre estratos de diferente competência mecânica, identificando ainda os marcadores que, por norma, documentam a sua presença no registo geológico. O mesmo acontece com os escorregamentos entre estratos: uma vez identificadas as estrias nos planos de estratificação de dobras reais e determinado o sentido de escorregamento com o auxílio de marcadores cinemáticos diversos, é possível reconstituir o binário que gerou o dobramento, pois as direcções de movimento dos estratos superiores em relação aos inferiores convergem para os antifomas e divergem nos sinformas (fig.12). Integrando, por último, os resultados experimentais obtidos para séries compósitas (alternantes) de argilas e areias (previamente testadas), novos horizontes se abrem à discussão das estruturas geradas durante a deformação de sequências metassedimentares detríticas e vulcanoclásticas, ponto de partida para todos estes ensaios, conforme se ilustra nas figuras 13 e 14 (adaptadas das inclusas no trabalho de Pinheiro *et al.*, 1999).

Uma vez discutidos globalmente os resultados experimentais sobre deformação de materiais com comportamento mecânico análogo ao das rochas e realizada a respectiva paralelização com a realidade geológica, facilmente se depreende que a acomodação da deformação naturalmente desencadeada por processos geológicos depende de vários parâmetros, de onde se destacam as características mineralógicas e texturais das rochas, a abundância relativa de fluidos intersticiais e sua reactividade química, a pressão litostática, a temperatura e a taxa de deformação. Os conhecimentos ministrados a nível de ensino secundário impedem, contudo, que neste momento se introduzam os princípios microfísicos subjacentes à caracterização dos diversos mecanismos de deformação natural (algo que se inscreve claramente nos propósitos de cursos avançados em Geologia Estrutural e Microtectónica). Em jeito de remate, importa contudo esclarecer que o presente conjunto de notas tem como objectivo primordial a indicação de algumas actividades experimentais de execução relativamente simples, mas cuja implementação permite articular variadíssimos conteúdos programáticos tradicionalmente leccionados de forma desagregada em diferentes disciplinas (nomeadamente no âmbito da Física e da Geologia), dando-lhes consistência pela via da inter/multidisciplinaridade. Tentou-se ainda mostrar que a complementaridade entre as actividades de campo e de laboratório, se devidamente explorada, conduz

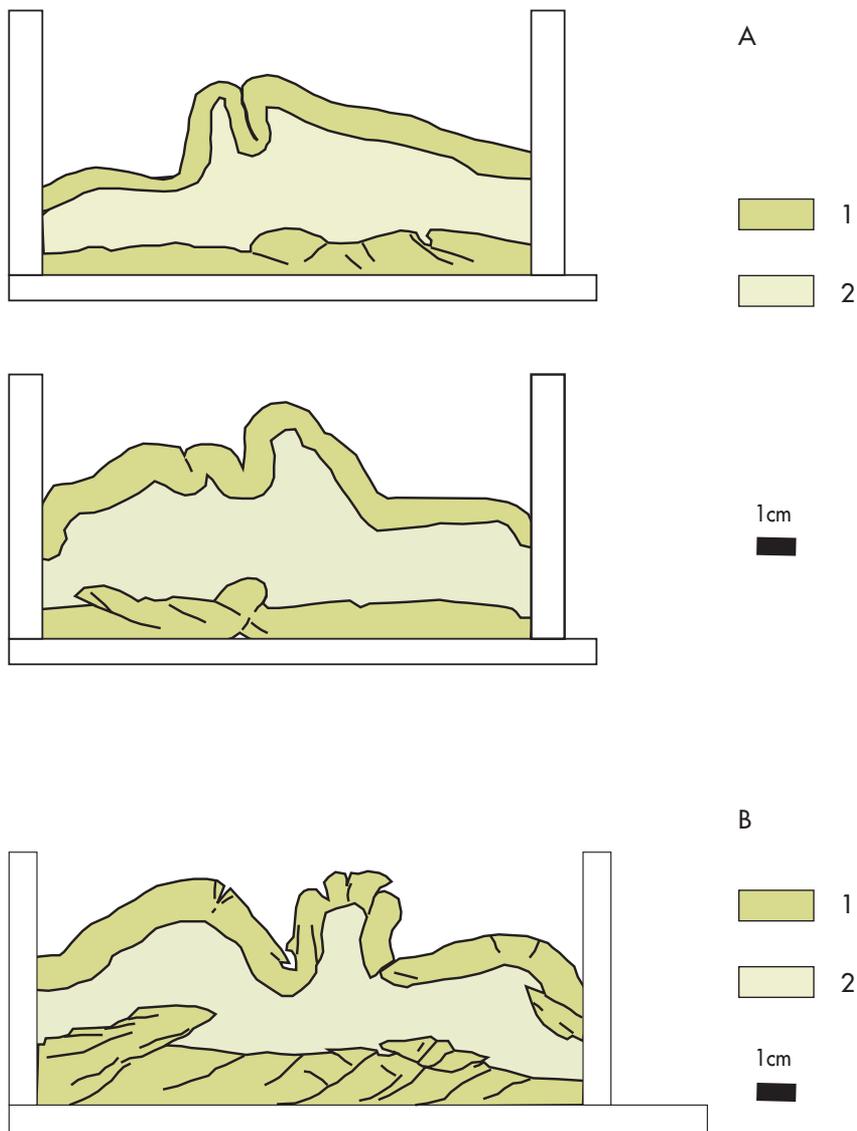


Figura 13 – Representação esquemática dos resultados obtidos em alguns ensaios de deformação sobre séries de estratos de argila (1) e areia fina bem calibrada (2), confinando o meio com uma placa de espuma; ilustrações obtidas com base nas fotografias inclusas no relatório de Pinheiro *et al.* (1999). A: resultados adquiridos em ensaio efectuado sobre uma sequência de estratos de argila húmida e areia com espessura inicial de 1 cm e 1,75 cm, respectivamente, ao fim de 35 minutos e 35% de encurtamento, aplicando uma força de 30 kg – em cima, vista de perfil esquerdo; em baixo, vista de perfil direito. B: resultados obtidos em ensaio efectuado sobre uma sequência de estratos de argila pouco húmida e areia com espessura inicial de 1 cm e 1,75 cm, respectivamente, ao fim de 30 minutos e 40% de encurtamento, aplicando uma força de 30 kg – vista de perfil direito.

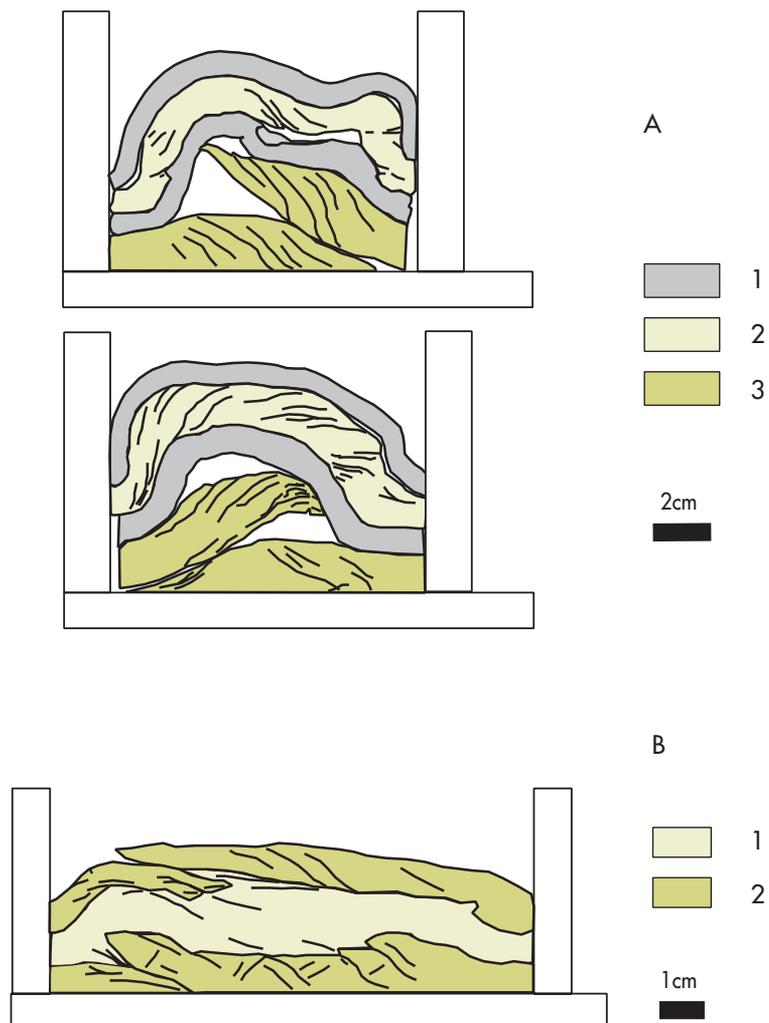


Figura 14 – Representação esquemática dos resultados obtidos em alguns ensaios de deformação sobre séries de estratos, confinando o meio com uma placa de espuma; ilustrações obtidas com base nas fotografias incluídas no relatório de Pinheiro *et al.* (1999). A: Ensaio efectuado sobre uma sequência de estratos de plasticina (1) – argila húmida (2) – plasticina (1) – argila húmida (3) que, do topo para a base, apresentam, respectivamente, as seguintes espessuras: 0,7 cm, 1,0 cm, 1,0 cm e 1,5 cm. As figuras documentam o registo obtido para as estruturas geradas ao fim de 33 minutos e 35% de encurtamento, aplicando uma força de 28 kg – em cima, vista de perfil esquerdo; em baixo, vista de perfil direito. B: resultados obtidos em ensaio efectuado sobre uma sequência de estratos de argila pouco húmida (2) e areia húmida (1) com espessura inicial de 1 cm e 1,75 cm, respectivamente, ao fim de 25 minutos e 40% de encurtamento, aplicando uma força de 18 kg – vista de perfil esquerdo.

a percursos investigativos interdisciplinares bastante enriquecedores, assegurando o estabelecimento de ligações fortes entre o que se realiza no espaço laboratorial e o mundo físico real. Deste modo, a realização de vários tipos de experiências semi-quantitativas e quantitativas, envolvendo diferentes materiais e distintos procedimentos, representam abordagens igualmente válidas (se bem que encerrem graus de incerteza distintos), adequadas a cada caso, permitindo testar as hipóteses de trabalho equacionadas em cada etapa do percurso investigativo. Salienta-se, por último, que o presente texto não pode, nem deve, ser entendido como uma introdução global acerca da problemática (verdadeiramente complexa) da deformação das rochas. Respostas às questões que vulgarmente se colocam no âmbito das análises descritiva, cinemática e dinâmica das estruturas geológicas, bem como aos problemas genericamente levantados em torno da reologia dos corpos rochosos e dos mecanismos de deformação, constam de numerosos livros específicos, de entre os quais destacamos¹¹ os devidos a Ramsay & Huber (1983, 1987), Park (1983), Price & Cosgrove (1990), Davis & Reynolds (1996). Refira-se finalmente que, para todo o tipo de detalhes e de questões relacionadas com futuros desenvolvimentos experimentais no âmbito da deformação de materiais geológicos e seus análogos mecânicos, poderão os interessados contactar o Laboratório de Tectonofísica e Tectónica Experimental (LATTEX) da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.

Referências

- Christman J.R. (1988). *Fundamentals of Solid State Physics*. John Wiley & Sons, Inc, New York: 518pp.
- Davis G.H., Reynolds S.J. (1996). *Structural Geology of Rocks and Regions*. John Wiley & Sons, Inc, New York: 776 pp.
- Kittel C. (1976). *Introduction to Solid State Physics*. John Wiley & Sons, Inc, New York:608pp
- Park R.G. (1983). *Foundations of Structural Geology*. Blackie-Chapman & Hall, London: 135 pp.
- Pinheiro E., Vasconcelos F., Amaro H., Oliveira H., Esteves P. (1999). *Relatório do Percurso Investigativo sobre a Deformação das Rochas e Minérios*. Acção de Formação - Ensino Experimental das Ciências, DES - FOCO, 53pp.
- Price N.J., Cosgrove J.W. (1990). *Analysis of Geological Structures*. Cambridge University Press, Cambridge, UK: 502 pp.
- Ramsay J.G., Huber M.I. (1983). *The Techniques of Modern Structural Geology, v.1: Strain Analysis*. Academic Press, London: 307 pp.
- Ramsay J.G., Huber M.I. (1987). *The Techniques of Modern Structural Geology, v.2: Folds and Fractures*. Academic Press, London: 381 pp.
- Smith, W.F. (1998). *Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais*. Mc Graw Hill:888pp

¹¹ As referências bibliográficas mencionadas, se bem que específicas, abordam pedagogicamente a generalidade dos assuntos relacionados com a Geologia Estrutural, introduzindo de forma simples os conceitos-base fundamentais à compreensão da reologia dos corpos rochosos. Indicações bibliográficas de âmbito mais especializado e avançado podem, adicionalmente, ser encontradas nestes livros de texto.

3.5 Densidade e separação gravítica de sólidos

A.MATEUS, J.MAIA ALVES

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

A determinação das propriedades físicas dos minerais e rochas afigura-se imprescindível em muitos ramos do conhecimento, representando ainda um elemento de crucial importância nos estudos de forte cariz interdisciplinar sem os quais dificilmente se poderia, e.g., compreender a estratificação física do Planeta, caracterizar a arquitectura da litosfera, entender muitas das relações causa-efeito envolvidas nos processos geológicos, prospectar variadíssimos recursos naturais, utilizar racional e eficientemente a matéria-prima explorada e sintetizar estruturas cristalinas com propriedades especiais para usos específicos. Acresce salientar que a densidade das rochas, bem como as suas propriedades mecânicas, térmicas, eléctricas, magnéticas e radioactivas constituem função complexa das propriedades físicas dos minerais que as constituem.

Durante as actividades desenvolvidas por dois subgrupos de trabalho no âmbito das acções de formação, de que agora damos conta, surgiram diversas questões que, de algum modo, exigiram a medida da densidade de diferentes tipos de rochas. O rigor utilizado para essas medidas, como sempre acontece com qualquer medição em Ciência, foi o considerado necessário e suficiente para responder a essas mesmas questões¹. Foi igualmente levada a cabo a concepção/construção de um dispositivo simples que ilustrasse cabalmente o princípio de funcionamento dos ciclones hidroclassificadores com vista à obtenção de concentrados hidrogravíticos, que, como se justificará adiante, poderemos, na sua essência, designar como uma mesa de separação inercial.

A densidade é uma propriedade frequentemente utilizada na identificação dos minerais constituintes das rochas, revelando-se particularmente útil na obtenção de

¹ Estamos apenas a referir-nos ao rigor da medição efectuada em cada uma das amostras no sentido mais físico do termo; é claro que nos deve preocupar também um outro tipo de rigor que decorre da representatividade geológica das amostras relativamente ao local em estudo e que, naturalmente, tem a ver com o tipo de amostragem efectuada.

concentrados monominerálicos fundamentais à promoção de investigações diversas ou à produção eficiente e economicamente rentável de pré-concentrados de minérios (se a separação se processar industrialmente). A determinação da densidade das rochas representa também um passo decisivo na caracterização de vários processos geológicos, em particular os que envolvem interações significativas entre fluidos aquosos e rochas, porquanto estes envolvem frequentemente transformações físico-químicas que concorrem para a alteração das relações mineralógico-texturais primárias, modificando adicionalmente a porosidade do meio rochoso. Determinações da densidade *in situ* ou em laboratório (recorrendo a amostras representativas das formações geológicas aflorantes) representam ainda um auxiliar precioso na interpretação dos dados de gravimetria, contribuindo para a caracterização indirecta do substrato geológico – a título ilustrativo vejamos um exemplo muito simples com implicações globais: a análise do campo gravítico terrestre denuncia uma morfologia do planeta assimilável a um elipsóide de pequeno achatamento (cerca de 1/300) com raio maior em torno de 6378 km e massa total de $5,98 \times 10^{24}$ kg; com base nestes valores, é possível estimar para a Terra uma densidade média de $5,5 \text{ gcm}^{-3}$; dado que a densidade média das rochas constituintes dos horizontes litosféricos superficiais se situa em torno de $2,8 \text{ gcm}^{-3}$, a densidade deverá necessariamente aumentar com a profundidade (inferência esta compatível, e.g., com os valores medidos laboratorialmente quer em exemplares de rochas basi- e infracrustais exumadas, quer em minerais gerados em condições de muito alta temperatura e pressão).

Define-se densidade de uma substância como sendo a sua massa por unidade de volume. Esta grandeza tem, portanto, unidades SI de kgm^{-3} (embora seja de facto muito mais utilizada a unidade CGS – gcm^{-3}). A medição da densidade de um objecto envolve assim duas medidas: por um lado, a sua massa, e, por outro lado, o volume que ocupa. Na prática, as medidas efectuadas são de volume e peso, dado constituírem medições bem mais expeditas². Ao proceder desta forma estamos imediatamente a introduzir um erro na medição da densidade, já que se considera desprezável a impulsão a que o objecto (cuja densidade estamos a medir) se encontra sujeito pelo facto de estar imerso em ar. No entanto, como esta força é, de acordo com o princípio de Arquimedes, igual e de sinal contrário ao peso do fluido deslocado, será sempre possível estimá-la se, além do volume do objecto (que temos sempre de conhecer), soubermos também a temperatura, pressão e humidade ambiente, uma vez que a densidade do ar se encontra devidamente tabelada em função de todos estes parâmetros. Se trabalharmos a valores normais de pressão, humidade e temperatura, a ordem de grandeza do erro introduzido na medição por esta via é de $-1,2 \times 10^{-3} \text{ gcm}^{-3}$ (cerca de 4×10^{-5} do valor médio da densidade das rochas constituintes dos horizontes litosféricos superficiais). Vemos, assim, que este erro é normalmente muito inferior ao que decorre da incerteza na determinação do volume da amostra, razão pela qual em alguns manuais escolares se define (erradamente) densidade de uma substância como sendo o peso no ar de uma unidade de volume dessa mesma substância.

² Mesmo quando estamos a utilizar uma balança que nos fornece a indicação da massa estamos de facto a fazer uma medida de força, e a usar o facto do peso (\vec{P}) e massa (m) de um objecto estarem relacionados entre si pela relação $\vec{P} = m \times \vec{g}$ onde \vec{g} representa a aceleração da gravidade cujo valor é de aproximadamente $9,8 \text{ ms}^{-2}$.

Em muitas circunstâncias existem vantagens em determinar a gravidade específica (peso ou massa específica) em vez da densidade. Trata-se de um valor adimensional resultante da razão entre pesos (ou massas) de volumes iguais da substância considerada e, geralmente, da água destilada a 4°C (ou outra temperatura especificada). A medição desta grandeza não implica, portanto, o conhecimento da aceleração da gravidade local. Acresce, por último, mencionar que as determinações usualmente efectuadas do peso ou do volume ocorrem em condições tais que os efeitos das pequenas variações de temperatura nas medições efectuadas podem ser considerados negligenciáveis. Por esta razão é também comum ignorar a temperatura à qual se medem o peso e o volume, se bem que determinações rigorosas da densidade exijam o controlo apertado dos efeitos da temperatura que, em situações particulares, podem conduzir a erros de medição superiores aos erros inerentes ao procedimento experimental utilizado.

Quando nos referimos à densidade de uma rocha pretendemos dizer densidade global (ou densidade média ρ), a qual, por razões óbvias, considera o volume ocupado pelos grãos minerais (de peso total W_g) e o volume dos poros que pode estar parcial ou totalmente ocupado por fluidos intersticiais (de peso total W_f), ou seja, $\rho = (W_g + W_f) / gV_b$, onde V_b representa o volume global. Claro está que podemos determinar também a densidade da rocha depois de convenientemente seca em estufa (a 120°C se os fluidos intersticiais forem aquosos) pela expressão $\rho_d = W_g / gV_b$, ou a densidade da rocha saturada (ρ_s) com um fluido de densidade conhecida (ρ_f) através da relação $\rho_s = [W_g / g + (V_p \times \rho_f)] / V_b$, onde V_p representa o volume dos poros interconectados. Acresce mencionar que a densidade de uma rocha poliminerálica pode ser equacionada através da expressão $\rho = C_1 \times \rho_1 + C_2 \times \rho_2 + \dots + C_n \rho_n$, onde $C_1 \dots C_n$ representam as fracções volumétricas dos n constituintes minerais de densidade $\rho_1 \dots \rho_n$, respectivamente; caso sejam conhecidas as fracções peso dos constituintes minerais ($k_1 \dots k_n$), a expressão de cálculo alternativo vem igual a

$$\rho = \frac{1}{\frac{k_1}{\rho_1} + \frac{k_2}{\rho_2} + \dots + \frac{k_n}{\rho_n}}$$

Face ao exposto, facilmente encontramos as equações que permitem o cálculo da porosidade total (n_t). Esta, expressa em percentagem, pode ser determinada através da relação

$$\left(1 - \frac{V_g}{V_b}\right) \times 100 \text{ ou, alternativamente, } \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_g}\right) \times 100,$$

onde V_g e ρ_g representam, respectivamente, o volume ocupado pelos grãos minerais e a sua densidade.

Vários são os métodos que podem ser utilizados na medida da densidade ou da gravidade específica de rochas e de minerais. Em termos gerais, podemos reparti-los, por três grupos básicos: no primeiro, o peso é medido directamente enquanto o volume se mede indirectamente de acordo com o Princípio de Arquimedes (usando balanças apropriadas com a de *Krauss-Jolly*); no segundo, o peso é medido directamente e o volume encontrado a partir do peso do líquido deslocado

num picnómetro; no terceiro, a densidade é medida por comparação directa com a de um líquido pesado conhecido. Descrições detalhadas sobre os principais métodos envolvidos na medida da densidade e da gravidade específica podem ser encontradas em diversos manuais (e.g., Muller, 1967; Hutchinson, 1974; Olhoef & Johnson, 1989). No âmbito do presente conjunto de notas importa referir, porém, que a selecção do método a utilizar se revela sempre muito importante e que a sua escolha deve ter em atenção quer os objectivos do trabalho em causa, quer ainda as características da rocha ou dos concentrados minerais em estudo. Tal como já referimos anteriormente, do ponto de vista geológico, uma das maiores fontes de erro associado a estas medidas advém da heterogeneidade natural apresentada pelas rochas, pelo que se devem efectuar diferentes medições em vários provetes da mesma amostra (após observação cuidada à lupa binocular de cada um deles). Este facto é de tal modo significativo que, em Geologia, é comum falar-se apenas em estimativa de densidade e não em medida de densidade. No caso dos concentrados minerais, estes problemas não se revelam tão críticos, porquanto a pureza dos concentrados se encontra assegurada quando a eficiência dos procedimentos adoptados na sua obtenção (trituração, peneiração, lavagem, separação) é devidamente avaliada em experimentações prévias. Dificuldades acrescidas podem surgir quando se lida com rochas porosas e granulometricamente finas, pois a quantidade de ar aprisionado nos poros pode influenciar significativamente as medições efectuadas; nestes casos, os provetes de rocha devem ser previamente sujeitos a extracções forçadas de ar (utilizando uma bomba de vácuo) antes da sua imersão em meios líquidos.

No âmbito da presente acção de formação utilizou-se para a medida de densidades o primeiro dos métodos referidos, numa tentativa de o desmistificar, já que é frequentemente justificada a não realização de medições de densidade nas escolas com a inexistência de balanças de Krauss-Jolly. De facto, como se verá adiante, qualquer balança pode ser utilizada para aplicar este método (nomeadamente as balanças digitais que existem em todas as escolas).

Como já se referiu, de acordo com o Princípio de Arquimedes, a impulsão sofrida por um objecto (em particular um provete ou um concentrado de grãos minerais) imerso num fluido (normalmente um líquido) é igual e de sinal contrário ao peso do volume de fluido deslocado. O volume que se pretende medir é, portanto, proporcional ao aparente decréscimo de peso quando o provete ou o concentrado é imerso num líquido de densidade conhecida (ρ_L)³; se designarmos por W_1 e por W_2 o peso do material medido no ar e quando imerso, respectivamente, a densidade pretendida (ρ) vem dada pela expressão

$$\rho = \frac{W_1 \times \rho_L}{(W_1 - W_2)}$$

Saliente-se que, à semelhança do que se verificava no caso da gravidade específica, também a densidade medida por este método é independente da

³ Esta afirmação apenas é em rigor verdadeira quando não se verifique a penetração do líquido utilizado na medição para o interior do objecto do qual se pretende medir o volume, ou seja, quando esse objecto não for poroso. Descreveremos adiante a técnica a utilizar se não for esse o caso.

gravidade local, uma vez que é obtida através de um quociente de dois pesos. Nos procedimentos expeditos vulgarmente usados, o líquido utilizado é a água destilada ($\rho_L \approx 1 \text{ gcm}^{-3}$). Note-se, porém, que devido à elevada tensão superficial da água, os resultados obtidos enfermam de imprecisão acrescida, pelo que, havendo necessidade de proceder a determinações mais rigorosas, se devem utilizar líquidos orgânicos. Importa ainda salientar que a comparação directa entre os valores de densidade determinados para uma amostra seca e depois de a amostra ser impregnada com um líquido de densidade conhecida, representa uma medida da sua porosidade.

Mercê da natureza textural dos tipos de rochas estudadas no âmbito desta acção de formação, os diferentes provetes foram, depois de pesados, sujeitos a parafinação antes da sua imersão em água destilada, visando a sua impermeabilização. Antes, porém, procedeu-se à caracterização mineralógica e textural dos provetes e à determinação da densidade da parafina, pesando-se uma porção desta no ar e medindo-se a variação de volume experimentada por uma coluna de álcool após imersão da porção de parafina em causa; o procedimento foi repetido três vezes, resultando o valor médio de $0,85 \text{ gcm}^{-3}$. Seguidamente fixou-se no prato da balança uma haste em vidro com um fio de nylon na ponta (no qual seriam suspensos os diferentes provetes), conforme se representa na figura 1, e procedeu-se à taragem da balança. A sequência de operações e de medições efectuada para cada amostra foi então a seguinte:

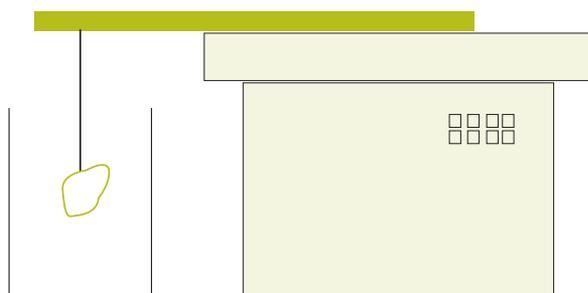


Figura 1

1. pesou-se o provete parafinado no ar (suspenso pelo fio de *nylon*);
2. pela diferença de peso relativamente ao que se tinha determinado antes da parafinação obteve-se o peso da parafina;
3. cálculo do volume ocupado pela parafina através da sua densidade previamente determinada;
4. medição do peso aparente da amostra parafinada após imersão em água destilada (garantindo que não há qualquer contacto da amostra com o recipiente onde se encontra a água);
5. cálculo do volume ocupado pela amostra parafinada;
6. cálculo do volume da amostra (diferença entre os volumes obtidos em 5 e 3)
7. cálculo da densidade da amostra.

As limitações de tempo impediram a realização de vários ensaios para cada provete e a concretização de idênticas estimativas para um maior número de amostras. Ainda assim, os resultados adquiridos mostraram-se revelantes na discussão e teste das hipóteses de trabalho construídas em torno de algumas das questões sobre a meteorização de rochas vulcânicas hidrotermalmente alteradas e do minério sulfuretado da Mina de S.Domingos. Acresce mencionar que, com base nestas estimativas de densidade, se poderiam avaliar os balanços de massa envolvidos nos processos de meteorização, desde que se conhecessem as composições químicas do protólito e dos seus equivalentes meteorizados, para além da densidade do protólito; tal não constitui o objectivo do presente conjunto de notas, mas os leitores interessados poderão encontrar em Brimhall & Dietrich (1987) e em Brimhall & Crerar (1988) interessantes discussões sobre o assunto. De igual modo, poderão encontrar em Gresens (1967), Grant (1986) e em Baumgartner & Olsen (1995) procedimentos de cálculo mais ou menos sofisticados para avaliação de balanços de massa em processos metassomáticos naturais.

Na impossibilidade de conceber e testar em tempo útil (nos termos de duração das acções de formação) dispositivos experimentais que ilustrassem devidamente os princípios subjacentes aos procedimentos industriais geralmente utilizados na beneficiação de minérios sulfuretados análogos aos explorados na Mina de S.Domingos (electrolixiviação e flutuação, principalmente), optou-se pela concepção e construção de um dispositivo que permitisse estudar o princípio de funcionamento dos ciclones vulgarmente utilizados na produção industrial de concentrados hidrogravíticos. Assumindo a existência de misturas em proporções variáveis de fragmentos de rochas silicatadas com fragmentos de minério sulfuretado (de natureza pirítica predominante), procurou-se testar em que medida o processo de separação hidrogravítica era eficiente.

Antes de passar à descrição do dispositivo desenvolvido, importa analisar o que acontece numa situação muito simples. Suponhamos que, da margem de um ribeiro que corre com uma velocidade constante, V_{fluido} , são simultaneamente largadas duas esferas de igual raio (R) mas de materiais com diferentes densidades (suporemos ainda, para simplificar, que estas esferas são largadas na vertical e suficientemente próximo da superfície para que possamos considerar que, no instante em que atingem a água, o fazem com velocidade nula, tanto segundo a vertical como segundo a horizontal). O que irá acontecer a estas duas esferas? A resposta a esta questão pode ser facilmente encontrada se admitirmos que o fluido exercerá sobre qualquer das esferas uma força de arrastamento proporcional à velocidade com que se desloca relativamente à esfera e à área de contacto entre ambos, ou seja, à secção transversal da esfera. Podemos então escrever que, segundo OX (direcção definida como sendo a direcção do escoamento do fluido), cada uma das esferas estará sujeita a uma força dada por

$$F_x = k(\pi R^2) [V_{\text{fluido}} - V_x] \quad (1)$$

onde V_x representará a velocidade da esfera, igualmente segundo OX. Não nos preocuparemos para já com o que sucede relativamente à outra componente

(vertical) do movimento, uma vez que isso não é relevante para a discussão que pretendemos fazer. Podemos até supor que a força total segundo essa direção é nula, ou seja, que as esferas se encontram em suspensão no interior do fluido, embora tal não possa suceder simultaneamente a ambas, porquanto estas apresentam o mesmo raio e densidades diferentes.

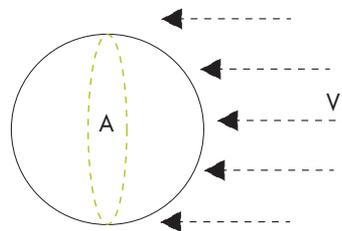


Figura 2

A aceleração a que cada uma das esferas está sujeita segundo OX é dada por F_x/m e será, portanto, diferente para cada uma das esferas, já que ambas estão sujeitas à mesma força de arrastamento, mas possuem massas diferentes. Explicitando a dependência desta aceleração na densidade virá

$$a_x = \frac{3k}{4R\rho}(V_{fluido} - V_x) \quad (2)$$

A velocidade segundo OX de cada uma das esferas obedecerá, portanto, a uma equação diferencial muito comum em Física que traduz o facto de a taxa de variação de uma grandeza ser proporcional à própria grandeza (tipo de relação que surge, por exemplo, no decaimento radioactivo, na carga e descarga do condensador, etc.). A integração desta equação diferencial conduz à relação

$$V_x = V_{fluido} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad \text{onde} \quad \left(\tau = \frac{4R\rho}{3k} \right) \quad (3)$$

A análise da equação (3) mostra que, como seria de esperar, a velocidade aumenta no tempo, desde o valor nulo inicial até à velocidade do fluido, mas que tal acontece com uma constante de tempo característica que depende da densidade do material. Este facto é bastante intuitivo pois, na sua essência, traduz o que todos sabemos com base na nossa experiência quotidiana sobre a inércia, ou seja, que a mesma força aplicada sobre dois corpos de massas diferentes

provocará uma variação mais rápida da velocidade do corpo com menor massa. A integração da equação (3) conduz imediatamente à expressão que transcreve o espaço percorrido em função do tempo

$$x = V_{\text{fluido}} \left(t + \tau \left(e^{-\frac{t}{\tau}} - 1 \right) \right) \quad (4)$$

A análise da equação (4), cuja representação gráfica se faz na figura 3 para diferentes valores da constante de tempo característica τ , é interessante e dá-nos informações importantes do ponto de vista da optimização de um sistema de separação que funcione com base neste princípio. A primeira constatação é a de que, depois de serem largadas, as esferas vão-se gradualmente afastar até que o tempo decorrido seja da ordem de várias constantes de tempo τ (matematicamente, até que a exponencial seja desprezável face à unidade), ou seja, até que todas adquiram a velocidade do fluido; posteriormente, e como seria de esperar, as esferas seguirão separadas, todas com velocidades iguais, indo as mais leves na frente e as mais pesadas no fim. A separação máxima obtida entre esferas é definida pelo produto entre a velocidade do fluido e a diferença entre as constantes de tempo características, que dependem, para cada uma, do produto entre a sua densidade e o seu diâmetro⁴. Tal significa que, em princípio, devemos evitar pequenas granulometrias, pois isso contribuirá para diminuir a separação para uma dada velocidade de escoamento do fluido. No entanto, teremos também de evitar grandes granulometrias, porquanto, por essa via, estaremos inevitavelmente a homogeneizar a densidade dos grãos.

Do exposto se depreende que existirá uma granulometria ideal para realizar uma separação deste tipo. Essa granulometria será, portanto, a maior possível, desde que permita uma diferenciação efectiva das densidades, ou seja, desde que promova a desagregação eficiente do minério em partículas maioritariamente constituídas por grãos minerais de uma determinada espécie.

O sistema desenvolvido para ilustrar o funcionamento das mesas de separação encontra-se representado na figura 4. As esferas utilizadas (esferas de metal e de borracha dura de igual diâmetro que facilmente se podem adquirir em casas de desporto) são lançadas a partir de uma espátula de tal forma que tenham aproximadamente a mesma velocidade inicial (com uma direcção que, quando se ligar o jacto de água, será aproximadamente em contracorrente). Ainda sem a água ligada, ajusta-se a inclinação da mesa para que as esferas atinjam aproximadamente a sua extremidade; nesta situação, todas as esferas atingem o fundo da mesa aproximadamente no mesmo ponto. Ao ligar a bomba de aquário, cria-se o fluxo de água, verificando-se que o movimento das esferas metálicas não é passível de grande perturbação, contrariamente ao que acontece com as esferas de borracha, as quais são praticamente arrastadas até à outra extremidade.

⁴ É claro que poderemos aumentar esta separação se, em vez de lançar as esferas com velocidade nula segundo OX, o fizermos com velocidade negativa, ou seja, em contra-corrente. Se o módulo dessa velocidade for, por exemplo, igual à velocidade do fluido será de esperar um efeito duplo.

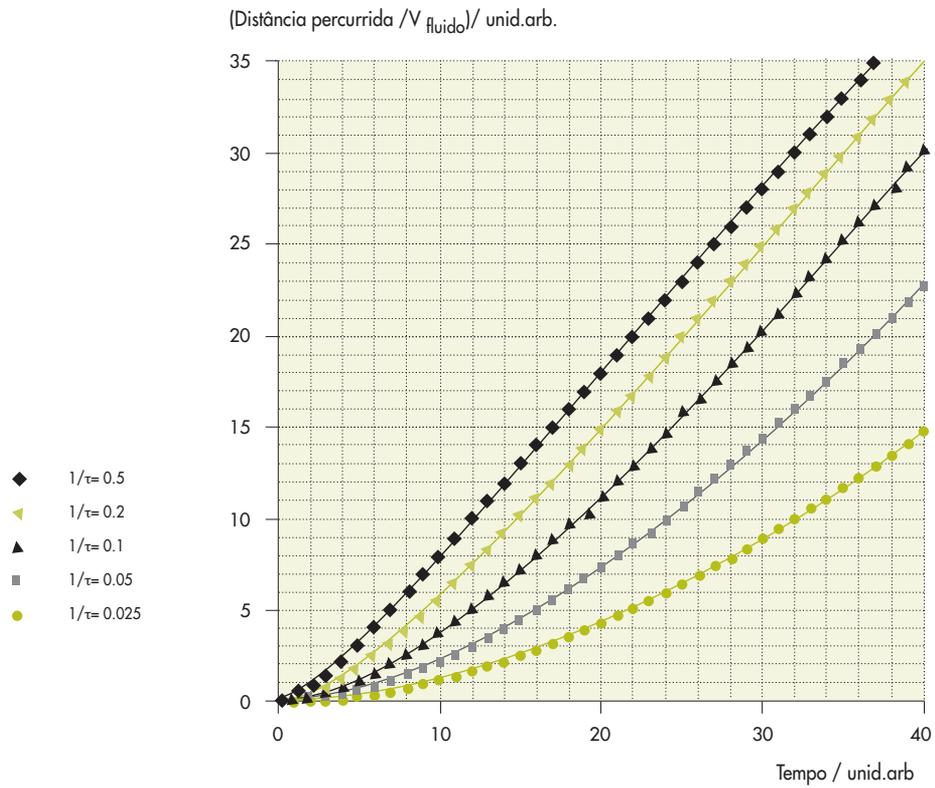


Figura 3 – Representação gráfica da distância percorrida por uma esfera sujeita a uma força de arrastamento por um fluido (de acordo com a equação 4) em função do tempo, para diferentes valores da constante de tempo característica τ .

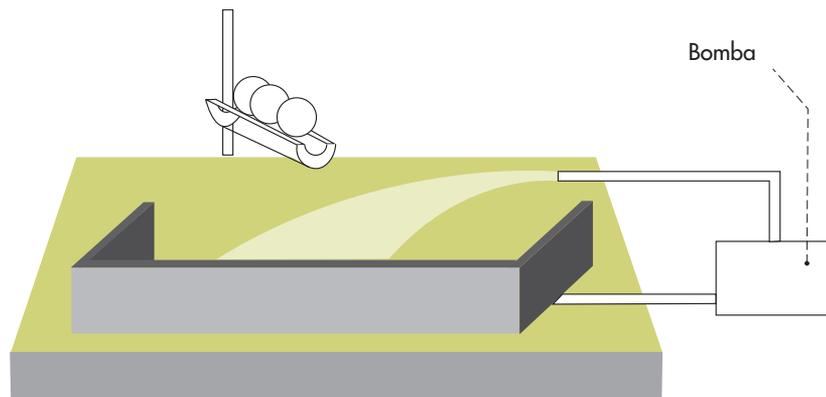


Figura 4

A dedução das equações do movimento das esferas é, neste caso, um pouco mais complicada, sobretudo porque a velocidade da água varia de ponto para ponto. Apesar disso e do facto de estarmos a trabalhar com objectos cuja diferença de densidades é enorme, julgamos que esta "mesa de separação" pode permitir o mais importante: discutir seriamente os princípios subjacentes às técnicas de separação gravítica e, adicionalmente, mostrar que a mecânica pode ser engraçada e não é apenas um assunto com fortes propriedades sedativas.

Antes de encerrar este conjunto de notas, julgamos pertinente tecer algumas considerações gerais sobre a separação de minerais com base na sua densidade, porquanto os dispositivos técnicos vulgarmente utilizados, sendo bastante simples, podem ser montados e utilizados na maioria dos laboratórios escolares.

O recurso a muitos métodos de análise mineralógica detalhada exige a separação prévia dos diferentes tipos de minerais constituintes das rochas, procedimento que nem sempre é fácil de concretizar, apresentando-se tanto mais delicado e moroso quanto maior for a analogia entre as propriedades físicas apresentadas pelos minerais a separar. Daqui se infere que o estabelecimento de qualquer percurso investigativo envolvendo a produção de concentrados minerais requer não só a identificação prévia dos minerais a separar, como também o conhecimento das propriedades físicas que possibilitem a separação eficiente de cada mineral (densidade, susceptibilidade magnética, condutividade eléctrica, etc.). Mais se deduz que existe toda a conveniência em delinear um plano de trabalho em função das observações previamente efectuadas e dos objectivos do estudo (é, por vezes, preferível utilizar um método de separação menos selectivo mas de rendimento superior). Importa ainda referir que, independentemente da eficácia expectável do conjunto de metodologias inscrito no plano de trabalho, se deve controlar de forma sistemática os resultados obtidos em cada etapa do processo de separação, procedimento este que permitirá introduzir eventuais correcções ao percurso inicialmente conceptualizado.

Vejamos, ainda que de modo muito sumário, alguns dos principais requisitos e cuidados a ter nas principais etapas envolvidas na separação gravítica por líquidos pesados (a qual permite, normalmente, obter fracções minerais de grande pureza). A escolha do(s) procedimento(s) a adoptar na separação gravítica por líquidos pesados deverá envolver a avaliação preliminar da dimensão dos grãos a atingir através da trituração da rocha (isto para evitar a produção de um número excessivo de grãos mistos, algo que introduz enormes problemas na separação, qualquer que seja o método adoptado). A dimensão a seleccionar depende fundamentalmente da granularidade da rocha e das relações que os minerais estabelecem entre si, muito embora valores compreendidos entre 0.08 e 0.12 mm sejam recomendáveis, pois, em geral, possibilitam um bom rendimento na maioria dos métodos de separação, incluindo a separação manual sob observação à lupa binocular.

A trituração da rocha envolve uma sequência de procedimentos que, em conjunto, visam reduzir a amostra disponível a uma "areia" em que os diversos minerais a separar constituam grãos puros. O processo de divisão da rocha inicia-se pela sua fragmentação com o auxílio de um simples martelo e/ou de uma prensa hidráulica (em casos extremos poder-se-á recorrer a uma serra de disco diamantado). Os fragmentos assim obtidos são subsequentemente sujeitos a

trituração num almofariz cilíndrico de aço, peneirando com frequência o material moído para evitar a acumulação de grande quantidade de pó (o que reduz a eficiência da trituração). Logo que se obtenham dimensões granulométricas em torno de 1-2 mm, convém utilizar um outro almofariz de menores dimensões, onde se torna mais fácil evitar que o material fique reduzido a dimensões inferiores às pretendidas. A rocha triturada é em seguida peneirada⁵ de modo a isolar os grãos com as dimensões previamente escolhidas para trabalhar, o que se consegue utilizando dois peneiros, um de malha um pouco mais larga que a dimensão do grão pretendida e outro de malha ligeiramente mais fina; caso se pretendam fracções de diferentes granularidades, deve usar-se uma sucessão de peneiros, de malha mais larga no topo e apertada na base. Após peneiração é necessário lavar várias vezes as fracções obtidas com água comum, decantando cuidadosamente, até que a água deixe de turvar por agitação; seguem-se novas lavagens com água destilada. Eliminam-se seguidamente quaisquer resíduos argilosos que porventura existam, adicionando aos grãos alguns centímetros cúbicos de água oxigenada que se deixa actuar durante alguns minutos, após o que se volta a decantar (havendo por vezes vantagens em adicionar um agente peptizante – geralmente hexametáfosfato de sódio). A fracção é novamente sujeita a lavagem com água destilada e, posteriormente, com acetona; a subsequente secagem das fracções minerais deve ser realizada em estufa a 120°C. Depois de secas, as fracções são conservadas em atmosfera desidratada, utilizando-se para o efeito um exsiccador com sílica-gel.

A exploração das diferenças de densidade entre minerais serve de base à separação gravítica por líquidos pesados, cuja gravidade específica é conhecida. Os líquidos pesados vulgarmente utilizados neste tipo de procedimentos são o bromofórmio ($\rho_s=2,89$), o tetrabromo etano ($\rho_s=2,964$), o iodeto de metileno ($\rho_s=3,325$) e o licor de Clerici (mistura em partes iguais de formiato e malonato de tálio, dissolvidos em água destilada – $\rho_s=4,33$). As gravidades específicas indicadas correspondem à dos líquidos puros a 20°C; no caso do licor de Clerici, tal valor denota a quantidade máxima de sais que é possível dissolver à temperatura ambiente, numa dada quantidade de água destilada. Podem ainda obter-se líquidos de densidades diferentes dissolvendo os acima mencionados em acetona, tetracloreto de carbono ou benzeno (bromofórmio, iodeto de metileno), ou em água destilada (licor de Clerici). A toxicidade de todos estes líquidos obriga ao seu manuseamento cuidadoso em salas ventiladas, evitando o contacto com os olhos e pele; tais precauções revestem-se de especial importância no caso de licor de Clerici. Importa notar também que, com excepção do licor de Clerici, todos os líquidos referidos são fotossensíveis, pelo que devem ser acondicionados em frascos castanhos ou opacos, por sua vez guardados em locais escuros. No caso específico do bromofórmio, convém adicionalmente assegurar que o seu contacto

5 Os peneiros são constituídos por uma rede metálica circular, montada numa tira também de metal, com a forma de um cilindro de pequena altura; têm normalmente cerca de vinte centímetros de diâmetro e cinco de altura. Especificam-se em *mesh*, isto é, em "número de fios metálicos por polegada linear", característica esta que nos indica o diâmetro dos grãos que por ela podem passar. As séries de peneiros mais vulgares são vulgarmente designadas pelas siglas "B.S." ou "A.S.T.M.". A granularidade (ϕ) de cada fracção é normalmente indicada por dois números *mesh* precedidos, respectivamente, pelos sinais – e + (ex: -170, +230 *mesh*, o que denota a presença de grãos que passaram no peneiro 170 *mesh* e ficaram retidos no 230 *mesh*).

com o ar não se prolongue por mais tempo que o estritamente necessário, em virtude da sua relativa volatilidade.

O elevado preço de alguns destes líquidos obriga à sua reciclagem e reutilização. Mas como a utilização prolongada destas substâncias conduz inevitavelmente ao seu escurecimento (especialmente no caso do iodeto de metileno e do licor de Clerici, já de si corados), impõe-se também a necessidade de estes serem periodicamente clareados – procedimento fundamental, porquanto a verificação da eficiência das separações gravíticas com o auxílio de líquidos pesados se faz visualmente. O clareamento dos líquidos pesados consegue-se através da adição de, por exemplo, pó de carvão de ossos ao líquido diluído, filtrando-o e concentrando-o seguidamente. A recuperação das pequenas quantidades de líquido pesado aderentes aos recipientes onde são utilizados envolve, por sua vez, a lavagem dos recipientes com o dissolvente correspondente ao líquido em questão, subsequente acumulação destas soluções e posterior reconcentração dos líquidos pesados puros. O bromofórmio reconcentra-se por lavagem com água destilada: esta dissolve a acetona, mas não o líquido pesado, que assim se separa do dissolvente e, sendo mais denso, se acumula no fundo do recipiente usado; depois de recuperado, o bromofórmio deve ser filtrado para eliminar quaisquer vestígios de água ou de outras impurezas. Face às diferenças de volatilidade entre o iodeto de metileno e a acetona, recupera-se o primeiro por evaporação da acetona, fazendo passar uma corrente de ar através da mistura de ambos; é possível controlar a operação introduzindo no evaporador um corpo sólido de densidade equivalente à do líquido pesado, o qual ficará em equilíbrio hidrostático quando a densidade pretendida for obtida. A reconcentração do licor de Clerici obtém-se por evaporação a quente, sujeitando a mistura a aquecimento controlado (evitando que a mesma atinja o ponto de ebulição).

Uma vez seleccionado o líquido pesado em função da separação pretendida, este é vertido para um tubo adequado (com estrangulamento próximo da base), no qual se tinha previamente introduzido o concentrado de grãos a separar (quantidade máxima em torno de 0,5 gramas). Tapa-se o tubo, agita-se e inverte-se várias vezes, verificando-se visualmente se a separação ocorre (acumulação de grãos no fundo e à superfície do líquido – fig.5). Em caso afirmativo, introduz-se o tubo numa centrifugadora, cuja tara deve ser assegurada (o que se consegue facilmente mediante a introdução de um outro tubo em idênticas condições). Centrifuga-se durante cerca de 5-10 minutos (15-20 minutos para o licor de Clerici), não ultrapassando as 3000 rotações por minuto, após o que se destapa o tubo e introduz uma pequena rolha de cortiça no estrangulamento existente nas suas paredes com o auxílio de uma agulha (fig.6). Em seguida verte-se o conteúdo da parte superior do tubo para um funil de Bückner, revestido de papel de filtro nº1 ou 2, encaixado na boca de um balão Kita-Sato, por sua vez ligado a uma bomba de sucção (fig.7). A fracção leve dos grãos a separar ficará retida no papel de filtro e o líquido pesado puro no Kita-Sato. Muda-se em seguida o funil para outro balão, lavando-se o tubo de separação com o dissolvente apropriado; o produto desta operação (dissolvente, líquido pesado residual e grãos minerais) é vertido para o funil, subsequentemente também lavado com dissolvente. A fracção assim obtida é colocada num cristalizador e seca numa estufa, após o que é observada à lupa para se ajuizar do seu grau de pureza; normalmente é necessário uma segunda separação idêntica à primeira. Do mesmo modo se procede para a fracção mais densa, após remoção da rolha separadora.

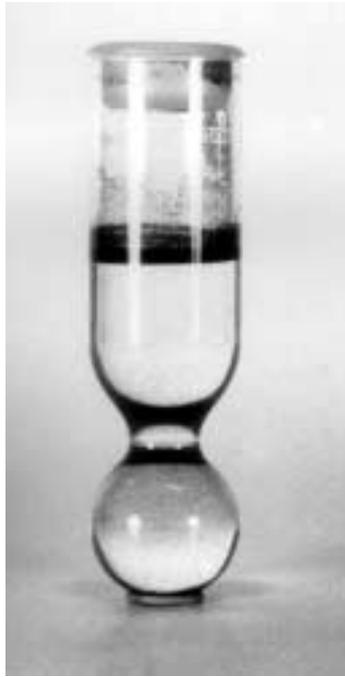


Figura 5

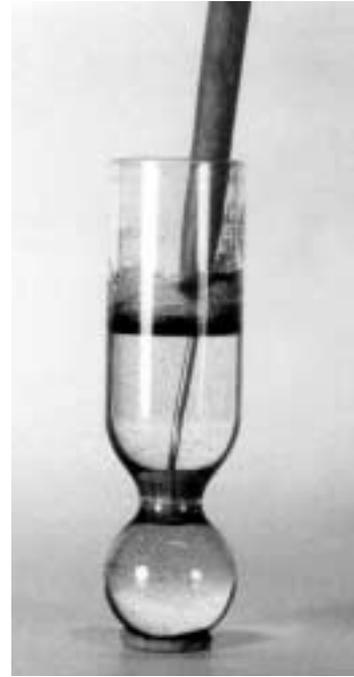


Figura 6



Figura 7

Referências

- Barriga F.J.A.S. (1973). *Técnicas de Análise em Mineralogia e sua aplicação aos minerais das rochas granulares da Ilha da Madeira*. Relatório de Estágio Científico, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa: 61 pp.
- Baumgartner L.P., Olsen S.N. (1995). A least square approach to mass transport calculations using the isocon method. *Economic Geology*, 90: 1261-1270.
- Brimhall G.H., Crerar D.A. (1988). Ore fluids: magmatic to supergene. In: *Thermodynamic Modeling of Geological Materials: minerals, fluids and melts*. Reviews in Mineralogy, 17, I.S.E. Charnick & H.P. Eugster eds., Mineralogical Society of America: 235-319.
- Brimhall G.H., Dietrich W.E. (1987). Constitutive mass balance relations between chemical composition, volume, density, porosity, and strain in metasomatic hydrochemical systems: results on weathering and pedogenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 567-587.
- Grant J.A. (1986). The isocondiagram – a simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration. *Economic Geology*, 81: 1976-1982.
- Gresens R.L. (1967). Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical Geology*, 2: 47-65.
- Olhoeft G.R., Johnson G.R. (1989). Densities of rocks and minerals. In: *Practical Handbook of Physical Properties of Rocks and Minerals*, R.S. Carmichael ed., CRC Press, Boston: 139-176.
- Hutchinson C.S. (1974). *Laboratory Handbook of Petrographic Techniques*. John Wiley & Sons, New York: 527 pp.
- Muller L.D. (1967). Laboratory methods of mineral separation. In: *Physical Methods in Determinative Mineralogy*, J. Zussman ed., Academic press, London.

4

Recomendações para uma
correcta utilização de
equipamentos e técnicas
padrão

4.1 KITS DE LA MOTTE DA SÉRIE STH PARA ANÁLISE DE SOLOS

(Produzidos por LaMotte Company)

ELISA MAIA

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

De entre os diversos equipamentos que foram distribuídos por Escolas Secundárias devem mencionar-se *kits* para análise de águas e também outros para análise de solos. Neste capítulo apenas faremos referência ao *Kit* de La Motte da série STH para análise de solos, utilizado no trabalho de laboratório na Escola Sá da Bandeira, menos divulgado do que os usados para análise de águas.

Os *Kits* de La Motte da série STH para análise de solos são equipamentos profissionais para técnicos agrários, ou mesmo agricultores, para determinação, de uma forma expedita, das características de solos em termos da sua qualidade agrícola.

O modelo mais simples da série apenas permite fazer determinações, em solos, de pH, de azoto em nitratos, de fósforo e de potássio. O modelo mais completo, (5010), que foi o utilizado nos ensaios laboratoriais em Santarém, para além destes factores, ainda analisa diversos micronutrientes e alguns nutrientes vestigiais. É também possível fazer algumas determinações em tecidos de plantas verdes.

Estas análises de solos baseiam-se na utilização de reacções químicas coradas realizadas em placas de teste de porcelana branca com pequenas cavidades, sendo a cor resultante da reacção do extracto de solo com o reagente específico para cada determinação comparada com uma tabela correspondente de cores fornecida com o equipamento. Alguns dos testes (cálcio, potássio, sulfato e cloreto), porém, não se baseiam em reacções coradas, mas são levados a cabo por determinação comparativa de turbidez.

Trata-se, evidentemente, de análises semiquantitativas, de precisão bastante limitada, mas suficiente, em geral, para os fins em vista, que são o avaliar a qualidade/estado do terreno em termos da sua produtividade para dadas culturas, e o introduzir, caso sejam necessárias.

É importante salientar que estes *kits* permitem determinar apenas aproximadamente o pH e as quantidades disponíveis de nutrientes por unidade de área do terreno. Como a sua extracção a partir de amostras do solo não é completa, a quantidade medida é relativa, dependendo do processo extractivo utilizado. Para que os resultados possam ser comparáveis e, dado que, como se disse, a quantidade de nutriente disponível depende do processo de extracção (em particular do pH), a caixa traz já a "solução extractora universal" com a qual se prepara o "extracto geral do solo", utilizado na maior parte dos testes. Exceptuam-se as análises de pH, de cloreto e de humus, bem como as realizadas com tecidos de plantas, em que os processos extractivos são diferentes.

Note-se que o termo quantidade é aqui usado com alguma frequência, mas sempre com o seu significado comum na linguagem corrente e por ser difícil encontrar um substituto adequado. Dado o tipo de testes que se podem realizar com estes *kits*, não tem sentido falar em quantidade química (em moles). De acordo com os manuais de utilização dos *kits*, as unidades em que vêm expressos os resultados são "libras por acre" ou, nalguns casos, ppm. O factor de conversão baseia-se na consideração de que "um acre de terreno, admitindo uma profundidade de 6-7 polegadas, que é a correspondente à profundidade média de sementeira, pesa 2 000 000 libras", e assim tem-se "ppm x 2 = lb/acre". Não é necessário salientar que, sendo o equipamento de origem americana, as unidades não são unidades SI.

Num dos manuais referidos, depois de uma introdução sobre o que é o solo, sua composição e efeitos do cultivo excessivo, trata-se pormenorizadamente dos nutrientes de diferentes tipos (macronutrientes, micronutrientes e nutrientes vestigiais) e da importância da sua existência em quantidades disponíveis adequadas a diversas culturas. A presença de determinado nutriente no solo só tem real significado em termos agronómicos se esse nutriente estiver disponível para assimilação pelas plantas. A sua existência em formas não assimiláveis, ou só muito lentamente disponíveis, não interessa directamente ao agricultor. Sendo assim, estes *kits* estão desenhados para dar informação útil, não indicando, portanto, a quantidade total do nutriente no solo, mas apenas, e de forma semiquantitativa, as quantidades disponíveis nas condições do terreno. Não estão também preparados para determinações de contaminação por poluentes de diferentes tipos, não sendo adequados como equipamentos padrão para análises de poluição de solos.

Assim, as análises realizáveis são apenas as que correspondem aos nutrientes considerados indispensáveis ao crescimento e boa qualidade das culturas, sendo referidos os valores mais aconselháveis, tendo em atenção também que, quando em excesso, alguns deles podem apresentar toxicidade para as plantas. Os exemplos mais relevantes são o alumínio e o manganês que, existindo frequentemente em formas insolúveis, não assimiláveis pelas plantas, ficam disponíveis em quantidades tóxicas quando em meio ácido, problema que pode ser resolvido sem muita dificuldade por correcção da acidez do terreno.

Como já se referiu, os *kits* de La Motte são equipamentos profissionais. Não foram desenhados para constituírem recursos didácticos, o que não quer dizer que não possam ser usados eficazmente como tal. Em primeiro lugar, a sua utilização mais

óbvia é na formação técnica de alunos de cursos tecnológicos ou profissionais em domínios relacionados com a agricultura. Trata-se, nesse, caso de treinamento na forma correcta de utilização directa do equipamento. O seu uso é bastante fácil, bastando seguir com cuidado as instruções detalhadas que são fornecidas nos manuais de instruções, atendendo também a aspectos de segurança no manuseamento de produtos químicos. Há que ter em conta, no entanto, possíveis erros por limitações de acuidade visual do operador em relação a observações de turbidez ou comparação de cores.

Os protocolos experimentais são simples, mas como estão escritos em inglês, pode/deve ser feita previamente pelo professor uma tradução cuidadosa. Se a tradução for feita pelos alunos, com o objectivo de desenvolver também competências linguísticas, é sempre indispensável uma revisão cuidadosa, feita por professores de química, para aferir da correcção dos termos técnicos.

A utilização dos *kits* de La Motte pode ainda ser feita nas disciplinas de Técnicas Laboratoriais de Química, nomeadamente em TLQ III, em que existe uma componente de análise de solos, ou em trabalhos de projecto em que esta vertente possa ser importante. Enquanto que no caso da formação de técnicos se privilegia a aplicação do equipamento, dando maior ênfase ao correcto procedimento, seguindo a par e passo uma rotina puramente técnica, tal não deverá ser o caso quando a exploração deste equipamento se faça integrada em cursos com mais forte componente química, em que os aspectos científicos não devem ser postos de lado. Podem ser estudadas, por exemplo, as reacções químicas em que os testes se baseiam e discutidos problemas de solubilidade de compostos variados. Questões sobre equilíbrio químico (ou não), sobre acidez e alcalinidade, tamponização de meios, trocas iónicas, e tantas outras que se entrecruzam podem ser trazidas a uma discussão mais ou menos aprofundada.

O processo de obtenção das amostras para os ensaios também é fundamental para que os resultados obtidos possam ter real significado. A exploração didáctica deste problema da correcta amostragem pode ser muito rica. Numa vertente técnica deve salientar-se que, se a amostragem não for convenientemente levada a cabo, as informações obtidas nos testes não correspondem à realidade do terreno e não podem, portanto, servir de base a decisões correctas sobre tratamentos (ou não) de terrenos com fertilizantes, correcções de pH, ou suplementos de dados nutrientes, pois que os resultados obtidos nas análises daquelas amostras não são generalizáveis ao terreno em estudo. Estas decisões envolvem custos económicos relativos aos produtos a utilizar ou à produtividade da cultura em termos de quantidade e qualidade ou mesmo custos ambientais. Note-se que, em regra, as análises dão resultados diferentes em diferentes partes de um terreno, dado que este não é homogéneo, apresentando variações tanto horizontais como verticais, que devem ser tomadas em conta, a fim de minimizar custos e maximizar benefícios.

O equipamento vem acompanhado também por um pequeno manual sobre amostragem, que dá informações suficientes sobre os procedimentos técnicos. Nele se apresentam ainda os cuidados a ter na recolha, conservação e transporte das amostras e se discutem as principais fontes de erro, de uma forma que parece suficiente para o perfil de formação de um técnico que "vá trabalhar no terreno",

fazendo as amostragens e as análises e actuando como consultor agrícola. O manual não é, porém, suficiente para uma formação mais específica, que deverá aprofundar os aspectos químicos e os estatísticos obviamente relacionados com as finalidades das análises e o consequente rigor pretendido, bem como o estudo do erro associado aos resultados obtidos.

A utilização de um *kit* de La Motte na análise de solos provenientes da Mina de São Domingos deveu-se, apenas, a critérios pragmáticos norteados pela falta de tempo disponível para obtenção de alguns resultados indicativos, pois havia a consciência de que este equipamento não está orientado para análises de contaminação, neste caso principalmente por metais diversos e enxofre e seus compostos. A facilidade de utilização e a rapidez de execução, quando comparadas com as de técnicas analíticas convencionais em laboratórios de química, bem como a não existência, no laboratório da Escola Sá da Bandeira, de Santarém, de alguns dos reagentes indispensáveis, caso se optasse por métodos mais tradicionais, levaram a escolher um método muito menos rigoroso de análise das amostras recolhidas na mina, mas bastante mais expedito.

Curiosamente, a reacção das formandas do sub-grupo de química que tomou a seu cargo a análise das amostras de solos foi inicialmente de satisfação pela existência de um equipamento, já todo preparado, que lhes permitiria obter rapidamente algumas das informações pretendidas (não todas, mas um número razoável) para o objectivo em vista. O *kit* era novo, os reagentes estavam em embalagens ainda fechadas; não haveria, portanto, contaminações por utilização anterior deficiente por alunos, o que é sempre uma eventualidade a ter em conta. Depois da consulta dos manuais de instruções, o entusiasmo inicial deu lugar a uma reflexão mais crítica, em que se discutiram aspectos como o de apenas ser possível realizar análises semiquantitativas e puramente rotineiras. Os químicos convivem habitualmente bem com rotinas, dada a consciência que têm de serem necessários procedimentos estandardizados de utilização de normas, a fim de ser possível comparar resultados analíticos que de outra forma não têm significado. Mas a falta de resultados quantitativos, a "falta de rigor", mesmo que eventualmente sem uma discussão prévia sobre "que rigor e para quê?", já provocou algum desconforto. O desagrado foi ainda aumentado pela utilização, nos protocolos experimentais, de unidades estranhas, como libras/acre, que não estavam habituadas a utilizar e para as quais desconheciam os factores de conversão para o sistema racional que sempre usam, o SI, a que os americanos ainda não se renderam.

Assim a ideia, a princípio tentadora, de usar os *kits* foi posta de parte em prol de recorrer a métodos tradicionais de análise. Mas aí começaram a surgir dificuldades. A química dos solos é uma química difícil, complexa, em que as interacções entre os diferentes componentes são múltiplas. Mesmo as "simples" determinações de pH, de uma acidez ou alcalinidade, que aparentemente seriam lineares, não o são. O que é o pH do solo? Como determiná-lo, em que condições, e qual o significado do valor obtido por cada método? A presença ou ausência de determinados componentes propicia a existência, em maior ou menor extensão, de propriedades tampão com consequências muito relevantes sobre o valor determinado. A simples modificação da temperatura altera o pH e a solubilidade das diversas substâncias, daí o interesse da sua leitura no local; o

valor do pH, por seu lado, modifica as quantidades de substâncias extraídas do solo. As capacidades de trocas iónicas são variáveis com os tipos de solos, e a quantidade de água pré existente também é fundamental – choveu ou não, e há quanto tempo? E assim, o possível/previsível/desejável rigor foi posto em causa. As análises quantitativas cuidadosas e demoradas, com técnicas exigentes, material aferido e equipamentos sofisticados, dariam mesmo resultados significativos em termos do terreno ou apenas (ou talvez nem isso...) daquela particular amostra? Isto levantou, agora com maior acuidade, os problemas da recolha, transporte e armazenagem das amostras e da sua possível alteração, já abordados antes, mas talvez ainda não sentidos realmente.

Por outro lado, a bibliografia disponível de Química Analítica não dava respostas suficientes, e quando as dava, por vezes os reagentes necessários não existiam na escola de Santarém e a consulta de literatura muito especializada implicaria um estudo demorado. A pressão de tempo, o ritmo alucinante de trabalho, a necessidade de dar uma resposta rápida às questões postas e de apresentar trabalho no final da semana não se compadeciam com pesquisas aturadas, encomendas de reagentes, protocolos complicados e por vezes lentos.

Passou-se, assim, a uma reavaliação dos métodos a usar em termos de limitações/facilidades, tendo o grupo finalmente decidido utilizar os *kits* para analisar as amostras de solos trazidas da mina. Os resultados obtidos, se bem que não totalmente satisfatórios do ponto de vista analítico, mostraram as possibilidades de exploração didáctica destes equipamentos com alunos em aulas mais tradicionais ou em trabalhos de projecto. Numa exploração com alunos de química, como estão indicados nos manuais os reagentes usados nos diferentes testes, há a possibilidade de estudar, pelo menos, algumas das reacções químicas envolvidas e os princípios que lhes estão subjacentes, não descurando aspectos de segurança relativos ao manuseamento dos vários produtos químicos. Podem ainda ser propiciadas discussões relativamente aos problemas de amostragem, ao tipo de análises a realizar, suas finalidades e conseqüente rigor necessário, facilidade de utilização do equipamento e economia de tempo e de reagentes, ou ainda outras que se revelem adequadas aos alunos envolvidos.

Também pode ser tentada a produção, com os alunos se possível, de *kits* deste género, com adaptação a outros tipos de análise, nomeadamente, explorando aspectos de ecotoxicologia. Mesmo no caso de replicação, é necessário experimentar e adaptar, porque as indicações dos fabricantes não são claras, no que se refere a concentrações, por exemplo. Pode ser necessário procurar outros indicadores e eventualmente pesquisar e testar outras reacções de identificação, com reagentes alternativos mais fáceis de obter, podendo próprios alunos fazer as necessárias tabelas de cores. A padronização poderia ser feita por comparação com resultados obtidos com métodos tradicionais. Os materiais – frascos e pipetas – são baratos e os reagentes são usados em quantidades muito pequenas, originando muito poucos resíduos, o que é ainda uma mais valia do ponto de vista ambiental, a que muitos alunos são já (ou deveriam vir a ser) sensíveis.

Por todas estas razões os *Kits* de La Motte (ou outros) deveriam ser utilizados com mais frequência e não ficar fechados em armários de escolas.

4.2 O Espectrofotómetro

J.M.SERRA

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Os espectrofotómetros são instrumentos usados frequentemente pelos químicos para a determinação de concentrações de um elemento em soluções. Este tipo de instrumento é também usado quer pelos físicos, quer pelos biólogos e geólogos. Trata-se, pois, de um instrumento de uso generalizado, ainda que nem sempre correctamente, já que para a maioria dos seus utilizadores se trata de uma "caixa preta", não se questionando os resultados que fornece. Justifica-se assim esta tentativa de clarificação do seu funcionamento.

A instrumentação

Existem basicamente dois tipos de espectrofotómetros. O mais antigo e tradicional usa um monocromador, enquanto que os mais modernos usam um interferómetro. O tipo de espectrofotómetro mais frequente nas escolas é o que se baseia no monocromador, de modo que neste texto iremos concentrar a nossa atenção neste tipo de instrumento.

Princípio de funcionamento

Da radiação proveniente da fonte de radiação (usaremos o termo radiação em vez de luz, uma vez que nem todos os aparelhos funcionam na região visível do espectro electromagnético) é seleccionada no monocromador uma pequena banda de comprimentos de onda (cdo) que incide na amostra a analisar. O sinal transmitido é então detectado e amplificado. O espectro de transmissão ou absorção é obtido fazendo o monocromador varrer o espectro pretendido.

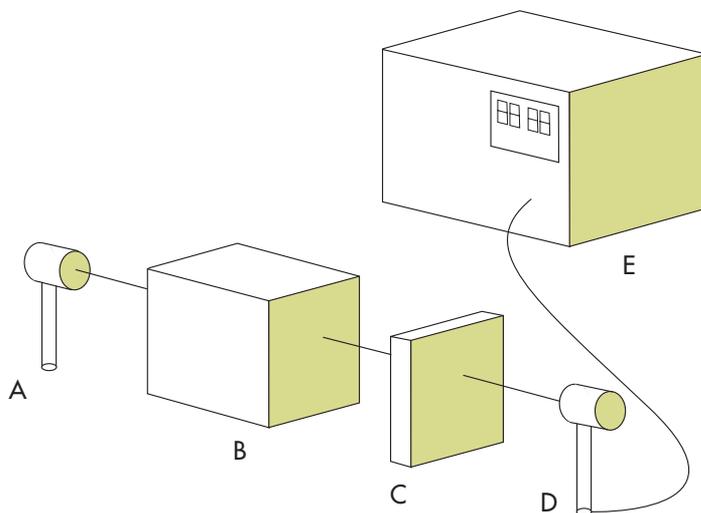


Figura 1- Diagrama esquemático de um espectrofotómetro.
A- Fonte de radiação; **B-** Monocromador; **C-** Amostra; **D-** Detector;
E- Amplificador e mostrador.

Os componentes do espectrofotómetro

A fonte luminosa

Todas as substâncias são susceptíveis de emitir e absorver radiação electromagnética. Nas fontes dos espectrofotómetros são normalmente usados elementos de SiC aquecidos, filamentos de tungsténio ou lâmpadas de arco, consoante se pretende trabalhar na zona do infravermelho, visível ou ultravioleta. A título de exemplo apresenta-se na figura 2 um espectro de emissão de uma lâmpada de tungsténio.

O monocromador

O monocromador destes instrumentos é constituído por uma rede de difracção e um conjunto de espelhos. O comprimento de onda é seleccionado pela rotação da rede de difracção. (ver figura 3)

O detector

Os espectrofotómetros que funcionam na região visível do espectro electromagnético usam detectores de silício. Estes detectores têm uma resposta que varia com o comprimento de onda (λ), como se pode observar na Figura 4. A este detector está acoplado um amplificador que fornece um sinal cuja medida é afixada no mostrador do aparelho.

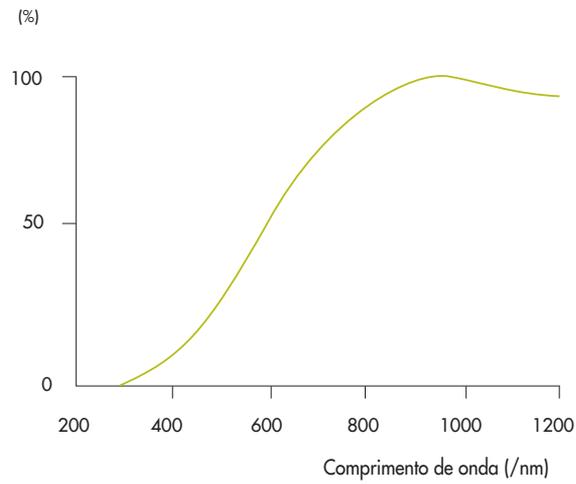


Figura 2- Distribuição espectral da radiação emitida por uma lâmpada de incandescência de tungstênio.

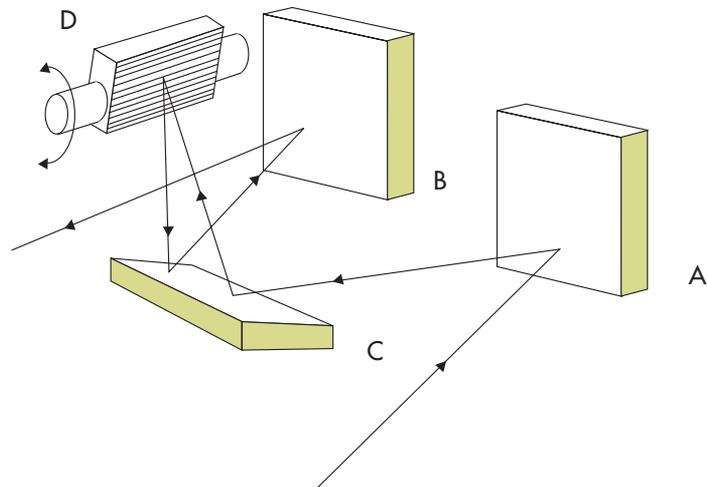


Figura 3- Esquema simplificado de um monocromador usado em diversos espectrofotômetros. O feixe proveniente da fonte incide nos espelhos A e C, dirigindo-se para a rede de difração. Uma fração do feixe com o comprimento de onda selecionado volta ao espelho C e continua para o espelho B, seguindo depois para a amostra.

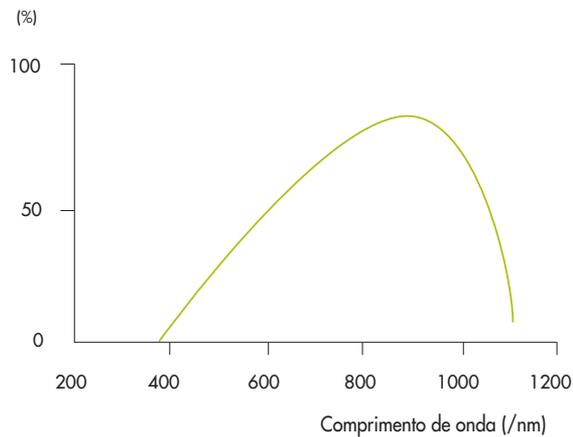


Figura 4- Curva da resposta relativa de um detector de silício em função do comprimento de onda.

Uma experiência típica com o espectrofotômetro

Analisemos a sequência de operações normalmente seguida numa experiência para a medida de um espectro de transmissão. Normalmente dizemos que devemos primeiro fazer uma calibração. Que significa isto exactamente?

Tendo em conta o que acima se disse sobre as características de emissão da fonte e sobre a eficiência do detector para os vários cdo em questão, facilmente se compreende que a conjugação desses factores dará lugar a uma resposta complexa do instrumento em função do cdo. Esta curva de resposta, obtida sem nenhuma amostra colocada, constitui a linha correspondente a uma transmissão de 100%. Daí ser importante ajustar o ganho do amplificador do detector por forma a garantir uma relação linear entre a resposta do amplificador e a intensidade da radiação detectada. Na gíria electrónica diríamos para não "saturar" o amplificador. Este ajuste pode fazer-se facilmente efectuando um varrimento rápido do espectro para se determinar o cdo para o qual a resposta é máxima. Colocando então o espectrofotômetro nesse comprimento de onda aumenta-se o ganho do amplificador até se verificar que o valor indicado no mostrador deixou de depender do botão de ajuste do ganho. Esta posição do botão do ganho corresponde ao valor limite da amplificação do sinal do detector. Por segurança deve diminuir-se ligeiramente o ganho para a realização da experiência.

Na segunda fase da experiência coloca-se então a amostra no porta-amostras e

efectua-se um novo varrimento do espectro. O coeficiente de transmissão da amostra obtém-se pela razão entre os valores obtidos, num dado cdo, com a amostra montada (I) e sem a amostra montada (I_0). Ou seja

$$T(\%) = I/I_0$$

E a absorção?

Poderemos dizer que é apenas $1-T$?

Analisemos então esta questão de um ponto de vista físico.

O feixe que atinge a amostra propaga-se no ar antes de incidir na amostra. A diferença de índices de refração entre os dois meios dá origem a um feixe reflectido e a um transmitido na superfície de incidência. Daqui resulta que o feixe que efectivamente penetra no material é apenas uma fracção do feixe incidente. O mesmo se passa quando o feixe abandona a amostra dirigindo-se para o detector. Ou seja, a conservação de energia diz-nos que a soma das intensidades reflectida, transmitida e absorvida deve ser igual à intensidade do feixe incidente. Assim, para determinarmos correctamente a absorção precisamos de medir não só a transmitância mas também a reflectância.

Um olhar mais detalhado

Vamos agora repetir a experiência anterior usando como amostra uma fina lamela de vidro.

Uma vez que sabemos existir uma reflexão do feixe sempre que este muda de meio, podemos construir o esquema indicado na Figura 5.

Ou seja, a radiação que atinge o detector não resulta apenas de uma passagem pela amostra (raio 1), mas também do raio 2 e de outros que se obtêm se prolongarmos o desenho das múltiplas reflexões.

Se atentarmos ao facto de que os feixes de que estamos a falar são na realidade ondas que se propagam, chegamos a uma situação curiosa e interessante. O raio 2 percorreu, em relação ao raio 1, um caminho adicional $2d$. Quer isto dizer que poderá não estar em fase com o raio 1. Inclusivamente até poderá estar em oposição de fase, dependendo da espessura d e do cdo do feixe. Nessas condições a intensidade do feixe transmitido seria mínima. Verificamos assim que a intensidade transmitida apresentará um comportamento oscilante, fruto da variação das condições de interferência quando se varia o cdo. As zonas em que os feixes interferem positivamente correspondem a um máximo na transmissão e as regiões em que interferem destrutivamente originarão um mínimo na transmissão. Um exemplo deste efeito pode ver-se na Figura 6.

Trata-se de uma lamela de silício que só é transparente no infravermelho.

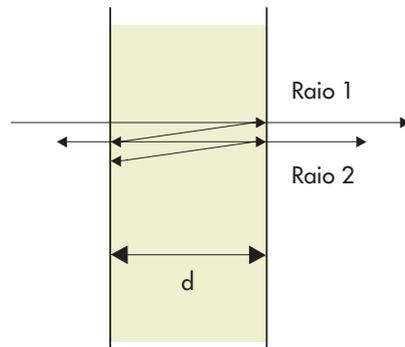


Figura 5- Propagação através de uma lâmina de faces paralelas.

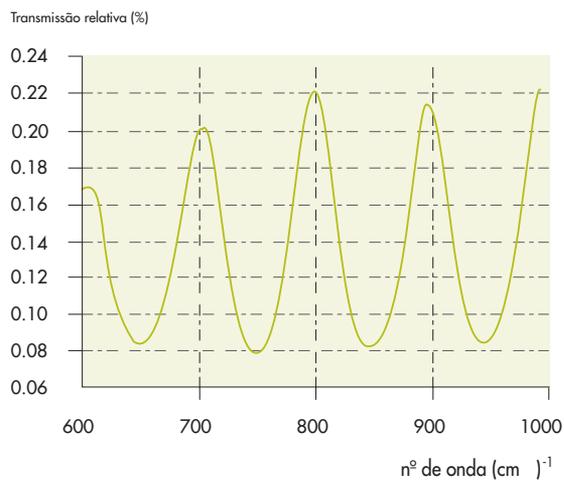


Figura 6- Curva de transmissão de uma lâmina de faces paralelas de silício. No eixo das abscissas foi usado o n° de onda ($1/\lambda$).

Qual a condição para o máximo da intensidade transmitida?

Como vimos atrás, será quando o caminho adicional percorrido for um múltiplo do cdo. De notar que, num meio com índice de refração n , o cdo neste meio relaciona-se com o cdo no ar por $\lambda_n = \lambda/n$ (considerando $n_{ar}=1$). A nossa condição de interferência vem então:

$$2d = m\lambda_n = m\lambda/n \quad \text{com } m \text{ inteiro}$$

Se usarmos o número de onda n_{onda} em vez de λ no eixo das abcissas obtemos

$$n_{onda} = m/(2dn)$$

Se tomarmos dois máximos adjacentes da transmissão, m difere de 1 e então podemos escrever

$$n_{onda} - n'_{onda} = \Delta n_{onda} = 1/(2dn) \\ \text{ou seja } d = 1/(2dn \Delta n_{onda})$$

Aplicando à amostra da Figura 6 obtém-se $15 \mu\text{m}$.

No entanto, poder-se-á argumentar:

- em muitas experiências, usando o espectrofotómetro, não se vêem interferências!

○ que aconteceria se em vez da espessura d tivermos uma amostra com uma espessura $d' = 100d$?

A condição para uma interferência destrutiva dos feixes diz-nos que devem ter uma diferença de caminho que seja um múltiplo de $\lambda/2$, ou seja $2d' = m\lambda/2$.

Em termos da espessura d teremos agora que a condição é satisfeita para $\lambda = 100d$ ou $m/4$. Se, por exemplo, para a lamela com espessura d , a condição de interferência destrutiva ocorria por exemplo em 500 nm (zona do verde do espectro), agora com uma espessura $d' = 100d$ ocorre em $100 \times 500 = 50000 \text{ nm}$, fora da zona de utilização do nosso espectrofotómetro.

A medida da absorvância

A absorvância é definida como $A = \log(I_0/I)$, o que significa que neste tipo de medidas se aplica aquilo que já abordámos anteriormente.

Muitas das experiências que envolvem a medida da absorvância visam determinar (com base em curvas de calibração) a concentração de um elemento numa dada

solução. Estas medidas são efectuadas frequentemente usando apenas um determinado cdo, correspondendo à zona em que esse elemento tem uma banda de absorção.

Vejamos, então, alguns dos cuidados a ter nas medidas:

Para a medida de I_0 bastará usar uma célula de líquidos vazia?

Estar vazia significa na realidade que contém ar; se estamos a analisar uma solução aquosa, então, pelo que acima se discutiu, será mais rigoroso usá-la já com uma solução o mais próxima possível da solução que se pretende estudar, pois só assim estaremos em condições de transmissão semelhantes. Aliás este é o princípio usado nos espectrofotómetros de duplo feixe, em que um dos porta-amstras tem a amostra de referência e o outro a amostra a analisar.

Quando introduzimos amostras com concentrações sucessivamente mais elevadas do elemento que pretendemos estudar, podemos relacionar a concentração directamente com a absorção?

A resposta a esta questão é uma outra questão: o coeficiente de reflexão da solução altera-se com a concentração ou não?

Agora torna-se mais clara a razão da utilização de uma curva de calibração, na medida em que esta curva (baseada em concentrações medidas por um método independente) contém já as contribuições de todas essas variações.

Conclusão

Vimos neste pequeno texto um resumo dos princípios de funcionamento de um espectrofotómetro e exemplos concretos da sua utilização em contexto escolar.

Embora algumas escolas possuam instrumentos deste tipo bastante sofisticados, a compreensão em termos simples e claros da física que está na sua base é fundamental para uma utilização correcta.

4.3 Caixa de deformação qualitativa

A.MATEUS

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

Várias foram as Escolas Secundárias que, nos últimos anos, receberam caixas TECTODIDAC MT 15472, concebidas pela PIERRON *Entreprise* para apoio a aulas experimentais de Geologia no desenvolvimento de modelos analógicos qualitativos sobre a deformação de rochas, erosão e deposição de sedimentos detríticos. Por diversas razões, porém, este equipamento didático não tem sido utilizado e/ou convenientemente explorado, comprometendo os propósitos implícitos na sua distribuição. Não vamos aqui discutir as razões eventualmente subjacentes à não utilização desta caixa de deformação qualitativa, mas sim enumerar as principais vantagens pedagógicas e didáticas inerentes ao seu uso, sem esquecer a apresentação dos cuidados a ter na concepção e análise dos resultados adquiridos em cada experiência.

O equipamento em causa (fig. 1), globalmente inspirado nas caixas de deformação introduzidas em 3.4. da presente brochura, é de utilização bastante simples, permitindo a criação relativamente rápida de dispositivos geométricos passíveis de documentar variadíssimas situações reais. A sua instalação requer somente uma mesa vulgar onde, para além da caixa propriamente dita e dos seus poucos acessórios, se possam colocar os diferentes "consumíveis" (recipientes com areias – preferencialmente coloridas, bem calibradas e de granularidade fina – , pó de gesso e/ou pó de talco, esguicho com água, papel para limpeza, fita métrica, papel transparente e marcadores de cor); em caso de se pretender documentar fotograficamente ou em vídeo as diferentes etapas de cada ensaio, necessitar-se-á, adicionalmente, de uma câmara fotográfica ou de vídeo devidamente montada num tripé.

A manutenção e conservação da caixa e seus acessórios é também muito fácil, exigindo apenas o cumprimento de um conjunto de regras, mais de bom senso que de outra natureza específica, de que são exemplo as seguintes:

- 1) nunca exercer forças elevadas ou introduzir torções desnecessárias durante os ensaios, por forma a evitar a abertura de fracturas na caixa;

2) forrar com folhas de acetato (ou qualquer outro material transparente) as paredes da caixa em contacto com a areia, evitando, portanto, o embaciamento gradual das superfícies de plástico devido aos numerosos microsulcos criados durante os sucessivos ensaios; e

3) lavar a caixa e seus acessórios com água corrente após cada ensaio, depois de limpeza prévia com o auxílio de um pincel limpo e seco.

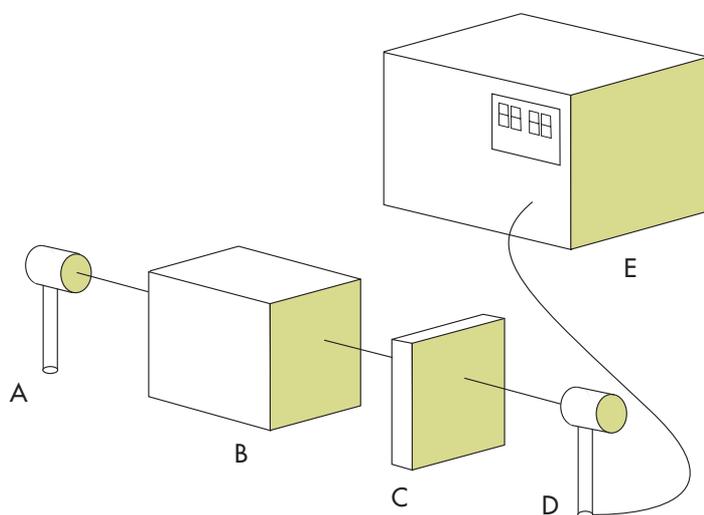


Figura 1 – Representação esquemática dos principais componentes e acessórios da caixa TECTODIDAC; 1) caixa plástica transparente com dimensões (Lxlxh) 260x160x170 mm e orifícios posicionados nos locais indicados pelas setas; 2) placas em plástico transparente onde se fixam as duas hastes metálicas representadas em 3; 4) mesa destinada ao nivelamento e compactação dos sedimentos detríticos.

Uma vez terminado o ensaio deve-se proceder à reciclagem de muitos dos consumíveis utilizados com vista à sua recuperação e subsequente uso em outras experiências. A promoção deste tipo de actividades, reforçando na prática um princípio de grande valor educativo, possibilita ainda a interacção com outro tipo de técnicas e/ou noções eventualmente já ministradas e discutidas (e.g., separação de diferentes fracções granulométricas com o auxílio de crivos, secagem em estufa de fracções granulométricas humedecidas com água, ataque químico e subsequente lavagem de fracções granulométricas coradas artificialmente).

A notícia técnico-pedagógica que acompanha o equipamento em causa enumera uma série de objectivos metodológicos e cognitivos directamente relacionados com a utilização da caixa, dando ainda alguns exemplos de modelos analógicos a construir. Nada diz, porém, quanto à importância de testar previamente os materiais a utilizar nos diferentes ensaios, nem tão pouco menciona a pertinência das discussões que se devem promover em torno dos parâmetros tempo e escala na avaliação dos resultados obtidos em cada experiência. Esta omissão pode conduzir a variadíssimos problemas de extrapolação entre o obtido analogicamente e o real, conforme se salientou no capítulo 3.4. da presente brochura, impedindo a avaliação do verdadeiro significado dos resultados experimentais. Estamos, aliás, convictos de que somente após a satisfação plena de tais requisitos, melhorando inclusivamente alguns dos procedimentos recomendados na notícia técnico-pedagógica, é possível atingir conscientemente os objectivos metodológicos e cognitivos nela inscritos – a este propósito importa salientar que os ensaios efectuados com esta caixa podem efectivamente proporcionar uma excelente introdução ao conjunto de experiências referido em 3.4.. Vejamos de forma sumária porquê e como.

A génese e propagação de estruturas na dependência de movimentos convergentes (tal como, *e.g.*, dobras e falhas inversas) pode ser globalmente apreciada em ensaios de compressão sobre sequências de estratos constituídos por sedimentos detríticos. Para o efeito utiliza-se apenas uma das placas móveis em **L**, exercendo-se uma força normal sobre a haste metálica que se introduz num dos orifícios da caixa e se fixa na placa com o auxílio de um parafuso; a série detrítica que será sujeita à força normal ficará confinada ao espaço compreendido entre a placa **L** e a parede oposta da caixa (fig. 2). O recurso às duas placas **L** colocadas em forma de **U** permite realizar um novo tipo de ensaios cujo objectivo se prende com a ilustração geral dos princípios subjacentes ao desenvolvimento de estruturas na dependência de movimentos distensivos; nos dispositivos experimentais assim formados, a série detrítica limitada pelas duas placas **L** é sujeita a forças normais de sentido oposto exercidas sobre as duas hastes metálicas previamente fixadas nas placas (fig. 3). Em termos gerais e independentemente do tipo de ensaio, acresce mencionar que:

- 1) após verter uma determinada porção de areia ou silte para a caixa se deve proceder à sua distribuição uniforme e subsequente compactação com o auxílio de uma espátula e de uma mesa em **T** ou cilindro manual, respectivamente, por forma a gerar um estrato coeso, homogéneo e de espessura regular (evitando, tanto quanto possível, a criação de anisotropias particulares que possam constituir domínios preferenciais de nucleação das estruturas);
- 2) o comprimento e espessura de cada estrato devem ser medidos antes da aplicação da(s) força(s) normal(ais) – tal poderá ser efectuado em uma ou nas duas faces da caixa; e
- 3) durante o(s) ensaio(s) se devem registar as variações de comprimento e de espessura dos estratos com o tempo, o que nos permite estimar as sucessivas taxas de encurtamento e caracterizar a evolução geométrica das estruturas geradas.

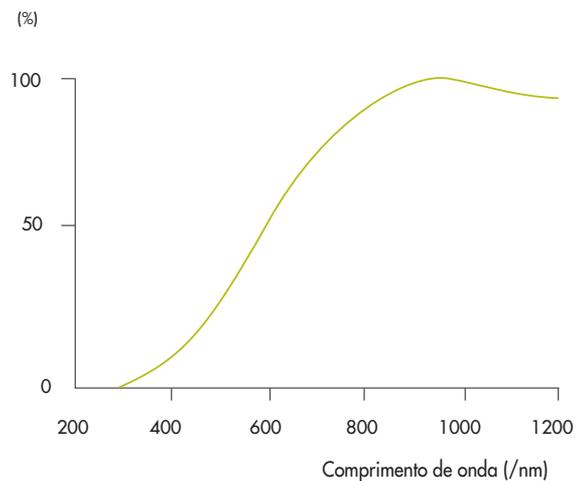


Figura 2 – Representação esquemática do ponto de partida para ensaios compressivos com o auxílio da caixa TECTODIDAC.

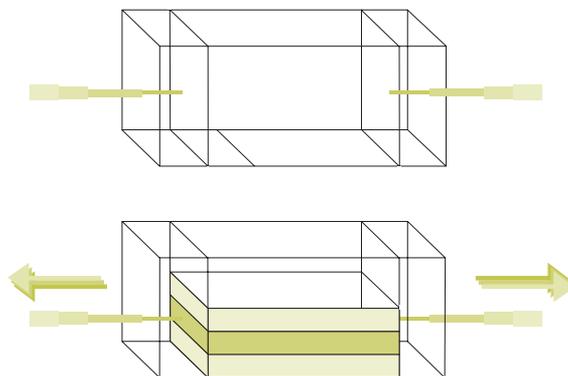


Figura 3 – Representação esquemática do ponto de partida para ensaios distensivos com o auxílio da caixa TECTODIDAC.

A análise comparativa das estruturas desenvolvidas em ensaios análogos exige ainda que, para iguais taxas de encurtamento, se proceda ao registo da sua geometria através de decalque directo em papel transparente sobre a(s) parede(s) da caixa ou fotografia da(s) mesma(s), havendo no último caso o cuidado de fotografar um elemento fixo que nos proporcione o cálculo da escala.

Qualquer que seja o tipo de ensaio a efectuar, afigura-se conveniente realizar não apenas uma experiência que documente a génese e desenvolvimento de uma

determinada estrutura, mas sim uma série de ensaios que possibilitem o amadurecimento gradual das noções subjacentes aos procedimentos a adoptar e o conhecimento dos materiais utilizados, permitindo levantar hipóteses de trabalho a testar com base nos resultados experimentais adquiridos (ainda que estes sejam qualitativos ou semi-quantitativos). A extrapolação para a realidade geológica não pode e não deve ser realizada sem a devida discussão dos parâmetros que influenciam a deformação natural das rochas, algo que só deve acontecer após a concretização da série global de ensaios, conceptualizados de forma a adquirir progressivamente a destreza técnica necessária ao manuseamento correcto desta caixa e dos materiais utilizados, para além (e talvez este seja o aspecto mais importante) dos cuidados a ter na observação e registo dos resultados, explorando-os racionalmente e preparando a sua discussão. A este propósito importa notar que a extrema simplicidade de utilização da caixa contrasta fortemente com a enorme riqueza e complexidade das discussões que se podem promover em torno dos resultados obtidos nos diversos ensaios.

O primeiro conjunto de ensaios a realizar consiste na programação de testes que visem a avaliação sumária do comportamento mecânico dos sedimentos disponíveis e a utilizar subsequentemente. Recomenda-se a utilização de areias finas e bem calibradas, mas tal opção deve ser convenientemente justificada (veja-se, por exemplo, o conjunto de notas inscrito em 3.4.). Podem e devem efectuar-se ensaios sobre o mesmo material com diferentes condições de humidade, comparando subsequentemente as estruturas obtidas para iguais taxas de encurtamento; o volume de água adicionado a uma certa quantidade de sedimento deve ser previamente medido por forma a estimar o índice de hidratação. A necessidade dos marcadores de deformação deve emergir com naturalidade durante a discussão dos resultados obtidos, justificando assim alguns dos procedimentos básicos a usar na construção das sequências de estratos. Esta construção deve envolver alternâncias diferentes de sedimentos, fazendo variar em ensaios consecutivos a espessura dos estratos e/ou a sua granulometria e/ou o índice de saturação em água; o registo de todas as variações introduzidas neste segundo conjunto de ensaios deve ser realizado com especial cuidado, por forma a comparar objectivamente os efeitos associados às modificações implementadas para taxas de encurtamento equivalentes.

Antes de introduzir o terceiro conjunto de ensaios é conveniente saber em que medida os materiais ensaiados constituem análogos mecânicos das rochas naturalmente deformadas, procurando igualmente discutir os factores escala e tempo envolvidos nas experiências realizadas. Tal exige o (re)exame dos parâmetros que influenciam o comportamento mecânico das rochas e, conseqüentemente, o debate em torno do estilo de deformação esperado em distintos ambientes geológicos. Desta discussão deverão emergir as principais limitações inerentes à caixa de deformação em discussão no que respeita à:

- 1) simulação de comportamentos dúcteis;
- 2) quantificação da(s) força(s) normal(ais) exercida(s);
- 3) impossibilidade de controlar os efeitos atribuíveis a forças tangenciais; e

4) avaliação dos efeitos devidos à temperatura sob a qual as estruturas são geradas.

Uma vez encontrados os sistemas geológicos passíveis de ilustração com o auxílio desta caixa (meios sedimentares detríticos sujeitos a deformação em regime frágil), estamos em condições de introduzir exemplos reais (de complexidade crescente) adequados à avaliação qualitativa dos factores escala e tempo, bem como de preparar percursos experimentais alternativos que possibilitem a quantificação de alguns parâmetros (a este propósito, vejam-se as indicações inscritas em 3.4. da presente brochura).

O terceiro conjunto de ensaios deve fundamentar-se em concepções mais complexas, preferencialmente construídas com base na interpretação prévia de cartas geológicas, se possível complementada com saídas de campo onde se procederá ao exame das principais características a evidenciar na modelação. Pretende-se assim desenvolver as capacidades de racionalização da narrativa geológica, integrando globalmente os conhecimentos adquiridos nos ensaios precedentes.

No terceiro conjunto de ensaios, cada estrato representará uma unidade geológica previamente identificada, pelo que as espessuras a utilizar na construção da série detrítica deverão respeitar a proporcionalidade determinada para a situação real. Só assim se assegura a correspondência geométrica entre as estruturas reais (passíveis de observação macroscópica) e as geradas durante o ensaio. E se tal não acontecer, importa averiguar porquê, discutindo amplamente as diferentes hipóteses de trabalho, se possível à luz das observações/medições efectuadas no terreno (inexistência de analogismo mecânico entre os materiais utilizados e as unidades geológicas tomadas como referência; condições de deformação natural não contempladas no ensaio; influência de anisotropias pré-existentes no desenvolvimento dos dispositivos estruturais observados *in situ*; etc.).

Outros níveis de complexidade podem e devem ser testados. A introdução prévia de uma porção irregular de esferovite, por exemplo, posteriormente envolvida e coberta pela sequência de estratos, poderá ser tomada como ponto de partida para avaliar qualitativamente os efeitos induzidos pela presença de um "bloco rígido" no seio da série sedimentar (à semelhança do que acontece quando existe, por exemplo, um corpo ígneo intrusivo). Fazendo variar a dimensão e morfologia do bloco, diferentes arranjos geométricos serão obtidos para as mesmas condições experimentais, resultando daqui elementos de comparação inestimáveis à discussão e concepção de novos quadros de problematização (muitos deles passíveis de observação e caracterização *in situ* e/ou servindo de base à conceptualização e montagem de novos dispositivos experimentais – conforme o discutido em 3.4.).

Sobre uma estrutura previamente criada, poder-se-á ainda proceder à remoção gradual de material com o auxílio de uma espátula ou colher, na tentativa de simular os efeitos da erosão sobre o "relevo criado". Alternativamente ou adicionalmente, poder-se-á "construir" novos estratos com o propósito de ilustrar novo(s) ciclo(s) de deposição, documentando ainda as diferentes relações geométricas que se estabelecem entre séries detríticas cronologicamente distintas

(discordâncias angulares, para-conformidades, entre outras). O conjunto sedimentar assim obtido poderá ser então sujeito a novo encurtamento ou extensão. Claro está que tais desenvolvimentos experimentais devem ser precedidos e acompanhados por discussões em torno dos processos de meteorização, transporte e deposição de sedimentos, bem como dos parâmetros que influenciam as taxas de vulnerabilidade física e química das rochas, sem negligenciar a apreciação e avaliação dos principais agentes modeladores do relevo e dos factores que controlam este último (estruturais ou impostos pelos contrastes litológicos, somente para citar os de maior importância). E, mais uma vez, se afiguram determinantes as actividades de campo devidamente apoiadas na análise prévia de documentos cartográficos adequados, por forma a consolidar os conhecimentos adquiridos através dos diferentes ensaios e das discussões (contextualizações) que a seu propósito se promovem.

Acresce, por último, referir que os dispositivos geométricos obtidos com o auxílio da caixa qualitativa de deformação se revelam excelentes para efeitos de comparação com vários registos gráficos resultantes da análise e interpretação de cartas geológicas, como sejam os perfis geológicos e os blocos diagrama (em cujas secções se inscrevem os elementos pertinentes à compreensão da arquitectura do substrato geológico da área representada).

4.4 Os planos, mapas, cartas e fotografias aéreas como recursos didácticos

A.MATEUS

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

O percurso investigativo empreendido em diversos momentos das acções de formação a que se reporta o presente conjunto de brochuras contemplou a utilização generalizada de extractos das cartas topográficas na escala 1:25000 n°569 (Santana de Cambas) e n°567 (Pomarão), editadas pelo Instituto Geográfico do Exército. Adicionalmente, alguns subgrupos de trabalho procederam ao exame da fotografia aérea na escala 1:23000 da região enquadrante da Mina de S. Domingos (fiadas 706 e 707 do voo FAP13 de 17/04/1985), fazendo também uso de diferentes cartas temáticas (geológicas, geofísicas e de pedogeocímica) por forma a contextualizar muitas das observações e medições efectuadas, testando diversas hipóteses de trabalho. Muitas das questões que então se levantaram justificam as notas que agora se gizam, cuja orientação geral gira em torno da pertinência formativa e educativa do procedimento adoptado e do modo como o mesmo se afigura relevante em qualquer abordagem que vise o estudo de um sistema natural ou sua parte. Por outras palavras, em que medida poderão os planos, mapas, cartas e fotografias aéreas constituir efectivamente um recurso didáctico, promovendo a aquisição de variadíssimas noções e o desenvolvimento de capacidades técnicas.

Uma forma vulgar de sustentar a pertinência das diversas incursões elementares pela Cartografia a nível dos Ensinos Básico e Secundário emerge da fácil verificação de que o manuseamento de mapas, planos e cartas é de capital importância para as actividades desenvolvidas por qualquer cidadão nas sociedades modernas. De facto, quantas foram as vezes que, ao longo da vida, sentimos a necessidade de recorrer ao plano de uma cidade, a um mapa de estradas ou a uma carta geográfica com o propósito de localizarmos esta ou aquela região que, por alguma razão, nos despertou a curiosidade (por ter sido devastada por uma intempérie, por constituir o cenário de conflitos sócio-políticos de relevo internacional, por incluir ecossistemas especiais, ou, simplesmente, por envolver o local anunciado naquele panfleto turístico especial que alimentava o sonho de umas amenas e retemperantes férias)? Quantas foram as vezes que, ao folhear um jornal ou uma revista, nos detivemos na apreciação de um mapa? Ou,

quantas foram as vezes em que o *pivot* de um telejornal nos encaminhou para uma representação cartográfica, dando conta de um determinado acontecimento (geopolítico, militar, económico, social, climático, etc.) e sua subsequente evolução? A incerteza na resposta a estas questões (ou a muitas outras similares) é certamente elevada, porquanto dificilmente poderemos contabilizar com rigor o número de vezes em que, por força das circunstâncias, consciente ou inconscientemente, fomos levados a manusear ou a interpretar um registo gráfico inscrito num plano, mapa ou carta. Mas será que as informações ministradas no âmbito dos conteúdos programáticos oficiais se transformam efectivamente em conhecimento? Ou seja, será que a ênfase colocada nas questões práticas (visando a operacionalidade e, até certo ponto, a utilização de rotina) não impede a verdadeira percepção das questões-base que orientam o método cartográfico e das vantagens e limitações inerentes à escolha desta ou daquela representação da superfície terrestre ou da distribuição espacial de uma determinada variável? Não seria preferível abordar toda esta problemática num quadro mais vasto em que a orientação geográfica e a utilização dos planos, cartas e mapas se revestisse de especial significado, surgindo como uma necessidade real? E, nesta perspectiva, não poderiam os docentes tirar maior partido educativo das noções ministradas e devidamente experimentadas?

A narração geral da história dos documentos cartográficos encerra em si mesma um grande valor cultural, já que retrata de forma magistral a evolução dos conceitos do Homem sobre o Planeta Terra e, conseqüentemente, a diacronia da mentalidade humana. Com efeito, a arte de elaborar mapas surgiu muito cedo (talvez como reflexo da ocupação e ordenamento territorial), traduzindo-se pela representação a grande escala das áreas percorridas pelo "cartógrafo". Os primeiros registos que se conhecem datam de cerca de 2500 a.C. e dizem respeito a fragmentos de mapas mesopotâmicos inscritos em "tábuas de barro" oriundas de Kirkuk. Na Grécia Antiga, em grande parte mercê das rotas comerciais entretanto estabelecidas, surgem representações bastante precisas da linha de costa do Mediterrâneo, contendo inscrições claras sobre as comunidades costeiras e diversas informações úteis à navegação. Deve-se a Aximandro (em torno de 400 a.C.) a primeira tentativa de estabelecer um mapa-mundi centrado no Mediterrâneo, subjacente ao qual se encontrava a concepção de um mundo cilíndrico no qual os terrenos continentais flutuavam num imenso mar. Mais tarde, na dependência das novas concepções desenvolvidas pela escola pitagórica, as visões do mundo adquirem nova estrutura, conduzindo às pioneiras concepções esféricas da Terra e, com Eratóstenes (por volta de 250 a.c.), às primeiras tentativas de medição do seu raio e perímetro. Tais concepções são posteriormente refinadas, beneficiando dos conhecimentos adquiridos no âmbito da geometria (medida da terra), o que permitiu a Ptolomeu, em pleno século II, apresentar uma teoria sobre as projecções cartográficas na qual os conceitos de latitude e longitude são utilizados de forma extensiva. Para os Romanos, os mapas representavam sobretudo um instrumento de avaliação do seu domínio territorial; no *Orbis Terrarum*, o mapa romano de maior importância, o Império constituía efectivamente o centro da representação circular do mundo. Na Idade Média (ou das Trevas), a doutrina da igreja determinou a visão do Mundo e, para a representação deste, adoptou uma forma plana perfeitamente simétrica, cuja expressão mais conhecida (em forma de T) divide o "domínio terrestre" em três partes, figurando Jerusalém no seu centro - este foi aliás o elemento figurativo que

serviu de base ao "ceptro imperial", símbolo de poder. A concepção renascentista do Mundo permitiu retomar e ampliar o conhecimento geodésico adquirido na Antiguidade Clássica, reeditando-se os atlas de Ptolomeu e engendrando novos métodos para representar o Planeta, cuja esfericidade foi entretanto comprovada; datam desta altura as numerosas e importantíssimas contribuições dos cartógrafos portugueses. Cinco anos antes da primeira viagem de C. Colombo, Martin Behaim publica o primeiro mapa do globo com base nas descrições de Marco Polo e seguindo de perto os cálculos de Ptolomeu; nesta representação, que não incluía o continente americano, o círculo máximo atingia somente 2/3 da circunferência real. Segue-se-lhe, a partir de 1541, a publicação dos mapas de Mercator. Do ponto de vista artístico, a cartografia atinge o seu apogeu nos séculos XVI e XVII: os espaços correspondentes às regiões desconhecidas ou relativamente às quais se dispunha de poucas informações eram ricamente preenchidos com imagens decorativas criadas em função de diversas inspirações e/ou imposições por parte de quem financiava as expedições necessárias à aquisição dos novos elementos cartográficos. Estas curiosas representações do Mundo desaparecem no século XVIII, sendo substituídas por mapas informativos, construídos de forma objectiva. Na linha da preocupação pela exactidão, própria da cartografia francesa do século XVIII, ficaram para a história os magníficos mapas devidos a D'Anville (1727). Estes representam, efectivamente, o ponto de partida para as concepções cartográficas actuais, suporte fundamental de qualquer estudo detalhado do território sobre o qual o Homem orienta a sua existência, determinando ainda a satisfação de muitas necessidades da vida prática (e.g. organização político-administrativa e económica de uma região).

O valor cognitivo das abordagens que, no âmbito da Cartografia, se podem fazer a nível do Ensino Secundário é imenso, varrendo transversalmente variadíssimas disciplinas, a começar pela Matemática e, nela, pelas noções de trigonometria (plana e esférica) e de geometria (estas últimas frequentemente relegadas para segundo plano). E se todas estas noções forem devidamente complementadas por outras de carácter geográfico, histórico, geofísico e, até mesmo, sócio-económico, várias são as actividades práticas que se podem implementar com vista à aquisição de capacidades técnicas e à introdução de novas problemáticas a debater e experimentar subsequentemente. Vejamos sumariamente de que modo, analisando quatro aspectos básicos da problemática em jogo: 1) localização e referenciação; 2) representação bidimensional do globo; 3) orientação e medição (planimetria e altimetria); e 4) linguagem simbólica.

A localização exacta de um ponto na superfície terrestre e, conseqüentemente, a selecção do referencial utilizado na determinação das suas coordenadas representa um problema aparentemente simples que importa tratar com especial cuidado. Em primeiro lugar convém lembrar que é o facto de a Terra ser assimilável a um esferóide com achatamento bastante pequeno (cerca de 1/300 do semi-eixo maior) que torna legítima a utilização de uma esfera (uniforme e contínua - sem qualquer tipo de elevações ou depressões - e com raio em torno de 6378 km) para sua representação em questões elementares. O diâmetro em torno do qual se processa o movimento de rotação do planeta toma então a designação de eixo terrestre, denominando-se pólos as suas extremidades. Desta forma, todo o plano que contém o eixo diz-se meridional, intersectando o globo terrestre segundo um círculo máximo (ou, simplesmente, meridiano). Os infinitos

planos perpendiculares ao eixo intersectam a superfície terrestre idealizada segundo círculos menores, também conhecidos por paralelos. O equador corresponde assim ao paralelo que contém o centro da esfera e, por isso, ao contrário dos restantes, um círculo máximo que divide a Terra em dois hemisférios: o boreal, que contém o pólo Norte, e o austral que contém o pólo Sul. Desta forma, o posicionamento de qualquer ponto da superfície terrestre fica definido pela intersecção de um meridiano e de um paralelo (poder-se-á adicionalmente definir a altitude do ponto, segundo a trajectória rectilínea perpendicular à superfície terrestre que o contém). Tomando um meridiano e um paralelo como referência (normalmente o de Greenwich - ao qual se reportam todas as efemérides astronómicas e os fusos horários - e o equador), é possível construir um sistema apropriado à descrição espacial de todos os pontos no espaço e, conseqüentemente, de todos os elementos geométricos nele inscritos. Por outras palavras: adoptando um referencial próprio (constituído por um meridiano e o equador), a localização de qualquer ponto fica determinada através das suas coordenadas esféricas ou, como se diz mais correntemente, pelas suas coordenadas geográficas: longitude, valor do arco medido sobre o paralelo de posição, positivo (Este) ou negativo (Oeste), entre os meridianos de posição e de referência; e latitude, valor do arco do meridiano de posição entre o equador e o paralelo de posição, o qual será positivo (latitude Norte) ou negativo (latitude Sul) quando o ponto se posicionar nos hemisférios boreal ou austral, respectivamente. A altitude do ponto será então definida pela distância (medida na vertical) que o separa da superfície esférica de referência (geóide), positiva ou negativa consoante se localize acima ou abaixo desta, respectivamente.

Introduzido e analisado de forma geral o problema da localização, impõe-se discutir de que forma se poderá representar bidimensionalmente a superfície terrestre. O primeiro passo consiste na transferência da rede de meridianos e paralelos para a superfície plana (de projecção), algo que pode ser efectuado de três modos distintos: i) sobre um plano tangente ao globo terrestre em um ponto - projecção plana ou azimutal (fig. 1); ii) sobre uma superfície cilíndrica que envolve parte do globo, sendo-lhe tangente ou secante - projecção cilíndrica (fig. 2); ou iii) sobre uma superfície cónica que envolve parte do globo - projecção cónica (fig. 3). As projecções podem ser exactas quanto à área, à longitude ou aos ângulos, mas nunca satisfazem os três requisitos simultaneamente, pelo que se deve seleccionar o tipo de projecção a usar de acordo com a finalidade a que se destina a representação cartográfica (esta constitui aliás uma informação inscrita em todos os mapas e cartas e que raramente se toma em consideração quando se introduzem e manuseiam tais documentos em salas de aula!). Sobre a rede projectada de meridianos e paralelos inscrever-se-ão todos os elementos topográficos, tendo por base as coordenadas do universo de pontos requerido pelo conhecimento da configuração precisa da superfície terrestre.

Os aspectos envolvidos na orientação e medição (planimetria e altimetria) são bastante mais complexos e extensos. Começemos pela localização, a qual consiste "apenas" na determinação exacta do ponto da superfície terrestre em que nos encontramos. Tal pode ser conseguido através de variadíssimos métodos, não exigindo nenhum tipo especial de mapa, porquanto se resume à determinação das coordenadas (esféricas ou geográficas) do lugar, o que actualmente se pode fazer de forma célere e relativamente precisa, graças à generalização dos receptores **GPS** (*Global Positioning System*). Mas, não dispondo de **GPS**, como fazer?

Em terra, o conjunto dos elementos topográficos inscritos na carta ou mapa afigura-se inestimável à selecção de pontos de referência relativamente aos quais se pode normalmente estimar com relativa precisão a posição pretendida. O mesmo acontece em navegação aérea de baixa altitude (e franca visibilidade) ou em navegação marítima costeira, em que os contornos das linhas de costa, faróis, bóias e outras formas de sinalização representam auxiliares preciosos na estimativa do posicionamento. Desta forma, após orientar globalmente a carta (o que se pode fazer tendo em conta o movimento da Terra relativamente ao Sol), a leitura das coordenadas do ponto faz-se directamente na carta com base nos meridianos e paralelos projectados. Pretendendo um posicionamento mais rigoroso, deve-se recorrer a uma bússola (no caso específico da navegação marítima e aérea em mar aberto e a altitude elevada, respectivamente, usam-se adicionalmente mapas e cartas cuja concepção envolve a projecção desenvolvida por Mercator, na qual o rumo indicado pela bússola vem dado por uma linha recta - loxodrómica - que intersecta todos os meridianos sob o mesmo ângulo). E aqui surge o primeiro problema que, simultaneamente, representa um grande desafio: o que é e como se deve usar a bússola?

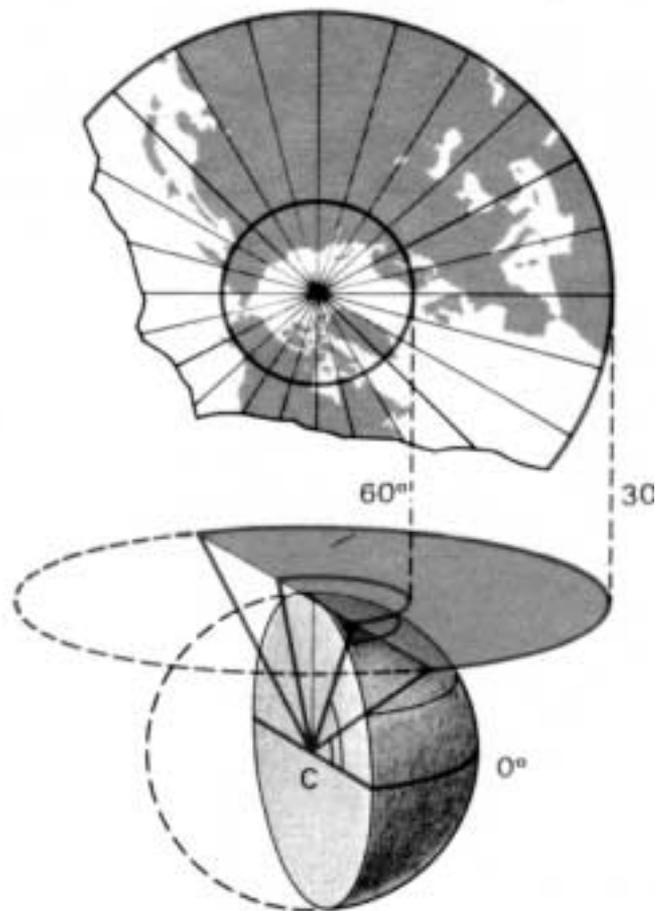


Figura 1

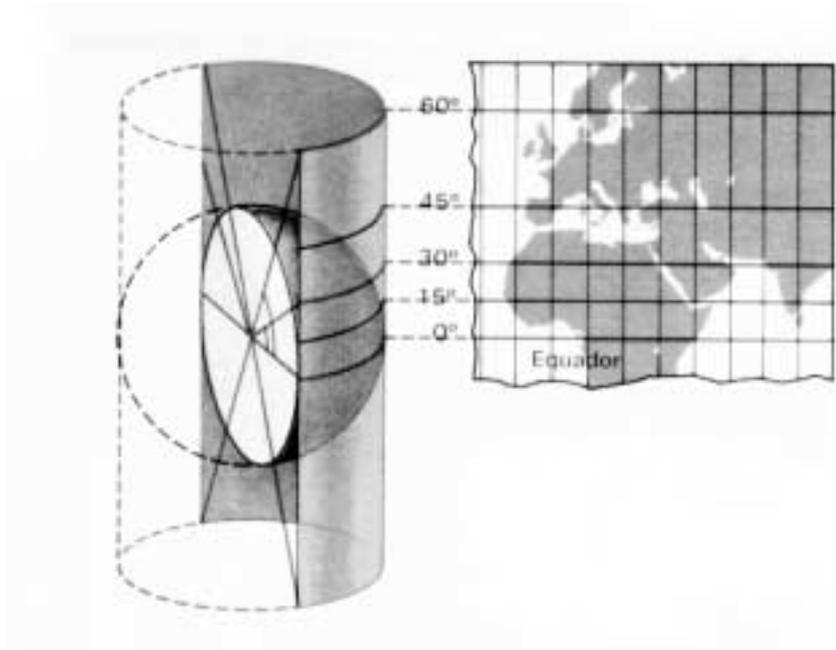


Figura 2

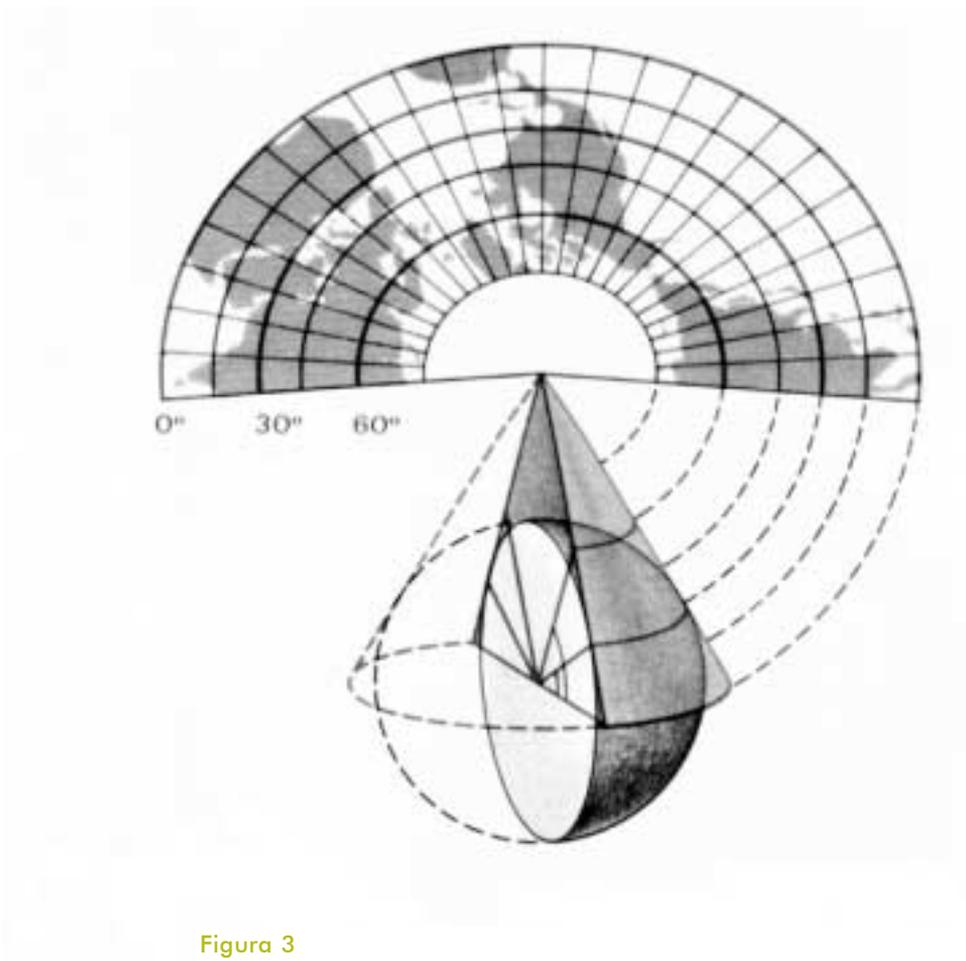


Figura 3

De forma muito simples, podemos dizer que uma bússola consiste numa caixa com limbo graduado (dividido em 360 partes iguais) em cujo interior existe uma agulha magnética montada sobre um eixo vertical, em torno do qual roda, indicando a direcção Norte-Sul magnética. A amplitude do desvio entre esta última direcção e um rumo desconhecido pode então ser medida recorrendo ao limbo graduado da caixa, tendo o cuidado de colocar a bússola na horizontal (por forma a que a agulha rode livremente em torno do eixo - para garantir tal requisito é sempre possível recorrer a um nível-bolha previamente colocado na caixa). Mas que relação existe entre o Norte-Sul magnético e o Norte-Sul geográfico? E, neste contexto, qual é o verdadeiro significado da declinação magnética patente em todas as cartas topográficas e para que serve? Tais questões, frequentemente colocadas por quem pela primeira vez utiliza racionalmente a bússola e tenta decodificar as cartas topográficas, permitem introduzir e/ou relembrar toda uma série de noções relacionadas com o campo magnético da Terra. E a oportunidade não pode ser negligenciada, porquanto, mesmo sem entrar em grandes formalismos matemáticos, é possível compreender que o globo terrestre se comporta como um íman bipolar fraco (graças às suas grandes dimensões) cujo campo magnético (de natureza vectorial) resulta da adição de três parcelas fundamentais denominadas campos regular, irregular e variável. A primeira diz respeito à magnetização uniforme do globo e corresponde a cerca de 92% do campo total; a segunda, perfazendo cerca de 2% do campo magnético total, tem também origem interna e depende das anomalias locais e regionais determinadas pela presença de corpos geológicos subsuperficiais fortemente magnéticos; a terceira parcela, cerca de 6% do campo total, representa a contribuição das variações periódicas (diária, anual, secular) e esporádicas (perturbações e tempestades magnéticas) de origem externa ao planeta. Uma vez estabelecidas as principais origens do campo magnético terrestre, acresce referir que, em qualquer ponto da superfície terrestre, o mesmo fica definido com base nas componentes horizontal (H) e vertical (Z), sendo ainda possível determinar os valores da inclinação magnética (I) e declinação magnética (D). A componente horizontal do campo magnético num dado local representa a projecção do campo nesse ponto sobre um plano horizontal, pelo que H se exprime através das medidas rectangulares Norte (X - dirigida segundo o meridiano geográfico) e Este (Y - segundo direcção perpendicular à anterior), resultando, a partir da figura 4,

$$X = H \times \cos D \quad , \quad Y = H \times \sin D \quad ,$$

$$\operatorname{tag} I = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad \text{e} \quad \operatorname{tag} D = \frac{Y}{X} \quad ,$$

onde facilmente se verifica que I corresponde ao ângulo entre a direcção do campo magnético do lugar e o plano horizontal e que D consiste no ângulo definido entre os meridianos magnético e geográfico que contêm o local. Daqui se depreende também que, medindo *in situ*, com o auxílio de equipamento apropriado, os valores de D e I , é possível conhecer o campo magnético em

qualquer ponto da superfície terrestre. Mais se infere que, dispondo de uma agulha magnética livremente suspensa pelo seu centro de gravidade, o seu eixo magnético tomará a direcção do campo magnético terrestre daquele local desde que a agulha se encontre fora da acção de outros ímanes ou de corpos geológicos muito ricos em magnetite. Limitando a movimentação da agulha magnética a um plano horizontal (como acontece com as bússolas vulgares), importará conhecer a declinação magnética de um local, pois só assim se poderão corrigir todas as medições efectuadas com a bússola nesse lugar (como adiante se explicitará). Tendo este cuidado, a localização de um ponto poderá ser determinada com exactidão com o auxílio da bússola, sendo esta o resultado da intersecção de dois rumos (miradas) medidos a partir do local relativamente a dois pontos previamente identificados na carta ou mapa. Passemos então à discussão sumária dos principais aspectos envolvidos na medição (planimetria e altimetria).

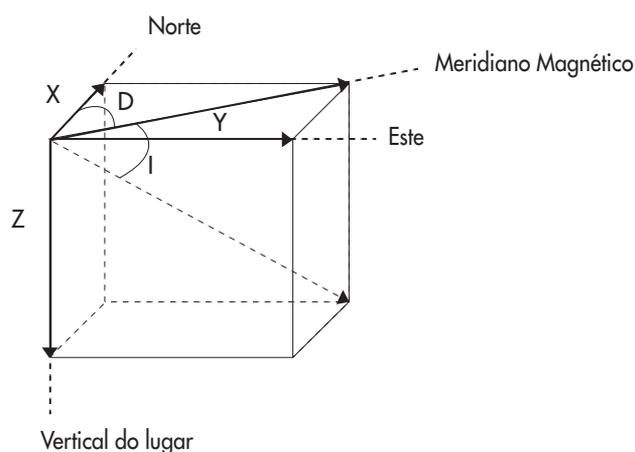


Figura 4 - Componentes do campo magnético num ponto da superfície terrestre

A elaboração de um mapa topográfico sobre o qual seja possível medir distâncias requer a triangulação do terreno, cujos princípios remontam à Antiguidade Clássica e podem facilmente constituir assunto de variadíssimos problemas a resolver no âmbito da geometria, posteriormente complementados por questões levantadas a propósito de outros assuntos tratados em diversas disciplinas (como adiante tentaremos demonstrar a propósito das cartas temáticas). Para efectuar uma triangulação apenas necessitamos de identificar no terreno dois pontos cujas coordenadas geográficas se encontram exactamente determinadas. Mede-se, subsequentemente, com grande precisão, a distância entre esses dois pontos, resultando uma linha que se toma como base. Os ângulos definidos pela linha de base e as direcções que contêm cada um dos pontos de partida e um terceiro ponto permitirão fixar este último (*i.e.* conhecer as suas coordenadas). Procedendo da mesma maneira com novos pontos, estabelece-se gradualmente uma rede de triângulos que, suficientemente detalhada, constituirá o esqueleto sobre o qual assentará a representação da morfologia externa da Terra. A medição precisa dos

ângulos requer a utilização de equipamento adequado (teodolito), se bem que, a nível elementar e para efeitos de aprendizagem dos princípios fundamentais subjacentes aos levantamentos topográficos, se possam conceber actividades práticas que envolvam o manuseamento de uma simples mesa portátil passível de nivelamento e equipada com uma alidade e pínula (à semelhança do meios usados nas antigas técnicas de agrimensura). Nestas circunstâncias, a medição de distâncias será efectuada com o auxílio de uma corda, substituindo o telémetro.

Definidas as coordenadas planimétricas de cada ponto, importa determinar as suas altitudes, recorrendo: 1) à triangulação em altura (aplicável uma vez conhecida a altitude dos extremos da linha de base); 2) à medição rigorosa e simultânea da pressão atmosférica nos vários pontos com um barómetro; ou 3) ao nivelamento da diferença de altura entre dois pontos com o auxílio de um instrumento estereométrico.

Na posse dos elementos planimétricos e altimétricos e uma vez seleccionado o tipo de projecção, proceder-se-á à representação gráfica dos diferentes elementos geométricos, optando por uma escala adequada aos objectivos do trabalho. A escala consiste simplesmente na relação numérica existente entre a distância que separa dois pontos inscritos no plano de projecção e a correspondente distância sobre o terreno - é, com efeito, a escala e, conseqüentemente, o detalhe com que se representa o real, que distingue os planos ($\geq 1:500$) dos mapas ($1:500 - 1:5000$) e, estes últimos das cartas ($\leq 1:10000$)¹. Mas se as relações de distância entre as coordenadas geográficas dos pontos projectados podem ser directamente determinadas sobre o plano, o mesmo não acontece com as relações altimétricas. Por isso mesmo, se traçam isolinhas de altitude (*i.e.*, linhas que unem pontos com igual altitude, conhecidas por curvas de nível), as quais expressam uma superfície contínua não exactamente coincidente com a morfologia real, mas que a retratam tanto mais fielmente quanto maior for o número de pontos da rede de triangulação e mais preciso for o método de interpolação usado. Resta incluir no suporte cartográfico a toponímia e as vias de comunicação, acrescentando-se uma boa figuração da hidrografia, do litoral e de todos os elementos pertinentes à utilização genérica do plano, da carta ou do mapa (linhas de alta tensão, poços, barragens, cobertura vegetal, limites de terrenos, etc.) recorrendo a símbolos convencionais. Obtêm-se assim os mapas ou as cartas topográficas, base de representação de qualquer variável ou característica adstrita a determinado fenómeno ou processo natural (e.g. cartas de vegetação, de solos, pluviográficas, hidrográficas, climáticas, litológicas, litogeoquímicas, magnéticas, gravimétricas) ou resultante da actividade antropogénica (cartas de uso do solo, demográficas, energéticas, político-administrativas, etc.).

A linguagem simbólica de um plano, mapa ou carta adquire particular importância quando, para além da planimetria e altimetria (esta última muitas vezes suprimida ou indicada de forma muito simplificada), se representa graficamente a distribuição de valores de uma determinada variável ou a extensão geográfica de uma certa

¹ A breve alusão que aqui se faz ao problema da escala exclui todos os documentos cartográficos que abrangem porções do globo com extensão angular considerável admitindo, portanto, variação significativa de escala de ponto para ponto.

característica impossível de avaliar numericamente. Falamos, obviamente, dos mapas/cartas temáticas, onde a grandeza ou a característica projectada revela significado especial quando referida a uma localização regional precisa.

Quando o valor numérico fundamenta a tipologia a inscrever na topografia, importa encontrar previamente os critérios de discriminação e subsequente marcação na carta, algo que exige a análise estatística do banco global de dados e a selecção do procedimento mais adequado à sua marcação (facilitando a leitura do documento cartográfico). A marcação de variáveis poderá, por exemplo, realizar-se sob a forma de classes, tendo em conta os valores centrais ou os resultantes do cálculo da média (simples, geométrica, ponderada ou harmónica), que passarão a representar uma determinada área do mapa ou da carta. Encontram-se posteriormente as "regras de marcação" e selecciona-se o modo de inscrição no plano, atribuindo cores e/ou tramas distintas a cada classe de valores ou fazendo uso de *degradé* da mesma cor (traduzindo a passagem contínua dos valores mais elevados aos mais baixos).

A marcação dos valores absolutos admitidos pela variável em cada ponto de amostragem envolverá, por seu turno, outro tipo de procedimentos. O mais vulgar consiste no traçado de linhas de isovalores (*i.e.* o lugar geométrico dos pontos nos quais a variável em causa assume o mesmo valor), existindo variadíssimos métodos para realizar a interpolação entre os pontos de amostragem (*e.g.* Davis, 1973; Godinho, 1984).

A marcação da extensão geográfica de uma certa característica impossível de avaliar numericamente deve fazer-se *in loco* e fundamentar-se em critérios objectivos, cujo enunciado implica necessariamente a observação, interpretação e registo directo sobre a base topográfica. Os documentos cartográficos assim obtidos têm carácter interpretativo e implicam a deslocação do observador ao terreno. Tal é o caso, por exemplo, da cartografia geológica em sentido estrito onde, em termos gerais, se procede à identificação das diferentes unidades litológicas aflorantes e à caracterização das relações (geométricas e cronológicas) estabelecidas entre estas (*e.g.* Ribeiro, 1984, Barnes, 1995).

Tendo em conta os objectivos da presente brochura, importa, por último, explicitar alguns comentários sobre a utilização da fotografia aérea.

Não é difícil perceber que as fotografias aéreas retratam de forma fidedigna a área por si abrangida, permitindo identificar com relativa simplicidade e bastante precisão os diferentes elementos geomorfológicos (facilitando, portanto, a orientação e localização), desde que estas tenham sido obtidas perpendicularmente à superfície terrestre, por forma a não introduzir distorções, algo que exige câmaras especiais e a garantia de se realizar um voo a altitude constante. Nestas circunstâncias e efectuando trajectos aéreos paralelos, é possível proceder à cobertura de uma região com fotografia sequencial automaticamente disparada, assegurando que cada fotografia cubra 30% de uma nova área e 60% da área previamente fotografada. Tal possibilita a reconstituição da imagem tridimensional do terreno fotografado com o auxílio de um estereoscópio (*e.g.* Serralheiro, 1984).

A realização de medições com base em fotografias aéreas não pode ser realizada de forma directa, uma vez que a projecção cónica cartográfica utilizada no documento fotográfico introduz distorções muito significativas, a mais importante das quais consiste na variação monotónica da escala a taxa crescente do centro para a periferia da fotografia. Importa, por isso, proceder previamente à triangulação aérea e à análise altimétrica, recorrendo aos meios técnicos adequados para o efeito, transformando as fotografias aéreas em ortofotomapas.

Em muitas circunstâncias, a fotografia aérea de uma região substitui com vantagem acrescida as cartas ou mapas disponíveis, por estes corresponderem a levantamentos relativamente antigos e/ou por compreenderem imprecisões significativas (em boa parte imputáveis a condições de terreno inóspitas e/ou inacessíveis que impedem a execução de uma triangulação detalhada e precisa). Existem, portanto, razões que justificam plenamente a utilização da fotografia aérea em qualquer percurso investigativo sobre uma determinada área da superfície terrestre (do mesmo modo que, em certos casos, se afigura pertinente a utilização de fotografias de satélite). Em termos de ensino a nível elementar, proceder ao exame estereoscópico de fotografia aérea corresponde adicionalmente à descoberta e subsequente análise da morfologia real da Terra, complementando de forma substancial o conjunto de informações previamente adquirido através do estudo das cartas e/ou mapas topográficos de uma determinada região. Esta mais valia cognitiva pode e deve ser consolidada, programando algumas aulas de campo onde, efectivamente, se poderão observar e caracterizar devidamente os elementos geomorfológicos identificados através do exame cruzado das cartas topográficas e fotografias aéreas. E, havendo a possibilidade de integrar nestas abordagens as informações resultantes da análise de cartas temáticas diversas (de natureza geológica, climática, pedológica, etc.), maior será certamente o proveito que se retira das incursões efectuadas.

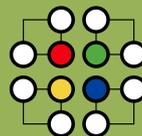
Referências bibliográficas

- Barnes J. (1995). *Basic Geological Mapping*. 3th edition. John Wiley & Sons Inc., New York, 133 pp.
- Davis J.C. (1973). *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons Inc., New York, 550 pp.
- Godinho M.M. (1984). Cartografia automática. *Geonovas*, 6: 83-84.
- Ribeiro A. (1984). Fundamento do método cartográfico em Geologia. *Geonovas*, 6: 85-90.
- Serralheiro A. (1984). O relevo em estereoscopia. *Geonovas*, 7: 3-8.

ENSINO EXPERIMENTAL DAS CIÊNCIAS

#4

Lisboa, Junho/2000



eec
ensino experimental
das
ciências

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
prodep
PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO ENSINHO PARA PORTUGAL

DCS
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
DEPARTAMENTO DO ENSINO SECUNDÁRIO

