

JORGE BONITO

ALTERAÇÃO DAS ROCHAS

- TEXTO PEDAGÓGICO-



UNIVERSIDADE DE ÉVORA

2023

ERRATA

<i>Lauda</i>	<i>Linha</i>	<i>Onde se lê</i>	<i>Deve ler-se</i>
7	17	se	-se
10	1	impureza	impurezas
14	11	geal	geral
18	3	em	Em
19	10	am	em
20	12	mentre	mente
20	14	químia	química
21	22	de	se
22	15	transforma-se	transformar-se
27	11	mereorização	meteorização
31	4	cuidado	cuidada

ÍNDICE

1. Alteração das rochas	3
1.1 Principais agentes de alteração	6
1.2 Alteração deutérica	7
1.3 Alteração meteórica	9
1.4 Meteorização das rochas e clima	12
1.5 Factores que condicionam a intensidade de alteração	14
1.6 Diferenciação geoquímica dos produtos de destruição e alteração	15
1.7 Taxa de meteorização	18
2. Alguns exemplos de alteração de rochas	20
2.1 Alteração do granito	20
2.2 Alteração das rochas básicas	23
3. A importância da alteração das rochas	26
4. Decadência das rochas dos monumentos	28
4.1 Factores de decaimento das rochas dos monumentos	28
4.2 Processos de decaimento das rochas dos monumentos	30
4.3 O decaimento do calcário dolomítico amarelo oolítico do sinemuriano-carixiano da região de Coimbra, empregue nas colunas dos claustros da Sé-Velha de Coimbra	30
Bibliografia	33

"Os que comem de mais, não são sempre os mais gordos; os que lêem de mais, não são sempre os mais sábios"

Montaigne, in Moraes Leal,
1993, A bíblia da vida,
Venda Nova, Bertrand Edito-
ra, p. 365.

1. ALTERAÇÃO DE ROCHAS

Inferências, realizadas a partir do estudo da propagação das ondas sísmicas P - longitudinais - permitiram distinguir dois conjuntos sobrepostos na constituição do globo terrestre: uma crista terrestre e um manto subjacente. A superfície do globo apresenta-se rígida (à escala humana) e corresponde à porção denominada litosfera, i.e., crista e manto superior, até aos 100 Km de profundidade.

A crista continental superior é formada de partes de espécie diferente. Apresenta uma espessura variável de sedimentos, subjacentes a gneisses mais ou menos granitizados, tomando a designação de camada granito-gneissica. Não obstante, por muito que estes materiais se apresentem coerentes e bem compactados, o conjunto das acções mecânicas que exercem os agentes externos sobre eles, conduz a um agregado de fragmentos cuja dimensão decresce progressivamente à medida que prossegue a sua acção assoladora.

A acção destruidora de agentes externos sobre as rochas, causa a desintegração do material rochoso; no entanto outros agentes, embora menos visíveis à priori que os primeiros, actuam no processo, como por exemplo, a acção química que exercem as águas naturais e os produtos que transportam em dissolução.

Adquire particular significado a acção simultânea dos processos de destruição mecânica e química. Em múltiplas situações, a intensidade de um processo depende da intensidade do outro; assim,

quanto maior a fragmentação mecânica, maior será a superfície exposta ao ataque e mais eficaz a alteração da rocha.

O vocábulo alteração, de origem latina *alteratione*, aponta para um efeito de alterar, modificar, degenerar ou corromper. A alteração das rochas, é vista em geodinâmica externa, como a adaptação dos minerais - especialmente os gerados no interior da litosfera - às novas condições existentes à superfície, como v.g., no contacto com a atmosfera, com a hidrosfera e a biosfera. Opiniam este conceito autores como Fersman¹, Vernadsky¹, Polynov¹, Reiche¹ e Millot¹, entre outros. De maneira mais simplista, a alteração de uma rocha consiste na sua desagregação e decomposição levadas a cabo por agentes físicos e químicos naturais, que transformam essa rocha noutro produto natural, em novo equilíbrio físico-químico com o ambiente. Com a transformação dos minerais das rochas, verifica-se um incremento da entropia do sistema, através da destruição das redes cristalinas dos minerais e a respectiva movimentação dos catiões.

Os principais tipos de alteração que afectam as rochas dizem respeito à alteração deutérica², primária ou hipogénica e a alteração meteórica, secundária ou supergénica. Esta última designação localiza a alteração em zonas peculiares da crista. Fersman³ não hesita em incluir na supergénese a alteração das rochas, a pedogé-

¹ Cf. A.M. Galopim de Carvalho, 1987, Alteração das rochas, p. 1.

² Diz-se das alterações que se dão numa rocha magmática durante as últimas fases de consolidação e em ligação com ela, pelo que a ações primárias de fluidos tardimagnéticos, permitem provocar uma aptidão para reagir ao meteорismo, diferente daquela que ocorre numa rocha sã.

³ Cf. A.M. Galopim de Carvalho, 1987, Alteração das rochas, p. 1.

nese, a biogénese e a sedimentogénese.

O termo meteorização, meteorismo ou intemperismo designa o conjunto de processos de alteração das rochas em virtude da acção dos agentes de natureza meteórica ou atmosférica, i.e., a alteração *in situ* de uma rocha endógena que foi elevada a condições exógenas. O desequilíbrio que surge da exposição da rocha ígnea ao ambiente, gera o mecanismo de meteorização que levará a novo equilíbrio.

Quando falamos de alteração meteórica referimo-nos a um estádio de modificação natural que ocorre em função de agentes ditos meteóricos. Por alterabilidade entendemos um conceito dinâmico que traduz a aptidão de uma rocha para se alterar.

O grau de alteração de uma rocha (que representamos pela letra m) é função de factores intrínsecos, dependentes do tipo de rochas (que designamos por i) e de factores extrínsecos, função do meio em que ocorre a alteração (que designamos por e). Tem-se com efeito, $m = f(i, e)$ em que i é função da natureza do material (n), da fracturação e volume de vazios (s) enquanto e depende da temperatura (T), do potencial de hidrogénio (pH), do potencial de oxiredução (Eh), da quantidade de água (l) e das forças bióticas actuantes (b). Com efeito, temos $i = f_1(n, s)$ e $e = f_2(T, pH, Eh, l, b)$.

Raramente no nosso estudo se considera pertinente o factor tempo (t), uma vez que os diferentes graus de alteração não são essencialmente devidos ao tempo de exposição, mas aos factores anteriormente enumerados, ditos intrínsecos e extrínsecos. Para integrar este factor, consideramos a equação $m_1 = X(i, e, t)$, i.e., a alterabilidade m_1 que está em relação com a taxa de alteração

m ($m_1 = \Delta m / \Delta t$).

Agora facilmente se deduz que quando nos referimos a alteração, o tempo por nós considerado refere-se ao "tempo geológico", enquanto que a alterabilidade considera o "tempo humano".

1.1 Principais agentes de alteração

De um modo geral, os ambientes exógenos são meios hídricos oxigenados, ou meios em que a acção das águas e componentes da atmosfera são relevantes.

Na meteorização, consideramos a acção de dois agentes a saber: acções físicas e acções químicas. Nas acções físicas importa referir a expansão devida a efeitos térmicos (amplitude térmica dia-noite ou sazonal), a expansão por descompressão, a expansão por congelação da água retida nos poros, vazios e fissuras, as acções mecânicas da água de circulação sub-aérea e dos glaciares e ventos e as acções mecânicas devido a actividade de seres vivos.

O principal agente de alteração química é a água líquida continental. Nela estão dissolvidas, além de quantidade significativas de gases atmosféricos, pequenas proporções de outros elementos ou grupos iónicos. Esta proporção de substâncias na água corrente varia extraordinariamente de umas zonas para outras, sendo o valor médio 0,01% em peso. Os produtos mais abundantes dissolvidos na água são o CO_2 (35%), SO_4 (12%), Cl (5%), NO_3 (0,9%), SiO_2 (12%), Ca (20%), Na (6%), Mg (3,5%) entre outros de natureza catiónica. Embora os grupos ácidos estejam presentes em baixa proporção, eles

são de importância considerável pela sua grande actividade química. As accções químicas são essencialmente do tipo de dissolução, de oxidação, de redução, de oxidação-hidratação e hidróise.

1.2 Alteração deutérica

Numa primeira abordagem poderia parecer despropositado considerarmos a alteração primária, todavia, do ponto de vista heurístico, estes fenómenos são, amiúde, do mesmo tipo, como v.g., a caulinização e cloritizações, além da necessidade de conhecer este tipo de alteração, uma vez que podemos detectar rochas alteradas deutericamente, em zonas onde o intemperismo não pode actuar.

Em rochas, cuja existência está associada a ocorrência de jazigos minerais de elementos metálicos de interesse económico (v.g., Sn, W, Cu, Pb, Zn, etc.), são vulgares processos de caulinização, albitização e sericitização dos feldspatos, a cloritação e a moscovitização das biotites e de outros minerais ferromagnesianos, como piroxenas e anfíbolas. A albitização manifesta-se pela presença de pertites e micropertites⁴, de tipo venado. Sendo a albitização um processo de metamorfismo hidrotermal alcalino, ocorre, por diferenciação e cristalização do magma granítico um enriquecimento do resíduo em Na_2O , em água e mineralizadores.

⁴ Nas séries de baixa temperatura a solução albite de baixa temperatura tem uma extensão mais limitada e a separação das fases ocorre numa escala que pode ser observada com a ajuda do microscópio. Aos intercrescimentos chamamos micropertite. Quando a presença desta fases é notada sem o recurso ao microscópio, denomina-se de pertite.

A serificação dos feldspatos, que por vezes, acompanha a albitização é comum nas rochas graníticas e filões pegmatíticos estaníferos, revelada pela presença de salbandas de sericite (elevado teor de SiO_2 , MgO e H_2O e baixo de K_2O) e de outras micas brancas que guarnecem os encostos dos filões pneumatolíticos-hidrotermais estaníferos e volframo-estaníferos que ocorrem no seio de formações xistentes.

A cloritização é um fenómeno de alteração hidrotermal dos minerais ferromagnesianos das rochas ígneas, particularmente da biotite e hornoblenda. A cloritização da biotite manifesta-se por uma descoloração da mica, que se torna esverdeada, traduzindo-se na adição do grupo OH e libertação de K, Fe e Ti.

A caulinização afecta geralmente os feldspatos dos granitóides. Verifica-se uma alteração do feldspato num produto baço, branco, pulverulento e desagradável, visto ao microscópio com porosidade. Este tipo de reacções está geralmente associado a ambiente ácidos, de soluções hidrotermais ácidas ricas de CO_2 .

A serpentinização é um processo através do qual os peridotitos ou outras rochas enriquecidas de olivina se transformam em serpentinitos, ou em que a olivina evolui para serpentina.

A greisenização traduz-se por forte lixiviação causada pelos fluidos pós-magmáticos que descoloraram e moscovitizaram a biotite e os feldspatos com consequente adição de F, Sn, Cl, e Li.

Uma rocha ultrabásica pode alterar-se e por esteatitização, sob a influência de soluções siliciosas a baixas temperaturas, originar uma rocha talcosa.

O último fenómeno que queremos referir denomina-se saussuritização, i.e., a substituição das plagioclases das rochas gabro-

dioríticas, por um agregado, finamente granular, de zoizite, clinzoizite ou epídoto.

1.3 Alteração meteórica

Já referimos que as acções físico-químicas das águas, e as acções químicas dos componentes da atmosfera são de extrema importância quando actuam em conjunto.

É sabido que a maior parte dos minerais é insolúvel na água pura, excepto, v.g., formações de halite, silvite e carnalite. Esta dissolve os sais alcalinos, cloretos, sulfatos, carbonatos e gases componentes da atmosfera como o oxigénio e o dióxido de carbono, que tomariam uma acção ligeira sem este estado. Deste modo, convém considerar a acção de dissolução da água juntamente com a acção química do ar. Referiremos sucintamente as acções de dissolução com acção química, a hidratação, a oxidação, a oxidação-hidratação, a redução e a hidrólise.

No caso das rochas de natureza calcária, adquire particular interesse a acção das águas com dióxido de carbono e outros ácidos orgânicos dissolvidos. A sua acção promove a transformação do carbonato de cálcio em bicarbonato, mais solúvel que o anterior, facilitando a acção dissolvente da água. A dissolução com acção química manifesta-se nos calcários por lapiasização e em fases mais evoluídas do processo, carstificação subterrânea, como revelam as inúmeras formações cársicas que temos no nosso país. É frequente a presença de resíduos de argila, quartzo ou sílex, bem como uma

percentagem maior ou menor de limonite resultantes das impurezas dos calcários. O produto final da dissolução dos calcários é frequentemente a formação de terra-rossa⁵.

É invulgar reacções isoladas de hidratação. Quando a hidratação da anidrite ocorre, forma-se gesso, com aumento de volume e consequente deformação das rochas encaixantes, do tipo diapírico.

Nos minerais de ferro a hidratação toma pouco significado, todavia, a oxidação destes e dos compostos orgânicos é particularmente activa. O que se passa na realidade é uma reacção química de transformação do ferro ferroso ao estado de ferro férrico, aquando a destruição das moléculas dos silicatos. Nas regiões tropicais, subtropicais e quentes, este processo é particularmente activo, manifestando-se pela formação de sesquióxido de ferro, dando uma coloração vermelha característica.

As reacções de oxidação e de hidratação, tendo um papel restrito quando consideradas isoladamente, adquirem maior interesse, importância e influência quando ocorrem associadas. É frequente vermos rochas com a coloração amarelo-acastanhada em zonas meteorizadas. Esta cor surge da transformação dos minerais de ferro em limonites, enquanto nas regiões quentes, se transformam em hematites. Verifica-se que os sulfuretos de ferro transformam-se em sulfatos, ferrosos ou férricos e em hidróxido férrico, originando concomitantemente ácido sulfúrico. Este ácido contribui, de maneira mais intensa, para acções de meteorização quando a pirite de

⁵ Essencialmente são argilas limoníticas residuais mais ou menos arenosas

ferro é abundante, enquanto o hidróxido férrico, em parte limonite, se acumula sobre os próprios locais de formação. Estas acções que descrevemos são particularmente importantes quando actuam sobre jazigos de pirite de ferro. Surge então, o chamado chapéu de ferro, *i.e.*, uma zona espessa de alteração limonítica, onde a miúdo, se depositam ouro e prata nativos, disseminados na massa dos sulfuretos. Quando nos calcários e margas surge um aspecto pulverulento na zona superficial com desagregação, é indicação da presença de pirite de ferro disseminada.

À superfície da Terra, os compostos mais estáveis são os mais oxidados, e, como tal, as reacções de redução adquirem pouca importância nos processos de meteorização. Algumas manchas brancas ou mesmo esverdeadas que surgem em algumas rochas sedimentares, são resultado da acção redutora da matéria orgânica, sobre compostos férricos a ferrosos. Verifica-se que algumas bactérias, reduzem igualmente, os sulfatos a sulfuretos.

Mas de todas as reacções descritas e acções de meteorização apresentadas, a de maior importância são as de hidrólise, uma vez que actuam sobre os silicatos. No entanto estas reacções ocorrem em relação com as reacções de hidratação. A água a temperaturas normais da superfície terrestre encontra-se pouco dissociada, todavia, a temperaturas maiores, dissociia-se em aníões $(OH)^-$ e em catiões H^+ . As águas naturais apresentam uma capacidade hidrolítica considerável. A sua capacidade hidrogeniónica é superior à das águas puras, pois contém dissolvidas outras substâncias. Daqui se vê que as águas naturais apresentam maior apetência para provocar fenómenos de hidrólise pela actuação dos seus iões e catiões. A sua acção sobre os silicatos é de ácido mais ou menos fraco. Sobre

os feldspatos e feldspatóides, traduz-se a formação de ácidos aluminio-silícios e de hidróxidos alcalinos e alcalino-terrosos. Surgem fenómenos de argilização (v.g., caulinização, montmorilonitação), de cloritização, de saussuritização, e serpentinização. Quer a alteração seja *per ascensum* ou *per descensum*, os produtos finais são geralmente idênticos, embora as rochas tenham sofrido trajectos diferentes.

1.4 Meteorização das rochas e clima

Entendemos aqui clima por um conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizam o estado médio da atmosfera numa dada região. Para caracterizar o clima tomamos em consideração a temperatura e a humidade do ar, a precipitação e pressão atmosférica, e os ventos. O clima influencia, significativamente e de modo largo, o processo de meteorização das rochas. O clima de Portugal caracteriza-se por um ritmo definido das variações de temperatura do ar, ocorrendo uma variedade de subtipos, individualizados pela distribuição da chuva. Nestes ambientes verifica-se a actuação de processos de desintegração e de decomposição das rochas, sendo o predomínio de uns ou de outros função das condições locais. Os processos de decomposição chegam a afectar as rochas em profundidade. O limite dasta alteração pode ir dos centímetros aos metros e é dado pelo limite de circulação das águas. Numa classificação climática, Portugal estaria colocado entre as regiões climáticas com alteração essencialmente bioquimiogénica (essencialmente quí-

mica), numa zona de bissialitização. Verifica-se uma fraca eliminação da sílica e geração de minerais argilosos e de filossilicatos tipo $t-o-t$, i.e., 1:2. A bissialitização ou arenização, é típica de zonas temperadas e consiste na transformação de rochas granítóides em saibro, por intermédio de hidrólises. Esta última formação além de fortemente lixiviada e pouco coesa, mostra a estrutura da rocha primitiva.

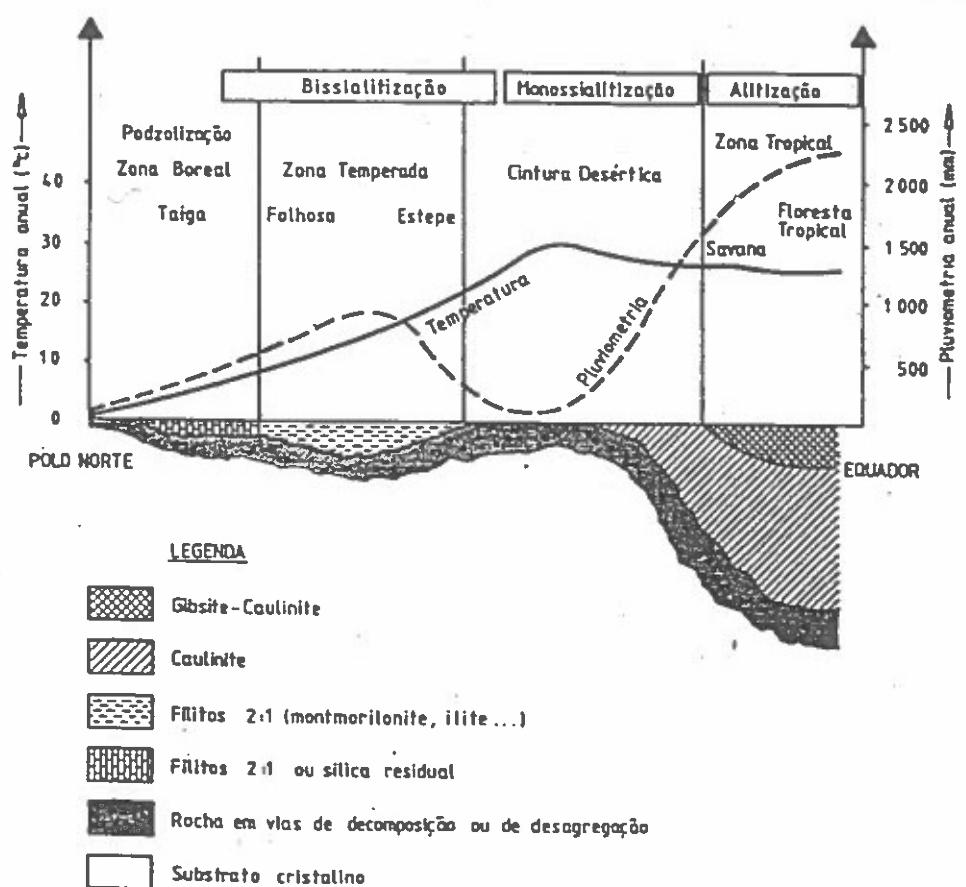


Fig. 1 - Síntese dos principais fenómenos de alteração meteórica em função das zonas climáticas (adaptado de Luis-Aires Barros, 1991, Alteração e alterabilidade das rochas, p. 38).

1.5 Factores que condicionam a intensidade de alteração

A alteração química das rochas superficiais depende de factores a saber:

a) Composição mineralógica das rochas submetidas a alteração

Uma rocha que apresente uma grande quantidade de minerais facilmente alteráveis, originará menos produtos residuais e maior proporção de produtos de dissolução iônica ou coloidal, ao invés daquela cuja quantidade de minerais resistentes é elevada, gerando poucos produtos secundários e uma enorme quantidade de fragmentos de minerais residuais não alterados. De uma maneira geral, os silicatos de ferro e magnésio - v.g., olivina, piroxena e anfíbola - são facilmente alterados, e concomitantemente, as rochas formadas por estes minerais (dioritos, gabros, etc.) são pouco resistentes à alteração química. Os aluminossilicatos e as micas alteram-se com maior lenteza e as rochas formadas por feldspatos registam, com frequência, pouco alteração. O quartzo é praticamente inalterável.

b) Intensidade do processo de ataque

A alteração varia de acordo com os ambientes onde estão localizados os afloramentos, como já referimos anteriormente. Onde existe grande abundância de água líquida quimicamente activa, a alteração é mais intensa do que nos países áridos ou subpolares, onde a água não existe, ou escasseia no estado líquido. Nos climas secos e frios verifica-se uma maior dominância dos produtos de

destruição mecânica em relação aos que resultam do ataque químico; em climas húmidos e quentes os produtos de decomposição química são, por inverso, mais abundantes.

c) Intensidade relativa dos meios de destruição mecânica

Em regiões onde a intensidade erosiva é considerável, os minerais têm poucas probabilidades de alterar-se completamente. Com efeito, os produtos de desagregação, ainda que estando parcialmente alterados, são arrastados rapidamente pelos agentes de transporte. Em zonas de actividade erosiva pouco potente, os produtos residuais terminam a sua alteração próximo do lugar onde se geraram. Em zonas de grandes desníveis topográficos, ocorre fraca intensidade de ataque químico, enquanto em regiões de topografia suave, este processo será o preponderante.

1.6 Diferenciação geoquímica dos produtos de destruição e alteração

A alteração química e mecânica dos materiais rochosos da crusta terrestre, origina dois tipos de produtos fundamentalmente diferentes:

a) Produtos residuais ou resistentes

São basicamente fragmentos de rochas e minerais que existiam nas rochas anteriores e podem agrupar-se em dois grupos distintos:

- Minerais estáveis nas condições superficiais, praticamente inalteráveis pela ação química;
- Minerais instáveis nas condições superficiais. Podem no entanto, persistir inalteráveis, em condições favoráveis, du-

rante períodos de tempo muito dilatados. Só parcialmente são alterados pela acção química.

b) Produtos secundários resultantes da alteração química dos minerais. Diferenciam-se em:

- Minerais que se originam no mesmo local onde se produz a alteração, em consequência de reagrupamentos estruturais de restos do antigo mineral;
- Produtos libertados do ataque, que ficam incorporados nas águas em solução iônica (v.g., K, Na, Ca, Mg, etc.)

Desde o momento da produção destas diferentes categorias de produtos, os agentes de transporte actuam de modo a conduzirem-nos até zonas, por vezes bem distantes, do local inicial da alteração. Como alguns materiais têm maior possibilidade do que outros para serem arrastados, alguns poderão permanecer muito tempo em suspensão no meio de transporte, e poderão ser levados e concentrados muito longe do ponto de origem, como ocorre, v.g., com muitos elementos que estão em dissolução iônica. Os minerais menos transportáveis, como os minerais residuais concentram-se em zonas mais próximas do ponto de partida. A consequência desta dispersão, que é selectiva, consiste na formação de novos materiais, cuja composição é muito diferente, quantitativa e qualitativamente, da que tinha a rocha originária. Designamos este processo de concentração selectiva de diferenciação geoquímica sedimentar.

O processo de diferenciação geoquímica sedimentar inicia pela separação dos fragmentos das rochas e minérios não alterados, cujo transporte é lento. Por acumulação destes minerais residuais estáveis ou instáveis, formam-se novas rochas denominadas residuais,

detríticas ou clásticas. Todas elas terão uma proporção elevada em SiO_2 uma vez que o quartzo é o mineral muito abundante nas rochas da crusta terrestre.

Num segundo momento deste processo, ocorre a concentração de minerais argilosos, formando soluções coloidais. O equilíbrio que se gera pode alterar-se muito facilmente por modificações das condições físico-químicas da água e podem precipitar-se facilmente, originando suspensões não coloidais de partículas floculadas, que podem depositar-se facilmente em águas pouco agitadas. As rochas formadas por minérios argilosos, constituem as argilas, que do ponto de vista químico apresentam grande quantidade de alumínio e menor proporção de silício. Outros elementos como o ferro, o cálcio, o magnésio, o sódio e o potássio, não constituintes da dissolução iônica, são arrastados até ao oceano, contribuindo para aumentar a salinidade da hidrosfera. No entanto, em muitas ocasiões, são bloqueados em zonas continentais por mecanismos físico-químicos ou bioquímicos de precipitação. O ferro é um dos elementos que poderá inicialmente precipitar, formando hidróxido férrico insolúvel, que poderá transformar-se em limonite. Formam posteriormente as rochas ferruginosas. O elemento cálcio está directamente relacionado com a forma bicarbonato e com as águas ricas em dióxido de carbono. Quando pela temperatura, pressão, actividade biológica das plantas aquáticas, etc., a quantidade de CO_2 diminui nas águas, ocorre geralmente, uma precipitação considerável de cálcio, em forma de carbonato, não somente no ambiente continental, mas também nas águas oceânicas. O composto $CaMg(CO_3)_2$ resulta da precipitação conjunta do cálcio em forma de carbonato com o magnésio. Formam-se nestas condições rochas carbonatadas.

1.7 Taxa de meteorização

Quando se fala em taxas de alteração meteórica é sempre subjetivo. em parte, deve-se aos diferentes climas onde as rochas estão instaladas. Parece que a primeira tentativa de quantificação do decaimento das rochas se deve a Grikie, em 1880.

Em 1990, Kukal apresenta estudos de taxas de meteorização química em clima tropical húmido nas ilhas Krakatoa. Ao fim de 45 anos de registos, obtiveram-se os seguintes dados:

<i>Tipo de rochas</i>	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	CaO	<i>Húmus</i>
<i>Lava alterada</i>	61,13	17,24	2,59	3,60	0,45	0,45
<i>Camada de transição</i>	65,87	16,37	1,74	2,05	3,07	0
<i>Lava sã</i>	67,55	16,19	1,52	2,15	2,87	0

Em 50 anos, houve a remoção de 9% de SiO_2 e deu-se a perda quase total de cal com a concentração de ferro e um ligeiro aumento de alumina.

Cernohouz & Solc, em 1966, apresentam um expressão para caracterizar a taxa de meteorização de basaltos:

$$d = A \log (1 + Bt)$$

em que

d - é a espessura dos produtos alterados à superfície, em mm

A e B são constantes

t - é o tempo em 10^3 anos

A partir desta equação é possível calcular a idade da altera-

ção se se conhecer a espessura da camada de meteorização ou calcular a taxa de meteorização se se conhecer a idade do fenómeno de decaimento.

Para os basaltos checos, Cernohouz & Solc encontraram $A = 4,64 \pm 0,05$ e $B = 0,010 \pm 0,001$.

Outros autores, apontam para climas tropicais húmidos, idades de 5 000 e 5 000 a 20 000 anos para fenómenos de arenização e bis-sialização respectivamente.

Podemos ainda avaliar a taxa de meteorização através do estudo da velocidade da pedogénese. Na Europa, em clima temperado, admite-se uma taxa de formação de solo de 1 cm por 100 anos. Na China existem taxas muito maiores.

O tempo de formação de um solo a partir de uma rocha sedimentar ou a partir de uma rocha cristalina é muito diferente. Para as mesmas condições climáticas favoráveis, são precisos, pelo menos, 20 000 anos, para gerar solo a partir de granitos. Em clima árido a taxa é substancialmente inferior.

2. ALGUNS EXEMPLOS DE ALTERAÇÃO DE ROCHAS

2.1 Alteração do granito

As rochas mais abundantes na crusta continental são as plutónicas, constituídas essencialmente por minerais, que pela sua composição química, podem ser considerados como silicatos de ferro, magnésio e cálcio ou aluminossilicatos de metais alcalinos e alcalinoterrosos (Na, K e Ca). Das rochas plutónicas, a mais opulenta é o granito. Os elementos essenciais dos granitos são ortoclase e quazto, geralmente associados a biotite e moscovite, ou mais raramente, só a moscovite, e por vezes a hornoblenda. Podem ainda conter microclina e oligoclase. São rochas faneríticas, e grosseiramente equigranulares, mas existem também variedades porfiróides, como são exemplos, os granitos da cintura de Évora, nos Almendres.

A composição química destes minerais descritos é seguinte:

FUNDAMENTAIS	Quartzo	SiO_2
	Feldspato potássico	$\text{K Al Si}_3 \text{O}_8$
	Plagioclase	$\text{Ca Al}_2 \text{Si}_2 \text{O}_8$ $\text{Na Al Si}_3 \text{O}_8$
	Biotite	$\text{K}(\text{MgFe})_3 \text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	Moscovite	$\text{K}_2\text{Al}_4 (\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}) (\text{OH})_4$
ACESSES	Magnetite	Fe_3O_4
	Zircão	Zr_4SiO
	Apatite	$\text{Ca}_5 (\text{PO}_4)_3 (\text{F},\text{Cl})$
	Pirite	FeS_2

Os minerais fundamentais do granito caracterizam-se do ponto de vista estrutural, por estarem formados por redes atómicas espaciais, em que o silício está rodeado de quatro átomos de oxigénio que ocupam teoricamente os vértices de um tetraedro, cujo centro é preenchido por um átomo de silício. Para compreender as diferenças energéticas entre as diferentes ligações químicas atómicas dos diferentes minerais, é necessário conhecer a estrutura dos silicatos e especificamente a de cada um em particular. Não é nosso objectivo fazer aqui essa descrição, todavia, esse conhecimento torna-se imprescindível se queremos compreender a acção dos agentes químicos nos diferentes minerais constituintes do granito. Os primeiros elementos a mobilizarem-se são precisamente os mais fracamente unidos (K, Na, Ca, Fe, Mg). Uma vez alterada a rede cristalina, e arrastados os elementos acima referidos, fica uma rede esquelética de tetraedros ou de tetraedros e octaedros de Si, Al e O que se reajusta a novas estruturas e compensa os espaços deixados pelos átomos expulsos da rede, com grupos (OH) provenientes da água, provocadora da alteração. São precisamente os iões H^+ , dissolvidos nas águas, que vão alterar o que resta da rocha. Estes iões penetram nas estruturas, deslocando os átomos de sódio e potássio, entre outros, adicionando-os à dissolução iónica da água que produz a hidrólise. Esquematicamente traduzem-se as reacções que desenvolvem:

Minerais iniciais	Hidrogeniões	Iões em solução	Redes residuais teóricas
KAlSi ₃ O ₈	+ H ⁺	K ⁺	+ H Al Si ₃ O ₈
NaAlSi ₃ O ₈	+ H ⁺	Na ⁺	+ H Al Si ₃ O ₈
CaAl ₂ Si ₂ O ₈	+2H ⁺	Ca ²⁺	+ H ₂ Al ₂ Si ₂ O ₈
K(Mg,Fe) ₃ AlSi ₃ O ₁₀ (OH) ₂	+ H ⁺	K ²⁺ (Mg ²⁺ ,Fe ²⁺)	+ H ₅ AlSi ₃ O ₁₀ ⁺ + 2(OH) ⁻

As antigas redes de aluminossilicatos, desprovidas dos seus átomos metálicos, fragmentam-se em entidades de pequeno tamanho e procuram o seu equilíbrio unindo-se a grupos (OH)⁻ da água. Como resultado final, formar-se-ia um nova estrutura atómica, i.e., um novo mineral, com composição e estrutura distinta do que o originou.

Processos de hidratação ocorrem igualmente na alteração dos minerais do granitos. O ferro ferroso da biotite, uma vez libertado, rodeia-se de seis moléculas de água para formar um ião complexo Fe (H₂O)₆²⁺. Por oxidação, perde um electrão e passa a ferro férrico (Fe³⁺), que uma vez unido ao oxigénio forma o oligisto, ou hidróxido férrico se unido a grupos OH. Este hidróxido por hidratação pode ainda originar limonite. A magnetite, mineral acessório do granito, apresenta dois dos seus átomos na forma férrica e o terceiro na forma ferrosa. Este último pode transforma-se por oxidação, em férrico, para originar oligisto, ou por oxidação e hidratação para produzir limonite. No caso de pirite acessória, por oxidação, ocorre a reacção:



Poderia parecer, pelo que apresentámos, que estas reacções ocorrem na maior das naturalidades em qualquer situação. Tal pressuposto seria erróneo da nossa parte. Na verdade, estão condicionadas por diversos factores variáveis, como a temperatura, conteúdo de H^+ na água (pH), potencial de oxidação, natureza e proporção de outros iões dissolvidos, etc. Verifica-se que, pequenas variações de algum destes factores, podem anular alguma das reacções, ou conduzir a caminhos diferentes no resultado final dos produtos da reacção. Outro aspecto consiste em considerar na natureza um conjunto imbricado de variáveis, que numa simples representação gráfica está ausente. Assim, v.g., um produto frequente da alteração da biotite é a clorite, na qual se perdeu grande parte do K e do Fe, ficando ainda a maioria do magnésio original: a ortoclase geral com frequência moscovite.

De qualquer forma, o processo de alteração de um granito origina, por um lado, novos minerais hidratados onde se acumula, por um lado, a maior parte de Al e Si preexistentes, e por outro um conjunto de iões que, uma vez dissolvidos na água, podem ser deslocados até regiões bem longe daquelas da alteração.

2.2 Alteração das rochas básicas

Em sentido lato, incluem-se no grupo das rochas básicas, os peridotitos, gabros, doloritos e basaltos, que apresentam plagioclases básicas (labrador e anortite), piroxenas, anfíbolas e olivina, constituindo os minerais essenciais. A magnetite e a ilmenite são dois dos minerais acessórios de maior importância.

Num clima temperado, estes minerais sofrem bissialitização. Os catiões Mg^{2+} e Fe^{2+} que ligam os tetraedros da olivina são muito aptos para a mobilização. Origina-se assim, uma libertação rápida de unidades tetraédricas, com a exposição de novas superfícies cristalinas ao ataque, com consequente rápida alteração. Quando a taxa de libertação de sílica excede a de solução, resulta a sua polimerização em folhas, com fixação de magnésia para gerar serpentina.

A maior parte do ferro (Fe^{2+}) é libertado acima do nível hidrostático e oxidado. Quando no estado Fe^{3+} , o ferro cristaliza sob a forma de óxido (hematite) ou de hidróxido (goetite).

Há medida que a meteorização avança, a magnésia é lixiviada da serpentina formada e transforma-se em saponite, i.e., um mineral argiloso do grupo da montmorilonite. Pode no entanto, ocorrer que a olivina se transforme directamente em montmorilonite sem passar pela serpentina.

No caso particular das piroxenas, e dada a sua singularidade de cadeias, as direcções de clivagem promovem o acesso da água e o do ar às partes mais íntimas do cristal e a consequente solução dos catiões metálicos, com a resultante destruição dos edifícios cristalinos. Depois da destruição das cadeias, os resíduos podem polimerizar, incorporando alumina e magnésia residual, originando clorite ou montmorilonite, ou ambas. Quando o Ca^{2+} excede a taxa de solução pode formar-se calcite. O TiO_2 cristaliza em anatase. As anfíbolas têm um processo de alteração análogo ao das piroxenas.

A perda de catiões intersticiais nas plagioclases conduz à destruição da rede em cadeias. Ocorre polimerização idêntica à re-

ferida para as piroxenas. Em condições de lixiviação, sem remoção total de Mg^{2+} e Fe^{2+} dos minerais ferromagnesianos acompanhantes das plagioclases, estas fixam esses catiões originando montmorilonite e clorite ou ambas. Outros minerais como a calcite e componentes do grupo do epídoto e ainda sericite, podem formar-se aproveitando o Ca^{2+} das plagioclases. Outros minerais como a magnetite, ilmenite e titanomagnetite, oxidam-se rapidamente produzindo hematite, maghemite, goetite, hidróxidos de ferro amorfos e libera-se titânia.

Em síntese, diríamos que estas rochas evoluem para produtos argilosos do tipo 2:1.

3. A IMPORTÂNCIA DA ALTERAÇÃO DAS ROCHAS

Ramos do saber geológico como a geologia aplicada, a sedimentologia, a geomorfologia ou a pedologia, fazem sistematicamente apelo aos conhecimentos relacionados com a alteração da rocha. Tais conhecimentos, permitem-nos, pelo actualismo ou uniformitarianismo geológico, inferir por similares analogias, as condições geológicas passadas através do estudo sedimentar. A interpretação das formas de relevo e a explicação da sua evolução são resultado do debruçar sobre a alteração das rochas da geomorfologia, enquanto a geologia aplicada, considera esta área vital na prospecção de matérias-primas, v.g., argilosas, mui importantes para a indústria cerâmica. Será necessário ainda apontar a importância aplicativa da alteração das rochas no que respeita ao conhecimento do estudo de alteração ou da susceptibilidade de certa rocha usada como pedra de construção (v.g., calcários cristalinos, granitos, gabros). Outras áreas, como geologia de engenharia, construção de barragens, estradas ou zonas urbanas, necessitam de recorrer a conhecimentos litológicos, geotectónicos, mas igualmente de um reconhecimento do tipo e grau de alteração dos terrenos. O mesmo se poderá dizer, dos trabalhos de construção e preservação das pedras dos diferentes monumentos, que uns mais rápido que outros, entram em decaimento. Uma aplicação prática deste âmbito será abordada no capítulo seguinte.

Mas na perspectiva vital, a alteração das rochas torna-se a

mais importante acção de toda a geologia. Quando a camada mais superficial das rochas atinge um certo grau de alteração, permite a instalação de organismos vivos. Considera-se isto um solo. Estas unidades pedológicas, sejam evoluídas (v.g., floresta tropical húmida), sejam pobres (v.g. tundra), só existem porque existe decomposição das rochas. A evolução pedológica, dinâmica e cumulativa é contemporânea em grande parte dos fenómenos de meteorização das rochas. Ora se os solos são o principal sustentáculo do mundo vegetal, sendo este capaz de elaborar matéria orgânica a partir de produtos inorgânicos e da energia solar, sustentáculo ao mundo animal, é na meteorização que a origem da subsistência e vida biológica se encontra; como é também nas rochas que se encontra a reserva salina das águas que nutrem numerosos animais e o homem. A tal ponto é importante a alteração das rochas, que Rittenberg, Energy e Orr (1955)⁶ não apresentam dúvidas afirmando que a vida do homem é possível unicamente, devido à existência da alteração das rochas.

⁶ Cf. A.M. Galopim de Carvalho, 1987, Alteração das rochas, p. 6.

4. DECADÊNCIA DAS ROCHAS DOS MONUMENTOS

4.1 Factores de decaimento das rochas dos monumentos

Desde cedo o Homem começou a fazer construções, primeiro de madeira e depois de pedra. Muitos monumentos, igrejas e outras construções históricas, têm resistido, durante bastantes séculos à acção intempérie. Com o desenvolvimento da poluição atmosférica, causada pelo incremento industrial que se verificou, a alteração das pedras dos monumentos tem sido maior.

Para definir o ambiente em que um determinado ambiente se encontra, há que definir adequadamente o microclima da área, através dos factores extrínsecos, anteriormente já citados. Os factores intrínsecos, específicos de cada tipo litológico são também essenciais a considerar.

De maneira sintética e sistemática podemos apontar que o decaimento das rochas de um monumento depende de:

- a) Factores intrínsecos
- b) Factores extrínsecos
- c) Factores impostos (geometria, orientação, lavrado)
- d) Factores antropológicos

Pormenorizando, Aires-Barros apresenta um esquema simplificativo:

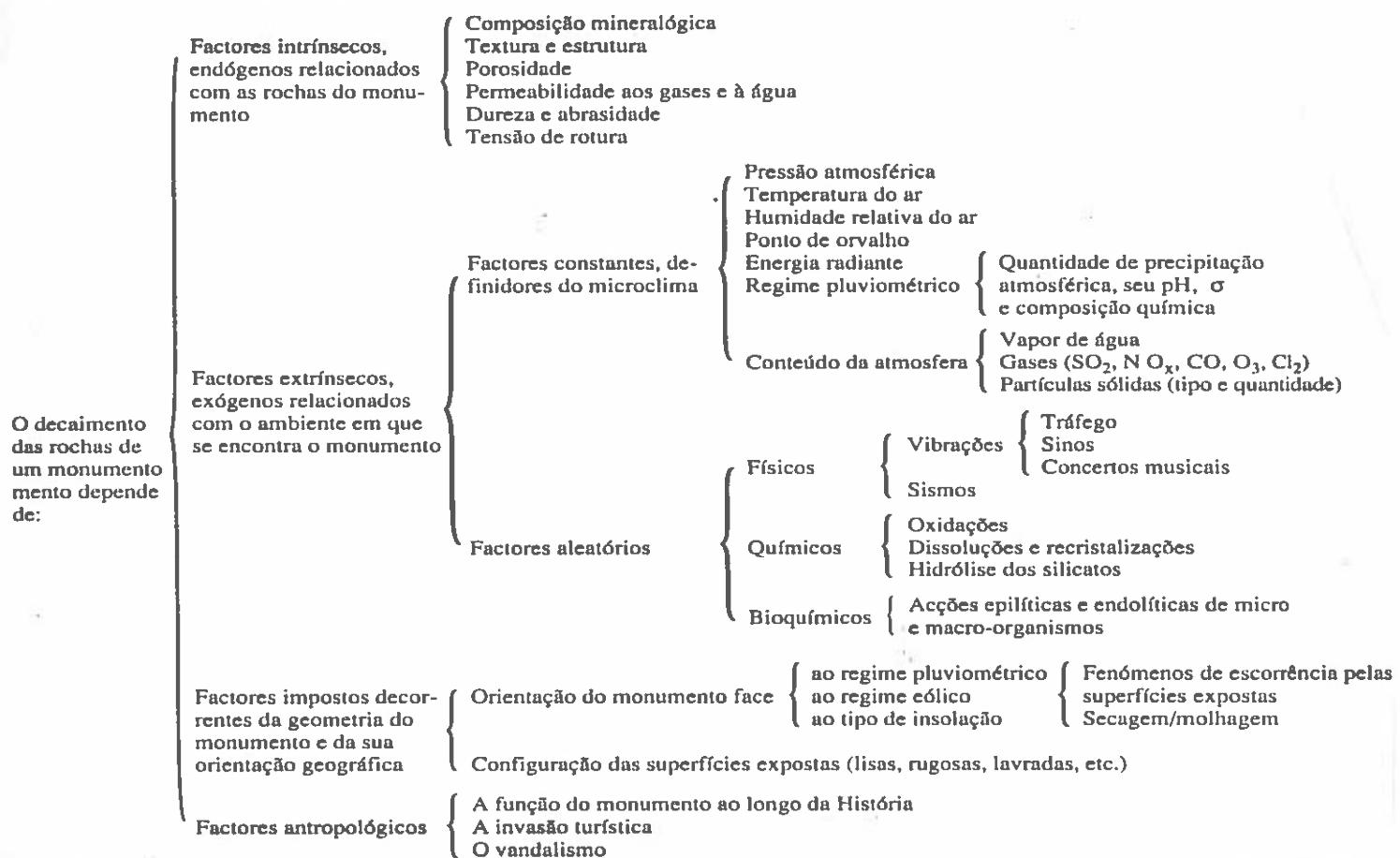


Fig. 2 - Factores de que depende o decaimento das pedras de um monumento (adaptado de Luís Aires-Barros, 1991, Alteração e Alterabilidade das Rochas, p. 203.)

4.2 Processos de decaimento das rochas dos monumentos

Há a considerar três tipos de mecanismos de decaimento das rochas dos monumentos:

- a) Decaimento químico, considerando as reacções químicas que se processam à superfície e nas descontinuidades das rochas com formação de minerais secundários;
- b) decaimento físico, resultando de fenómenos de expansão e/ou retracção provocados por variações térmicas, abalos físicos de varia origem e ainda por fenómenos de expansão devidos à génese de mineria secundários por fenómenos de recristalização;
- c) Decaimento biológico, a partir do crescimento de microorganismos sobre as rochas, bem como algas, fungos, líquenes, musgos e ainda pela acção de aves e do homem.

Cada processo destes requeria uma análise cuidada, que nos abstemos, por circunstâncias de espaço e objectivos.

4.3. O decaimento do calcário dolomítico amarelo oolítico do sinemuriano-carixiano da região de Coimbra, empregue nas colunas dos claustros da Sé-Velha de Coimbra

Este calcário dolomítico, que constitui as colunas dos claustros da Sé-Velha de Coimbra, apresenta textura oolítica em tom creme, conhecido como *Camadas de Coimbra*, que afloram com cerca de 60 ± 20 m de espessura máxima e com má exposição. As zonas mais

elevadas da cidade são sustentadas por este tipo de calcários, explorando-se, v.g., na pedreira de Bordalo. Esta formação pertence ao Sinemuriano-Carixiano inferior.

Em observação cuidado das colunas do claustro, já restaurados no final do século XIX, verifica-se que o estado de desagregação é adiantado. Há uma desagregação natural, originando poeira que cai suave e continuamente. As superfícies abrigadas do ar, encontram-se melhor preservadas, enquanto as que voltadas para a zona de abrasão, estão mais pulveriolentas.

Estudos efectuados em laboratório permitiram verificar que o mineral constituinte fundamental das rochas em estudo é a dolomite e que as capas brandas e pulveriformes são de calcite. A presença de ilite, fixando óxidos de ferro férrico, desenham capas escuras acastanhadas. Estudos de Aires-Barros, et al., de 1977, revelaram que:

- a) Embora existam dois tipos de calcários dolomíticos (grão fino, coesa e textura oolítica vacuolar), ambos apresentam porções esbranquiçadas pulveriformes, que são calcíticas ou argilo-ferruginosas, contendo um nitrato.
- b) Há um posterior enriquecimento de nitrato à medida que se caminha do centro para a periferia, concentrado-se nas capas e porções acastanhadas.
- c) O calcário dolomítico vacuolar é mais desagregável, como se observa nas colunas do claustro.
- d) Os oolitos têm tendência a libertarem-se da rocha, por debilidade do cimento que os envolve, onde intervém o nitrato, imregnando as películas argilo-ferruginosas. Isto constitui a poeira que cai continuamente.

e) O nitrato migra de dentro para fora nas rochas e encontra-se preferencialmente nas rochas oolíticas e vacuolares; porém não aparece nas rochas da pedreira de Bordalo. É pois, um produto gerado, sendo fontes nitrificantes a própria atmosfera (cada vez mais poluída), a acção biológica dos pombos e a presença circundante a este claustro de quintais com hortas e habitações.

Basicamente temos:



que explica a acção do ácido nítrico, proveniente da actividade biológica dos pombos e da infiltração de águas provenientes das hortas e habitações dominantes aos claustros.

Esta, além de outras, será a razão do estado avançado de degradação, que este monumento se encontra.

BIBLIOGRAFIA

- * AIRES-BARROS, Luís, 1991, Alteração e Alterabilidade de Rochas, Lisboa, Instituto Nacional de Investigação Científica.
- * BRINKMANN, Roland, 1974, Geologia Geral, col. "manuais universitários", trad. Maria Lacerda, (a partir do original alemão Lehrbuch der allgemeinen geologie, © 1964), Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, pp. 7-9.
- * CARVALHO, A. M. Galopim, 1987, Alteração das Rochas, Lisboa, Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa.
- * CERNOHOZ, J., SOLC, I., 1966, "Use of sandstone wanes and weathered basalt crust for the absolute chronology", Nature, vol. 212, pp. 806-807.
- * COSTA, Joaquim Botelho da, 1985, Estudo e classificação das rochas por exame macroscópico, col. "manuais universitários", 6.^a ed., Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, p. 78.

- * DEER, W. A., HOWIE, R. A., ZUSSMAN, J., 1981, Minerais constituintes das rochas - uma introdução, col. "manuais universitários", trad. Luís E. Nabais Conde (a partir do original An introduction to the rock forming minerals, © 1966), Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian.
- * FURTADO, A.F.A., 1966, "Alteração de granitos em Angola", Garcia da Orta, vol. 14, nº 2, pp. 201-216.
- * FURTADO, A.F.A., 1968, "Alteração das rochas e formação dos solos", Agronomia Lusitana, vol. 25, t.6.
- * HOLMES, Arthur, 1980, Geología Física, 3.^a ed., trad. Montserrat Domingo de Miró (a partir do original inglés Principles of physical geology), Barcelona, Ediciones Omega, pp. 28-29.
- * KELLER, W. D., 1957, The principles of chemical weathering, Columbia, Lucas Brothers.
- * KUKAL, Z., 1990, "The rate of geological processes", Earth Science Review, vol. 28, pp. 1-284.
- * MELENDEZ, Bermudo, FUSTER, José M., 1991, Geología, 5.^a ed., Madrid, Editorial Paraninfo, pp. 219-240.

* PEDRO, G., 1968, "Distribution des principaux types d'altération chimique à la surface du globe", Géographie physique et géologie dynamique, Paris, vol. 10, f.5

Nota. Trabalho adaptado, a partir do original *Alteração das Rochas*, da autoria de Jorge Bonito, apresentado, em 1994, ao Departamento de Ciências da Terra da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.