

## RESUMO

Este trabalho trata dos produtos de alteração intempérica das rochas alcalinas do distrito de Lages, estado de Santa Catarina, que constituem a mais meridional ocorrência de bauxita conhecida no continente sul-americano. A alteração destas rochas sob condições adequadas de temperatura e disponibilidade de água levou à formação de um depósito de bauxita de  $5 \cdot 10^6$  tons com  $Al_2O_3 > 50\%$ .

As características mineralógicas e químicas dos diferentes horizontes do perfil de alteração, da rocha fresca até os níveis superiores, são descritas. Ocorre uma transformação da assembléia mineral primária (K-feldspato, nefelina e egrina) em uma assembléia secundária composta de gibbsita e goethita ou de halloisita/kaolinita e goethita. É um processo de laterização que envolve lixiviação da sílica e álcalis e concentração de alumina, como é demonstrado pelos cálculos isovolumétricos.

A análise destes dados sugere que a textura e estrutura da rocha, juntamente com a posição topográfica do perfil são os principais fatores que controlam o processo de bauxitização.

O depósito de Lages é comparado com outros depósitos similares desenvolvidos sobre rochas alcalinas como Poços de Caldas e Arkansas.

## ABSTRACT

This paper deals with the products of weathering of alkaline rocks of the Lages district, state of Santa Catarina, the southernmost known occurrence of bauxite in South America. The alteration of these rocks under suitable conditions of temperature and availability of water has led to the formation of a bauxite deposit of  $5 \cdot 10^6$  tons of  $Al_2O_3 > 50\%$ .

The chemical and mineralogical characteristics of the different horizons of the alteration profile from the fresh rock to the uppermost levels are here described. There is a transformation of the primary mineral assemblage of K-feldspar, nepheline and aegirine to a secondary one of gibbsite and goethite or halloysite/kaolinite and goethite. It is a lateritisation process involving leaching of silica and alkalis and concentration of alumina, as demonstrated by isovolumetric calculations.

The analysis of these data suggests that texture and structure of the rock and topographic site are the principal factors controlling the process of bauxitisation.

The bauxite deposit of Lages is compared with other similar deposits developed upon alkaline rocks like Poços de Caldas and Arkansas.

## INTRODUÇÃO

Ao norte da cidade de Lages, no estado de Santa Catarina, ocorrem rochas alcalinas no contexto de uma estrutura dômica conhecida como "Domo de Lages". Essas rochas foram assinaladas pela primeira vez na literatura em 1933, quando Otávio Barbosa descreveu amostras coletadas por Glycon de Paiva (BARBOSA, 1933). A partir daí alguns artigos foram publicados, dando conta do mapeamento geológico, da descrição das unidades litológicas presentes, da caracterização da estrutura regional e de dados geocronológicos. Entre estes, os mais importantes são os de LOCZY (1968), JOST (1967), AMARAL *et al.* (1967) e GUAZELLI & FEIJÓ (1970). Na década de setenta, apareceram na literatura geológica trabalhos sobre os

produtos de alteração supérgena das rochas alcalinas: LEPREVOST (1971) publicou dados sobre a composição química e mineralógica das bauxitas, LINDSTAED (1972) estudou o processo de alteração intempérica e, finalmente, SZUBERT & VERGARA (1975) avaliaram as reservas de minério. Estudos mais pormenorizados sobre os carbonatitos associados às rochas alcalinas são devidos a SCHEIBE (1979) e SCHEIBE & FORMOSO (1982). Recentemente foi publicada uma caracterização petrográfica mais detalhada das rochas alcalinas por SCHEIBE *et al.* (1984).

O objetivo do presente trabalho é o de caracterizar, no plano mineralógico e geoquímico, os diferentes horizontes que compõem os perfis de alteração sobre as rochas alcalinas e de

\* Depto. Geol. Geral, IG-USP  
Bolsista da FAPESP

determinar os fatores que regem o fenômeno de sua evolução supérgena. A análise destes dados culmina com uma hipótese sobre a história evolutiva da jazida, contribuindo assim para o domínio das investigações no campo da metalogênese supérgena.

## O MEIO FÍSICO

O estudo dos diferentes aspectos do meio físico informa sobre as condições nas quais se dá o processo de alteração intempélica.

### Geologia

#### *Traços regionais*

A intrusão do magma alcalino provocou o soerguimento dos estratos sedimentares da bacia do Paraná, de modo que toda a seqüência gondwânica aflora na região de Lages.

O domo, de forma grosseiramente circular com cerca de 1000 km<sup>2</sup> de superfície, situa-se a oeste da escarpa do Primeiro Planalto da Serra Geral (Grupo Estrada Nova), sendo circundado a norte, a leste e a sul pela escarpa do Segundo Planalto da Serra Geral (Formações Botucatu e Serra Geral). Em disposição concêntrica e mergulhos centrífugos, afloram no domo, da borda para o centro, os sedimentos da Formação Rio do Rastro, Grupo Passa Dois, Grupo Guatá e Grupo Itararé (Fig. 1). O contato entre as camadas sedimentares dos Grupos Guatá e Passa Dois parece ser o nível preferido pelos corpos alcalinos, de modo que estes se dispõem aproximadamente em um círculo com cerca de 25 km de diâmetro (SCHEIBE *et al.*, 1984), como se vê na Figura 1. Os principais corpos alcalinos são mais ou menos equidimensionais com poucos quilômetros de diâmetro; suas áreas de afloramento perfazem um total de 50 km<sup>2</sup>.

Nos contatos entre os sedimentos e as rochas alcalinas não foi observado metamorfismo de contato, embora sejam visíveis auréolas de cozimento, o que, na opinião de LOCZY (1968), prova o caráter hipobaissal da intrusão.

As estruturas mais conspícuas consistem num sistema anelar de falhamento de até 350 m de rejeito. O levantamento dómico teria precedido a deposição do arenito Botucatu, mas a fase principal da atividade vulcânica seria pós-Botucatu (LOCZY, 1968). Dados geocronológicos relativos a uma das intrusões indicam idade de 65 milhões de anos (AMARAL *et al.*, 1967).

#### *As rochas alcalinas*

SCHEIBE *et al.* (1984) distinguem quatro grandes grupos de rochas alcalinas no distrito de Lages:

- rochas alcalinas leucocráticas;
- rochas ultrabásico-alcalinas;
- carbonatitos e rochas associadas;
- brechas vulcânicas.

Este trabalho trata apenas da alteração das rochas alcalinas leucocráticas, que são, de longe, as dominantes. Estas, segundo os autores citados, são principalmente os fonólitos do Morro do Tributo, Serra do Cadeado e Serra da Chapada, e os fonólitos porfiríticos da Serra da Farinha Seca e de outros pequenos corpos. Um corpo de nefelina-sienito porfirítico aflora a leste (Cerro Alto) e três pequenos corpos de analcita-traquito são encontrados entre os fonólitos da Serra da Chapada e da Serra do Cadeado (Fig. 1).

Os fonólitos são rochas de granulação fina, cor cinza e fratura lisa. Constituem-se de uma matriz composta principalmente por cristais sub-milimétricos de feldspato alcalino, nefelina e um pouco de egirina, sodalita e albita. Os dois primeiros minerais mostram-se frequentemente alterados para natrolita. A egirina, no Morro do Tributo, apresenta crescimento poiquilítico de dimensão centimétrica, o que dá à rocha aspecto mosqueado. SCHEIBE *et al.* (1984) apresentam a mineralogia e a paragéneses destas rochas, destacando a presença de minerais raros, tais como eudialita, neptunita, lavenita e astrofilita.

Os fonólitos porfiríticos são rochas de matriz afanítica com textura tranqüilóide, constituídas por feldspato alcalino, nefelina e, subordinadamente, por egirina e sodalita. Fenocristais prismáticos de feldspato alcalino, mostrando geminação Carlsbad, e de nefelina idiomórfica, mostrando clivagem basal conspícua, atingem dimensões milimétricas e mostram-se muitas vezes alterados para natrolita e cancrinita.

Os nefelina-sienitos porfiríticos apresentam essencialmente a mesma mineralogia dos fonólitos, mas a matriz é fanerítica e os fenocristais centimétricos. No plano mineralógico, a diferença marcante é a presença de piroxênio cálcico em muito maior quantidade que egirina (SCHEIBE *et al.*, 1984).

Os pequenos corpos de analcita-traquito constituem-se principalmente por feldspato alcalino e analcita e, do ponto de vista químico, são rochas mais ácidas que as anteriormente descritas.

### Relevo

A região de Lages situa-se a altitudes médias em torno de 900 m, isto é, encontra-se um pouco rebaixada em relação aos altos da escarpa do Segundo Planalto da Serra Geral que, na

região, atingem altitudes sempre superiores a 1000 m. No entanto, na área do complexo encontram-se elevações, sobretudo relacionadas aos corpos alcalinos, que podem chegar até 1220 m, como é o caso do Morro do Tributo. As Seras da Chapada, Cadeado e Cerro Alto estão a altitudes de cerca de 1000 m e a Serra da Farinha Seca, parcialmente constituída de diabásio, tem seus picos a 960 m.

A drenagem principal é representada pelo rio Canoas que ocorre no limite norte do maciço no sentido leste-oeste. Seus principais afluentes são os rios dos Índios e do Tributo, cujas cabeceiras estão na porção sul do maciço. Localmente a drenagem é controlada pelos afloramentos das rochas alcalinas ou por pequenas estruturas dômicas relacionadas provavelmente a corpos alcalinos em profundidade (LINDSTAEDT, 1972); neste caso, o padrão é radial e anelar. Na parte norte da área observa-se um padrão paralelo na drenagem que aí é controlada por sistemas de falhamentos retilíneos.

### Clima e Vegetação

Dados compilados por SCHEIBE (1979) indicam para a região de Lages temperaturas médias anuais em torno de 15°C, oscilando entre 26 e 28°C (média das máximas em janeiro) e -8°C (mínima absoluta em julho).

A precipitação média anual é da ordem de 1500 mm, bem distribuídos durante o ano todo, mas ligeiramente concentrados nos meses de agosto, setembro e outubro, sendo os meses mais secos os de maio, junho e julho.

Em vista destes dados, o clima da área classifica-se no tipo Cfb de Koeppen: mesotérmico, sempre úmido, com verões frescos.

A vegetação é principalmente de dois tipos (ALONSO, 1977 *apud* SCHEIBE, 1979): floresta sub-caducifolia subtropical com *Araucaria angustifolia* e campo. Segundo este autor, a floresta estaria em equilíbrio com o clima atual, enquanto que as áreas de campo seriam remanescentes de um clima passado, de caráter mais seco.

Na parte norte da área, sobretudo na Serra da Farinha Seca, grandes extensões de terra foram desmatadas e reflorestadas com *Pinus eliotti*.

## ALTERAÇÃO DAS ROCHAS ALCALINAS DA SERRA DA FARINHA SECA E FORMAÇÃO DA JAZIDA DE BAUXITA

As jazidas de bauxita do distrito de Lages estão praticamente restritas aos topos da Serra

da Farinha Seca. Foram, portanto, os fonólitos porfíricos que, em condições adequadas de drenagem, responderam aos agentes intempérricos transformando-se em material essencialmente composto por hidróxidos de alumínio. Para o esclarecimento do mecanismo destas transformações, foram descritos e amostrados dezenas de poços e algumas trincheiras em diferentes posições topográficas. Estas amostras foram analisadas quimicamente e seu conteúdo mineralógico foi determinado. A interpretação dos resultados obtidos é o principal objetivo deste capítulo.

### As Facies de Alteração Presentes

Distinguem-se nos perfis de alteração quatro diferentes tipos de materiais que, do ponto de vista macroscópico, serão descritos a seguir.

a. *Rocha fresca*: fonólito porfírico já caracterizado no capítulo anterior. Esta facies é dificilmente encontradas de forma maciça em profundidades inferiores a vinte metros. Os exemplares descritos provém de fragmentos decimétricos arredondados, compostos por um núcleo de rocha sã envolvido por um córtex de material alterado. O material como um todo faz parte do horizonte aqui denominado rocha alterada.

b. *Rocha alterada*: trata-se de material rochoso, mas de coesão e densidade inferiores à da rocha sã. Macroscopicamente, o aspecto que mais chama a atenção é a mudança de cor, que passa de um cinza escuro esverdeado para tons de cinza claro, bege e amarelo. Os fenocristais de nefelina e feldspato alcalino são bem visíveis, às vezes ainda frescos, às vezes já transformados num material pulverulento esbranquiçado. A transição da rocha fresca para a rocha alterada se dá gradualmente, expresso de um processo que tem início nas fraturas da rocha, isolando núcleos frescos e que, à medida em que se intensifica, atinge e homogeneiza todo o horizonte.

c. *Bauxita*: material duro, coeso, áspero ao tato, de coloração predominantemente amarelada. É leve, poroso e conserva geralmente bem a estrutura da rocha. Às vezes apresenta-se recortado por veios brancos sub-milimétricos de gibbsita pura. Não foram observadas as texturas oolíticas descritas por SZUBERT & VERGARA (1975). A bauxita pode ocorrer diretamente em contato com a rocha alterada ou com os níveis argilosos descritos a seguir. De maneira geral, nos perfis onde ocorre bauxita, ela é predominante no topo do perfil.

d. *Argila*: é uma fácies geralmente friável, de granulação fina e de tonalidades róseas, ou esbranquiçadas. Às vezes são visíveis estruturas reliquias da rocha. A densidade deste material é um pouco mais alta que a da bauxita. Apresenta freqüentemente concentrações enegrecidas de manganês sob forma de manchas esparsas, películas atapetando superfícies de descontinuidade ou mesmo veios de dimensões milimétricas a até centimétricas.

### Distribuição das Facies no Espaço

Na Serra da Farinha Seca foram selecionadas quatro áreas, em diferentes contextos topográficos, com a finalidade de examinar a dependência deste fator na estruturação dos perfis de alteração.

a. *Área Parisotto*: nesta área (Fig. 2) foram descritas duas toposseqüências (I e II), abrangendo dez poços. A distribuição das facies na toposseqüência I é mostrada na Figura 3, onde se vê claramente que a bauxita só aparece nas porções mais elevadas do relevo, intercalada com material argiloso. Na porção superior da encosta, representada pelo poço I-4, ocorre um delgado nível de bauxita de origem coluvionar sobre a rocha alterada. Mais abaixo, nos setores onde a erosão predomina sobre a alteração, ocorre rocha alterada sem qualquer cobertura. Na toposseqüência II (Fig. 4), os poços II-2 e II-3, em posição de topo, apresentam perfis bauxíticos *in situ*; o perfil II-1, em posição alta na encosta, compõe-se de bauxita *in situ* sobre rocha alterada e é recoberto por cerca de um metro de bauxita coluvionar; o perfil II-4, em posição de encosta íngreme, é formado essencialmente por bauxita coluvionar sobre rocha alterada.

b. *Área Pelanda*: esta área (Fig. 2) situa-se em posição topográfica de topo e constitui-se num depósito de bauxita que vem sendo lavrado atualmente. Foram amostradas duas frentes de lava (IV-1 e LG-III) e dois poços (IV-2 e V-1). Nas frentes de lava aflora bauxita com intercalações eventuais de material argiloso. Nos poços, onde a rocha alterada não foi atingida apesar das profundidades de 11 e 21 m, ocorre bauxita mais ou menos misturada com argila (Fig. 5).

c. *Área Momm*: como na área Pelanda, existe aqui (Fig. 2) um pequeno depósito em fase de lava. O perfil amostrado (Fig. 6) mostra bauxita recoberta por um nível mais argiloso em contato com a rocha alterada.

d. *Área Faxinal*: esta área (Fig. 2) compreende três manchas de rochas alcalinas no limite oeste da Serra da Farinha Seca. É uma área

mais baixa que as anteriores e os dois poços examinados encontram-se próximos do nível de drenagem local. Nestes poços não há bauxita, sendo a rocha alterada diretamente recoberta por uma camada de argila (Fig. 7). É característico desta área o fenômeno de concrecionamento incipiente das argilas.

Da descrição acima ficam caracterizados três tipos de sítios topográficos com seus respectivos perfis:

— topos com bauxita *in situ*, mais ou menos intercalada com material argiloso; representam sítios bem drenados onde a alteração, de tendência à alitização, prevalece sobre a erosão;

— encostas íngremes, onde a erosão compete com a alteração, resultando em perfis pouco desenvolvidos, recobertos ou não por um colúvio de pequena espessura; a tendência da alteração é em direção à monossilização, provavelmente em decorrência da menor infiltração de água nestes sítios, em comparação com os topos aplanados;

— baixadas sem ocorrências de bauxita; aqui a alteração prevalece sobre a erosão, como nos topos, mas tem caráter de monossilização em consequência do relativo impedimento da drenagem interna dos perfis devido à proximidade do nível d'água.

### Mineralogia das Facies

No intuito de caracterizar as fases presentes em cada tipo de material, foram efetuadas determinações mineralógicas por difração de raios X para cerca de uma centena de amostras e por análise termo-diferencial para algumas amostras selecionadas. Foram submetidas à difração de raios X não só amostras totais moídas mas, em alguns casos, frações granulométricas selecionadas da amostra original, principalmente a fração argila (< 2 $\mu$ m). Também foram analisados aos raios X veios ou concentrações de certos minerais que puderam ser distinguidos macroscopicamente e separados manualmente.

Quase todas as amostras estudadas foram laminadas, após tratamento com resina sintética, em caso de necessidade de endurecimento prévio. As lâminas foram examinadas ao microscópio óptico, onde puderam ser observadas as relações genéticas entre os minerais hipógenos e aqueles resultantes da alteração supérgena.

a. *Composição mineralógica de cada horizonte*. Os fonólitos porfíricos da Serra da Farinha Seca já foram descritos, do ponto de vista petrográfico, por LINDSTAED (1972), SZUBERT & VERGARA (1975) e por SHEIBAL *et al.* (1984). No item II.1.b foram apresenta-

dos dados sobre a composição mineralógica e a textura destas rochas.

O início da alteração supérgena é evidenciado pelo aparecimento da goethita que substitui as egirinas, imprimindo uma tonalidade alaranjada a esse mineral, a partir do centro do prisma, em direção às bordas. É comum a ocorrência, na rocha alterada, de egirina com as extremidades verdes e, portanto, frescas e o centro totalmente substituído por goethita. Com relação aos feldspatos, seja como fenocristais, seja como pequenas ripas na matriz, o padrão de corrosão é totalmente outro: é ao longo das clivagens e fraturas que ocorre a transformação feldspato-gibbsita. Não foi possível observar o início da alteração da nefelina provavelmente porque esse fenômeno se completa rapidamente, tendo como resultado também a gibbsita. Os horizontes de rocha alterada são freqüentemente recortados por veios sub-milimétricos de gibbsita bem cristalizada, que cresce perpendicularmente às paredes das fraturas.

A evolução exposta acima descreve a rocha alterada como produto do processo de alitização dos minerais primários. No entanto, em certas condições topográficas, conforme já foi visto no item 2, a rocha fresca pode evoluir para material argiloso, e, neste caso, o aspecto das lâminas delgadas da rocha alterada é bem diferente. Enquanto que no caso anterior a estrutura original da rocha era preservada, através da epigenização dos feldspatos e nefelina por gibbsita, aqui os minerais primários dão lugar a uma massa de argila e goethita que não lembra em nada a textura traquitóide original da rocha. Os fenocristais de feldspato apresentam-se manchados e invadidos, preferencialmente ao longo de seus planos de clivagem, por um material isotrópico. Veios de material argiloso microcristalino de birrefringência bem baixa aparecem recortando as amostras. O controle difratométrico da rocha alterada indica que a argila presente no início da alteração é principalmente a halloisita  $4H_2O$ .

Os difratogramas das bauxitas revelam que este material é constituído essencialmente por gibbsita e goethita. Nos diagramas de ATD aparecem bem caracterizados os picos endotérmicos da gibbsita: um pico principal a  $310^\circ C$  e dois subsidiários no intervalo de  $250$  a  $300^\circ C$  e a  $525^\circ C$ . Aparece também o pico endotérmico característico da goethita a  $350^\circ C$ , o que significa, segundo MACKENZIE (1957) que este mineral apresenta-se bem cristalizado. Quando a fração argila foi separada, ela mostrou aos raios X, de maneira sistemática, além da presença de gibbsita, a presença de boehmita, donde se conclui que este mineral deve estar sempre presente

nas bauxitas, em pequenas quantidades e em granulção muito fina. Nesta fração aparecem ainda traços de um mineral de argila que, na maior parte dos casos, é caolinita. A caolinita foi identificada através de seus espaçamentos interplanares principais de 7.15 e a 3.56A. Distingue-se da halloisita  $2H_2O$  por não expandir o espaçamento basal a 10A quando tratada com formamida (ROSS *et al.*, 1983). Com a finalidade de pesquisar melhor a composição dos óxidos de ferro, algumas amostras de bauxita foram submetidas a tratamento com soda a quente, que colocou em solução os silicatos secundários e os óxidos de alumínio. O resíduo deste ataque evidenciou aos raios X quase que unicamente goethita, acompanhada por traços de zircão e anatásio. Em algumas amostras, pequenos picos correspondentes a distâncias interplanares de 3.66A e 2.51A sugeriram a presença de hematita. Se este mineral de fato estiver presente, é em quantidades baixas. Quanto à textura, nas bauxitas a gibbsita apresenta um aspecto rendado que lembra o padrão de alteração dos feldspatos, revelado nas amostras de rocha alterada. A goethita é microcristalina e aparece acumulada em pequenos prismas, substituindo pseudomorficamente a egirina, o que contribui para que a estrutura original da rocha seja reconhecível. O material como um todo é recortado por veios de gibbsita bem cristalizada.

As argilas constituem o material de observação mais difícil ao microscópio óptico. Nestas amostras vêem-se dificilmente traços da estrutura original da rocha; o material argiloso parece muito misturado com os hidróxidos de ferro. Uma feição característica do horizonte argiloso é a concentração de óxidos de manganês misturados com argila, seja em veios, seja em acumulações mais equidimensionais. Dados difratométricos indicaram que a argila presente é ora caolinita, ora halloisita, ora ambas; o óxido de manganês é a litioforita e o óxido de ferro é a goethita. Nos diagramas de ATD a halloisita é representada por um pico endotérmico em torno de  $100^\circ C$  e outro a  $560^\circ C$ . O pico exotérmico a  $980^\circ C$  não foi pesquisado devido a limitações da aparelhagem.

Do que foi exposto acima, parece claro que a natureza do argilomineral varia em função das fases que o acompanham. Assim, de 60 amostras onde ele foi constatado, sua distribuição se dá conforme a Tabela 1.

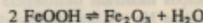
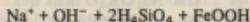
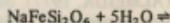
A halloisita parece, portanto, característica das fases iniciais da alteração, enquanto que a caolinita acompanha preferencialmente materiais mais evoluídos como a bauxita. Aliás, mesmo quando a caolinita é encontrada no material argiloso, ela ocorre sempre associada à gibbsita.

Tabela 1 – Distribuição da Caolinita e da Hallosita 4H<sub>2</sub>O na Rocha Alterada, Argila e Bauxita

	Caolinita	Hallosita 4H <sub>2</sub> O
Rocha alterada	12%	88%
Argila	43%	57%
Bauxita	75%	25%

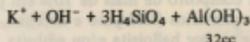
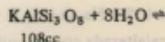
A presença de hallosita na raiz dos perfis de alteração em zona tropical já foi constatada por FUJIMORI (1975) nas alteritas de Salvador e por MONIZ (1969) em Poços de Caldas.

b. *Filiações mineralógicas.* A goethita provém essencialmente dos piroxênios, por lixiviação do sódio, cálcio, magnésio e silício, restando apenas o ferro que se cristaliza como óxido hidratado. Um processo incipiente de desidratação da goethita pode ter originado a hematita. As equações abaixo indicam estas transformações:



O anatásio deriva provavelmente da titanita, que ocorre na rocha associada à egirina.

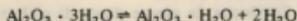
A gibbsita é formada diretamente pela alteração do feldspato alcalino e da nefelina por dessilicificação, lixiviação das bases e cristalização *in situ* do alumínio. Neste caso, a perda de matéria é significativa, do que decorre a gênese de um material muito poroso, cuja densidade aparente pode chegar a ser inferior a um. Este fenômeno está expresso pela equação abaixo, que vem acompanhada dos volumes molares das fases envolvidas:



Os veios de gibbsita que recortam os níveis alterados têm certamente outra origem. Devem ter sido formados por precipitação de  $\text{Al}(\text{OH})_3$  a partir de soluções que percolaram o perfil de alto a baixo. Esse alumínio em solução deve ter sido proveniente da destabilização de minerais aluminosos do topo do perfil, sob influência da matéria orgânica que abaixa o pH do meio e fornece íons complexantes.

Com o aumento do pH nos níveis inferior do perfil, ocorrem condições propícias para a precipitação do  $\text{Al}(\text{OH})_3$ .

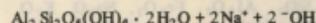
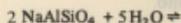
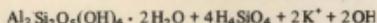
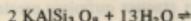
A boehmita deriva da gibbsita por desidratação:



A paragênese gibbsita-boehmita é estável na ausência de H<sub>2</sub>O como uma fase independente (CHESWORTH, 1972). Isso explica porque a boehmita é principalmente encontrada nos níveis superiores dos perfis, onde a umidade é menos permanente.

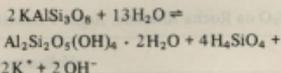
O problema da gênese da caolinita e da hallosita 4H<sub>2</sub>O é o mais complexo e não pôde ser inteiramente esclarecido ao nível deste trabalho. No entanto, observações micromorfológicas e a distribuição destes dois minerais nas diferentes facies de alteração sugerem as seguintes tentativas de interpretação:

– a hallosita provém diretamente da alteração do feldspato alcalino e da nefelina em condições de drenagem insuficiente para lixiviação total da sílica, segundo as equações:



Esta hipótese é sustentada pela observação ao microscópio dos fenocristais de feldspato avidos ao longo de suas clivagens pela hallosita. É também sugerida pela estreita associação rocha alterada-hallosita, conforme mostra a Tabela 1.

– a caolinita origina-se pela ressilicificação da gibbsita; este último mineral, ao entrar em contato com soluções ricas em sílica proveniente do ataque dos minerais primários, reage com ela e disto resulta a cristalização da caolinita, segundo a equação:



Um argumento a favor desta hipótese é o fato de a caolinita ocorrer sempre associada à gibbsita, seja no horizonte argiloso, seja na bauxita. No entanto, ao microscópio, não é possível observar a substituição da gibbsita pela caolinita. Isto pode ser devido à fina granulação da gibbsita e ao fenômeno de destruição completa das estruturas primitivas, acompanhado da mistura da caolinita com ferro. A demonstração experimental desta possibilidade está exposta em KIMPE *et al.* (1964).

Evidências da gênese direta da gibbsita a partir de silicatos primários e de formação de caolinita por ressilificação de gibbsita são mencionados na literatura por diversos autores, entre os quais GOLDMAN & TRACEY Jr. (1946), GORDON *et al.* (1958), DELVIGNE (1965), MONIZ (1969), MONIZ *et al.* (1972) e ALMEIDA (1977).

Quanto à ordem de alteração dos minerais, evidências micromorfológicas revelaram que entre os félsicos é a nefelina que se altera primeiro, mais ou menos ao mesmo tempo que a egirina. O feldspato alcalino é o último mineral a se alterar.

Uma última menção a ser feita neste item diz respeito à possibilidade de existência de fases amorfas intermediárias entre os minerais primários e os minerais secundários. De difícil observação ao microscópio e insusceptível de tratamento aos raios X, estas fases só serão evidenciadas por ataques químicos parciais e serão tratadas mais adiante.

### Quimismo

Foram analisadas 102 amostras para  $\text{H}_2\text{O}^+$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$  e  $\text{MnO}$ , das quais 40 também para  $\text{TiO}_2$ . A sílica foi dosada por gravimetria, o titânio por colorimetria e os demais elementos por absorção atômica. Estas rochas representam materiais encontrados nos vários níveis do perfil, da rocha à bauxita.

Para a dosagem das fases amorfas foram selecionadas 4 amostras de várias posições do perfil de alteração e procedeu-se segundo o método preconizado por SEGALIN, 1968.

O cálculo do balanço geoquímico foi efetuado para 96 amostras, através da avaliação da quantidade de cada óxido presente em 100cc da amostra, o que é obtido multiplicando o teor

ponderal do óxido pela densidade aparente da amostra (MILLOT & BONIFAS, 1955).

### Composição química da rocha fresca

A Tabela 2 mostra a composição química de 7 exemplares de fonólitos porfiríticos. São rochas intermediárias, ricas em  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e álcalis e com baixo teor de ferro. Nestes fonólitos o teor de  $\text{Na}_2\text{O}$  é sempre bem elevado, podendo superar 10%, o teor em  $\text{K}_2\text{O}$  é mais baixo, mas situa-se sempre para além dos 4%. O teor de  $\text{CaO}$  raramente atinge 2%.

Com relação aos elementos traços, os poucos dados disponíveis na literatura e presentes na Tabela 2 indicam que o La, o Ga e o Zr ocorrem em quantidades semelhantes ao clark, o Y, V e Zn em quantidades inferiores e o Be, Pb, Nb, Mo, Sr, Ba, e Cl em quantidades superiores.

Comparando com as rochas alcalinas de Poços de Caldas (ALMEIDA, 1977), os fonólitos da Farinha Seca apresentam 2 diferenças marcantes: a razão  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  mais alta e o ferro total mais baixo. No entanto, os fonólitos de ambos os maciços mostram deficiência em Al em relação à soma  $\text{Na} + \text{K}$  em número de moléculas, podendo ser, portanto, classificados como apaiticos (SCHEIBE *et al.*, 1984).

### Composição química dos níveis alterados

O critério utilizado para definir os limites entre rocha fresca/alterada, material argiloso e bauxita foi o seguinte:

rocha fresca/alterada	$\text{SiO}_2 > 15\%$ e $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} > 1,5\%$
material argiloso	$\text{SiO}_2 > 15\%$ e $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 1,5\%$
bauxita	$\text{SiO}_2 < 15\%$ e $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 1,5\%$

A rocha fresca/alterada corresponde a um material composto de mais de 10% em peso de minerais primários (feldspato e nefelina, principalmente) e por halloisita e/ou gibbsita. O material argiloso contém menos de 10% em peso de minerais primários e mais de 35% de halloisita ou caolinita; pode conter gibbsita. A bauxita é um material composto principalmente por gibbsita, com menos de 10% de minerais primários e menos de 35% de caolinita.

As Tabelas 3, 4 e 5 mostram a composição química de cada facies expressa através da média, desvio padrão, máximo e mínimo para cada óxido e para a densidade aparente.

TABELA 2 - Composição Química dos Fonólitos Porfíricos

% em peso dos óxidos

	LA-01 <sup>(1)</sup>	LA-02 <sup>(1)</sup>	MCM-1 <sup>(2)</sup>	I 1.15 <sup>(3)</sup>	I 5.6 <sup>(3)</sup>	II 3.5 <sup>(3)</sup>	III 2.7 <sup>(3)</sup>	Média	Poços <sup>(4)</sup>
SiO <sub>2</sub>	51.60	54.50	49.49	50.20	49.90	49.50	52.20	51.05	53.50
TiO <sub>2</sub>	0.32	0.45	0.03	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.27	0.76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.10	22.20	22.33	23.32	22.66	24.07	23.69	22.91	20.10
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	3.36	3.16	3.39	3.40	3.10	3.20	2.80	3.20	6.01
MnO	0.19	0.10	0.20	0.21	0.20	0.20	0.17	0.18	0.22
MgO	0.36	0.39	0.34	0.17	0.16	0.15	0.11	0.24	0.28
CaO	1.60	2.00	2.06	1.62	1.69	1.55	1.02	1.65	1.72
K <sub>2</sub> O	5.23	7.37	5.57	4.78	4.45	4.75	4.50	5.24	7.79
Na <sub>2</sub> O	9.22	6.52	10.43	7.28	11.13	11.78	8.98	9.33	6.59
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.07	0.11	0.10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.09	0.13
H <sub>2</sub> O*	5.27	2.31	0.94	6.40	4.70	4.00	3.60	3.88	1.69
densidade	n.d.	n.d.	2.41	2.41	2.49	2.49	2.72	2.50	

ppm dos elementos										
Cu			5							10
Zr	295	220	112							
Y			5							
V			10							
Be			20							
Pb			52							22
Nb			112							
Mo			5							
Zn			tr							195
La			20							
Ga			14							
Sr	1100	2200								1030
Ba	1000	1600								
Cl		2000								

(1) Análise feita no Geosol (SCHEIBE, com. pessoal)

(2) Análise citada em LINDSTAEED (1972)

(3) Análises feitas no Lab. Geoquímica - USP

(4) Média de 2 análises de fonólito citada em ALMEIDA (1977)

\* Fe total calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

TABELA 3 - Composição Química (% em peso) da Facies Rocha Fresca/Alterada (51 amostras)

	Min	Max	$\bar{x}$	$\sigma$
densidade	0,99	2,72	1,67	0,41
H <sub>2</sub> O*	3,60	23,07	12,16	3,89
SiO <sub>2</sub>	16,49	52,20	42,71	7,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22,33	50,87	33,57	6,14
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,00	6,99	4,20	0,80
Na <sub>2</sub> O	0,07	11,87	1,98	2,92
K <sub>2</sub> O	0,75	6,36	4,39	1,27
CaO	0,04	2,06	0,46	0,46
MgO	0,03	1,00	0,18	0,16
MnO	0,05	0,66	0,27	0,11

Min - valor mínimo

Máx - valor máximo

$\bar{x}$  - média

$\sigma$  - desvio padrão

TABELA 4 – Composição Química (% em peso) da Facies Material Argiloso (21 amostras)

	Min	Máx	$\bar{x}$	$\sigma$
densidade	0.98	1.75	1.35	0.25
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	14.57	25.25	19.05	3.33
SiO <sub>2</sub>	15.49	41.96	30.61	8.47
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	37.69	51.30	44.01	4.76
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.24	7.89	5.03	1.71
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.36	0.17	0.11
K <sub>2</sub> O	0.04	1.44	0.41	0.42
CaO	0.01	0.72	0.19	0.18
MgO	0.02	0.39	0.12	0.19
MnO	0.04	3.31	0.39	0.68

Min – valor mínimo

Máx – valor máximo

 $\bar{x}$  – média $\sigma$  – desvio padrão

TABELA 5 – Composição Química (% em peso) da Facies Bauxita (30 amostras)

	Min	Máx	$\bar{x}$	$\sigma$
densidade	0.85	1.60	1.17	0.18
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	25.50	31.82	28.73	1.58
SiO <sub>2</sub>	1.98	14.15	6.22	3.25
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53.25	61.84	58.08	1.94
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.14	8.52	6.19	1.41
Na <sub>2</sub> O	0.01	0.55	0.17	0.14
K <sub>2</sub> O	0.01	0.44	0.11	0.13
CaO	0.04	0.43	0.20	0.10
MgO	0.01	0.18	0.05	0.05
MnO	0.02	1.09	0.19	0.28

Min – valor mínimo

Máx – valor máximo

 $\bar{x}$  – média $\sigma$  – desvio-padrão

A facies rocha fresca/alterada tem composição não muito diferentes da média para as rochas frescas (Tabela 2), apresentando como característica marcante o grande empobrecimento em Na<sub>2</sub>O e CaO e o enriquecimento em Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. O horizonte de material argiloso é composto essencialmente por sílica e alumina e, subordinadamente, por ferro. Na bauxita, a alumina domina largamente sobre os outros óxidos e o teor em H<sub>2</sub>O<sup>+</sup> bem elevado evidencia a presença de minerais fortemente hidratados.

#### Tendências gerais da alteração

Os dados químicos apresentados evidenciam que a alteração dos fonólitos se dá com perda de SiO<sub>2</sub> (intensa no caso da formação de bauxita e moderada no caso de material argiloso), perda intensa dos álcalis (em ambos os casos) e concentração de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (mais intensa nas bauxitas). Esse comportamento dos elementos maiores é característico da alteração laterítica.

Os dados da literatura referentes aos elementos — traços na argila e na bauxita (LINDS-TAED, 1972) mostram que a argila não parece se enriquecer em relação à rocha fresca em nenhum dos elementos dosados, enquanto que a bauxita mostra teores sensivelmente mais elevados que a rocha fresca em Cu, Zr, Y, V, Nb e Ga.

Foram calculados os coeficientes de correlação Pearson entre as variáveis para 102 amostras, sendo os resultados apresentados na Tabela 6. É possível distinguir dois grupos de óxidos de comportamento geoquímico oposto: os residuais,  $Fe_2O_3$  e  $Al_2O_3$  (correlação positiva entre si e negativa com os demais) e os solúveis,  $SiO_2$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$ ,  $CaO$  e  $MgO$  (correlação positiva entre si e negativa com os demais). O MnO não apresenta correlações significativas com nenhum outro elemento, mas seu comportamento é ligeiramente mais parecido com os solúveis que com os residuais. A densidade aparente, parâmetro que reflete sensivelmente o grau de alteração, fica incluída no grupo dos solúveis. A água estrutural cresce de importância quanto mais evoluído é o material e compõe o grupo dos residuais.

As relações acima apontadas são claramente percebidas quando se projetam os coeficientes de correlação de cada variável em função dos coeficientes de correlação das 2 variáveis que apresentam entre si o mais alto coeficiente de correlação negativo (Fig. 8). No caso, são a sílica e a alumina que se comportam dessa forma (Fig. 9), o que é consequência do fato de serem esses 2 óxidos os mais importantes de um conjunto de variáveis de soma constante e de eles apresentarem comportamento contrastante.

A composição química das 3 facies consideradas foi expressa, em termos de  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ , seus componentes principais, no diagrama triangular da Figura 10. Segundo os critérios propostos por SCHELLMANN (1981), para a conceituação de laterização em diversos graus, fica claro a partir da análise do diagrama que as amostras de rocha fresca/alterada pertencem ao domínio da caolinização, as amostras de material argiloso são produto de laterização fraca e média, e, finalmente, as bauxitas representam um processo de laterização forte.

O estudo da distribuição dos teores dos principais óxidos em cada uma das facies consideradas evidenciou certas regularidades, com relação aos parâmetros *dispersão dos teores em torno da média e assimetria*. A Tabela 7 mostra que para os elementos solúveis  $SiO_2$  e  $K_2O$ , cujas médias caem da rocha fresca/alterada para a bauxita, a assimetria da distribuição dos teo-

res passa de acentuadamente negativa para acentuadamente positiva e a dispersão dos teores aumenta. No caso dos elementos pouco móveis,  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$ , acontece o contrário: a distribuição passa de assimétrica bastante positiva na rocha fresca/alterada para aproximadamente simétrica na bauxita e a dispersão dos teores diminui.

As caudas das curvas referentes à  $SiO_2$  e  $K_2O$  na população das bauxitas representam teores mais altos que a moda, assim como as caudas referentes ao  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  na mesma população representam teores mais baixos que a moda. Essas feições refletem complementarmente o mesmo fato, qual seja, o de restarem em poucas amostras de bauxitas núcleos que resistiram mais à alteração. Por outro lado, a ausência de assimetria ou pequeno grau de assimetria, como constatado para as distribuições do  $Al_2O_3$  e  $Fe_2O_3$  na bauxita, corresponde sempre a uma baixa dispersão de teores, conforme já assinalado por AHRENS (1966).

As regularidades que acabam de ser comentadas já tinham sido verificadas pela autora para a transição dunito alterado — laterita com relação às amostras do maciço ultramáfico de Santa Fé (OLIVEIRA, 1978) e é possível que constituam uma feição geral do processo de alteração supérgena das rochas, cujo significado mais profundo ainda não foi compreendido.

#### *Composição mineralógica das facies de alteração*

A Figura 11 representa um fragmento da topossequência I, composto pelos poços I-2, I-3 e I-4, para cujas amostras foi calculada a composição mineralógica aproximada a partir da análise química e do conhecimento da composição mineralógica obtido por difração de raios X.

Considerando-se que, para amostras de material argiloso e de bauxita, o alumínio, além de estar contido na hallosita e na gibbsita, também entra no retículo da goethita, foi necessário avaliar em que proporção isto acontece. Esta avaliação foi feita a partir da determinação do desvio do pico correspondente ao espaçamento d (111), segundo o que foi proposto por FITZPATRICK & SCHWERTMANN (1982). Os resultados destas determinações, assim como as estimativas do grau de cristalinidade da goethita (expressa pela largura do pico 111 medida à meia altura) constam da Tabela 8. A análise desta tabela mostra que na bauxita a goethita contém em média 23,3% molar de  $AlOOH$ , enquanto que a goethita que acompanha o material argiloso contém apenas 21,2% molar.

TABELA 6 – Correlação entre os Óxidos (102 amostras)

H <sub>2</sub> O*	-0,62								
SiO <sub>2</sub>	+0,56	-0,98							
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,64	+0,98	-0,98						
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0,42	+0,67	-0,70	+0,63					
Na <sub>2</sub> O	+0,78	-0,53	+0,42	-0,53	-0,34				
K <sub>2</sub> O	+0,56	-0,84	+0,81	-0,86	-0,51	+0,45			
CaO	+0,71	-0,45	+0,35	-0,47	-0,23	+0,87	+0,40		
MgO	+0,20	-0,45	+0,49	-0,49	-0,40	+0,17	+0,36	+0,15	
MnO	+0,06	-0,14	+0,16	-0,15	-0,21	-0,01	0,00	-0,03	+0,15
	DA	H <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO

Os valores sublinhados significam correlações não significativas para uma probabilidade de 0,001.

TABELA 7 – Parâmetros Estatísticos para a SiO<sub>2</sub>, K<sub>2</sub>O, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e FeO<sub>3</sub> nas Facies Rocha Fresca/Alterada e Bauxita

	Rocha Fresca/Alterada			Bauxita		
	$\bar{x}$	<i>i</i>	ass.	$\bar{x}$	<i>i</i>	ass.
SiO <sub>2</sub>	42.71	0.18	-1.96	30.61	0.52	+0.76
K <sub>2</sub> O	4.39	0.29	-0.99	0.41	1.18	+1.93
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	33.57	0.18	+0.88	44.01	0.03	+0.067
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.20	0.19	+0.95	5.03	0.13	-0.017

$\bar{x}$  = média  
*i* = dispersão =  $\bar{x}/\sigma$   
 ass. = assimetria

TABELA 8 – Teor de Al na Goethita e Cristalinidade

Amostra	Tipo de Material	Molar Al na Goeth	Cristalinidade*
I 1.5	bauxita	25.4	0.52
V 1.4	bauxita	22.3	0.42
II 2.2	bauxita	22.3	0.40
I 2.5	bauxita	22.3	0.40
I 2.3	bauxita	23.5	0.45
II 3.2	bauxita	23.5	0.45
IV 1.3	bauxita	23.5	0.40
IV 1.2	bauxita	23.5	0.42
V 1.2	bauxita	23.5	0.45
Média		23.3	0.43
I 1.8	material argiloso	15.8	0.42
V 1.8	material argiloso	23.5	0.42
II 2.5	material argiloso	20.8	0.45
IV 2.3	material argiloso	24.7	0.50
Média		21.2	0.44

\* Vide Texto

Estes valores concordam com os obtidos por FITZPATRICK & SCHWERTMANN (1982) (goethita de bauxitas entre 20 e 25% molar de  $AlOOH$  e goethita de material argiloso entre 13 e 21% molar de  $AlOOH$ ). Esta diferença é provavelmente devida ao fato de que as primeiras se formaram em ambiente de maior disponibilidade de Al que as últimas, o que, aliás, já foi assinalado pelos autores citados e por DIDIER (1983). O grau de cristalinidade das goethitas nas bauxitas parece semelhante ao encontrado nas goethitas do material argiloso, resultado que também está de acordo com o encontrado pelos autores supra citados.

Para os poços I-2 e I-3, as discontinuidades existentes entre o nível de rocha alterada e o nível de bauxita mais ou menos argilosa devem-se ao fato de que as amostras de rocha alterada não foram coletadas *in situ* no perfil, mas provêm de fragmentos rolados encontrados fora do poço e representam um dos momentos do estágio inicial da alteração e não o momento imediatamente anterior representado pelas amostras de bauxita que, no desenho, aparecem sobrejacentes.

O cálculo da alumina aproveitável consta da Figura 11 como teor de  $Al_2O_3$  na gibbsita, descontando-se a quantidade de ferro aí contida. As amostras classificadas como bauxita apresentam teores de  $Al_2O_3$  aproveitável sempre maior que 42%, podendo chegar até mais de 50%, situação em que o minério é considerado da mais alta qualidade.

#### As fases amorfas existentes

Com a finalidade de determinar a existência ou não de fases amorfas nos materiais estudados e avaliar sua quantidade, três amostras (rocha alterada, bauxita e argila) foram submetidas a ataques químicos parciais, conforme o método proposto por SEGALLEN (1968). As curvas de extração de amorfos mostradas nas Figuras 12, 13 e 14 indicam que para cada facies a quantidade  $Fe_2O_3$ ,  $SiO_2$  e  $Al_2O_3$  amorfos é a indicada na Tabela 9.

Parece que no início da alteração a quantidade de amorfos é maior e que esse material se cristaliza à medida em que evolui, de forma que nas facies formadas unicamente por minerais secundários a presença de uma fase amorfa é pouco significativa. Assim, é lícito supor que uma fase amorfa possa ser intermediária entre a destruição dos minerais primários e a cristalização dos minerais secundários.

#### Balanço geoquímico

O cálculo do balanço geoquímico através do método isovolumétrico foi utilizado para todas as amostras que, ao nível macroscópico, mostrassem vestígios das estruturas originais da rocha, mesmo que as texturas, ao nível microscópico, estivessem destruídas, como no caso do material argiloso. Amostras que mostrassem sinais de compactação foram descartadas para estes cálculos.

As Tabelas 10 e 11 expressam os valores médios de densidade aparente,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  e  $MnO_2$  em g/100 cc para amostras representativas de três estágios de alteração para as transições rocha fresca-argila e rocha fresca-bauxita, respectivamente. O conjunto de valores utilizados para o cálculo está plotado nas Figuras 15, 16, 17, 18, 19 e 20, onde os teores volumétricos de cada óxido aparecem em função da densidade aparente da amostra. As Tabelas 12 e 13 mostram as perdas e ganhos médios expressos em porcentagem com relação à rocha fresca.

A análise destes dados mostra que o processo de alteração laterítica das rochas alcalinas de Lages apresenta as seguintes características:

- lixiviação gradual e progressiva de Si e Mn;
- lixiviação do K lenta no início e brutal nos estágios mais avançados;
- lixiviação brutal do Na no início do processo;
- aproximada conservação do Al e ligeira lixiviação do Fe.

Essas características gerais são comuns tanto para a alteração monossialítica como para a de tendência alítica. No entanto, a intensidade do processo é mais atenuada no primeiro caso. Assim, as perdas de sílica são praticamente totais para a bauxita e apenas de 2/3 para o material argiloso. No caso do potássio, o comportamento das perdas é semelhante nas duas situações: perda da ordem de 50% nos estágios intermediários (rocha alterada-bauxita e rocha alterada-argila) e praticamente total tanto para a argila como para a bauxita. O manganês apresenta solubilidade mais baixa que a sílica e o potássio nas condições físico-químicas reinantes nos perfis e, portanto, perdas mais leves; nas etapas intermediárias estão em torno de 40%, mas nas bauxitas elevam-se a 64%, enquanto que no material argiloso situam-se abaixo de 50%. O sódio apresenta uma evolução muito especial, com perdas brutais desde o início do processo, seja na transição rocha alterada-bauxita, seja na transição rocha alterada-argila. O Al e o Fe são os elementos menos móveis, so-

TABELA 9 – Avaliação Quantitativa das Fases Amorfas (% dos óxidos amorfos em relação total do óxido na amostra)

	$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$
I 2.7 (argila)	4.9	3.1	1.7
I 2.9 (bauxita)	8.1	4.2	0
I 2.10 (rocha alt.)	28.2	10.8	7.0

TABELA 10 – Valores Médios em g/100cc de cada Óxido em cada Facies de Alteração na Transição Rocha-Argila

	<i>densidade</i>	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$MnO_2$	<i>Nº Am.</i>
Arg	1.33	41.7	57.9	6.3	0.2	0.6	0.31	18
Ra + Arg	1.41	63.1	47.0	5.7	1.2	6.1	0.38	24
RF	2.49	124.7	60.5	8.2	23.2	12.3	0.59	6

TABELA 11 – Valores Médios em g/100cc de cada Óxido em cada Facies de Alteração para a Transição Rocha-Bauxita

	<i>densidade</i>	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$MnO_2$	<i>Nº Am.</i>
Bx	1.16	7.4	67.4	7.0	0.2	0.1	0.21	29
Ra + Gibbs	1.60	61.2	57.4	7.2	2.1	5.8	0.36	19
RF	2.49	124.7	60.5	8.2	23.2	12.3	0.59	6

TABELA 12 – % de Perdas e Ganhos Médios com Relação à Rocha Fresca na Transição Rocha-Argila

	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$MnO_2$
Arg	-67%	-4%	-23%	-99%	-95%	-47%
Ra + Arg	-49%	-22%	-30%	-95%	-50%	-36%

TABELA 13 – % de Perdas e Ganhos Médios com Relação à Rocha Fresca na Transição Rocha-Bauxita

	$SiO_2$	$Al_2O_3$	$Fe_2O_3$	$Na_2O$	$K_2O$	$MnO$
Bx	-94%	+11%	-15%	-99%	-99%	-64%
Ra + Gibbs	-51%	-5%	-12%	-91%	-53%	-40%

bretudo o primeiro, cujos ganhos e perdas médias expressos nas Tabelas 13 e 14 são bastante baixos. No entanto, a Figura 16 indica que existem algumas amostras que evidenciam perdas e ganhos absolutos consideráveis em Al. Quanto ao Fe, os valores médios indicam perdas baixas e o diagrama da Figura 17 mostra que a maioria absoluta das amostras indica perdas, sendo os ganhos absolutos raros.

As tendências gerais do balanço geoquímico para os fonólitos porfíricos de Lages são as mesmas evidenciadas por ALMEIDA (1977) para as alcalinas de Poços de Caldas: perda intensa de  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , conservação do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e ligeira perda de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

É interessante notar que os elementos mais móveis, K, Si e Mn, mostram perdas maiores em média para a transição rocha alterada-bauxita do que para a transição rocha alterada-argila, enquanto que os elementos menos móveis, Al e Fe comportam-se de maneira oposta, evidenciando maiores perdas nos níveis argilosos que nos níveis bauxíticos. Isto aparece claramente nas Figuras 15 a 20, onde estão projetadas as trajetórias médias dos dois tipos de transformação.

O cálculo do balanço isovolumétrico permite estabelecer uma escala relativa de mobilidade para os principais elementos constituintes das rochas. Do mais móvel para o mais imóvel, temos: Na, K, Si, Mn, Fe e Al. Os dois primeiros estão ausentes tanto das argilas como das bauxitas. O Si está praticamente ausente das bauxitas e presente em 1/3 de sua quantidade inicial nas argilas. O Mn está presente nas duas facies, mas apresenta-se mais concentrado nas argilas. O Fe e o Al constituem o resíduo da alteração e permanecem mais ou menos em sua quantidade inicial mesmo nos horizontes mais alterados.

O comportamento dos elementos que acaba de ser descrito é a outra face do fenômeno já caracterizado ao nível mineralógico. Assim, no início da alteração, o primeiro mineral que se desestabiliza é a nefelina, com lixiviação principalmente da sílica e do sódio e precipitação do alumínio. Mais ou menos concomitantemente, a egirina libera em solução esses mesmos elementos e o ferro que reprecipita como goethita, talvez pelo intermediário de uma fase amorfa. Segue-se finalmente a alteração do feldspato alcalino, com precipitação do Al como gibbsita. No

caso de a alteração seguir pelo caminho da monossilicização, a lixiviação da sílica é incompleta e, no lugar da gibbsita, precipita a halloisita.

### Gênese da Jazida

A jazida de bauxita do distrito de Lages originou-se por laterização intensa dos fonólitos porfíricos da Serra da Farinha Seca, em sítios topográficos que satisfizessem duas condições.

— drenagem desimpedida, permitindo completa lixiviação da sílica e das bases;

— declive moderado, permitindo que o aprofundamento dos perfis de alteração prevalecesse sobre a erosão do material alterado.

Estes sítios correspondem aos altos do relevo; nas encostas é possível encontrar um discreto nível de bauxita coluvionar e, nas baixadas, o minério está completamente ausente.

O minério originou-se por bauxitização direta, isto é, os minerais primários, feldspato alcalino e nefelina, alteraram-se diretamente em gibbsita. Isto pôde ser amplamente verificado por evidências micromorfológicas: a bauxita apresenta-se estruturada como réplica da textura dos fonólitos porfíricos, onde a gibbsita substitui pseudomorficamente os silicatos félsicos e a goethita, o mineral ferromagnésiano. A bauxita encontra-se muitas vezes cortada por veios de gibbsita pura, bem cristalizada, originada de soluções que se enriqueceram de alumínio por dissolução da gibbsita de níveis superiores do perfil, em condições de pH mais ácidos.

Os níveis argilosos intercalados na bauxita derivam, em parte, de um episódio de laterização menos intensa, quando os silicatos primários alteraram-se em halloisita e, em parte, da ressilicificação da gibbsita originada de um episódio de laterização mais intensa. A fonte de sílica para a ressilicificação poderia ser encontrada nos sedimentos que cobriam as rochas alcalinas, hoje erodidos, ou em fragmentos remanescentes de fonólitos nos níveis bauxíticos superiores.

As jazidas de bauxita de Poços de Caldas (ALMEIDA, 1977) e do Arkansas (GORDON *et al.*, 1958) apresentam algumas feições semelhantes às do depósito de Lages. Desenvolvidas sobre rochas alcalinas, mostram, às vezes, níveis argilosos na base do perfil da alteração ou intercalados com a bauxita de estrutura conservada.

TABELA 14 — % de Amorfos sobre o Total Extraído

Amostra	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
LG-10	39.5	58.6	94.9

No caso de Poços de Caldas, ALMEIDA (1977) acredita que a alteração argilosa seja posterior à alteração bauxítica e que tenha se dado por diminuição da eficiência da drenagem à medida que o relevo ia sendo aplainado. MELFI & CARVALHO (1983) também creem que a caolinização é o processo ativo atualmente em Poços de Caldas, sendo a bauxitização correspondente a uma evolução passada, a não ser em setores restritos de encostas abruptas. MONIZ *et al.* (1972) consideram que os níveis de caolinita intercalados no minério de Poços de Caldas são derivados de ressilificação da gibbsita. No Arkansas, GORDON *et al.* (1958) sustentam a ideia de que os níveis argilosos formam-se por alteração da rocha fresca abaixo do nível bauxítico, em decorrência da elevação do nível d'água que acompanhou a deposição dos sedimentos eocênicos. Admitem também a ressilificação da gibbsita como processo gerador dos níveis argilosos.

As características da bauxita do distrito de Lages são as seguintes:

- dados físicos: bauxita de estrutura conservada, cor amarela, porosa, com densidade variando de 0,9 a 1,6;

- composição química média:  $Al_2O_3$  58%,  $SiO_2$  6% e  $Fe_2O_3$  6%;

- composição mineralógica: essencialmente gibbsita e goethita, além de traços de boehmita, hematita, zircão e anatásio;

- reservas: 5,8 milhões de toneladas, distribuídas em uma área de aproximadamente 1 km<sup>2</sup>, com espessura variando entre 0,5 e 6 m (SZUBERT & VERGARA, 1975).

A qualidade do minério do distrito de Lages é excelente, apresentando teores de  $Al_2O_3$  semelhantes aos de Poços de Caldas, teores de  $SiO_2$  um pouco mais elevados (Poços 4%) e teores de  $Fe_2O_3$  mais baixos (Poços 9%). Em termos de reservas, os 5,8 milhões de toneladas (superestimados, pois calculados para uma densidade do minério de 2,5) representam muito pouco no panorama brasileiro (reservas de mais de 4 bilhões de toneladas), mas podem ser importantes localmente, dada a inexistência de outras fontes de alumínio no sul do Brasil. Por outro lado, as reservas poderiam ser aumentadas se o limiar para sílica fosse admitido a níveis superiores, isto é, se o material mais argiloso pudesse ser incluído, desde que este material sofresse lavagem prévia, como processo concentrador de gibbsita. Estudos da composição mineralógica das várias frações granulométricas revelaram que nos materiais compostos de gibbsita e halloisita ou caolinita, as

fasces argilosas estão sempre concentradas na fração < 0,062 mm.

## ALTERAÇÃO DE OUTROS TIPOS DE ROCHAS

Outros tipos de rochas, além dos fonólitos porfíricos da Serra da Farinha Seca seriam potencialmente capazes de produzir, por alteração, bauxita. Os resultados da investigação sobre a constituição, mineralógica e química das facies alteradas sobre estas rochas são descritos a seguir.

### Fonólitos do Morro do Tributo e da Chapada

A meteorização dos fonólitos foi estudada por meio de amostras provenientes de perfis de alteração aflorantes em cortes de estrada e de amostras de córtex de alteração de fragmentos de rocha fresca.

No plano mineralógico, os produtos de alteração dos fonólitos consistem sempre numa mistura de minerais primários e de halloisita, sendo largamente dominantes os primeiros. Às vezes aparecem nos difratogramas discretos picos a aproximadamente 15Å, o que revelaria a presença de traços de esmectita, cuja natureza não foi investigada. No Morro do Tributo, a rocha alterada encontra-se cortada por veios de material branco de aspecto porcelânico que a análise por difração de raios X revelou ser halloisita pura, como já havia sido observado por LINDSTAED (1972). MONIZ *et al.* (1972) mencionam a existência de veios de halloisita porcelânica em Poços de Caldas e atribuem sua origem à precipitação a partir de soluções ricas em silício e alumínio.

Ao microscópio, os fonólitos alterados mostram substituição pseudomórfica do feldspato alcalino e da nefelina por material argiloso e um início de ferruginização da egrina. Em níveis mais evoluídos do perfil, a estrutura da rocha desaparece e é substituída por uma massa argilosa mais ou menos amarelada, composta de feldspato e halloisita. As amostras do córtex de fragmentos de fonólitos frescos não evidenciaram aos raios X a presença de minerais secundários, embora constituam-se em material branco e pulverulento, portanto bem alterado. Trata-se, na verdade, de uma mistura de minerais primários e compostos amorfos de silício e alumínio. O teor de amorfos sobre o total extraído, calculado a partir da Figura 21, está expresso na Tabela 14.

Em resumo, os fonólitos alteram-se de maneira incipiente, isto é, mesmo nos horizontes mais evoluídos os minerais primários predominam. O principal mineral secundário é a halloisita, originada, talvez, pelo intermediário de uma fase amorfa. Não foi constatada a neofor-mação de gibbsita, senão como traço em algumas poucas amostras.

A Tabela 15 mostra a composição química de 6 exemplares de fonólitos. Do ponto de vista químico, essas rochas se assemelham muito aos fonólitos porfíricos, apresentando apenas ligeiras diferenças, quais sejam:

- são ligeiramente mais ácidas;
- apresentam teores de  $Fe_2O_3$  e  $CaO$  mais baixos;
- apresentam teores em  $K_2O$  e  $Na_2O$  um pouco mais altos;
- mostram menor grau de hidratação.

A composição química dos produtos de alteração dos fonólitos é mostrada na Tabela 16, onde são distinguidos 3 estágios de graus de alteração crescentes. A tendência geral é a mesma verificada para os fonólitos porfíricos, isto é, perda progressiva de sílica e bases (retardamento da perda de  $K_2O$  em relação ao  $Na_2O$ ) e aumento de  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$  e  $H_2O^+$ . O  $MgO$

apresenta comportamento aparentemente anômalo, aumentando nas facies mais alteradas em relação à rocha fresca. Isto pode ser devido a erros analíticos, pois este elemento foi dosado numa faixa de teores para a qual a absorção atômica não fornece boa exatidão. Quanto ao ferro, parece que, de fato, ele é perdido na alteração, o que já era suspeitado a partir da observação de campo da cor muito clara, praticamente branca, dos níveis alterados sobre fonólitos. A explicação clássica para a remoção do ferro, concomitante com a retenção do alumínio, repousa na questão da variação do potencial de oxido-redução e do pH do meio (NORTON, 1973). Assim, pequenas variações de Eh e de pH seriam responsáveis pela acumulação preferencial do alumínio sobre o ferro. Com relação ao caso específico de Lages, contudo, a autora não dispõe de argumento para caracterizar o ambiente gerador das alteritas nos termos dos parâmetros acima mencionados.

A alteração dos fonólitos fica, portanto, caracterizada como de tendência laterítica pouco pronunciada: os perfis são pouco espessos, os níveis de alteração contêm grande porcentagem de minerais primários e o principal mineral secundário presente, a halloisita, resulta de uma

TABELA 15 - Composição Química dos Fonólitos (% em peso dos óxidos)

	LG-03	LG-10	LG-63	IN-1	MT-2	1006	Média
$SiO_2$	55.18	55.64	57.00	49.82	55.91	55.84	54.90
$TiO_2$	0.18	0.10	0.27	0	0	0.02	0.10
$Al_2O_3$	23.24	23.70	21.07	23.75	23.67	21.27	22.78
$Fe_2O_3^*$	2.24	2.24	1.77	2.43	1.94	2.20	2.14
$MnO$	0.16	0.15	0.21	0.06	0.35	0.20	0.19
$MgO$	0.11	0.05	0.05	n.d.	0	0.19	0.08
$CaO$	1.08	0.99	0.43	1.39	0.65	1.08	0.94
$K_2O$	5.57	5.85	5.60	7.88	5.25	6.83	6.16
$Na_2O$	9.57	9.67	9.67	11.68	11.01	9.93	10.25
$H_2O^+$	2.15	1.99	1.18	1.62	1.51	1.53	1.67
Densidade Aparente	2.39	2.60	2.54	n.d.	n.d.	n.d.	2.57

LG-03 - Fonólito da Chapada (Lab. Geoquímica IGUSP)

LG-10 - Fonólito da Chapada (Lab. Geoquímica IGUSP)

LG-63 - Fonólito do Tributo (Lab. Geoquímica IGUSP)

IN-1 - Serra da Chapada (citado por LINDSTAED, 1972)

MT-2 - Serra do Cadeado (citado por LINDSTAED, 1972)

1006 - Morro do Tributo (citado por LINDSTAED, 1972)

\* - Fe total calculado como  $Fe_2O_3$

desilicificação incompleta dos feldspatos e da nefelina.

#### Micronefelina-sienitos do Cerro Alto

O corpo alcalino do Cerro Alto, além dos fonólitos porfíricos da Serra da Farinha Seca, foi investigado pela CPRM (SZUBERT & VERGARA, 1975) para bauxita. A pesquisa demonstrou que o material alterado era muito pobre em alumina e rico em sílica, de modo que não podia ser classificado sequer como argilo-bauxítico. LINDSTAED (1972) mostrou que a alteração de uma amostra de Cerro Alto era de caráter incipiente.

Algumas amostras de córtex de alteração de fragmentos de micronefelina-sienito foram analisadas por difração de raios-X pela autora deste trabalho. Os resultados indicaram uma mistura de minerais primários e gibbsita, o que leva a supor que estas rochas possam apresentar tendência à alitização, porém de intensidade muito reduzida, ou que os níveis mais profundamente alterados foram erodidos.

#### Analcita-Traquitos

Num dos pequenos corpos de analcita-traquito situado a sul da Serra do Cadeado (Fig. 1) foram amostrados 3 níveis de alteração provenientes de um fragmento de rocha com exfoliação esteroideal. A amostra de rocha fresca

revelou aos raios-X ser constituída essencialmente por feldspato alcalino e analcita. Nos dois níveis mais alterados só aparece o feldspato alcalino, indicando que a analcita se altera desde bem cedo. Dada a ausência de minerais secundários em material de aspecto bem alterado (branco e pulverulento), supõe-se que aqui, a exemplo do que ocorre com os fonólitos, os primeiros estágios da alteração sejam representados por material amorfo.

#### Fonólitos Porfíricos do Licurgo

Um pequeno corpo de fonólito porfírico que ocorre no limite ocidental do maciço mostra níveis alterados semelhantes aos dos corpos da Serra da Farinha Seca. Amostras provenientes de um poço executado para pesquisa de minério indicaram a presença de níveis argilosos e de níveis bauxíticos.

#### Diabásios da Serra da Farinha Seca

Corpos de diabásio encontram-se associados aos fonólitos porfíricos da Serra da Farinha Seca, ocupando posições de altos topográficos, em Barra dos Índios e na Colonia Faxinal (Fig. 1). A alteração destas rochas é de mesma tendência que a das alcalinas associadas, isto é, apresenta caráter de alitização. A rocha fresca, composta essencialmente por plagioclásio e augita, transforma-se em material constituído por gibbsita e goethita. A Tabela 17 mostra a com-

TABELA 16 — Composição Química (% peso) dos Produtos de Alteração dos Fonólitos

	<i>Estágio 1</i>	<i>Estágio 2</i>	<i>Estágio 3</i>
SiO <sub>2</sub>	55.89	52.78	50.60
TiO <sub>2</sub>	0.24	0.18	0.40
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24.56	29.16	33.35
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	1.65	1.89	1.95
MnO	0.07	0.06	0.12
MgO	0.87	0.62	0.10
CaO	0.98	0.51	0.09
K <sub>2</sub> O	5.42	5.40	2.17
Na <sub>2</sub> O	2.68	0.76	0.55
H <sub>2</sub> O <sup>†</sup>	6.35	9.39	12.18
Densidade Aparente	2.20	1.66	1.22
Nº de Amostras	2	3	1

Estágio 1 — Rocha pouco alterada (Lab. Geoquímica IGUSP)

Estágio 2 — Rocha alterada (Lab. Geoquímica IGUSP)

Estágio 3 — Rocha bem alterada (Lab. Geoquímica IGUSP)

\* — Fe total calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

posição química da rocha fresca e de seu produto de alteração, ambos provenientes de um fragmento apresentando exfoliação esferoidal. Aqui também o processo caracteriza-se por perda de sílica e bases e por concentração de alumínio e ferro, dando como produto uma bauxita ferruginosa. A CPRM considerou este material, pelo seu alto teor em ferro, destituído de interesse econômico (SZUBERT & VERGARA, 1975).

### Folhelhos do Grupo Passa Dois

Um afloramento de folhelho, situado a sul do corpo de fonólito de Serra da Chapada foi mostrado com a finalidade de comparar a tendência de alteração destas rochas com a das alcalinas.

O folhelho fresco é constituído essencialmente por quartzo e illita e, secundariamente por caolinita. Com a alteração, a única transformação que ocorre é a passagem da illita para caolinita; este mineral parece estável no ambiente supérgeno.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

A bauxitização é essencialmente um processo de dissolução e lixiviação da sílica e das bases dos silicatos primários formadores da rocha-mãe e concomitante enriquecimento em alumínio, cristalizado principalmente sob forma de gibbsita. Para que a bauxitização possa ocorrer, é necessária toda uma conjuntura de fatores

favoráveis: composição mineralógica e química adequada da rocha-mãe, condições climáticas suficientemente agressivas para a desestabilização dos minerais primários, condições de drenagem dos perfis que permitam a evacuação da sílica e, finalmente, condições de preservação dos perfis de alteração dos processos erosivos. Todos estes fatores precisam atuar tempo suficiente para que os perfis desenvolvam espessuras de minério que possam ser consideradas interessantes.

Serão discutidos a seguir cada um destes fatores e seu papel na gênese da bauxita do distrito de Lages.

### Influência da Rocha-mãe

Em Lages, a bauxita deriva principalmente do fonólito porfirítico. É uma rocha extremamente favorável para gerar bauxita pois possui teor elevado de  $Al_2O_3$  e uma relação  $SiO_2/Al_2O_3$  baixa. Seus constituintes mineralógicos, o feldspato alcalino e a nefelina, são minerais que se alteram facilmente. A ausência de quartzo nestas rochas é outro fator extremamente favorável, pois a lenta dissolução deste mineral eleva o teor de  $H_4SiO_4$  nas águas, dificultando a cristalização da gibbsita.

O micronefelina-sienito também parece ser uma rocha capaz de gerar bauxita. O relatório da CPRM (SZUBERT & VERGARA, 1975) informa que parte dos corpos alcalinos bauxitizados da Serra da Farinha Seca são constituídos por esta variedade litológica. Por outro lado, a autora deste trabalho constatou que em

TABELA 17 — Composição Química do Diabásio e de seu Produto de Alteração

	Diabásio**	Diabásio Alt.**
SiO <sub>2</sub>	50.00	12.42
TiO <sub>2</sub>	1.40	0.15
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.74	33.54
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	13.59	31.46
MnO	0.22	0.08
MgO	1.14	0.08
CaO	15.39	0.39
K <sub>2</sub> O	0.87	0.20
Na <sub>2</sub> O	2.59	0.23
H <sub>2</sub> O*	1.13	20.75
Densidade Aparente	2.87	1.49

\* Fe total calculado como Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

\*\* Análises realizadas no Lab. Geoquímica IGUSP

Cerro Alto, apesar de não haver bauxita, a tendência da alteração é em direção à alitização.

Os fonólitos, no entanto, parecem não ser rochas capazes de gerar bauxita. As evidências disponíveis indicam que estas rochas alteram-se para material halloisítico, através do intermediário de uma fase amorfa importante. A razão para a diferença de comportamento frente à alteração entre as três principais variedades de rochas alcalinas do distrito de Lages deve ser atribuída menos a diferenças em suas composições químicas e mineralógicas, mas a particularidades texturais e ao grau de fraturamento. Em Poços de Caldas, ALMEIDA (1977) constatou que os tinguaítos e os fonólitos são rochas mais fraturadas que os nefelina-sienitos e, em função disto, são mais facilmente transformadas em bauxita. Em Lages, esta questão não foi suficientemente esclarecida.

Os diabásios associados às alcalinas da Serra da Farinha Seca, embora apresentem tendência à completa alitização, não geram bauxita, em função de sua composição química desfavorável. Enquanto as rochas alcalinas apresentam uma razão  $SiO_2/Al_2O_3$  igual a 2,3, nos basaltos esta razão sobe a 3,4. Mas, mais importante que a relativa pobreza em  $Al_2O_3$  é a baixa razão  $Al_2O_3/Fe_2O_3$  nos diabásios (1,1) em comparação com as alcalinas (7,2); o elevado teor em ferro nas rochas básicas impede a formação de bauxita de boa qualidade.

Os sedimentos gondwânicos aflorantes no domo de Lages também não produzem bauxita. Geralmente têm em sua constituição bastante quartzo, que é um mineral de baixíssima suscetibilidade à alteração. A caolinita, outro componente importante, mostrou-se estável nas condições de alteração reinantes em Lages. Este é, aliás, um outro argumento favorável à idéia de que a bauxitização foi direta, não tendo se dado por intermediário de uma fase caolinítica ou halloisítica.

### Influência do Clima

A maior parte dos autores concorda que é preciso de um clima úmido e quente para a formação de bauxita laterítica. Segundo BARDOSSY (1983) as condições climáticas ideais seriam caracterizadas por temperaturas médias anuais entre 20 e 26°C e precipitação superior a 1200 mm anuais, com pelo menos 1 ou 2 meses secos. Em Lages, apesar de haver disponibilidade de água suficiente, a temperatura média de 15°C é um pouco baixa. O efeito da baixa temperatura consiste em aumentar a viscosidade da água, do que decorre uma percolação mais

lenta e conseqüente lixiviação incompleta de  $SiO_2$ . Assim, sob climas subtropicais, a tendência da alteração seria em direção da monossialitização, com formação de caolinita, ou halloisita.

Em Lages, a fase de bauxitização deve ter ocorrido num período de clima um pouco mais quente que o atual, quando o balanço global da radiação solar era mais favorável. BARDOSSY (1981) admite que este parâmetro vem decrescendo paulatinamente em escala mundial desde o Eoceno.

Lages representa no território brasileiro um limite latitudinal, além do qual mais nenhuma outra jazida laterítica é encontrada.

### Influência do Relevo

As bauxitas de Lages situam-se nas cristas de um platô ondulado, a altitudes entre 900 e 950 m, desniveladas de 50 a 100m em relação ao nível de base local (a várzea do rio dos Índios que corta o platô está a 850 m). Esta posição topográfica é muito favorável à gênese de bauxita, pois assegura uma drenagem desimpedida, fator condicionante da eliminação da sílica. Como foi visto no item III.2, nas encostas e nas baixadas, a tendência da alteração é para a formação de argilas.

A maior parte das reservas de bauxita laterítica do mundo ocorrem a altitudes entre 300 e 1000 m, com elevações relativas de 50 a 200 m (BARDOSSY, 1983) tal como acontece em Lages.

### Época e Duração da Bauxitização

A idade de 65 milhões de anos para as rochas alcalinas de Lages coloca um limite inferior para o início do processo de bauxitização. Aliás, este limite deve ser posterior a 65 m.a. porque é preciso considerar o tempo que estas rochas levaram para serem expostas à superfície. A datação exata do processo de bauxitização não pôde ser determinada porque as bauxitas de Lages não estão claramente associadas a nenhuma superfície de aplainamento passível de ter sua idade conhecida.

Dadas as limitações expostas acima, e considerando o que foi discutido no item referente às condições climáticas, pode-se dizer apenas que a bauxitização deve ter se dado, principalmente, no Terciário, tendo diminuído sua intensidade em tempos mais recentes.

## AGRADECIMENTOS

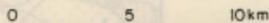
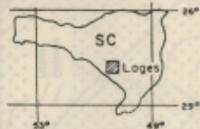
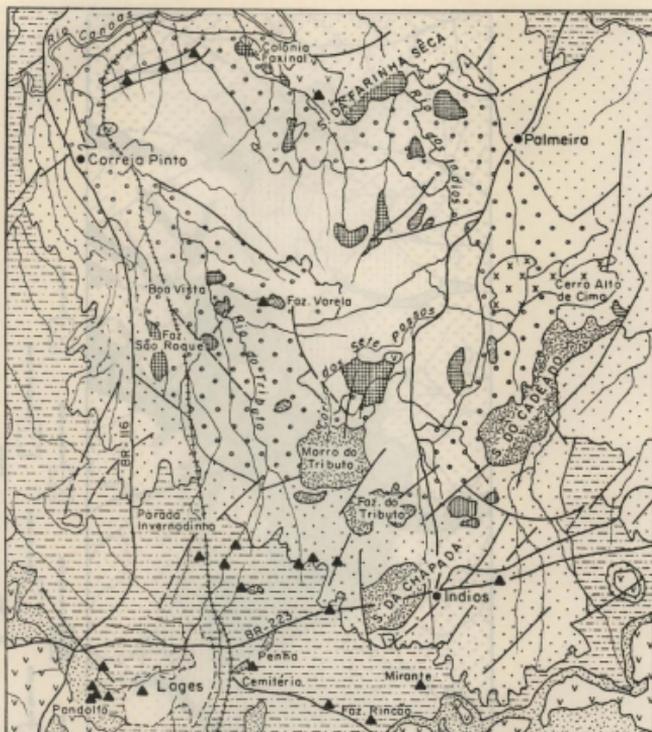
O acesso à área e a visita aos depósitos de bauxita foram enormemente facilitados pelo Prof. L.F. Scheibe, profundo conhecedor da geologia da região, a quem consigno meus maiores agradecimentos. O Prof. Dr. A.J. Melfi e o Prof. Dr. C.B. Gomes contribuíram para o fi-

nanciamento dos trabalhos de campo. O Prof. Dr. M.L. Formoso e o Prof. A.J. Melfi acompanharam parte das visitas à área. O estudante M. Blumer, bolsista de iniciação científica da FAPESP, colaborou na execução dos trabalhos de laboratório. O CNPq concedeu ajuda financeira aos trabalhos de campo e de laboratório. A todas essas pessoas e entidades, meu sincero reconhecimento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENS, L.H. (1966) *Element distributions in specific igneous rocks*. VIII. Geoch. Cosm. Acta 30: 109-122.
- ALMEIDA, E.B. (1977) *Geology of the bauxites deposits of the Poços de Caldas District, State of Minas Gerais*. PH.D. Thesis, Un. Stanford, 273 p.
- ALONSO, M.T.A. (1977) *Vegetação da região sul do Brasil*. Geogr. do Brasil - região sul, 5: 81-109.
- AMARAL, G.; BUSHEE, J.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; REYNOLDS, J.H. (1967) *Potassium-argon dates of alkaline rocks from southern Brazil*. Geoch. Cosm. Acta 31: 117-142.
- BARBOSA, O. (1933) *Eruptivas de Lages, Santa Catarina*. Bol. Serv. Geol. Min. do Min. Agr., 69: 15-18.
- BARDOSSY, G. (1981) *Paleoenvironments of laterites and lateritic bauxites - Effect of global tectonism on bauxite formation*. Proc. I Int. Sem. Lat. Proc., Índia: 287-301.
- BARBOSSY, G. (1983) *A comparison of the main lateritic bauxitic region of our globe*. Proc. II Int. Sem. Lat. Proc., São Paulo: 15-51.
- CHESWORTH, W. (1972) *The stability of gibbsite and boehmite at the surface of the earth*. Clays and Clay Min. 20: 369-374.
- DELVIGNE, J. (1965) *Pédogenèse en zone tropicale. La formation des minéraux secondaires en milieu ferrallitique*. Mem. ORSTOM, 13, Dunod, Paris, 177 p.
- DIDIER, P. (1983) *Paragenèses à oxydes et hydroxydes de fer dans les bauxites et les cuirasses ferruginenses*. Th. Un. Poitiers, 150 p.
- FITZPATRICK, R.W. & SCHWERTMANN, U. (1982) *Al-substituted goethite an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa*. Geoderma, 27: 335-347.
- FUJIMORI, S. (1975) *Halotiss no embasamento cristalino alterado de Salvador (BA)*. Rev. Bras. Geoc. 5(4): 269-273.
- GOLDMAN, M.I. & TRACEY JR., J.I. (1946) *Relations of bauxite and kaolin in the Arkansas bauxite deposits*. Ec. Geol. XLI(6): 567-575.
- GORDON, M.; TRACEY J.I.; ALLIS, M.W. (1958) *Geology of the Arkansas bauxite region*. Geol. S. Prof. Pap. 299: 1-268.
- GUAZELLI, W. & FEIJÓ, F.L. (1970) *Mapa geológico de semi-detalle do centro-leste e sudoeste de Santa Catarina*. Petrobrás, Desul, Rel. 396, anexo 14, Ponta Grossa (inédito).
- JOST, H. (1967) *The dome-folded structure of Lages, Santa Catarina Southern Brazil*. I Inst. Symp. Gondw. Strat. and Pal. Guidebook exc. nº 3: 67-72.
- KIMPE, C.; GASTUCHE, M.C.; BRINDLEY, G.W. (1964) *Low temperature synthesis of kaolin minerals*. Am. Min. 49: 1-16.
- LEPREVOST, A. (1971) *A bauxita da fazenda Tributo, Lages-SC*. Bol. Und. Fed. Paraná, 29: 1-22.
- LINDSTADT, H.P. (1972) *A alteração das rochas alcalinas, Lages, Santa Catarina*. Diss. Mestrado UFRS, Porto Alegre, 54 p. (inédito).
- LOCZY, L. (1968) *Basic and alkalic volcanics of the State of Santa Catarina, Brazil*. An. Ac. Br. Cienc., 40: 187-193.
- MACKENZIE, R.C. (1957) *The differential thermal investigation of clays*. Min. Soc. London, 456 p.
- MELFI, A.J. & CARVALHO, A. (1983) *Bauxitisation of alkaline rocks in Southern Brazil*. Inst. Col. CNRS. Petrology of weathering and soils (inédito).
- MILLOT, G. & BONIFAS, M. (1955) *Transformation isovolumétrique dans les phénomènes de latérisation et de bauxitization*. Bull. Serv. Cart. Geol. Als. Lor. 8(1): 3-20.
- MONIZ, A.C. (1969) *Estudo mineralógico de argilas do maciço alcalino de Poços de Caldas*. Bol. Fac. Fil. Ciênc. Letr. USP, 304: 1-134.

- MONIZ, A.C.; WILLIAM, D.D.; SANTOS, P.S.; SANTOS, H.S. (1972) *Clay minerals in veins associated with bauxites of Poços de Caldas, MG*. An. XXVI Congr. Bras. Geol., Belém, 1: 221-230.
- NORTON, S.A. (1973) *Laterite and bauxite formation*. Ec. Geol., 68: 353-361.
- OLIVEIRA, S.M.B. (1978) *Alteração de rochas ultrabásicas: tratamento estatístico preliminar de dados químicos*. Res. XXX Congr. SBPC, São Paulo: 391 p.
- ROSS, G. I.; KODAMA, H.; WANG, G.; GRAY, J. T.; LAFRENIÈRE, L. B. (1985) *Halloysite from a strongly weathered soil at Mont Jacques Cartier, Quebec*. Soil Sc. Soc. Am. 1: 47: 327-332.
- SCHIEBE, L.F. (1979) *Estudo petrológico e geoquímico dos carbonatitos da Fazenda Varela, Lages, SC., Brasil*. Diss. Mestrado UFRS, Porto Alegre, 120 p. (inédito).
- SCHIEBE, L.F. & FORMOSO, M.L. (1982) *Contribuição da geoquímica das terras raras à caracterização dos carbonatitos da Fazenda Varela, Lages, SC*. Rev. Bras. Geoc., 12: 553-561.
- SCHIEBE, L.F.; GOMES, C.B.; COUTINHO, J.M.V. (1984) *Caracterização petrográfica das rochas alcalinas de Lages, SC*. An. XXXIII Congr. Bras. Geol., Rio de Janeiro, IX: 4377-4391.
- SHELLMANN, W. (1981) *Considerations on the definition and classification of laterites*. Proc. 1 Int. Sem. Lat. Proc., Indis: 1-10.
- SEGALEN, P. (1968) *Note sur une méthode de détermination des produits minéraux amorphes dans certains sols à hydroxydes tropicaux*. Cah ORSTOM, sér. Péd. 6(1): 105-126.
- SZUBERT, E.C. & VERGARA, V.D. (1975) *Avaliação das reservas e da qualidade dos depósitos de bauxita do município de Lages, SC*. Rel. CPRM, ag. Porto Alegre, 68 p. [inédito].



Cf.: SCHEIBE et al., 1984

Figura 1 — Rochas alcalinas de Lages, SC



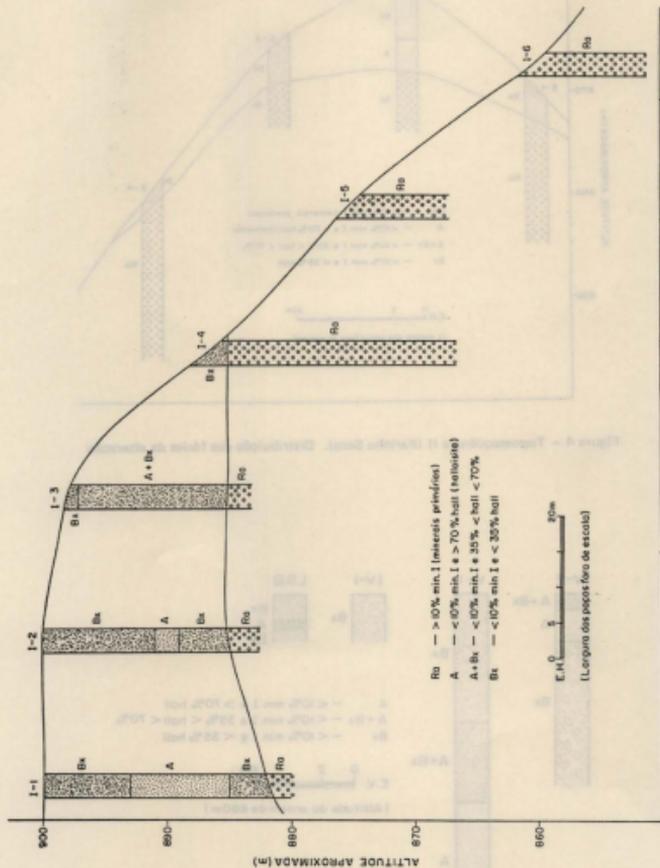


Figura 3 — Topossequência I (Farinha Seca). Distribuição das fácies de alteração



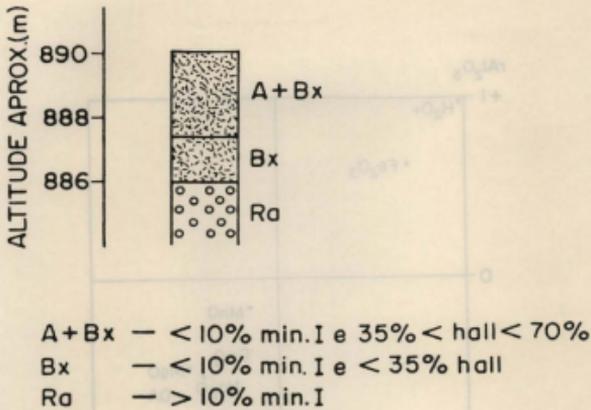


Figura 6 — Jazida Momm. Poço (LGII)

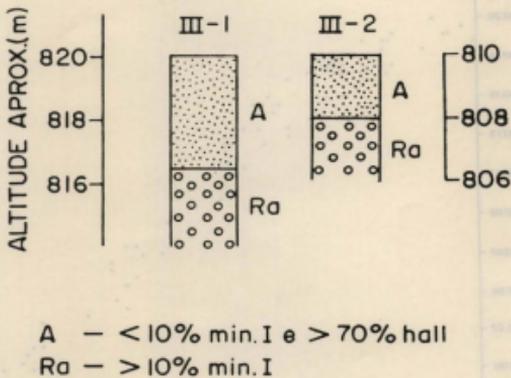


Figura 7 — Área Faxinal. Poços espertos

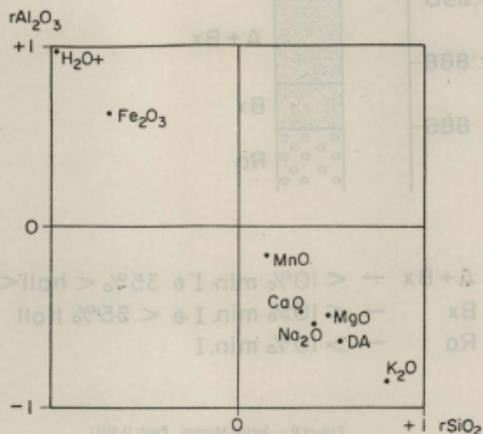


Figura 8 — Diagrama  $rSiO_2 \times rAl_2O_3$  para os principais óxidos

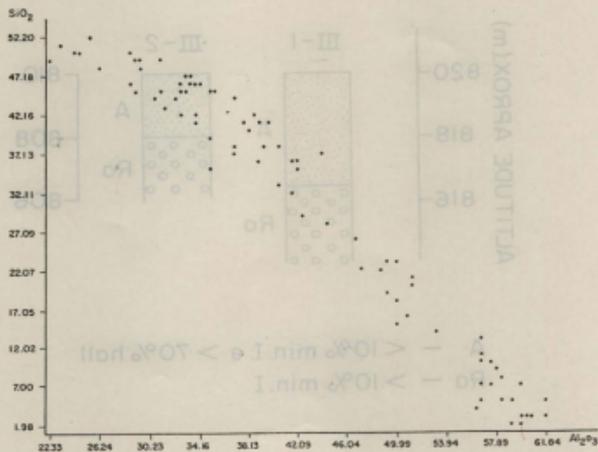


Figura 9 — Diagrama de correlação entre  $Al_2O_3$  e  $SiO_2$

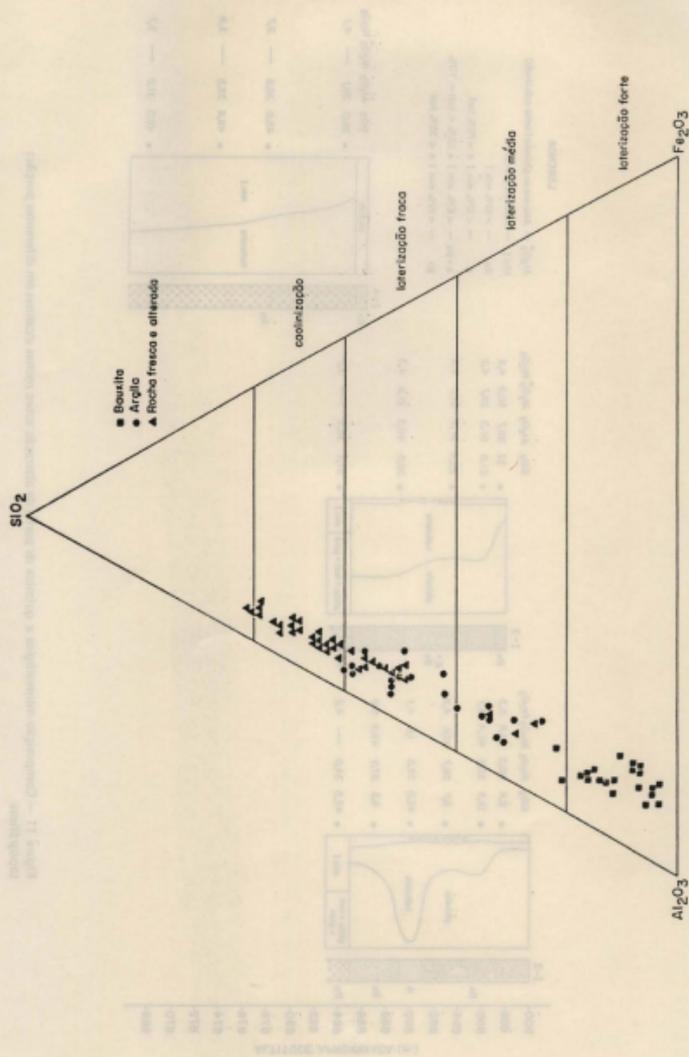


Figura 10 — Composição química da bauxita, argila e rocha fresca e alterada em termos de seus principais componentes

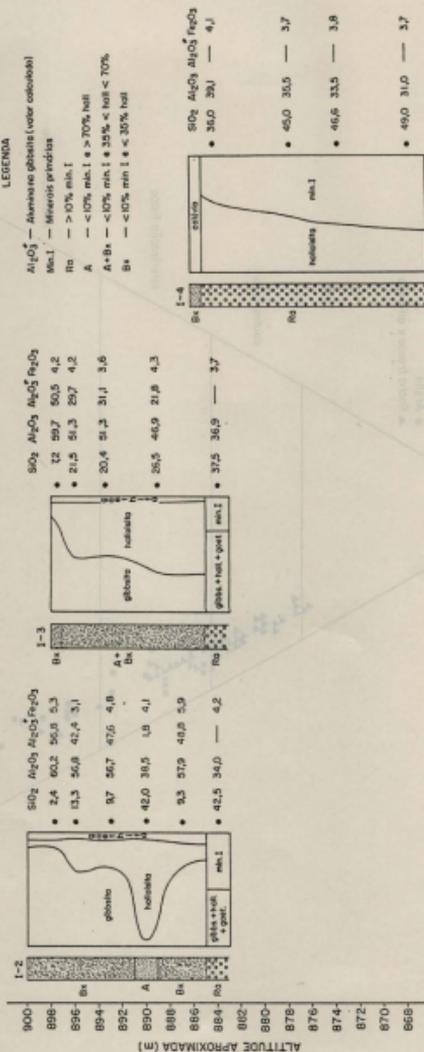


Figura 11 — Composição mineralógica e química de perfis de alteração sobre rochas alcalinas em diferentes porções topográficas

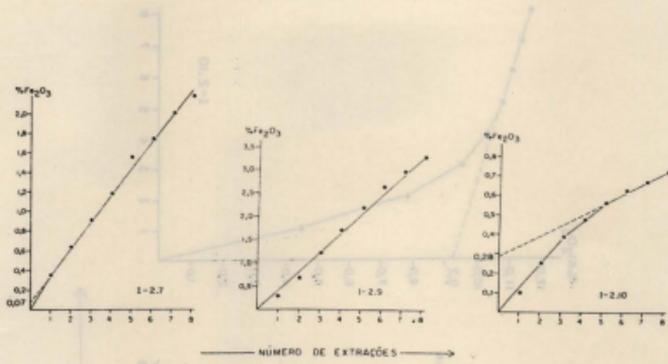


Figura 12 — Curvas de extração de amorfos obtidas para o Fe

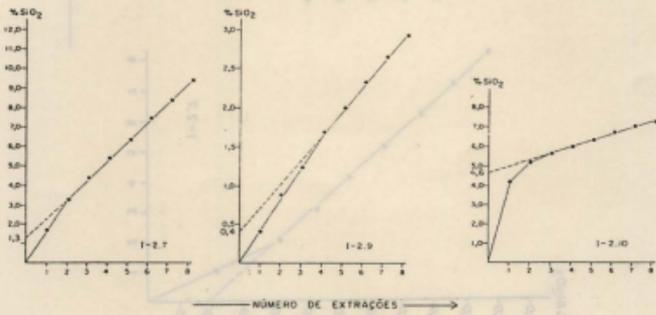


Figura 13 — Curvas de extração de amorfos obtidas para o Si

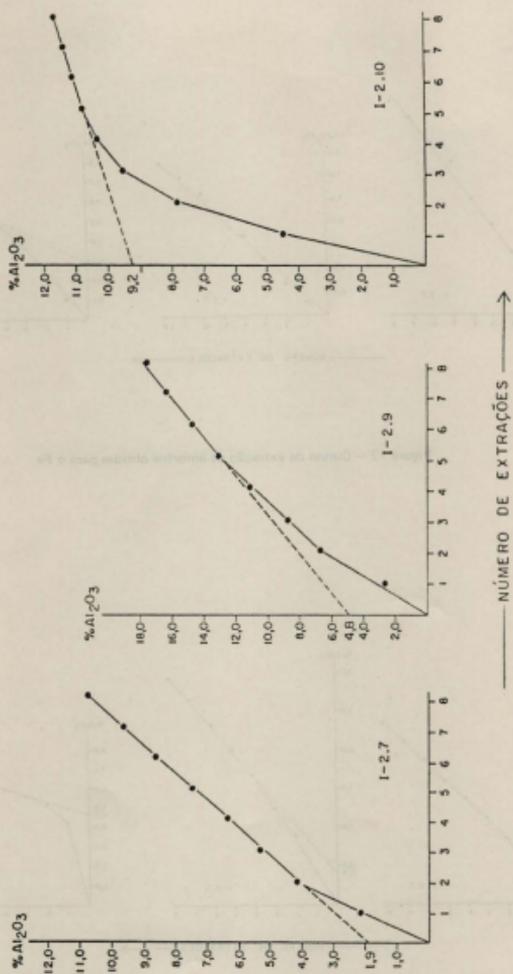


Figura 14 — Curvas de extração de amorfos obtidas para o Al

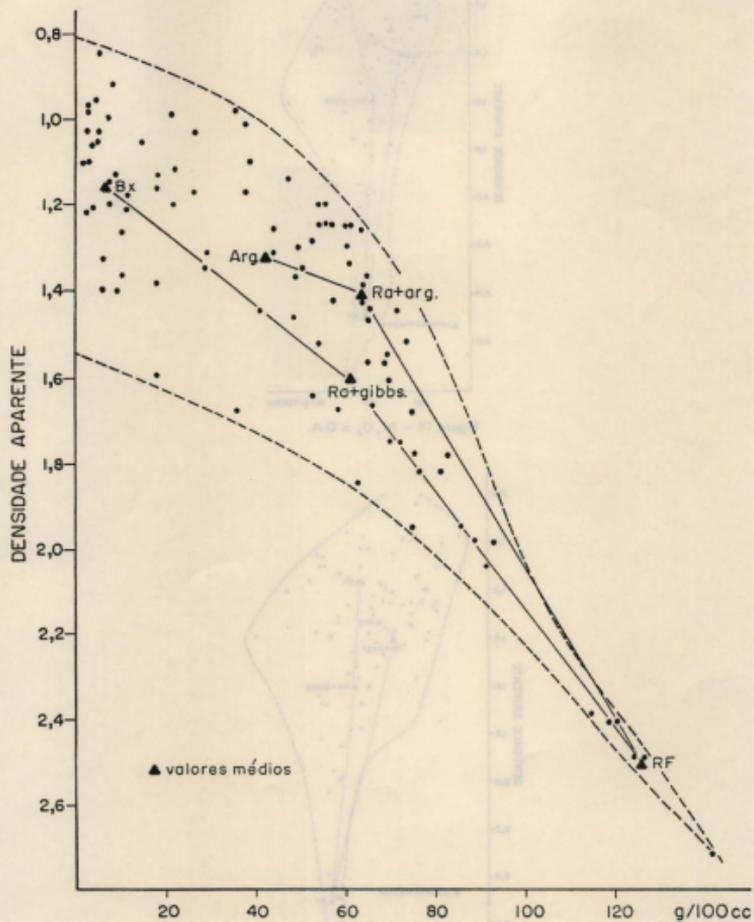
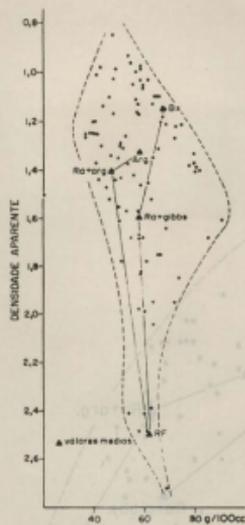
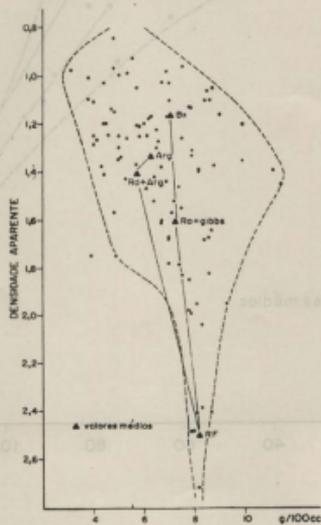


Figura 15 - SiO<sub>2</sub> x D.A.

Figura 16 -  $\text{Al}_2\text{O}_3$  x D.A.Figura 17 -  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  x D.A.

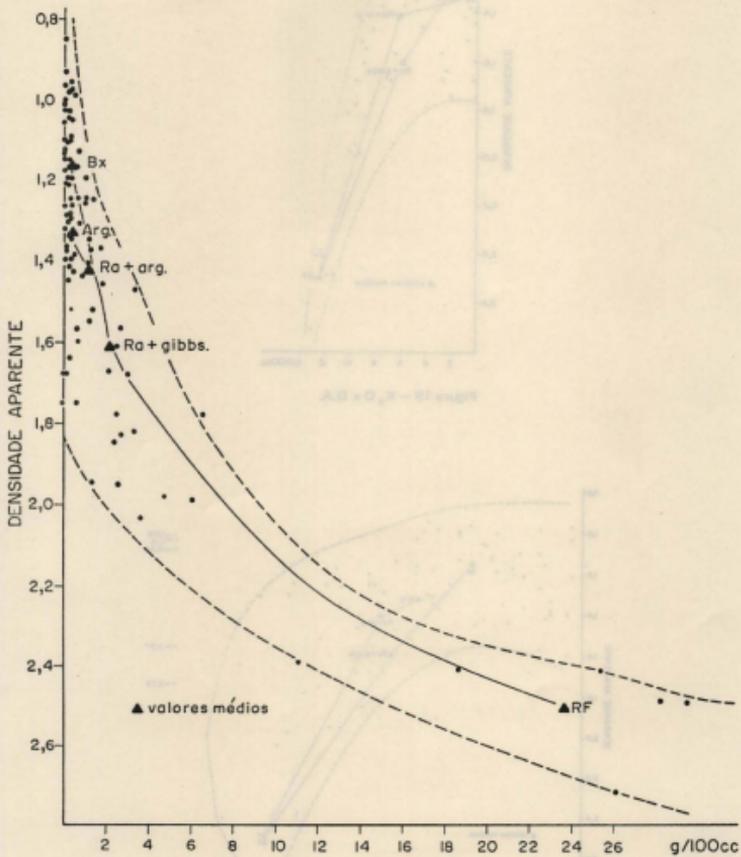


Figura 18 -  $\text{Na}_2\text{O}$  x D.A.

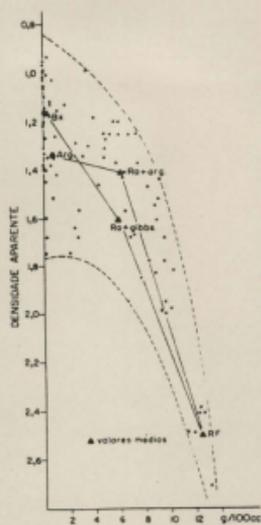


Figura 19 -  $K_2O \times D.A.$

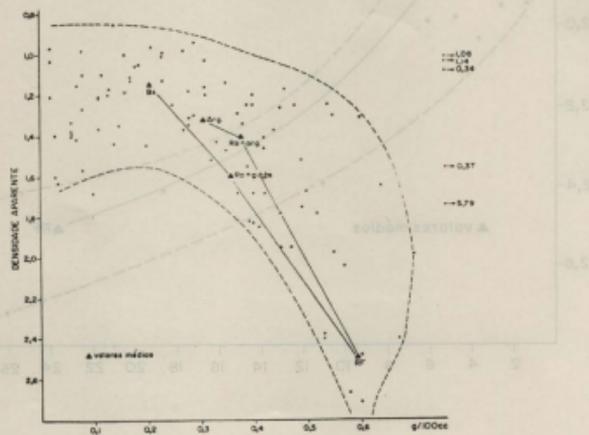


Figura 20 -  $MnO_2 \times D.A.$

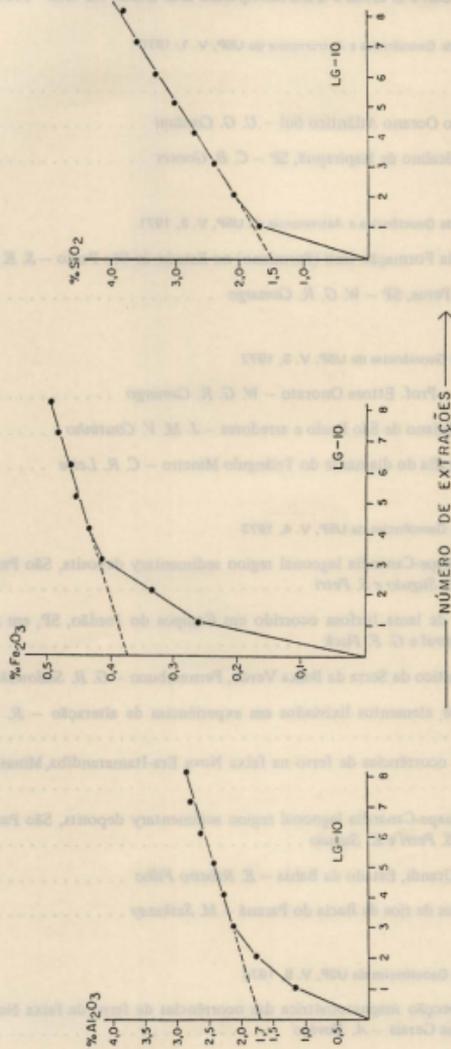


Figura 21 — Curvas de extração de amostra para amostra do córtex de fragmento de fonólito