

PERSPECTIVAS ACTUAIS E FUTURAS DO ENSINO DA CRISTALOGRAFIA

JORGE FIGUEIRAS

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

ANTÓNIO MATEUS

Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa

INTRODUÇÃO

Quais as razões porque a Cristalografia evoca tantas reacções negativas da parte de estudantes e docentes? Haverá maneira de torner as dificuldades que se apresentam no seu ensino? Serão essas dificuldades originadas por uma concepção errada ou antiquada do que se entende por Cristalografia? Justificar-se-á o seu ensino ao nível secundário? Eis algumas das questões que pretendemos abordar no presente trabalho.

Modernamente, a Cristalografia encerra um conjunto de metodologias próprias, orientado para o estudo dos vários aspectos da matéria cristalina, isto é, do estado sólido, tal como entendido no âmbito das ciências físicas e químicas. Trata-se de um ramo da Ciência que se encontra na encruzilhada de várias disciplinas fundamentais, e as suas aplicações, distribuídas por diferentes áreas do conhecimento científico e tecnológico (e.g. Física e Química do Estado Sólido, Mineralogia, Ciência e Engenharia dos Materiais e, recentemente, até Bioquímica), permitem um manuseamento muito abrangente de noções e conceitos fundamentais extraídos de todas elas. O seu ensino, quer ao nível secundário, quer, especialmente, ao nível universitário pode, portanto, potenciar uma formação científica fortemente interdisciplinar de elevada qualidade. Daqui decorre a importância científica e pedagógica da iniciação ao estudo da Cristalografia em níveis etários relativamente precoces e do seu subsequente aprofundamento durante o ensino universitário, sem com isso pretender necessariamente uma licenciatura em Cristalografia. Este

ponto de vista, deveras positivo, contrasta, contudo, fortemente com a realidade observada nas escolas, em todos os níveis de ensino, onde a Cristalografia é abordada. Porquê?

A Cristalografia é uma ciência com uma história algo invulgar. Originalmente, ela aparece associada às Ciências da Terra, não só porque alguns dos cientistas que inicialmente a desenvolveram eram mineralogistas, mas também, e principalmente, porque, até às primeiras décadas do século XX, os métodos da Cristalografia Morfológica eram dos mais poderosos (e também dos mais rigorosos) na identificação dos minerais. Com efeito, descobriu-se no século XVII que os cristais de uma dada espécie mineral, apesar de possuírem formas poliédricas muito diversas, apresentavam ângulos entre faces homólogas sempre iguais entre si e diferentes dos apresentados pelos cristais de qualquer outro mineral. A causa desta “constância dos ângulos” era desconhecida, mas a sua própria existência, conjugada com a posterior descoberta de que as razões entre as tangentes dos ângulos interfaciais dos cristais são razões entre números inteiros, fomentou várias especulações sobre a estrutura íntima dos cristais, de entre as quais se destacam o conceito de *molécula integrante* e a *Teoria Reticular* desenvolvidos, respectivamente em 1784 e 1850, por R. Haüy e por A. Bravais. Esta última veio resolver em boa parte as discrepâncias existentes entre as conceptualizações sobre a matéria desenvolvidas por Haüy e por Dalton, partindo de observações distintas. Todavia, só nos finais do século XIX, por via dos trabalhos desenvolvidos independentemente por Fedorov e Schoenflies, surge a for-

malização matemática da simetria interna (rotacional) do arranjo espacial implícito na Teoria Reticular, se bem que ainda sem qualquer suporte experimental. Este último surge apenas no limiar do século XX, com a comprovação de que os cristais podem actuar como redes de difracção da radiação-X (Friedrich et al., 1912). Desta forma, um conjunto de concepções desprovido de base experimental, desenvolvido no âmbito da Mineralogia, evoluiu progressivamente para uma ciência exacta e experimental, plenamente formalizada do ponto de vista matemático. Acentuou-se assim a dicotomia já anteriormente existente entre a Cristalografia Morfológica empírica e a Cristalografia Estrutural que, a partir desta época se vai autonomizar fortemente das suas raízes mineralógicas. Os mineralogistas, contudo, continuaram até cerca de 1970 a privilegiar a Cristalografia Morfológica, por ser ela a que possibilitava a resolução dos problemas do seu dia-a-dia.

Só o advento das modernas técnicas de análise e caracterização (*e.g.* difracção de neutrões, métodos espectroscópicos, métodos micro-analíticos e difracção de electrões, para além da já mencionada difracção de Raios-X), de mais fácil utilização ou com um âmbito de aplicação mais vasto do que as da Cristalografia Morfológica, viria a tornar esta última totalmente obsoleta para fins de identificação rigorosa de minerais e, portanto, inútil para a esmagadora maioria dos profissionais das Geociências. A prova pode ser obtida comparando edições sucessivamente mais recentes de manuais de Mineralogia, com tratamentos cada vez mais simplificados da Cristalografia Morfológica, e, mais significativamente, comparando sucessivos manuais de Cristalografia, muitos dos quais abandonaram totalmente, ou reduziram à sua expressão mais simples, a Cristalografia Morfológica. Nestas circunstâncias, é compreensível que se tenha desenvolvido uma tendência nítida para o abandono gradual (por vezes, já total) do ensino da Cristalografia nas licenciaturas de carácter geral em Ciências da Terra. Mas será que tal tendência é irreversível e desejável?

A sensação de *démodé* que perpassa a generalidade dos textos de Cristalografia destinados a geocientistas contrasta fortemente com o dinamismo que esses mesmos textos adquirem quando tratados no âmbito da Física ou da Química. Nestes últimos, a Cristalografia afirma-se como um conjunto inestimável de metodologias de análise expressando-se em domínios muito variados, incluindo a própria Mecânica Quântica que, quando aplicada a sistemas moleculares de muitas partículas, faz extenso uso de conceitos de simetria desenvolvidos inicialmente sobretudo no âmbito da Cristalografia (*e.g.* Cotton, 1971; Vainshtein, 1981, 1982; Putnis, 1992). É, contudo, possível (e em nossa opinião, recomendável) revitalizar os ensinamentos cristalográficos no domínio das Geociências, renovando o seu conteúdo nos termos preconizados pela Cristalografia Moderna, pois só assim se consegue entender cabalmente as propriedades dos minerais (e consequentemente das

rochas) numa perspectiva abrangente, imprescindível à compreensão dos processos naturais (*e.g.* petrogenéticos e reológicos) intimamente associados à dinâmica do Planeta em que habitamos. Nesta linha de raciocínio, e sabendo que os minerais são substâncias cristalinas por excelência (a perfeição das suas estruturas é frequentemente muito superior à dos materiais sintéticos), faz todo o sentido preservar os elos de ligação entre a Cristalografia e a Mineralogia e, assim, manter adstritos às Geociências os cursos introdutórios à primeira. Importa, no entanto, colocar em prática (no ensino, em particular), as reestruturações de conteúdo e de metodologia que ultimamente têm marcado os percursos da Cristalografia e da Mineralogia, perfeitamente integrados no moderno quadro que, desde os anos 80, se tem vindo a esboçar para as Geociências (Frodeman, 1998).

O ENSINO UNIVERSITÁRIO DA CRISTALOGRAFIA

QUADRO ACTUAL E ENUMERAÇÃO DOS PRINCIPAIS PROBLEMAS

O ensino da Cristalografia no âmbito das licenciaturas em Geologia ministradas pelas universidades portuguesas, à semelhança do que acontece em muitos outros países, parece encontrar-se actualmente no limiar de uma fase crítica. O ensino existente em muitas universidades tem muito de residual, visto que, no fundo, segue programas que resultam historicamente de aligeiramentos sucessivos dos programas outrora leccionados. Estes últimos retracavam o próprio percurso histórico da Cristalografia, introduzindo os formalismos matemáticos da Cristalografia Morfológica sem recurso à realidade física de que derivam. Esta abordagem torna a assimilação das matérias difícil e árdua e só aparece justificada aos olhos dos alunos se se verificarem duas condições: 1) o formalismo transmitido é imprescindível para o exercício da ciência geral objecto da licenciatura e 2) a realidade física subjacente é desconhecida. Actualmente, nenhuma destas duas condições se verifica, e isto tem originado uma resistência muito forte, curiosamente partilhada por docentes e discentes, à manutenção da Cristalografia nos currículos das licenciaturas. Daí assistir-se ao aligeiramento já referido, que, em alguns casos, prosseguiu até à extinção. Aliás, esta extinção não é ainda geral apenas porque a leitura inteligente e informada de qualquer manual de Mineralogia conceituado ainda exige (algumas) noções de Cristalografia que ultrapassam o trivial.

O que acaba de ser afirmado pode ser bem ilustrado tomando o exemplo de um manual de Mineralogia muito divulgado, a última edição do Manual of Mineralogy (after J. D. Dana). Muitas das informações fulcrais que esse manual insere sobre cada espécie mineral assumem forma simbólica e só se tornam inteligíveis e utilizáveis se o leitor

dominar activamente noções como simetria pontual, forma cristalina, índices de Miller e Miller-Bravais e modos de Bravais. Este domínio não se limita ao mero conhecimento de que estas noções existem, nem sequer é suficiente possuir-se um conhecimento exaustivo das nomenclaturas utilizadas ou das numerosas variantes que a manifestação de algumas dessas noções nos minerais pode assumir. O que é necessário é que o leitor seja capaz de reconstituir, a partir dos símbolos apresentados, detalhes tais como número de superfícies de clivagem e respectivos ângulos, tipos de hábito dominantes, tipos de anisotropia presentes e assim por diante. Isto só se consegue se o leitor dispuser de um conhecimento muito sólido de simetria, de resposta simétrica das características dos minerais e se conhecer bem as relações entre a simbologia de Hermann-Mauguin e a simetria. A inabilidade de manipular estes conceitos ao nível requerido torna inútil a informação mais relevante contida no manual, como se constata frequentemente nas aulas práticas dos primeiros anos de licenciatura, em que o aluno, convidado a determinar aproximadamente a identidade de um mineral é incapaz de o fazer por não poder descodificar a descrição contida no manual.

Poderemos então dizer que a organização de qualquer curso introdutório à Cristalografia deverá necessariamente conduzir à verdadeira compreensão do conjunto de conceitos acima explicitados. E é aqui que os problemas começam a surgir, pois não basta engrenar alguns princípios de cálculo e/ou de geometria e proceder à sua aplicação mecanizada; é fundamental que do ensino/aprendizagem dos conceitos-base resulte um adequado domínio racional dos mesmos. Por outras palavras: as dificuldades sentidas por muitos alunos no âmbito da geometria e/ou da trigonometria (por carência de formação de base) poderão, após algumas sessões de trabalho, ser completamente ultrapassadas. Mas, mesmo munidos destas “ferramentas”, o domínio real da Cristalografia Morfológica e dos fundamentos elementares de Cristalografia Estrutural que lhe servem de base, não são devidamente apreendidos e, conseqüentemente, racionalmente utilizados. Porquê?

Pensamos que tal se deve ao facto daqueles fundamentos representarem uma forma especial de geometria, que, apesar de simples, não é normalmente encontrada fora do contexto cristalográfico. A sua especificidade reside fundamentalmente no facto de ela se desenvolver num espaço caracterizado por repetição periódica tridimensional e por, conseqüentemente, requerer do estudante um constante esforço de abstracção e visualização tridimensional, para não perder o *modelo de referência* necessário à contextualização dos seus raciocínios e/ou observações.

Tempos houve no decorrer da nossa experiência de docência, em que se atribuiu a relutância manifestada pelos estudantes em aprender Cristalografia ao facto dos mesmos apresentarem certas carências de formação (particularmente ao nível da geometria descritiva), ou de não entenderem

cabalmente as perspectivas globais em que esta disciplina se inseria, perpetuando uma imagem negativa da Cristalografia e, por consequência, a esmagadora sensação da mesma fornecer apenas conceitos sem grande utilidade prática. A transmissão clara aos estudantes das interações entre a Cristalografia e os diversos ramos da Ciência, com especial ênfase nos que constituirão a sua formação específica (salientando ainda a importância científica e tecnológica actual da determinação de estruturas cristalinas por métodos difractométricos de vários tipos, da espectroscopia, com a teoria do campo cristalino e as suas equivalentes posteriores - de que se destacam as teorias do campo de ligandos e das orbitais moleculares -, do estudo das anisotropias, da ciência dos materiais, com a previsão de propriedades físicas - incluindo as eléctricas e magnéticas - e químicas a partir da estrutura molecular e/ou electrónica dos compostos sólidos), apesar de inicialmente motivar muitos estudantes, revela-se ainda assim insuficiente. Temos hoje, porém, fortes razões para acreditar que as justificações referidas, não explicam a essência da resistência oferecida pela maioria dos estudantes ao estudo da Cristalografia, embora possam justificar algumas das aversões individualmente identificadas. Efectivamente, as dificuldades subsistem essencialmente porque o tipo de abstracção que o estudo da Cristalografia exige é substancialmente diferente do exigido pela generalidade das Ciências da Terra, sobretudo da Geologia propriamente dita.

A Geologia é uma ciência cujo objecto é constituído por aquilo a que Per Bak (1996) designa por sistema crítico. Nesta obra, Per Bak chama a atenção para o facto de o estudo dos sistemas críticos poder ser abordado de duas maneiras diferentes: ou estudando a sua criticalidade (no âmbito das Geociências, esses estudos recorrem frequentemente aos fractais e aos sistemas dinâmicos não lineares que descrevem certas propriedades e aspectos da criticalidade) ou analisando os seus eventos, isto é, investigando e descrevendo sob uma perspectiva histórica os acontecimentos (em si imprevisíveis a priori) que ocorreram durante a evolução do sistema e o modo como estes condicionaram os seus sucessivos estados. Per Bak afirma com grande ênfase que todo o Universo (incluindo os seus aspectos relacionados com a psicologia e a sociologia humanas) parece constituir um mega-sistema crítico. Isto significa que a mente humana está sintonizada para a compreensão e percepção das realidades contingentes dos sistemas críticos e não tem, portanto, qualquer dificuldade em assimilar o modelo da natureza proposto pelas Geociências (muito particularmente pela Geologia propriamente dita) pois, embora não seja redutível à nossa experiência quotidiana, esse modelo evoca uma realidade que, no fundo, pouco mais é que uma variante dessa experiência. Em contraste, a Cristalografia é uma ciência exacta e, portanto, não se ocupa directamente do estudo do sistema crítico constituído pelo mundo físico.

As ciências exactas caracterizam-se por se debruçarem sobre aspectos particulares desse mundo físico que têm a propriedade de se manifestarem ou de modo mais ou menos constante, ou sob a forma de relações entre fenómenos ou características de fenómenos que, dentro do seu tipo, revelam igualmente uma constância assinalável. O isolamento desses aspectos, ou dessas relações, conduz rapidamente à construção de modelos representativos que se caracterizam por: 1) terem um elevado grau de abstracção e de idealização; 2) serem susceptíveis de expressão em linguagem matemática rigorosa, sem por isso se confundirem com os objectos matemáticos propriamente ditos; 3) serem intemporais, no sentido de (geralmente) não conseguirem prever o comportamento dinâmico dos sistemas reais a que o modelo se aplica; 4) não serem contingentes, isto é, apresentarem-se totalmente destituídos da possibilidade de incluir eventos que possam modificar a descrição constituída pelo modelo; e 5) apresentarem muitas vezes um nível de formalismo e de elegância formal muito elevados que não raro provocam reacções de carácter estético na mente de quem toma contacto com eles. O problema é que esses modelos têm uma estrutura diferente das nossas concepções mentais usuais e só são *visíveis* se a mente de quem os estuda ou investiga os reconstituir integralmente no mundo de abstracção onde eles têm verdadeira existência. É assim inútil tentar aprender Cristalografia memorizando noções e aplicando mecanicamente conceitos, pois o modelo permanece invisível e a Cristalografia apresenta-se então sob o seu aspecto odioso de proposições ininteligíveis sobre realidades cujas características se ignoram. É igualmente inútil assistir com muita atenção a todas as aulas na esperança de que “se faça luz”, pois dessa atitude passiva não resulta uma (re)construção mental do modelo própria do aluno. Mas se o estudante for devidamente encaminhado no sentido de se elevar ao nível de abstracção necessário à percepção do modelo (ou, pelo menos, de alguns dos seus aspectos), a Cristalografia transforma-se subitamente num edifício lógico muito simples e o seu estudo na mera observação dos contornos e das características de um objecto claramente visível. Mais: grande parte dos conceitos que vão sendo transmitidos podem mesmo ser sentidos como conhecidos, porque são consequências necessárias (dir-se-ia, características visíveis mas ainda não descritas nas aulas, de um objecto cuja contemplação mental é clara) daquilo que já se sabe anteriormente.

Do exposto se depreende que uma boa parte do sucesso do ensino moderno da Cristalografia depende fundamentalmente do modo como se introduzem e trabalham os conceitos-base requeridos por uma satisfatória construção e compreensão do modelo abstrato de referência. O ritmo de aprendizagem será tanto mais elevado, quanto mais robusto for o esqueleto do modelo gradualmente concebido pelo aluno; a subsequente aquisição de novas

noções, racionalmente integradas no fio condutor do raciocínio previamente desenvolvido, consolidarão em definitivo o modelo tridimensional pretendido. Tal metodologia de ensino, implica necessariamente o abandono da perspectiva histórica habitualmente utilizada na leccionação da Cristalografia (em que o formalismo matemático é apresentado sem considerar a realidade física de que decorre), e a sua substituição por uma abordagem, bastante mais atraente, que parte da realidade da matéria cristalina e de onde se retiram lógico-dedutivamente os princípios cristalográficos fundamentais. Disso tentaremos dar conta em seguida.

UMA PROPOSTA DE LECCIONAÇÃO

A experiência docente universitária por nós adquirida na última década revela que a aprendizagem dos conceitos-base da Cristalografia se processa, por norma, em três fases distintas ao longo de um semestre lectivo. Durante a primeira, relativamente longa (cerca de 1 mês), os alunos debatem-se, geralmente, com grandes dificuldades e necessitam de um acompanhamento muito cuidado; apesar de se mostrarem receptivos a certos conceitos abstratos como, por exemplo, a ordem triperiódica do arranjo das partículas constituintes da matéria cristalina, apercebem-se realmente da sua dificuldade em lidar com noções básicas de geometria e de trigonometria, mostrando-se, com alguma frequência, apreensivos quanto à conceptualização espacial dos arranjos simétricos e, conseqüentemente, das leis matemáticas que os regem. A segunda fase de aprendizagem, por norma bastante curta (não mais de 2 semanas), afigura-se determinante ao sucesso da disciplina, porquanto é nesta altura que o aluno deverá, com esforço ao seu alcance, construir mentalmente o modelo abstracto pretendido (ou, pelo menos, a sua estrutura-base). A passagem à terceira fase de aprendizagem é geralmente ditada pelo sucesso atingido na fase precedente, e nela todos os conceitos são compreendidos e trabalhados de forma perfeitamente vulgar; por outras palavras, a Cristalografia passa a ser apenas uma disciplina igual às demais.

Assim, embora do ponto de vista do aluno a fase crítica seja a segunda, visto que é nela que reside o sucesso ou insucesso final, do ponto de vista do docente é a primeira que se afigura crítica, pois é nela que tem de ser dada ao aluno a orientação julgada conveniente para ele ingressar na segunda fase e ultrapassá-la. Esse acompanhamento pode ser feito, dir-se-ia, *tem* de ser feito, de duas maneiras. Primeiro, demonstrando que o docente vê o modelo e se apercebe perfeitamente da sua simplicidade e beleza. Isto torna evidente ao aluno que o que se lhe pede não é a memorização de matérias áridas e ininteligíveis cuja compreensão só estaria ao alcance de estudantes com capacidades excepcionais, evitando-lhe estados de desânimo contraproducentes para o sucesso pretendido. Segundo,

construindo cuidadosamente o corpo de conhecimentos que pretende transmitir ao aluno. Isto tem consequências muito significativas na selecção das matérias a ensinar e respectiva ordenação.

Pretendendo uma leccionação assente na realidade física, o ponto de partida é, necessariamente, a matéria cristalina, pelo que se deverão estabelecer claramente as características estruturais das fases condensadas da matéria, mostrando a especificidade da matéria cristalina. Assim, o primeiro conceito a introduzir tem de ser a ordem nas suas vertentes direccionais e posicional, normalmente designada por ordem a grande distância. Poder-se-ia, eventualmente, argumentar que a característica distintiva mais facilmente visível dos cristais é a presença de faces planas naturais, mas, no universo da matéria cristalina, a presença de cristais poliédricos deve ser encarada como uma anomalia que decorre da conjugação de circunstâncias muito especiais favoráveis ao seu desenvolvimento; e isto pode, e deve, ser referido no decurso destas aulas introdutórias, tendo como objectivo final a racionalização da noção de cristal. Além disso, as propriedades muito particulares desses poliedros (de que se destacam a presença de zonas, isto é de conjuntos de faces paralelas a uma direcção comum, e restrições muito sérias às simetrias que podem adoptar) não podem ser explicadas nem a partir de si mesmas, nem a partir de qualquer conceito físico ou químico de carácter geral (como a história da Cristalografia, acima esboçada, demonstra amplamente). O seu estudo numa fase inicial de qualquer curso de Cristalografia obriga consequentemente à introdução gratuita de conceitos aparentemente absurdos, de que exemplos gritantes são o de sistema cristalográfico e face unitária, cuja necessidade escapa à generalidade dos alunos e cuja utilidade parece ser unicamente possibilitar a construção de um formalismo ele próprio de necessidade algo duvidosa.

Inversamente, conceitos como translação, simetria translacional, rede, motivo simétrico e malha unitária, nascem naturalmente como consequência lógica, evidente e simples da ordem a grande distância. Não cabe no âmbito deste texto ensinar Cristalografia, mas não é difícil constatar que todos os conceitos acabados de enumerar são, na realidade, apenas aspectos elementares da ordenação a grande distância, que podem ser apresentados com sucesso no espaço de uma ou duas aulas, a alunos cuja formação em Cristalografia seja nula. Elaborando um pouco mais estas noções, é relativamente fácil conduzir os alunos ao conceito de coordenadas racionais e assim, à naturalidade da adopção em Cristalografia de sistemas de referência aparentemente surpreendentes pela sua complexidade. Estes sistemas de referência, os tais *sistemas cristalográficos*, utilizam como eixos as direcções de translação da rede e como unidades de medida os comprimentos das arestas da malha unitária e são naturais porque são os únicos que permitem relacionar por números racionais (na realidade,

por números inteiros) as coordenadas de pontos (átomos) equivalentes por translação. Reparar-se-á que a questão de saber *quantos* sistemas cristalográficos existem (crucial quando a sua existência é postulada *a priori*) não tem qualquer sentido neste encadeamento das coisas e é, portanto, uma falsa questão: o sistema cristalográfico é, muito simplesmente, ditado pela forma da malha unitária.

Nesta fase, a racionalidade decorrente da adopção do sistema cristalográfico ditado pela malha unitária, dá origem a um sub-produto, que é uma facilitação extrema do método paramétrico de indicar orientações de rectas e planos no espaço. A utilização do sistema cristalográfico não só torna os parâmetros números racionais (sempre transformáveis em números inteiros por multiplicação por um factor adequado), como possibilita que esses parâmetros sejam determinados visualmente sem necessidade de qualquer cálculo: dada uma recta que contenha a origem (supondo esta coincidente com um nó da rede), os parâmetros da recta não são mais do que as coordenadas do primeiro nó depois da origem que a recta encontra; dado um plano e seus equivalentes por translação, os parâmetros do plano são o número de troços em que a respectiva família gerada por translação corta cada uma das arestas da malha unitária. Este modo de apresentar os índices de Miller, pois é deles que se trata, não é comparável ao que se é obrigado a utilizar quando não se invocam noções estruturais na sua derivação: 1) postulação de um sistema de eixos cristalográficos mais ou menos *ad hoc*; 2) postulação de uma face unitária que tanto pode ser a efectivamente escolhida como outra qualquer; 3) derivação a partir dela de uma relação axial (!) que complete o sistema cristalográfico; 4) determinação das distâncias à origem dos pontos de intersecção da face cujos índices se querem determinar com os três eixos cristalográficos; 5) sua divisão por essas mesmas distâncias, mas relativas à tal face unitária; 6) inversão dos números obtidos; e 7) multiplicação pelo factor necessário para tornar o resultado números inteiros...! É realmente surpreendente como houve no passado estudantes capazes de aprender tais métodos de indexação.

Estabelecidos os conceitos decorrentes da geometria da repetição, o estudo da Cristalografia pode prosseguir concentrando a atenção no conteúdo material da malha unitária, isto é, no motivo simétrico. O primeiro objectivo será concluir pela existência de uma determinada simetria interna no motivo simétrico, o que pode ser feito por observação e estudo de padrões periódicos planos, figurativos ou não. O aluno aprende a reconhecer a existência de linhas de reflexão e de pontos de rotação no interior dos padrões e também a estabelecer as translações que descrevem a repetição, com a consequente determinação da malha unitária e do motivo simétrico. De todas estas observações conclui-se que a localização dos operadores rotacionais no seio do padrão está intimamente relacionada com a direcção e a magnitude das translações, conclusão

que pode ser tornada muito evidente se se usarem como exemplos padrões com simetrias rotacionais idênticas, mas diferentes modos de Bravais. A explicação desta dependência conduz à introdução de dois conceitos de importância capital em Cristalografia: a noção de *multiplicação de operações de simetria* e a noção de *grupo espacial*. A assimilação destas noções reveste-se de alguma complexidade e o docente deverá conduzir os alunos com reexames sucessivos destes conceitos sob pontos de vista e aspectos diferentes, de modo a consolidá-los definitivamente na mente dos estudantes.

Conseguida essa assimilação, será natural para o aluno que a ligação entre as translações e as rotações pela multiplicação sobre a qual assenta o grupo espacial, faça com que apenas seja possível um número muito restrito de malhas unitárias simetricamente distintas e, portanto, que não haja um número infinito de sistemas cristalográficos. Na realidade, como também é evidente que o número de simetrias rotacionais é igualmente muito restringido pela presença das translações, consegue mesmo fazer-se uma enumeração dos sistemas que seriam possíveis em “cristais bidimensionais” e dos modos de Bravais admissíveis por cada um deles. Note-se que a necessidade destes últimos só surge por se demonstrar a vantagem em usar um referencial cujos eixos sigam as direcções dos operadores de simetria, o que é fácil comparando as transformações elementares de coordenadas obtidas com ambos os tipos de referenciais. A passagem aos cristais tridimensionais reais faz-se por simples extensão à terceira dimensão, visto que uma rede tridimensional se obtém de uma rede plana por junção de uma terceira translação principal (não coplanar com as já existentes) ao grupo de translações bidimensional. Se se impuser a condição lógica de que a repetição da estrutura motivada pela terceira translação preserve a continuidade dos operadores de simetria previamente existentes, um simples exame das próprias redes bidimensionais permite enumerar imediatamente não só os sistemas cristalográficos existentes (com excepção do cúbico), como também os respectivos modos de Bravais. Consegue-se deste modo construir logicamente a partir de um número mínimo de conceitos concretos e claramente inteligíveis (a simetria translacional e a simetria rotacional do motivo simétrico) a generalidade do corpo de conhecimentos normalmente ministrada em cursos elementares de Cristalografia Morfológica.

Os conceitos tradicionalmente leccionados e ainda não referidos são os de grupo pontual e forma cristalográfica. Ambos podem ser introduzidos neste momento sem provocar quebras lógicas no corpo de conhecimentos já construído. A partir do tratamento já feito dos grupos espaciais, o aluno já se encontra familiarizado com a noção de que as translações restringem fortemente as rotações admissíveis, não só na amplitude dos ângulos de rotação, como também na direcção dos seus eixos. A noção de grupo

pontual pode, pois, ser introduzida chamando a atenção para o facto de que nenhum corpo isolado pode ser simétrico em relação a uma translação ou a qualquer operação que possua elementos translacionais, mas que a presença de simetria no interior de cada motivo simétrico e a respectiva constância de orientação implicam que o edifício cristalino, quando tomado como um corpo independente, seja necessariamente anisótropo; a anisotropia daqui resultante terá uma simetria puramente rotacional “herdada” da simetria do motivo simétrico, como pode facilmente ser visualizado em qualquer padrão periódico. A compreensão desta ideia é simultaneamente a compreensão de um outro conceito relativamente abstracto: o das *relações de isogonalidade entre grupos espaciais e grupos pontuais*.

Chegado a este ponto, o estudante quase não necessita de orientação para compreender o conceito de forma cristalográfica: se as propriedades do cristal são tais que se forma naturalmente uma face plana, é óbvio que se formarão igualmente todas as restantes faces em posições simétricas da primeira e que as propriedades medidas em cada uma delas serão rigorosamente idênticas. O estudante encontra-se assim amadurecido para ver a simetria, não como uma simetria geométrica da forma poliédrica exterior, mas como uma expressão macroscópica nas propriedades físicas e químicas do cristal do arranjo estrutural do motivo simétrico. Mas o desenvolvimento destas novas ideias encontra-se já na fronteira de um curso avançado de Cristalografia.

Numa época em que a Cristalografia Morfológica perdeu toda a sua utilidade na identificação de minerais ou de outras substâncias cristalinas, é questionável o valor de fazer os alunos aprender listagens quer de grupos pontuais, quer das respectivas formas. A abordagem que temos vindo a delinear não inclui qualquer catálogo deste tipo, mas dá (pelo menos potencialmente) ao estudante todas as ferramentas de que necessita para deduzir de princípios fundamentais todos os 32 grupos pontuais, e, com bastante esforço e muitíssima perseverança, também todas as formas cristalinas possíveis. No entanto, caso seja considerado imprescindível o conhecimento de todas as formas, é fundamental que a abordagem “catalogar” não seja utilizada. No fim do curso, o aluno está muito sensibilizado para as consequências da presença da simetria e essa sensibilidade pode ser usada para lhe indicar um método de derivar rapidamente todas as formas de todas as classes de simetria. O ponto de partida serão os símbolos de Hermann-Mauguin, que devem ser lidos, não como uma enumeração, segundo regras mais ou menos fixas, dos operadores de simetria presentes, mas como a expressão simbólica (e simétrica) das multiplicações de operações de rotação existentes em cada grupo pontual. O aluno apercebe-se assim de que os símbolos descrevem a simetria de três direcções (por vezes uma, raramente duas) de simetria não equivalentes entre si e de que há um número finito de

atitudes que uma face pode tomar em relação a essas direcções (no caso geral, 7) que lhe conferem um comportamento distinto em relação à globalidade da simetria. Isso limita a 7 o número de formas de cada classe e, como essas formas se distinguem umas das outras pela identidade das direcções de simetria a que as respectivas faces são paralelas, o exercício não apresenta qualquer dificuldade, nem exige qualquer memorização gratuita.

ALGUMAS REFLEXÕES (PREOCUPAÇÕES!) SOBRE O ENSINO DA CRISTALOGRAFIA NO ENSINO SECUNDÁRIO

Em Portugal, bem como em muitos outros países, a iniciação ao estudo da Cristalografia é feita, ao nível do ensino secundário, exclusivamente no âmbito das Ciências da Terra (11º e 12º ano de escolaridade). Defendemos no corpo introdutório do presente texto que o binómio Cristalografia-Mineralogia deveria ser mantido nos cursos introdutórios de Cristalografia, pelo que, em nossa opinião, a leccionação dos fundamentos cristalográficos aos níveis de ensino secundário deverá permanecer adstrita à disciplina de Ciências da Terra e da Vida. O grau de abstracção requerido pela conceptualização do modelo que explicitámos anteriormente, impõe, contudo, que os conceitos-base sejam ministrados segundo um fio condutor preciso apenas a uma audiência de nível etário acima dos 15-16 anos. O posicionamento dos assuntos a versar no currículo em vigor para o 11º de escolaridade na disciplina de *Ciências da Terra e da Vida* (unidade *Materiais Constituintes da Terra – Minerais e Rochas*) afigura-se, assim, correcto. O mesmo não se poderá dizer, infelizmente, das listagens oficiais de *Conteúdos*, *Objectivos*, e de *Termos/Conceitos* dessa unidade, porquanto estas carecem de enquadramento lógico e/ou de fundamentos científicos, problemas que, não raras vezes, conduzem a *Sugestões de Actividades* desadequadas (face aos objectivos enunciados) e/ou inconsequentes e/ou mesmo irrealizáveis em qualquer sala de aula. Em última instância, toda esta problemática se reflecte em manuais de apoio mal concebidos, veiculando uma perspectiva errada da Cristalografia (e Mineralogia) que, em muitos aspectos, nem sequer respeita o ensino tradicional desta, com todas as consequências que daqui advêm. Vejamos, ainda que de modo sucinto, alguns exemplos paradigmáticos associados apenas ao primeiro tópico da unidade *Materiais Constituintes da Terra – Minerais e Rochas*, denominado *Estrutura Interna dos Minerais*, seguindo de perto o programa actualmente em vigor para o 11º ano de escolaridade das Ciências da Terra e da Vida.

A sequência apresentada para os *Termos/Conceitos* a leccionar inclui duas noções de extrema importância: a de *mineral* e de *crystal*. Mas estas, em vez de aparecerem como corolário lógico duma série de conceitos, são impostas a

priori sob a forma de definições desligadas do contexto que subsequentemente se pretende apresentar e que as devia preceder. Falamos, obviamente, do conjunto das características intrínsecas à matéria cristalina, que deveriam ser equacionadas tão somente após se descrever de forma clara o esqueleto do modelo físico já mencionado no presente texto, de cuja compreensão decorreria ainda, de forma imediata, vários dos *Termos/Conceitos* listados (motivo, nó, malha, rede, fiada e plano reticular) com vantagens pedagógicas e científicas acrescidas. Nesta perspectiva, seriam também evitadas as confusões, vulgarmente encontradas nos programas e livros de texto do ensino secundário, entre os fundamentos da Cristalografia Estrutural e os conceitos geométricos implícitos na Cristalografia Morfológica. E as noções básicas de geometria fundamentalmente associadas à orientação espacial de planos e sua referenciação poderiam ser correcta e gradualmente introduzidas, tornando lógico-dedutivas (sem necessidade de enunciado formal) as “leis” clássicas de Steno (posteriormente generalizada por Romeu d’Isle em 1772, como *Lei da Constância dos Ângulos*) e de Haiiy (1784), conhecida por *Lei da Racionalidade dos Índices*, bem como os conceitos de *sistema cristalográfico* e de *forma cristalográfica*.

A inexistência de um espaço, ainda que reduzido, no programa escolar consagrado à aprendizagem dos *conceitos elementares de simetria* (em particular dos que se prendem com as translações, quando se abordam os fundamentos da Cristalografia Estrutural, e as operações de simetria admitidas por corpos isolados, quando se introduzem as bases da Cristalografia Morfológica), é por nós tido como uma omissão de crucial importância, pois impede a racionalização da maioria dos conceitos abordados, prejudicando de forma ímpar a aprendizagem propriamente dita. Como se tal não fosse suficiente, acrescem aos efeitos negativos que daqui resultam os que são induzidos pela utilização de muitos dos manuais de texto disponíveis no mercado.

Com efeito, em vez de prestar o devido apoio ao leitor (aluno e docente), fornecendo a título complementar os elementos de trabalho indispensáveis à boa compreensão dos conceitos, a maioria dos manuais privilegia a profusão de quadros e/ou de figuras ilustrativas de conceitos não introduzidos no texto, chegando a propor exercícios de auto-avaliação sobre assuntos nunca afluídos ou deficientemente abordados. São assim bastante frequentes os quadros (decorativos, já que invariavelmente se apresentam graciosamente coloridos!) em que, por exemplo: 1) se listam os 14 modos de Bravais, sem que haja o mínimo cuidado de referir no texto adjunto o seu verdadeiro significado; 2) se apresentam os sete sistemas cristalográficos (porque não apenas seis, perguntará qualquer leitor atento!); 3) se listam classes de simetria, como se fosse óbvia a nomenclatura utilizada; 4) figuram

algumas formas cristalográficas simples que, em certos casos, como que por artes mágicas, se fazem acompanhar por diagramas de projecção estereográfica; ou, ainda mais grave, 4) se ilustram alguns dos 10 grupos espaciais planos de simetria. Após tudo isto só pode reinar a confusão e a conseqüente relutância em aprender (de que forma?) Cristalografia.

As observações até agora efectuadas, centradas nos *Termos/Conceitos* organizados no item *Estrutura Interna dos Minerais* e nos manuais publicados, encontram também eco nas *Sugestões de Actividades* sugeridas no plano programático. Vejamos apenas três exemplos, seleccionados por razões distintas: 1) “*Observação de radiogramas e esquemas que sirvam de base à apresentação da lei de Bravais*” – qual o fundamento científico de tal actividade? Qual a pertinência de falar em radiogramas (de que tipo?) sem a prévia demonstração de que todos os cristais são redes de difracção de Raios-X? E terão os alunos neste nível de escolaridade os conhecimentos necessários sobre a radiação-X e a percepção do fenómeno da difracção? Os modos de Bravais podem, efectivamente, ser deduzidos a partir de radiogramas, mas para isso é necessário indexá-los e possuir conhecimentos sobre extinções sistemáticas, procedimentos e conceitos que não estão ao alcance dos estudantes daquele nível etário. Quais os esquemas a utilizar? Na maioria dos manuais escolares editados só aparecem ilustrações relativas ao empilhamento regular das “moléculas integrantes” segundo a histórica concepção de Haüy! É, portanto, impossível fazer qualquer comentário construtivo à actividade proposta. 2) “*Através da observação de figuras de corrosão em faces de cristais, por exemplo, de apatite e calcite e estrias em faces de cristais de pirite ... relacionar estes aspectos com diferentes arranjos estruturais*” – trata-se de uma actividade que não tem qualquer fundamento científico, porquanto com base na estriação e/ou figuras de corrosão em faces de cristais apenas se conseguem deduzir *alguns* dos aspectos da *simetria externa* do próprio cristal. E, mesmo assim, se não se processa à leccionação dos conceitos elementares de simetria (não imposta pelos conteúdos do programa e, portanto, não obrigatória), qual a razão de ser desta actividade? 3) “*Medir os ângulos diedros de faces correspondentes em cristais da mesma espécie mineral (com diferentes tamanhos e em formas proporcionadas e distorcidas) para concluir da sua constância*” – aqui o problema centra-se fundamentalmente na inexistência de vantagens objectivas na execução da actividade proposta (que concorram verdadeiramente para uma aprendizagem eficaz do conceito em causa), e na sua inexequibilidade prática, já que obriga à aquisição por parte de todas as escolas do ensino secundário de uma excelente colecção de referência composta por cristais naturais euédricos (mais própria de um Museu do que de uma sala de estudo).

CONCLUSÕES

A principal conclusão que se retira do conjunto de reflexões acima exposto é a da pertinência da manutenção dos cursos introdutórios à Cristalografia quer ao nível secundário, quer ao nível universitário. A inserção curricular destes cursos no âmbito das Geociências deverá também ser mantida, porquanto é cada vez mais nítido que a compreensão de um vasto número de fenómenos geológicos actualmente objecto de grande atenção por parte da comunidade científica requer uma formação sólida em Cristalografia. Alternativamente é concebível que a introdução aos estudos universitários de Cristalografia seja feita no âmbito de um ano vestibular (actualmente inexistente), de características multidisciplinares, que conferisse aos alunos um espectro geral de conhecimentos, permitindo-lhes o subsequente acesso às licenciaturas em Ciência, uma vez que a utilidade da Cristalografia se faz sentir igualmente em muitos domínios científicos que não as Geociências. Em qualquer dos casos, afigura-se desejável uma reforma dos programas de ensino da Cristalografia segundo linhas semelhantes às que acima foram explicitadas.

No que respeita ao ensino da Cristalografia a nível secundário, a conclusão só pode ser uma: importa, com a maior brevidade possível, re-examinar os conteúdos programáticos propostos (em particular a sua articulação e seqüência) e, por conseguinte, proceder às tão necessárias revisões científicas dos manuais escolares editados. Mas estas reformas não poderão ser implementadas no terreno se não forem acompanhadas da necessária formação de professores, uma vez que a sua generalidade teve um ensino de Cristalografia clássico e/ou deficiente. Em todas estas actividades, as instituições universitárias, responsáveis últimas pela formação científica dos docentes, têm responsabilidades acrescidas que não deverão enjear.

Agradecimentos

Os autores agradecem reconhecidamente ao Doutor Ricardo Quadrado, Professor Jubilado da Universidade de Lisboa, o seu inestimável contributo para a sua formação científica e pedagógica, e esperam que o presente conjunto de reflexões sirva de algum modo para continuar a sua obra de defesa do Ensino da Cristalografia.

REFERÊNCIAS

- Bak, P. (1996). *How nature works – The science of self-organized criticality*. New York, N.Y., E.U.A.: Copernicus.
- Cotton, F. A. (1971). *Chemical applications of group theory*. New York, N.Y., E.U.A.: Wiley – Interscience.
- Friedrich, W. von, Knipping, P., & Laue, M. (1912). Interferenz-Erscheinunge bei Röntgenstrahlen. In J.M. Bijvoet, W.G. Burgers & G. Hägg (Eds.), *Early Papers on Deffraction of*

- X-Rays by Crystals*, International Union of Crystallography, Utrecht (1969).
- Frodeman, R. (1998, Maio). *The Epistemology of the earth sciences*. Conferência apresentada no "Symposium on Geosciences in the Secondary School Curriculum". Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Klein C., & Hulburt C.S. (1993). *Manual of Mineralogy (after J.D. Dana)*. 21st Edition. John Wiley & Sons Inc.
- Putnis, A. (1992). *Introduction to mineral sciences*. Cambridge, U.K.: Press Syndicate of the University of Cambridge.
- Vainshtein, B.K. (1981). *Modern Crystallography I – Symmetry of crystals; Methods of Structural Crystallography*. Berlin, Alemanha: Springer-Verlag.
- Vainshtein, B.K. (1982). *Modern Crystallography II – Structure of crystals*. Berlin, Alemanha: Springer-Verlag.

MODERN APPROACHES TO CRYSTALLOGRAPHY TEACHING

ABSTRACT

Traditionally, the teaching of Crystallography presents its mathematical background without concerning itself with the physical reality of crystals. This renders almost impossible a rational understanding of the foundations of Crystallography in general and of crystals in particular. We propose a different approach in which, after characterizing physically the crystalline state, all relevant crystallographic principles are logically deduced. This approach, which can be used both at high-school and university levels, will also give the students the opportunity to get involved in several multidisciplinary aspects of science, that come together in the field of Crystallography. Minerals are quite perfect crystals and so very good examples on which to base the elementary teaching of Crystallography. That's why we think that the first crystallographic teaching should be imparted within the framework of the Earth Sciences.

Key-words: Crystallography teaching; teaching strategies; high-school curricula; Portugal.

RESUMO

O ensino tradicional da Cristalografia, onde o formalismo matemático é apresentado sem equacionar a realidade física de que decorre, dificulta a construção e compreensão do modelo abstracto de referência imprescindível ao entendimento racional dos conceitos-base que se pretendem ministrar. Em alternativa propõe-se uma abordagem moderna e atraente de ensino que, partindo da caracterização da matéria cristalina, permitirá a dedução lógica dos princípios cristalográficos fundamentais. Tal procedimento, aplicável aos níveis de ensino secundário e universitário, potencia uma vincada e desejável formação científica interdisciplinar. Os minerais, enquanto substâncias cristalinas por excelência, podem (e devem) continuar a servir de base à introdução dos fundamentos científicos em causa, justificando a manutenção (a nível de ensino) dos elos de ligação entre Cristalografia e Mineralogia e, assim, a pertinência (e actualidade) da sua inclusão curricular no âmbito das Geociências.

RESUMÉ

L'enseignement traditionnel de la Cristallographie présente son formalisme mathématique sans se soucier de la réalité physique dont il découle. Ça rend difficile la compréhension rationnelle des fondements de la Cristallographie qu'on veut transmettre. Nous proposons ici une alternative qui, partant de la caractérisation préalable de la matière cristalline, permet la déduction logique des principes cristallographiques fondamentaux. Cette méthode, qui peut être utilisée aussi bien au niveau secondaire qu'au niveau universitaire, permet aussi une formation scientifique multidisciplinaire basée sur la Cristallographie. Les minéraux sont d'excellents exemples de substances cristallines et peuvent toujours être la base pour l'enseignement élémentaire de la Cristallographie.