



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 566

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DE BAUXITAS DE BARRO
ALTO (GOIÁS): CONSIDERAÇÕES GENÉTICAS**

Dissertação apresentada por:

VITOR HUGO SANTANA MOURA

Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa (UFPA)

**BELÉM
2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo (a) autor (a)

M929m Moura, Vitor Hugo Santana
Mineralogia e geoquímica de bauxitas de Barro Alto (Goiás) : considerações
genéticas / Vitor Hugo Santana Moura. — 2019.
xviii, 64 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa Dissertação
(Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em
Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do
Pará, Belém, 2019.

1. Bauxita - Barro Alto (GO). 2. Mineralogia - Goiás. 3. Gibbsita. 4.
Caulinita. 5. Halloysita. I. Título.

CDD 333.85492614



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DE BAUXITAS DE BARRO ALTO (GOIÁS): CONSIDERAÇÕES GENÉTICAS

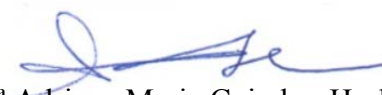
DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR
VITOR HUGO SANTANA MOURA

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOLOGIA E GEOQUÍMICA, linha de pesquisa MINERALOGIA E GEOQUÍMICA**

Data de Aprovação: 01 / 10 / 2019

Banca Examinadora:


Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa
Orientador – UFPA


Prof.ª Dr.ª Adriana Maria Coimbra Horbe
Membro – UnB


Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica
Membro – UFPA

*Agradeço primeiramente a Deus,
Por ter me dado discernimento e saúde para enfrentar as dificuldades;
Aos meus pais, Maria do Rosário Santana Moura e Raimundo de Souza Moura,
Por terem me preparado para os desafios da vida e sempre acreditarem em mim;
Por não medir esforços para me proporcionar uma boa educação;
Pelas palavras de incentivo e orientações de vida;
Pelo amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Dr. Marcondes Lima da Costa, pela proposição do tema e por acreditar em meu potencial para desenvolvê-lo, assim como pelo esforço em proporcionar os recursos e matérias necessários ao desenvolvimento deste trabalho. Bem como as lições de vida, paciência e orientações ao longo desta dissertação, meu muito obrigado;

Ao Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG) da Universidade Federal do Pará (UFPA) pela a infraestrutura laboratorial e pelos recursos financeiros;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Agradeço ao Geólogo Gustavo Guerra (EDEM Mineração) e ao consultor técnico Geólogo Tadeu Veiga, pelo auxílio nas etapas de campo, laboratorial, apoio logístico, dados e relatórios internos, meu muito obrigado e admiração por vocês e por esta empresa que me deu todo o suporte para este trabalho.

Aos professores e técnicos do Instituto de Geociências (IG) responsáveis pela Oficina de Preparação de Amostras (Prof.^a Candido Moura); Oficina de Laminação (Prof.^a Vania Barriga, téc. Joelma Lobo e téc. Bruno Veras); Laboratório de Sedimentologia (Prof. Afonso Nogueira e téc. Everaldo Cunha); Laboratório de Microanálises (Prof. Dr. Cláudio Lamarão, téc. Gisele Marques e téc. Ana Paula); e Laboratório de Mineralogia Geoquímica e Aplicações (Prof. Marcondes Lima da Costa e Glayce Valente);

Aos amigos que me acolheram tão bem no Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA) da UFPA, especialmente ao Paulo Ronny, Karine Santos, Daiveson Abreu, Pabllo Santos, José Diogo, Priscila Gozzi, Igor Barreto, Leonardo Boiadeiro, Laís Aguiar, Rayara Silva, Allan Dias, Suyanne Rodrigues, Gisele Marques, Alessandro Leite, Rose Norat, Darilena Porfirio e Glayce Valente, pelo companheirismo e suporte;

E a todos que direta ou indiretamente contribuíram para a execução e conclusão deste trabalho.

“Ama-se mais o que se conquista com esforço”

Benjamin Disraeli

RESUMO

No município de Barro Alto, Goiás, um depósito de bauxita foi desenvolvido, em sua maior parte, sobre anortositos de idade Neoproterozoica. Segundo os dados recentes publicados o modo geral de ocorrência reforça a origem laterítica, visto que a bauxita acompanha a atual superfície topográfica. No entanto, a sucessão de horizontes não corresponde a este modelo, ao menos parcialmente. A ausência ou dimensão restrita do horizonte argiloso com caulinita, ou ainda a presença de corpos de caulinita seccionando o corpo bauxítico, que atinge localmente grandes espessuras, desequilibram o modelo laterítico simples. Isso é reforçado pela ausência da clássica crosta ferro-aluminosa tipo pele-de-onça ou assemelhada e ausência de outra cobertura. Para aqueles autores a ampla ocorrência de gibbsita macrocristalina, botrioidal, extensiva, aparentemente ocupando vênulas e paredes de fraturas, o que sugere ao lado da diversidade de modo de ocorrência de argilas, uma contribuição de outro processo, que não somente a lateritização. A partir destas informações foi elaborado um estudo para aprofundar o conhecimento sobre a formação da bauxita de Barro Alto, detalhando as gerações de gibbsita e caulinita, bem como tentar identificar as contribuições lateríticas e hidrotermais a partir desses minerais. Em campo, foram estudadas 5 lavras exploradas pela empresa EDEM – Mineração LTDA, (Lavra 1, Lavra 2, Lavra 5, Lavra 6 e a trincheira SELA), destas 5 lavras foi realizado um maior detalhamento nas lavras 1, 2, 5 e SELA. Onde foram coletadas 48 amostras, destas selecionou-se 22 mais representativas para análises laboratoriais que envolveram caracterização mineralógica (Difratometria de Raios X); textural (Microscopia Óptica e Eletrônica de Varredura); e química (Espectrometria de Massa e de Emissão Óptica, com Plasma Indutivamente Acoplado). Em termos gerais o perfil bauxítico em Barro Alto compreende o anortosito como substrato e possível rocha geradora, sobre o qual se estabeleceram o horizonte bauxítico poroso (HBP) com *stockworks* e veios de caulim flint (CF), localmente com cristais subcentimétricos de coríndon (HBPC), convergindo para uma zona argilosa bauxítica (ZAB) e então o horizonte bauxítico maciço (HBM). Este por sua vez é sobreposto por capeamento formado de blocos e nódulos centimétricos a decamétricos de bauxita maciça (HBANB), cujo modo de ocorrência sugere formação coluvionar. Nos perfis observa-se que os horizontes HBP, HBPC, HBM e HBANB são constituídos essencialmente por gibbsita e caulinita, contendo por vezes minerais acessórios como o coríndon HBPC, seguidos de hematita e goethita. Já no CF e na zona argilosa bauxítica ZAB o mineral dominante é a caulinita e/ou halloysita, seguido de gibbsita. A composição química do perfil bauxítico é composta basicamente por Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 . As concentrações de CaO , MgO , K_2O , MnO , Na_2O e P_2O_5 são muito baixas (em geral $< 0,09$), até mesmo abaixo do limite de detecção analítica. Os teores de TiO_2 também são relativamente baixo, em geral $< 0,2$ %. As concentrações dos elementos traços quando comparadas com os

valores médios da Crosta Superior da Terra (CST) se mostram em geral em valores muito baixos. As concentrações de elementos como Cr, Co, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Pb, Th e U estão em níveis inferiores a CST em todos os horizontes. Apenas Mo apresenta valores mais concentrados em todos os horizontes. Por outro lado, a V, Ni, Cu, Cr, Ga, e Pb que podem apresentar eventualmente valores superiores mais especificamente, porém apenas em parte no CF e ZAB. As concentrações dos elementos terras raras (ETR) estão abaixo da média crustal em todas as amostras estudadas e também do anortosito. As concentrações mais elevadas estão tipicamente relacionadas às unidades mais argilosas com CF, ZAB e também a presença dos oxi-hidróxidos de Fe (HBPC). Quando normalizados aos condritos, as curvas exibem padrão de distribuição ligeiramente semelhante entre si, exceto para a bauxita porosa com coríndon. Observa-se sutil enriquecimento em ETRL e tendência aos pesados, mas apenas de Tm ao Lu. Esse comportamento se assemelha ao do anortosito, apenas com concentrações bem mais baixas, com exceção do Tm. É nítida as anomalias negativas em Ce e positiva em Tm, anomalias atreladas ao empobrecimento dos ETRL e ligeiro enriquecimentos dos ETRP. A partir desses dados mineralógicos e químicos foi possível distinguir três gerações distintas de gibbsita e caulinita: Gibbsita (I) do horizonte bauxítico poroso, que parece ser aquela formada diretamente dos plagioclásios e almandina; Gibbsita (II) está associada ao caulim flint, portanto a caulinita, halloysita e mesmo localmente hematita; Gibbsita (III) macrocristalina coesa, por vezes drúsica e sobreposta a gibbsita mais fina e compacta, de aspecto botrioidal. Ela forma corpos isolados, aparentemente desconectados do conjunto maior de bauxitas, em bolsões de dezenas de metros de largura e profundidades superiores a 40 m; Caulinita (I) na interface gibbsita - anortosito. Essa caulinita constitui as auréolas de alteração do anortosito, quando este não passa direto para gibbsita; Caulinita (II) corresponde aquela do caulim flint ou simplesmente caulim, associada à halloysita e por vezes gibbsita e ocorrendo sob a forma de vênulas, veios e bolsões e zonas fraturadas verticalizadas, os *stockworks* em geral; Caulinita (III) corresponde àquela encontrada principalmente no horizonte bauxítico argiloso com nódulos, em que esse mineral se apresenta em massa amarelada, terrosa, invadindo a massa bauxítica e envolvendo os nódulos centimétricos a decamétricos. As gerações de gibbsita, I, II e III, principalmente II e III não são compatíveis com evolução laterítica, da mesma forma as gerações de caulinita, I, II, e III, em que I e II não são claramente intempéricas lateríticas, e a III parece ser pedogenética atual a sub-atual. Pelo exposto provavelmente as bauxitas de Barro Alto sejam produto principalmente de intensa atividade hidrotermal subsuperficial dos anortositos por conta da forte deformação estrutural a que foram submetidas essas rochas em seus estágios finais pós-emplacement.

Palavras-chave: Bauxita - Goiás. Mineralogia - Goiás. Gibbsita. Caulinita. Halloysita.

ABSTRACT

In the municipality of Barro Alto, Goiás, a bauxite deposit was developed, mostly, on Neoproterozoic anorthosites. According to recent published data, the general mode of occurrence reinforces the lateritic origin, since bauxite follows the current topographic surface. However, the succession of the horizons is not corresponding to the others of the lateritic model, at least partially. The absence or restricted size of the clay horizon with kaolinite, or the presence of kaolinite bodies sectioning the bauxitic body, which locally reaches large thicknesses, overturn the simple lateritic model. This is reinforced by the absence of the classic leopard skin-like pattern or similar iron-aluminous crust and the absence of other coverage. For various authors the wide occurrence of extensive macrocrystalline, botrioidal gibbsite, apparently occupying venules and fracture walls suggests, along with the diversity of the way of occurrence of clays, a contribution of another process, not only lateritization. From this information a study was elaborated to deepen the knowledge about the formation of the Barro Alto bauxite, detailing the generations of gibbsite and kaolinite, as well as to try to identify the lateritic and hydrothermal contributions with these minerals. In the field, 5 mines explored by the company EDEM - Mineração LTDA were studied (Mining 1, Mining 2, Mining 5, Mining 6 and the SELA trench). From these mines, a greater detail was made in mines 1, 2, 5 and in SELA trench. Forty-eight samples were collected from which 22 most representative samples were selected for laboratory analysis involving mineralogical (X-ray Diffractometry), textural (Optical and Scanning Electron Microscopy), and chemistry (Inductively Coupled Plasma Mass and Optical Emission Spectrometry) characterization. In general, the bauxitic profile of Barro Alto comprises the anorthosite as substrate and possible source rock, on which a porous bauxite horizon (HBP) with stockworks and flint-type veins of kaolin (CF), and locally with subcentimeter corundum crystals (HBPC) was established. They converge to a bauxitic clay zone (ZAB) and then to a massive bauxite horizon (HBM). This in turn is superimposed by a capping formed by centimetric to decametric blocks and nodules of massive bauxite (HBANB), whose occurrence suggests a colluvial formation. In the profiles the horizons HBP, HBPC, HBM and HBANB consist essentially of gibbsite and kaolinite, sometimes containing accessory minerals such as corundum (HBPC), followed by hematite and goethite. In CF and in the bauxite clay zone (ZAB) the dominant mineral is kaolinite and/or halloysite, followed by gibbsite. The chemical composition of the bauxitic profile is basically composed of Al_2O_3 , SiO_2 and Fe_2O_3 . CaO , MgO , K_2O , MnO , Na_2O and P_2O_5 concentrations are very low (generally <0.09), even below the analytical detection limit. TiO_2 contents are also relatively low, generally $<0.2\%$. Trace element concentrations when compared to the average values of the Earth's Upper Crust (EUC) are generally very low. The concentrations

of elements such as Cr, Co, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Pb, Th and U are below EUC in all horizons. Only the element Mo has more concentrated values in all horizons. On the other hand, V, Ni, Cu, Cr, Ga, and Pb may eventually have higher values especially in some parts of CF and ZAB. Rare Earth Element (REE) concentrations are below the crustal average in all samples studied and also in the anorthosite. The higher concentrations are typically related to the clayey units such as CF and ZAB, and also to the presence of Fe oxides-hydroxides (HBPC). When normalized to the chondrites, the curves exhibit a slightly similar distribution pattern except for porous bauxite with corundum. There is a slight LREE enrichment and a HREE tendency, but only from Tm to Lu. This behavior resembles that of anorthosite, but with much lower concentrations, except for Tm. It is clear the negative anomalies in Ce and positive in Tm, anomalies linked to LREE depletion and a slight enrichment of HREE. From these mineralogical and chemical data, it was possible to distinguish three distinct generations of gibbsite and kaolinite: Gibbsite (I): of the porous bauxitic horizon, which appears to be that formed directly from the plagioclase and almandine; Gibbsite (II): associated with flint kaolin, along with kaolinite, halloysite and even locally hematite; Gibbsite (III): Cohesive and macrocrystalline, sometimes drusic and overlapping the thinner and more compact botryoidal gibbsite. It forms isolated bodies, apparently disconnected from the larger set of bauxites, in pockets of tens of meters wide and depths greater than 40 m; Kaolinite (I) at the gibbsite - anorthosite interface. This kaolinite makes up the halos of anorthosite alteration, when it does not go straight to gibbsite; Kaolinite (II) corresponds to that of flint kaolin, associated with halloysite and sometimes gibbsite. It occurs in the form of venules, veins and pockets, and vertical fractured zones, the stockworks in general. Kaolinite (III) corresponds to that found mainly in the clayey bauxite horizon with nodules, in which this mineral is yellowish, earthy, invading the bauxite mass and involves the centimetric to decametric nodules. The generations of gibbsite, I, II and III, especially II and III, are not compatible with lateritic evolution, likewise the kaolinite, I, II, and III generations, where I and II are not clearly lateritic, and the III seems to be current pedogenetic. Therefore, it is likely that Barro Alto bauxites are the product of the intense subsurface hydrothermal activity of anorthosites, due to the strong structural deformation in which these rocks were subjected in their final post-emplacement stages.

Keywords: Bauxite - Goiás. Mineralogy – Goiás. Gibbsite. Kaolinite. Halloysite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- A) Geologia regional da Província Estrutural Tocantins no Brasil Central. Adaptado Giovanardi *et al.* (2017); B) Complexo de Barro Alto e suas sequências e zonas litológicas. Adaptado de Giovanardi *et al.* (2017). 5
- Figura 2- A) Localização da área de estudo; B) Modelo Digital de Elevação do Complexo de Barro Alto gerado a partir dos dados SRTM evidenciando as Serras de Santa Bárbara, Laguna e Serra Grande e em destaque o Maciço Bauxítico de Barro Alto; C) Localização geográfica da área de estudo destacando a imagem retirada do Google Earth dos Morros da Torre e do Buraco; D) Imagem de satélite das lavras onde foram descritos perfis geológicos e conduzidas as amostragens, com base em imagens do Google Earth, acessado em 25 de Setembro de 2018. 8
- Figura 3- Perfis compostos das Lavra 1, 2 5 e SELA e perfil composto para Barro Alto. 13
- Figura 4- A) Interior da trincheira da Lavra 2 e ao lado com detalhe os perfis; B) Perfis bauxíticos estudados na jazida de bauxita de Barro Alto na Lavra 2; C) Detalhe do perfil descrito na lavra 5, apresentando o horizonte bauxítico poroso seccionado por veio de caulim flint associado a corpos máficos alterados; D) Detalhe da gibbsita macrocristalina presente na Lavra 5 e duas amostras representativas: amostra com gibbsita macrocristalina (1) e amostra com gibbsita botrioidal (2). 14
- Figura 5- A) Detalhe do interior da trincheira da lavra 1; B) Detalhe do Horizonte Bauxítico Poroso em contanto com uma rocha máfica alterada, além de veio de caulim flint; C) Ao centro da trincheira um dique formado por rocha serpentizada seccionada por caulim flint; D) Na extremidade da trincheira o contanto do HBP com o anortosito; E) Detalhe da bauxita porosa rica em cristais sub-centimétricos de coríndon descrita na trincheira SELA. No detalhe uma amostra subtraída, que continha cristais de corindon. 15
- Figura 6- A) Anortosito em contanto com a bauxita. B) Detalhe fotomicrográfico da textura do anortosito granoblástica. Lab: labradorita; Hbl: hornblenda; Aug: augita; Alm: almandina. C) Cristais de almandina no anortosito. D) Minerais identificados por DRX do anortosito. An: plagioclásio cálcico (anortita/labradorita); Hbl: hornblenda; Agt: augita; Alm: almandina. 16

Figura 7- A) Horizonte Bauxítico Poroso com estrutura tipo *stockwork*, localizado na Lavra 2; B) Detalhe dos veios de caulim flint e a bauxita porosa; C) Bauxita com foliação remanescente do anortosito; D) Amostra de bauxita porosa com bandamento mineral remanescente; E) Difratoograma de raios X de amostra do Horizonte Bauxítico Poroso, praticamente formada apenas de gibbsita. Gbs: gibbsita.18

Figura 8- Fotomicrografias em amostra do Horizonte Bauxítico Poroso. A) Gibbsita microcristalina com aspecto maciço a reticular, sugestiva de alteração diretamente de plagioclásio (nicóis paralelos); B) Gibbsita microcristalina granular e gibbsita alternada com óxi-hidróxido de ferro opaco, sugerindo derivação de granadas, em processo pseudomórfico (nicóis cruzados). C) Imagem de MEV da almandina parcialmente alterada em cimento gibbsítico. D) Espectros de MEV/EDS evidenciando a matriz gibbsítica (1) e a almandina alterada (2). E) Imagem de elétrons secundários de MEV sugerindo cristais de granada substituídos pseudomorficamente por gibbsita e hematita em cimento gibbsítico; F) Mineral relíquiar, provavelmente piroxênio ou granada, envolvida por cimento gibbsítico microcristalino.19

Figura 9- A) Vista de baixo de amostra de gibbsita microcristalina com aspecto maciço; B) Vista de cima de amostra de gibbsita microcristalina com aspecto maciço e *boxwork* macrocristalino. C) Amostra de gibbsita botrioidal; D) Amostra de gibbsita botrioidal apresentando veios de formato drúsico; E) Detalhe do veio de gibbsita macrocristalina em formato acicular plano simétrico drúsico, em matriz gibbsita microcristalina (nicóis cruzados); F) Imagem de MEV da gibbsita macro, com o espectro de EDS evidenciando a sua composição.....20

Figura 10- A) Anortosito com coríndon em destaque; B) Amostra da trincheira SELA do Horizonte Bauxítico Poroso com coríndon; C) Minerais identificados por DRX em amostra do Horizonte Bauxítico Poroso com coríndon da trincheira SELA. Crn: coríndon, Gbs: gibbsita.21

Figura 11- Fotomicrografias de MEV em amostra do Horizonte Bauxítico Poroso com coríndon da trincheira SELA. As fotomicrografias foram obtidas com elétrons secundários. A) Detalhe da superfície do cristal de coríndon com partição típica e bordejado por hematita/goethita secundária, provavelmente; B) Espectro de EDS evidenciando a presença do coríndon (1) e de hematita, provavelmente uma alteração de magnetita associada ao coríndon (2). C) detalhe no alo de alteração do coríndon, com a identificação de lamelas típicas de hematita associadas com cristais pseudo-hexagonais de gibbsita. D) Fotomicrografia por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. Mostrando esqueleto de hematita/goethita dentro ou no entorno do coríndon (em cinza).22

Figura 12- A) Exposição na lavra 2 do Horizonte Bauxítico Poroso com estrutura tipo *stockwork* e os veios de caulim flint; B) Vênulas ou veios que geram o aspecto brechoso, ou *stockworks*, em corpo máfico alterado; C) Amostra de caulim flint coletado na Lavra 1; D) Minerais identificados por DRX em amostra de caulim flint (VM-24). Kln: caulinita; Gbs: gibbsita. E) Amostra com caulim coletada do corpo máfico alterado com ligeira foliação e bastante porosa; F) Minerais identificados por DRX em amostra de caulim flint junto à rocha máfica alterada (VM-17). Hal: halloysita; Gbs: gibbsita; Gt: goethita.....24

Figura 13- Fotomicrografias ópticas em amostra de corpo máfico com caulim flint. A) Vênulas de caulim (nicóis cruzados); B) Vênulas de caulim (nicóis cruzados). Fotomicrografia por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. C) Massa de caulinita com gibbsita e hematita reticulada; D) Espectro de EDS indicando o domínio da gibbsita criptocristalina (1) e possivelmente hematita intercrescida com gibbsita e ainda caulinita (2); Fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários. E) Massa formada de caulinita e halloysita; F) Caulinita intercrescida com gibbsita e halloysita tubular com goethita tabular, com aspecto geral em forma de lâ.25

Figura 14- A) Zona Argilosa Bauxítica com foliação remanescente, localizado na Lavra 2. B) Amostra da Zona Argilosa Bauxítica; C) Matriz caulínítica amarelada (nicóis paralelos); D) Matriz caulínítica escura e gibbsita microcristalina preenchendo poros e substituindo pseudomorfos (nicóis cruzados); E) Minerais identificados por DRX em amostra da Zona Argilosa Bauxítica. Kln: caulinita; Gbs: gibbsita.27

Figura 15- Fotomicrografia por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. A) Aspecto da matriz argilosa com cavidades tipo *boxworks*, prováveis pseudomorfos de minerais ferromagnesianos como piroxênios e também granadas; B) Espectro de EDS evidenciando o domínio de minerais tipos caulinita e/ou halloysita. Fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários (C e D). C) Estrutura em *boxwork* da matriz argilosa; D) Agregados de tubos de halloysita.....28

Figura 16- A) Horizonte Bauxítico Maciço ligeiramente, localizado na Lavra 2; B) Detalhe da bauxita maciça, apresentando veios ou vênulas de caulim e aspecto corroído; C) Amostra de bauxita maciça, compacta, em que uma massa rosada envolve pontuações esbranquiçadas, como se fosse nódulos; D) Amostra de bauxita Maciça semelhante a com vênulas formadas por caulinita/halloysita, em que se observa os nódulos esbranquiçados; E) Minerais identificados por DRX em amostra do Horizonte Bauxítico Maciço. Gbs: gibbsita; Kln: caulinita; Hem: hematita; Gt: goethita.....30

Figura 17- Fotomicrografias de amostra do Horizonte Bauxítico Maciço. A) Plasma gibbsítico, de aspecto porcelanado, portanto maciço (nicóis cruzados). B) Cristal de mineral pseudomorfizado para gibbsita microcristalina em plasma criptocristalino gibbsítico. (nicóis cruzados). Fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. C) Matriz gibbsítica (cinza escuro) com massa de caulim muito fratura e quebrada; D) Espectros de EDS evidenciando a matriz gibbsítica (1) e o caulim fragmentado formado provavelmente por caulinita (2). E) Fotomicrografia de microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários de cristais gibbsita pseudohexagonal (1) e de caulinita/halloysita (2); F) Espectros de EDS dos cristais de gibbsita (1) e caulinita/halloysita (2).31

Figura 18- A e B) Nódulos bauxíticos expostas em trincheira localizada na Lavra 2, com formatos arredondados ou esferoidais; C) Detalhe de um nódulo; D) Vista interior do nódulo anterior, com canal preenchido por material argiloferruginoso; E) Minerais identificados por DRX em amostra de nódulo do Horizonte Bauxítico. Kln: caulinita; Gbs: gibbsita.33

Figura 19- Fotomicrografias em amostra do Horizonte Bauxítico com Nódulos Bauxíticos. A) Matriz gibbsítica e aspecto porcelanado, ou maciço (nicóis cruzados); B) Pseudomorfos apresentando porosidade elevada (nicóis cruzados); C) Matriz gibbsítica com nódulos cauliníticos e alguns poros entre eles; D) Espectro de EDS evidenciando a composição de gibbsita (1) e caulinita (2).34

Figura 20- Distribuição mineral obtida por estequiometria para os perfis das Lavras 1, 2, 5 e SELA..... 36

Figura 21. Distribuição dos teores dos elementos químicos principais (em óxidos) do perfil.40

Figura 22- Distribuição das concentrações dos elementos-traço normalizados pela média da crosta superior da Terra (A) e pelo anortosito (B).42

Figura 23- Diagramas de dispersão mostrando a correlação positiva entre Fe_2O_3 e TiO_2 , Zr e alguns elementos-traço. (A) V x Fe_2O_3 ; (B) Ga x Fe_2O_3 ; (C) Ni x Fe_2O_3 ; (D) TiO_2 x Zr; (E) Nb x Ta; (F) Zr x Nb; (G) Zr x Hf; (H) Ga x Al_2O_3 ; (I) TiO_2 x $\sum \text{ETR}$; (J) Zr x $\sum \text{ETR}$43

Figura 24- Análise de agrupamento dos dados dos elementos químicos do perfil de Barro Alto.44

Figura 25- Curvas de distribuição das concentrações de ETR normalizadas as dos condritos para as amostras de bauxitas e o anortosito.46

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1- Limites mínimos e máximos de detecção dos métodos empregados para determinação da composição química total (GEOSOL). Os elementos Ba, Co, Cu, Ni, Sn, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr quando não detectados por ICP-OES, foram determinados por ICP-MS.....11
- Tabela 2- Composição química total dos perfis bauxíticos de Barro Alto, alumina aproveitável e sílica reativa, incluindo a rocha mãe (Anortosito). (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Rudnick (2003).37
- Tabela 3- (continuação). Composição química total dos elementos maiores e menores dos perfis bauxíticos de Barro Alto, incluindo a rocha mãe (Anortosito). (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Rudnick (2003).38
- Tabela 4- (continuação). Composição química total dos elementos traços dos perfis bauxíticos de Barro Alto, incluindo a rocha mãe (Anortosito). (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Rudnick (2003).39

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	iv
AGRADECIMENTOS.....	v
EPÍGRAFE.....	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....;	ix
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	xi
LISTA DE TABELAS	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 JUSTIFICATIVA	3
3 OBJETIVOS	3
3.1 OBJETIVO GERAL.....	3
3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO.....	3
4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	4
5 LOCALIZAÇÃO	7
6 MATERIAIS E MÉTODOS	9
6.1 ETAPA DE CAMPO.....	9
6.2 AMOSTRAGEM.....	9
6.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X	9
6.4 MICROSCOPIA ÓTICA.....	9
6.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	10
6.6 ANÁLISES QUÍMICAS	10

7	RESULTADOS	12
7.1	A SUCESSÃO ARGILA-BAUXITA NA JAZIDA DE BARRO ALTO.....	12
7.1.1	Anortosito	16
7.1.2	Horizonte Bauxítico Poroso (HBP)	17
7.1.3	Caulim Flint (CF)	23
7.1.4	Zona Argilosa Bauxítica (ZAB).....	26
7.1.5	Horizonte Bauxítico Maciço (HBM)	29
7.1.6	Horizonte Bauxítico Argiloso com Nódulos Bauxíticos (HBANB).....	32
7.2	COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO PERFIL BAUXÍTICO	35
7.2.1	Elementos Maiores	35
7.2.2	Elementos-Traço.....	41
7.2.3	Elementos Terras Raras.....	45
8	DISCUSSÕES	47
9	CONCLUSÕES.....	55
	REFERÊNCIAS.....	57
	APÊNDICES	62
	APÊNDICE A - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DO PERFIL BAUXÍTICO DE BARRO ALTO.....	63

1 INTRODUÇÃO

As maiores reservas de bauxita atualmente conhecidas no mundo são tipicamente aquelas formadas por processos lateríticos ocorridos, sobretudo, durante o Cenozoico. Estão situadas principalmente na Guiné, na Austrália e no Brasil, em especial na Amazônia (Oliveira *et al.* 2016). Recentemente entrou em lavra um depósito bauxítico significativo no Centro-Oeste do país. Trata-se do depósito de bauxita de Barro Alto, no estado de Goiás, por certo o mais expressivo depósito de bauxita fora dos limites da Amazônia, que se destaca pelo alto teor em alumina aproveitável, baixo teor em sílica reativa, baixo teor relativo em ferro e elevada espessura (Vessani & Veiga 2008, Vessani *et al.* 2014).

O depósito tem sido motivo de pesquisas acadêmicas recentes, na forma de uma tese e uma dissertação, além de artigos científicos em periódicos internacionais (Santos 2011, Oliveira 2011, Oliveira *et al.* 2011, 2013 e 2014). São excelentes contribuições que discutem e reforçam a origem laterítica do depósito, embora ressaltem o aspecto não tão comum da gênese de gibbsita, formada diretamente a partir dos anortositos, sem o desenvolvimento clássico do horizonte argiloso ou saprolítico argiloso.

Observações de campo junto à descrição destes trabalhos evidenciam anomalias não tão comuns à formação clássica de bauxita (gibbsita), como a ausência ou dimensão restrita do horizonte argiloso com caulinita, ou ainda a presença de corpos de caulinita seccionando o corpo bauxítico, que atinge localmente grandes espessuras e que desequilibram o modelo laterítico simples. Isto é reforçado pela ausência da clássica crosta ferro-aluminosa tipo pele-de-onça ou assemelhada e a ausência de outra cobertura na jazida (Costa & Veiga 2016), que sugere outros processos de formação (Marcondes Lima da Costa, comunicação verbal; Costa & Veiga 2016).

A partir desses dados, junto a contribuições técnico-científicas sobre diversos depósitos de bauxita no mundo, demonstram que alguns deles não se enquadram no modelo puro e simples laterítico, a menos que tivessem ocorrido sob condições locais propiciadas por fenômenos geológicos específicos (Marcondes Lima da Costa, comunicação verbal, Costa & Veiga 2016). Costa & Veiga (2016) descrevem alguns trabalhos sobre bauxitas que se formaram sob condições específicas. Na Alemanha, Schwarz (1997) descreve a formação de bauxitas ferruginosas, (Hill *et al.* 2001) a formação de lateritas ricas em gibbsita na Irlanda e (Formoso *et al.* 1997, Valetton *et al.* 1997, Sigolo & Boulangé 1997) descrevem a formação de bauxitas ligadas atividades vulcânicas. Em Poços de Caldas, Valetton *et al.* (1997) identificaram intensa atividade metassomática que levou à formação de argilominerais e óxi-

hidróxidos de ferro. Schullmann *et al.* (1997) descrevem a formação de cliachita, um material amorfo, amarronzado, constituído de óxi-hidróxidos de Al e Fe, também integrante das bauxitas, apresentando-se como precursor da gibbsita e hematita, sendo citado também nas bauxitas de Poços de Caldas. Nas ilhas vulcânicas do Hawaí também se reconheceu a formação de gibbsita a partir de halloysita tubular (caulinita está ausente) ou mesmo diretamente dos plagioclásios, ou via fases amorfas de hidróxidos de alumínio, como cliachita, allophana (Bates 1962).

Em Barro Alto, Goiás, o depósito de bauxita atualmente em lavra, desenvolveu-se em sua maior parte, até então conhecida, diretamente de anortositos, com idade Neoproterozoica (Oliveira *et al.* 2011). Segundo Costa & Veiga (2016), o modo geral de ocorrência reforça a origem laterítica, visto que a bauxita acompanha a atual superfície topográfica. No entanto, a sucessão de horizontes não corresponde a este modelo, ao menos parcialmente. A ausência ou dimensão restrita do horizonte argiloso com caulinita, ou ainda a presença de corpos de caulinita seccionando o corpo bauxítico, que atinge localmente grandes espessuras, desequilibram o modelo laterítico simples. Isso é reforçado pela ausência da clássica crosta ferro-aluminosa tipo pele-de-onça ou assemelhada; além da ausência de outro tipo de cobertura. Para aqueles autores a ampla ocorrência de gibbsita macrocristalina, botrioidal, extensiva, aparentemente ocupando vênulas e paredes de fraturas, sugere, ao lado da diversidade de modo de ocorrência de argilas, uma contribuição de outro processo, que não somente a lateritização. Assim, o principal objetivo desse trabalho, a partir da recomendação destes autores é avaliar uma possível contribuição hidrotermal sobre a origem do depósito.

2 JUSTIFICATIVA

Com as possibilidades descritas anteriormente, junto com exemplos inclusive ligados a atividades vulcânicas, pode-se assumir que também haja outras possibilidades para a formação de bauxitas, obviamente em escala restrita. Isto possivelmente ocorreu também em Barro Alto, em período anterior ou concomitantemente à lateritização (Costa & Veiga 2016) e que pode ter sido favorecida por minerais precursores a gibbsita proporcionando a extensão da formação de bauxitas pela lateritização.

A parceria Universidade Federal do Pará e a empresa EDEM – Mineração LTDA, proporcionou acesso as suas lavras e dados geológicos e químicos para fins acadêmicos.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho busca ampliar o conhecimento científico sobre a gênese da bauxita de Barro Alto, em Goiás, através do estudo das novas exposições da bauxita, atualmente em lavra, a partir dos novos dados mineralógicos e químicos de perfis bauxíticos da jazida, visando avaliar os processos envolvidos na sua formação, em especial o hidrotermal.

3.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos desta dissertação foram:

- ✓ Caracterização geológica e mineralógica proporcionados pelas novas frentes de lavra.
- ✓ Identificar gerações distintas de gibbsita e caulinita;
- ✓ Tentar identificar as contribuições lateríticas e hidrotermais a partir da avaliação de diferentes gerações de gibbsita e caulinita.

4 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

A Província Estrutural Tocantins é uma região orogenética que foi ativa até o Neoproterozoico. Compreende cinturões orogênicos formados durante a colisão de três grandes blocos cratônicos, os crátons Amazônico, São Francisco e o bloco Paraná, durante o ciclo Brasileiro/Pan-Africano incluindo o cinturão Brasília na região do Brasil Central. (Fuck *et al.* 1994, Dardenne 2000, Pimentel *et al.* 2000). Está representada pelas faixas de dobramentos justapostas, denominadas faixas Brasília, Araguaia e Paraguai. A primeira situa-se na margem oeste do Cráton do São Francisco, enquanto as últimas contornam o Cráton Amazônico a Leste e a Sul, respectivamente (Arantes *et al.* 1991).

Neste contexto estão os complexos intrusivos máfico-ultramáficos de Barro Alto, Niquelândia e Cana Brava. Eles formam uma faixa de 350 km com direção NNE dentro do Cinturão Brasília (Fig. 1A) e são consideradas parte do Maciço de Goiás. Trata-se de um terreno exótico, ou mesmo um microcontinente, rompido e acrescido ao cráton de São Francisco durante o evento Brasileiro / Panafricano Neoproterozoico que levou à formação do supercontinente Gondwana (Brito Neves e Cordani 1991, Pimentel & Fuck 1992, Fuck *et al.* 1994, Pimentel *et al.* 2000).

Ao longo dos anos, vários nomes e subdivisões estratigráficas foram atribuídos aos três complexos de Goiás (Girardi & Kurat 1982, Girardi *et al.* 1986, Ferreira Filho *et al.* 1994, Correia *et al.* 1997, Ferreira Filho *et al.* 2010, Giovanardi *et al.* 2017). Uma primeira tentativa de simplificar a estratigrafia dos três complexos foi feita com base no modelo de duas intrusões (Ferreira Filho *et al.* 2010), o que sugere que os complexos sejam formados por eventos intrusivos Meso e Neoproterozoicos, que se cristalizaram na parte superior e nas partes inferiores dos complexos. Esta tentativa unificou os nomes das unidades inferiores dos complexos e diferenciou as unidades superiores como intrusivas diferentes.

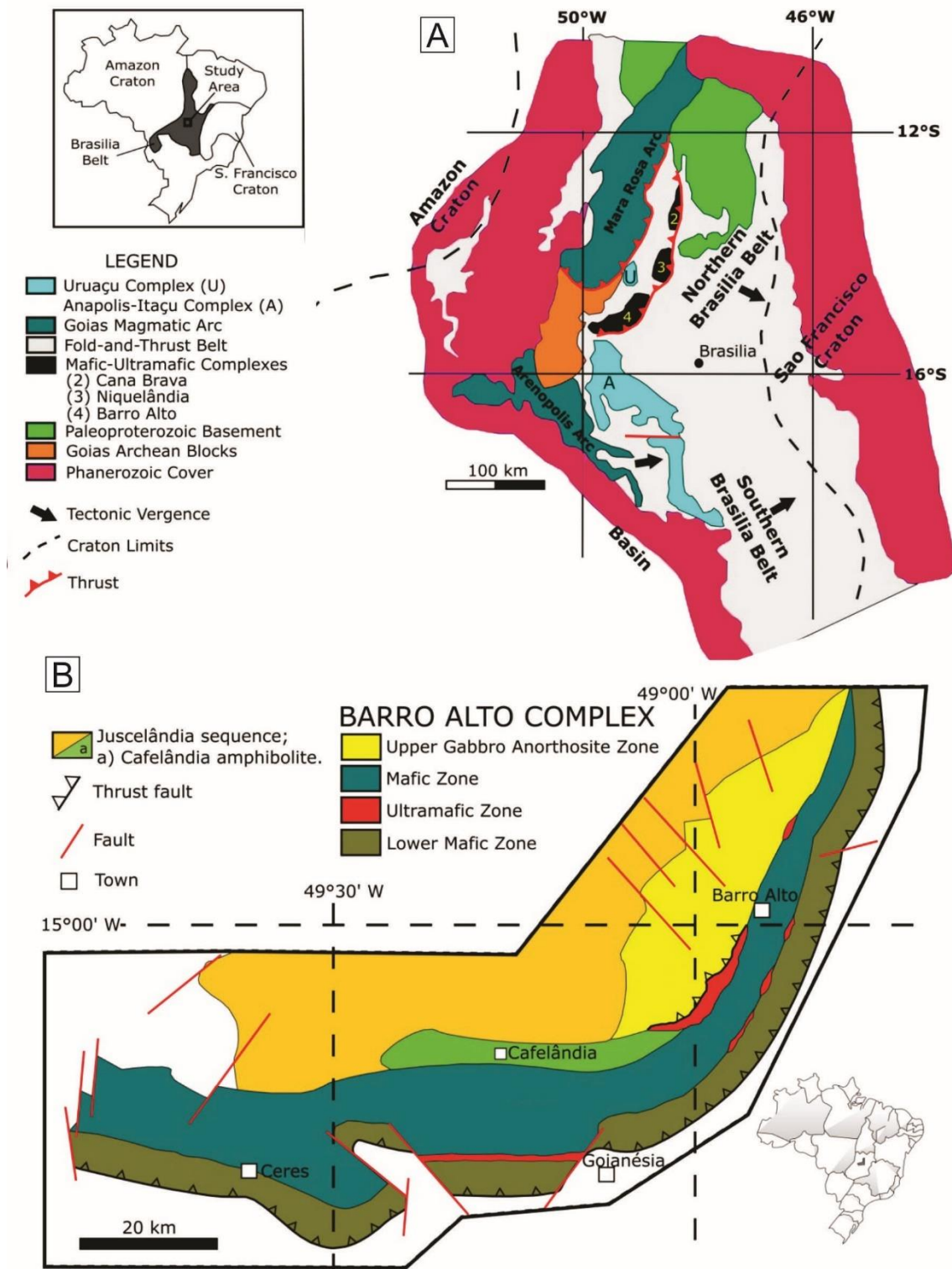


Figura 1- A) Geologia regional da Província Estrutural Tocantins no Brasil Central. Adaptado Giovanardi *et al.* (2017); B) Complexo de Barro Alto e suas seqüências e zonas litológicas. Adaptado de Giovanardi *et al.* (2017).

Essas intrusões compostas são conhecidas como os complexos Canabrava, Niquelândia e Barro Alto, distribuídas de Norte para Sul (Fig. 1B). Além disso, revisitaram-se as denominações anteriores das unidades em camadas Mesoproterozoicas, expostas nas intrusões sul e central, e, conseqüentemente, foram renomeadas para o Complexo Serra da Malacacheta e Serra dos Borges, respectivamente (Ferreira Filho *et al.* 2010). As idades desses dois sistemas magmáticos ainda são controversas. Pimentel *et al.* (2006), Ferreira Filho *et al.* (2010), e Della Giustina *et al.* (2011) sugerem que a parte ocidental dos complexos e as sequências vulcano-sedimentares associadas de Juscelândia, Indianópolis e Palmeirópolis sejam Mesoproterozoicas, enquanto a parte oriental Neoproterozoica, cristalizada a 780 Ma.

Os complexos máficos-ultramáficos compostos, com suas respectivas sequências vulcano-sedimentares, sofreram metamorfismo de fácies anfibolito-granulito, com condições P e T aumentando progressivamente de Oeste para Leste. Localmente, observam-se montagens minerais de temperatura ultra-alta (Moraes & Fuck 1994, 2000, Ferreira Filho *et al.* 1998). Análises de zircão U-Pb SHRIMP realizadas em sobrecrecimentos metamórficos restringem a idade do metamorfismo de alto grau nas intrusões em camadas compostas em aproximadamente 760-750 Ma (Moraes *et al.* 2003, Pimentel *et al.* 2004, 2006). Além disso, as idades U-Pb de rutilo revelam um evento metamórfico mais jovem em torno de 610 Ma, o que é interpretado como relacionado ao levantamento dos complexos no final da orogenia brasileira (Ferreira Filho *et al.* 1994). A configuração estrutural atual dos três complexos compostos em camadas é atribuída a esse episódio tectono-metamórfico.

O Complexo de Barro Alto envolve terreno granulítico com 153 km de extensão, largura entre 8 e 25 km e área total de 2.860 km² cuja morfologia lembra um bumerangue (Fig. 1B) com orientação NNE-SSW, tendendo para E-W e com a concavidade para NW (Winge 1995). Esse Complexo de Barro Alto posicionado tectonicamente na Faixa Dobrada Brasília (Veiga 2008) é caracterizada por corpo Máfico-Ultramáfico na série superior, pelo predomínio de gabros e anortositos, ocorrendo, secundariamente, troctolitos e olivina-gabros (Fuck *et al.* 1981), e na série inferior, por noritos e gabróides na zona máfica e serpentinitos, dunitos, harzburgitos e piroxenitos na zona ultramáfica, além de gabronoritos (Ferreira Filho 1998). As condições de metamorfismo destas rochas variam de granulito a anfibolito (Ferreira Filho *et al.* 1998, Moraes & Fuck 2000).

5 LOCALIZAÇÃO

O depósito de bauxita de Barro Alto localiza-se, nos municípios de Barro Alto e Santa Rita do Novo Destino, ao norte da localidade de Souzalândia, na porção central do estado de Goiás (Fig. 2A). O acesso a partir de Brasília, que está a 170 km de distância, se dá pela BR-080 no sentido das cidades de Padre Bernardo e Dois Irmãos em direção à cidade de Barro Alto. As coordenadas geográficas que centralizam o depósito são: 15°09'28,7" S/ 49°06'57,7" W.

A área estudada no presente trabalho se caracteriza pelo domínio de bauxitas sobrepondo-se a anortositos da Série Acamadada Superior do Complexo de Barro Alto. As principais jazidas estão localizadas entre dois morros: Morro da Torre e Morro do Buraco. O relevo apresenta topos com altitudes aproximadas, entre 1500 e 1300 m, respectivamente (Fig. 2B e 2C). A bauxita é lavrada e beneficiada pela empresa EDEM – (Empresa de Desenvolvimento em Mineração e Participações Ltda.).

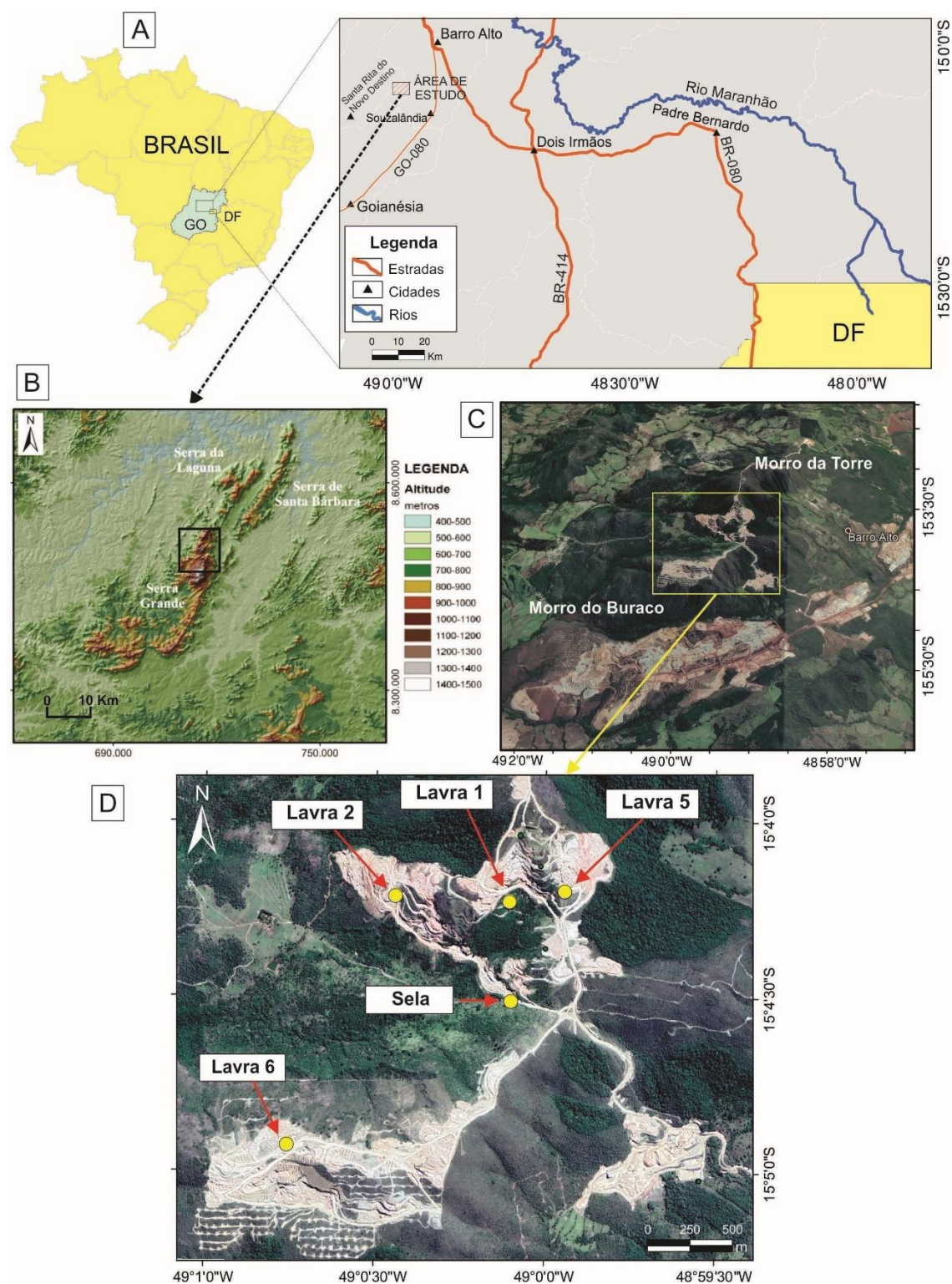


Figura 2- A) Localização da área de estudo; B) Modelo Digital de Elevação do Complexo de Barro Alto gerado a partir dos dados SRTM evidenciando as Serras de Santa Bárbara, Laguna e Serra Grande e em destaque o Maciço Bauxítico de Barro Alto; C) Localização geográfica da área de estudo destacando a imagem retirada do Google Earth dos Morros da Torre e do Buraco; D) Imagem de satélite das lavras onde foram descritos perfis geológicos e conduzidas as amostragens, com base em imagens do Google Earth (2018).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 ETAPA DE CAMPO

As principais atividades de campo foram realizadas em cinco frentes de lavra distintas, envolvendo descrições de perfis geológicos detalhados, sempre procurando identificar horizontes e aspectos texturais do minério e minerais associados. Essas atividades foram nas Lavra 1, Lavra 2, Lavra 5 e SELA, e em parte na Lavra 6 (Fig. 2D).

6.2 AMOSTRAGEM

Foram realizadas amostragens nas 5 lavras indicadas (Lavra 1, Lavra 2, Lavra 5, Lavra 6 e a trincheira SELA), com ênfase maior nas lavras 1, 2, 5 e SELA. Foram coletadas 48 amostras, das quais 22 foram selecionadas para a caracterização mineralógica e química.

6.3 DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A identificação mineralógica geral por DRX foi conduzidas nas 22 amostras selecionadas. A análise por Difração de Raios X (DRX) foi feita com base no método do pó, com emprego do difratômetro Bruker D2 PHASER, com ânodo de Cu. As condições de análise foram faixa angular de 5 a 74,98 °C, passo 0,02°, tempo/passo 38,4 s, tempo total 720 s, fenda 0,2 °C e potência 300 W. Os resultados foram tratados com o software X'Pert High Score Plus, que compara os picos obtidos com os do Centro Internacional de Dados de Dinâmica (ICDD).

6.4 MICROSCOPIA ÓTICA

Foram analisadas 22 lâminas delgadas e polidas representativas das 22 amostras selecionadas, visando além da caracterização mineralógica a textural por microscopia óptica. Destas amostras, 2 representativas da rocha-mãe (anortosito), uma de rocha máfica encaixante, e as demais contemplam a interface de alteração, marcada pela passagem da rocha fresca para a bauxita, ou do contato entre os níveis gibbsíticos ou cauliníticos, e a própria bauxita. Os aspectos micromorfológicos foram observados inicialmente através de estereomicroscópio Leica EZ4 D com câmera CMOS 3.0 megapixel incorporada. Em seguida, se utilizou microscópio petrográfico LEICA DM 2700 P com câmera LEICA MC 170 HD acopladas para a investigação em lâminas delgadas e polidas. A nomenclatura adotada para a textura foi à proposta pelo "Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering" (Delvigne 1998).

6.5 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A micromorfologia dos cristais foi investigada com auxílio do MEV Zeiss modelo SIGMA-VP, por imagens de Elétrons Secundários, auxiliada por análise química por Espectrometria de Energia Dispersiva (EDS) IXRF modelo Sedona-SD, que permitiu a identificar a fase mineral em apreço. As condições de operação do MEV foram: corrente do feixe de elétrons = 80 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 kv, distância de trabalho = 8,5 mm, tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s. Para a obtenção de imagens por MEV e análises químicas por EDS, as amostras foram montadas em fita dupla face colada em lâmina de vidro e metalizadas com ouro durante 1,5 minutos, em um sistema automático de metalização, modelo Emitech K550X, a fim de torná-las eletricamente condutivas.

6.6 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas de amostra total para a determinação dos elementos maiores, menores, traços incluindo os elementos terras raras (ETR), foram realizadas em laboratório comercial (GEOSOL). Os elementos maiores foram determinados por Espectrometria de Emissão Ótica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Para tal, as amostras foram fundidas com metaborato de lítio e digeridas em ácido nítrico diluído. A perda ao fogo foi determinada por calcinação a 405°C e/ou 1.000°C. Os elementos-traço e ETR foram determinados por Espectrometria de Massa com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-MS), após fusão, que utilizou metaborato de lítio enquanto as pastilhas foram digeridas em ácido nítrico. Além dessas análises químicas foram determinadas alumina aproveitável e sílica reativa nos laboratórios a serviços da EDEM.

Tabela 1- Limites mínimos e máximos de detecção dos métodos empregados para determinação da composição química total (GEOSOL). Os elementos Ba, Co, Cu, Ni, Sn, Th, U, V, W, Y, Zn, Zr quando não detectados por ICP-OES, foram determinados por ICP-MS.

Elemento	ICP-OES		Elemento	ICP-OES	ICP-MS	
	Lim. mín. (%)	Lim. máx. (%)		Lim. mín. (ppm)	Lim. mín. (ppm)	Lim. máx. (ppm)
SiO ₂	0,01	100	Ag	3	-	100
Al ₂ O ₃	0,01	100	As	10	-	10.000
Fe ₂ O ₃	0,01	100	Ba	3	10	50.000
CaO	0,01	100	Be	3	-	10.000
MgO	0,01	100	Bi	20	0,1	2.000
Na ₂ O	0,01	100	Cd	3	0,1	2.000
K ₂ O	0,01	100	Co	8	0,2	10.000
MnO	0,01	100	Cs	-	0,1	10.000
TiO ₂	0,01	100	Cu	3	5	10.000
P ₂ O ₅	0,01	100	Ga	-	0,1	10.000
LOI	0,1	100	Hf	-	0,05	10.000
			Hg	-	0,1	100
			Mo	-	0,1	2.000
			Nb	-	0,05	50.000
			Ni	3	0,1	10.000
			Pb	8	0,1	10.000
			Rb	-	0,1	10.000
			Sb	-	0,1	2.000
			Sc	1	-	10.000
			Se	20	-	100
			Sn	20	0,3	10.000
			Sr	3	10	50.000
			Ta	-	0,05	50.000
			Th	20	0,1	10.000
			Tl	20	0,5	1.000
			U	20	0,05	10.000
			V	8	5	10.000
			W	20	0,1	10.000
			Y	3	0,05	50.000
			Zn	3	5	10.000
			Zr	3	10	50.000
			La	20	0,1	50.000
			Ce	-	0,1	50.000
			Pr	-	0,05	10.000
			Nd	-	0,1	10.000
			Sm	-	0,01	10.000
			Eu	-	0,05	10.000
			Gd	-	0,05	10.000
			Tb	-	0,05	10.000
			Dy	-	0,05	10.000
			Ho	-	0,05	10.000
			Er	-	0,05	10.000
			Tm	-	0,05	10.000
			Yb	-	0,01	10.000
			Lu	-	0,05	10.000

7 RESULTADOS

7.1 A SUCESSÃO ARGILA-BAUXITA NA JAZIDA DE BARRO ALTO

Em termos gerais o perfil bauxítico em Barro Alto (Fig. 3) compreende o anortosito como substrato e possível rocha geradora, sobre o qual se estabeleceram o horizonte bauxítico poroso com *stockworks* e veios de caulim flint. Observa-se localmente com cristais subcentimétricos de coríndon, convergindo para uma zona argilosa bauxítica e então o horizonte bauxítico maciço. Este por sua vez é sobreposto por capeamento formado de blocos e nódulos centimétricos a decamétricos de bauxita maciça, cujo modo de ocorrência sugere formação coluvionar. Essa sucessão completa não é observada em todas as frentes de lavra, sendo a lavra 2 a mais representativa. Na lavra 1 o horizonte bauxítico poroso ainda contém blocos grandes de anortositos, rochas máficas sãs e caulim flint. Em Sela o horizonte bauxítico poroso é rico em cristais centimétricos de coríndon. O Horizonte Bauxítico Maciço foi reconhecido por Santos (2011) e Oliveira *et al.* (2011). Neste horizonte a bauxita é formada por uma massa gibbsítica que ocupou os poros preexistentes. Nódulos caulínicos são comuns e bastante fragmentados, o que sugere intensa atividade deformacional. Aspectos contundentes é a constante presença de caulim flint em veios, faixas, faixas essas horizontais e/ou verticais, além de blocos decamétricos a métricos de anortosito.

Na lavra 2 (Fig. 4A e B) o Horizonte Bauxítico Poroso (HBP) converge para uma zona mais argilosa denominado, Zona Argilosa Bauxítica (ZAB), sendo essa convergência tanto na vertical quanto na lateral; a NW da trincheira é nítida a sucessão gradacional variando de bauxita porosa para bauxita maciça, com cristais bem desenvolvidos de gibbsita. Ao topo toda a sequência é parcialmente coberta por material dominado por nódulos centimétricos a decamétricos de bauxita compacta em matriz argilosa amarela, correspondente a colúvio, o Horizonte Bauxítico Argiloso com Nódulos Bauxíticos (HBANB).

Na Lavra 2 também se identificou a presença de grandes veios e vênulas de caulim flint formando estruturas do tipo *stockwork* (Fig. 4A), em meio ao Horizonte Bauxítico Poroso. Caulim Flint é constituído principalmente de halloysita, e a bauxita porosa majoritariamente de gibbsita, com oxi-hidróxidos de ferro restritos. O Horizonte Bauxítico Poroso neste perfil apresenta foliações remanescentes, o que sugere que o anortosito foi substituído por bauxita. A bauxita deste horizonte está em contato direto com a bauxita maciça; nele ocorrem ainda pequenas concreções formadas por gibbsita e caulinita.

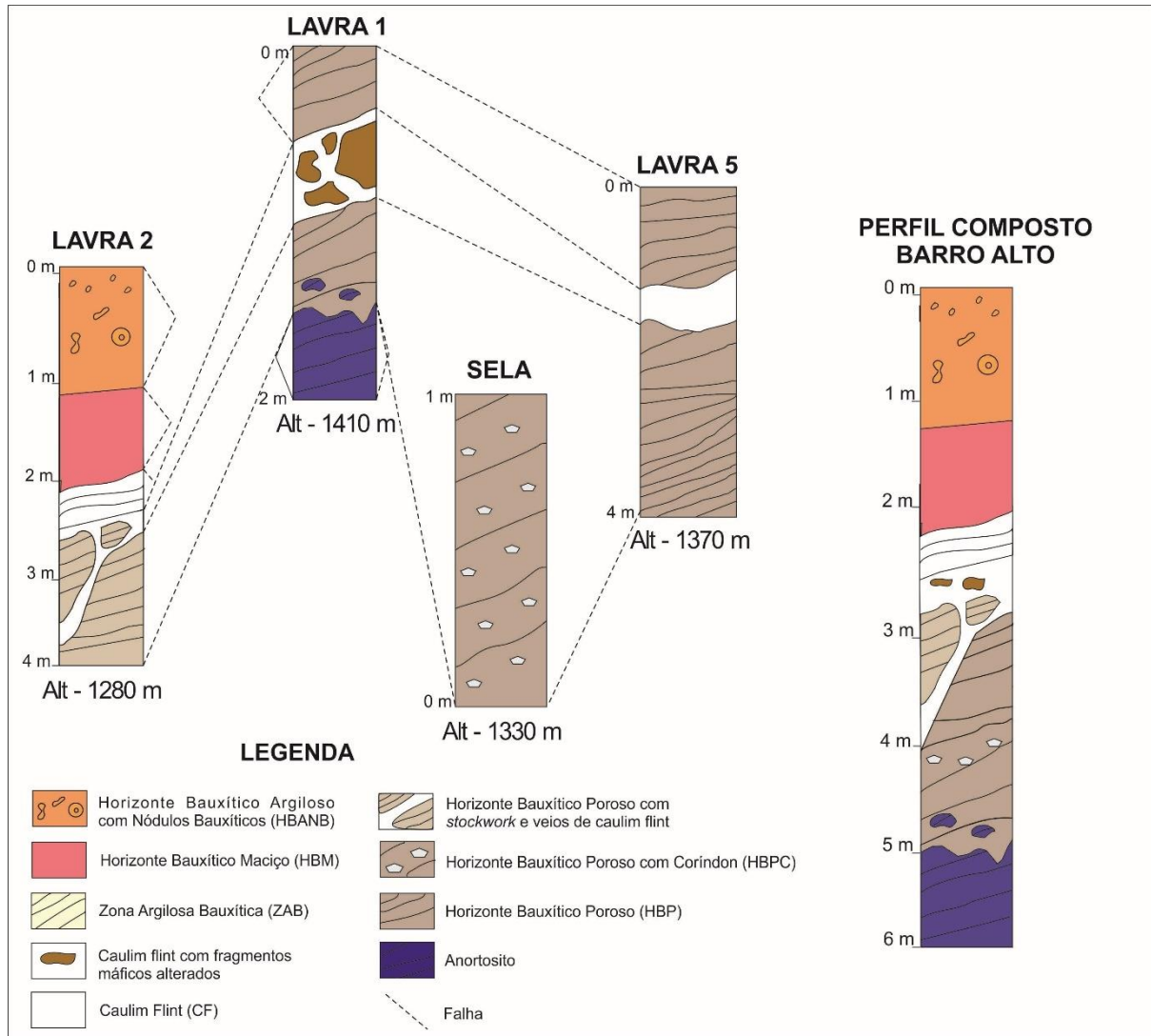


Figura 3- Perfis compostos das Lavra 1, 2, 5 e SELA e perfil composto para Barro Alto.

A lavra 5 exhibe o Horizonte Bauxítico Poroso (HBP) que envolve uma zona dominada por pequenos veios de caulim flint (CF) e alguns relictos de rochas máficas intemperizadas (Fig.4C).

Na Lavra 5 foi identificado pequenos bolsões de gibbsita macrocristalina com estrutura em *boxwork* e também gibbsita botrioidal (Fig. 4D), próximos a gabro alterados e corpos de Caulim Flint seccionando o Horizonte Bauxítico Poroso.

Já na lavra 1, em trincheira com 30 m de comprimento, 1m de profundidade e quase 1m de largura, destaca-se o horizonte bauxítico poroso em contato lateral com o anortosito além de rochas máficas e rocha serpentinizada seccionada por veios de caulim flint (Fig. 5A, 5B, 5C e 5D). Na trincheira SELA foi observado apenas o Horizonte Bauxítico Poroso com coríndon subcentimétrico (Fig. 5E).

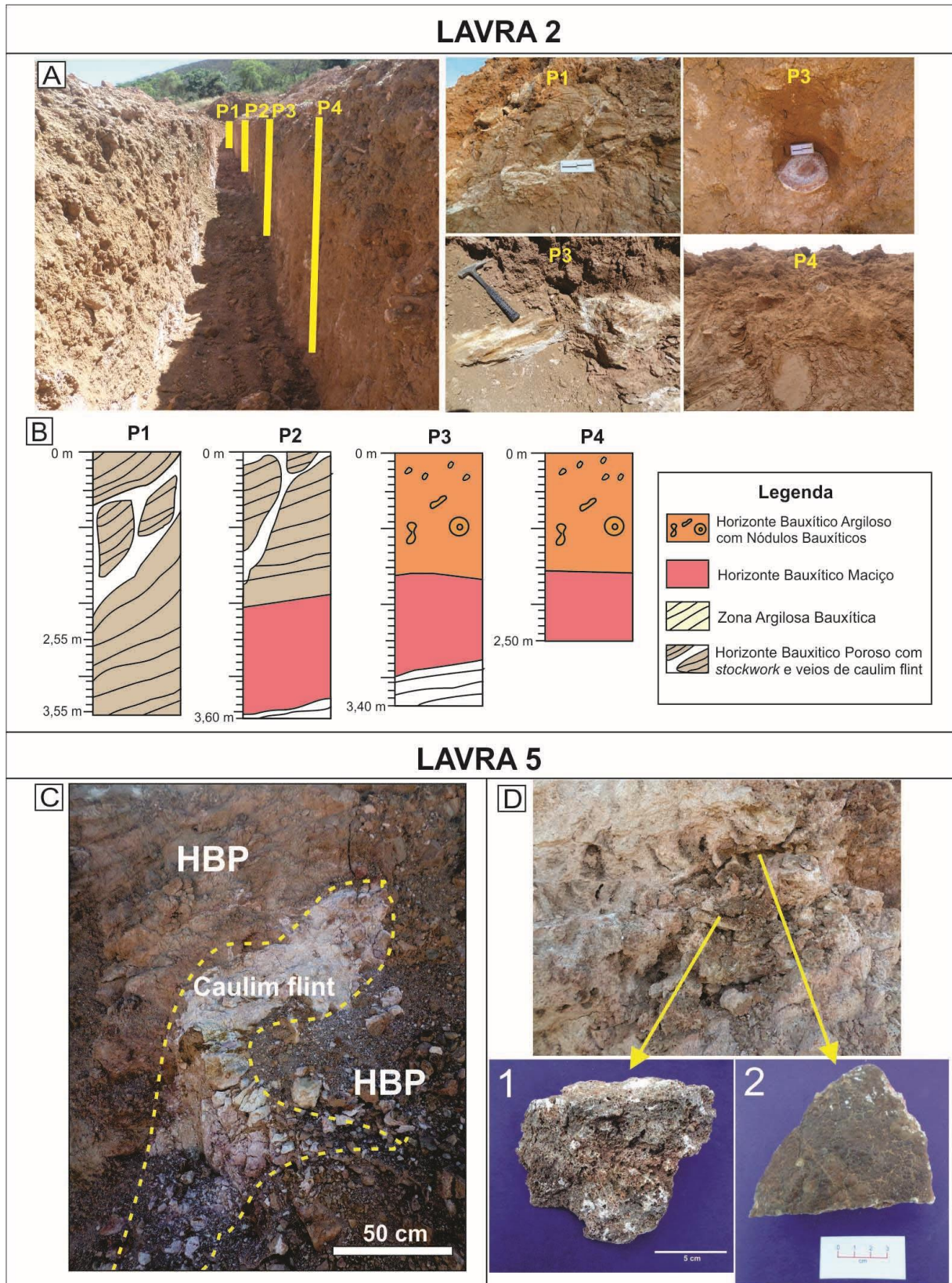


Figura 4- A) Interior da trincheira da Lavra 2 e ao lado com detalhe os perfis; B) Perfis bauxíticos estudados na jazida de bauxita de Barro Alto na Lavra 2; C) Detalhe do perfil descrito na lavra 5, apresentando o horizonte bauxítico poroso seccionado por veio de caulim flint associado a corpos máficos alterados; D) Detalhe da gibbsita macrocristalina presente na Lavra 5 e duas amostras representativas: amostra com gibbsita macrocristalina (1) e amostra com gibbsita botrioidal (2).

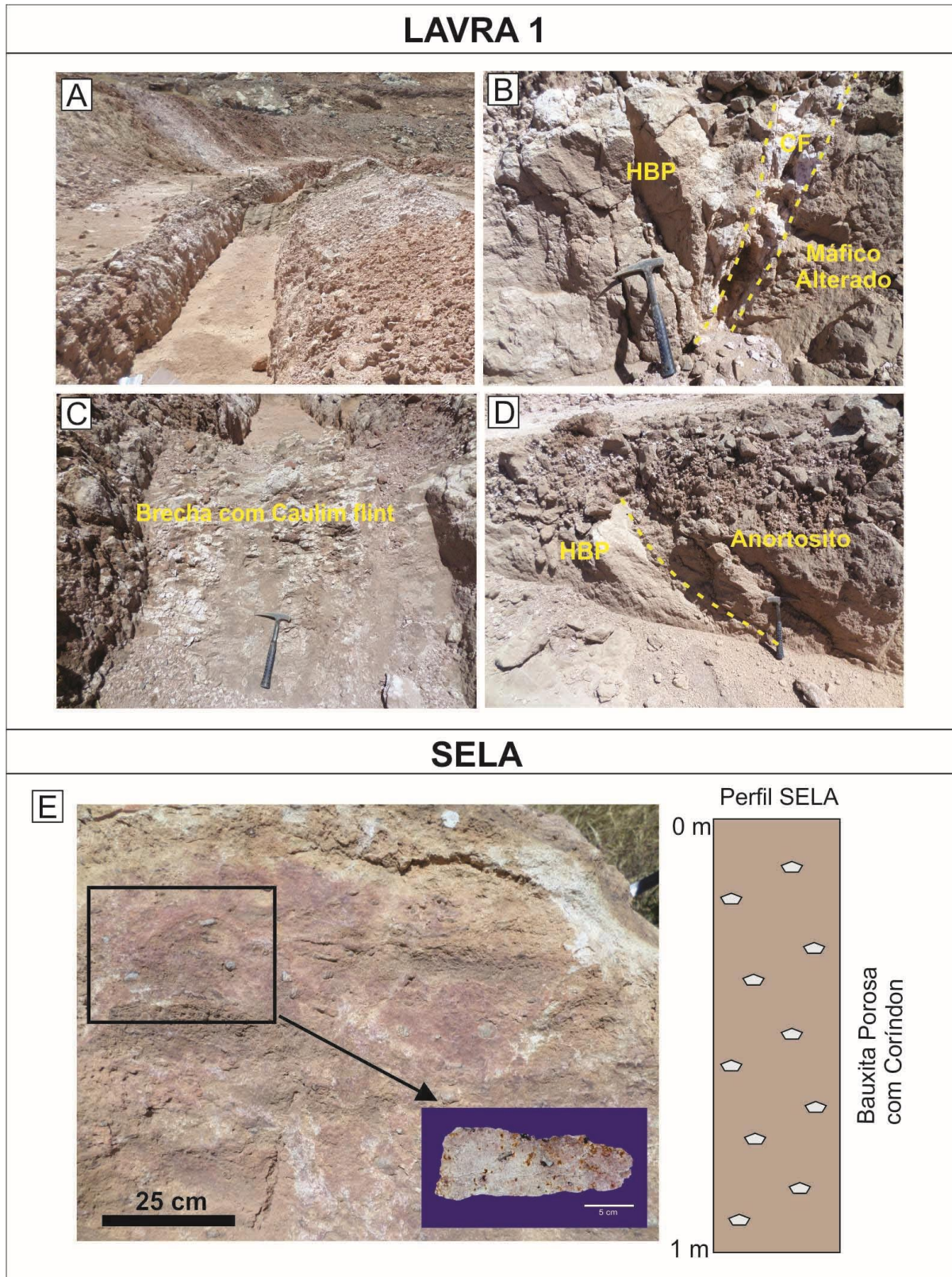


Figura 5- A) Detalhe do interior da trincheira da lavra 1; B) Detalhe do Horizonte Bauxítico Poroso em contato com uma rocha máfica alterada, além de veio de caulim flint; C) Ao centro da trincheira um dique formado por rocha serpentizada seccionada por caulim flint; D) Na extremidade da trincheira o contato do HBP com o anortosito; E) Detalhe da bauxita porosa rica em cristais sub-centimétricos de coríndon descrita na trincheira SELA. No detalhe uma amostra subtraída, que continha cristais de coríndon.

7.1.1 Anortosito

Em Barro Alto o modo de ocorrência das bauxitas e os contatos entre ela e o anortosito mostram que essas rochas certamente foram a principal geradora, a rocha-mãe das bauxitas. Corpos de composição máfica a ultramáfica seccionando a rocha e expostos em diversos afloramentos, na forma de corpos arredondados ou diques, estão presentes, e certamente, a primeira, pode ter contribuído para o desenvolvimento de bauxitas. Os anortositos afloram, principalmente, tanto no alto da serra, como em suas escarpas e encostas íngremes, como pequenos lajedos de rocha fresca e também no alto ou meia-encosta, e o mais surpreendente nas frentes de lavras dentro do corpo bauxíticos, com boulders que atingem dimensões métricas, em contato abrupto com a bauxita.

Macroscopicamente, o anortosito apresenta cor cinza a róseo (Fig. 6A), textura equigranular média a grossa, composição homogênea e teor de máficos entre 5 e 10 %. A estrutura principal é um bandamento incipiente, descontínuo e irregular, definido pela intercalação de bandas félsicas e máficas. Microscopicamente apresenta composição majoritária de labradorita 90%, seguido por hornblenda, augita e granada (almandina e piropo) como acessório (Fig. 6B e 6C, 6D).

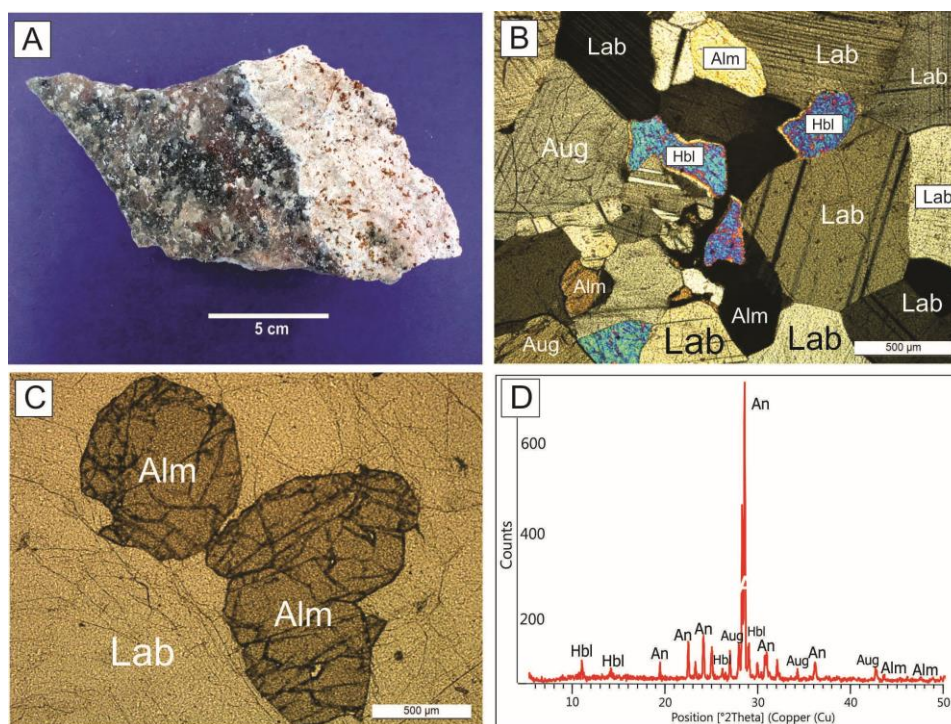


Figura 6- A) Anortosito em contanto com a bauxita. B) Detalhe fotomicrográfico da textura granoblástica do anortosito. Lab: labradorita; Hbl: hornblenda; Aug: augita; Alm: almandina. C) Cristais de almandina no anortosito. D) Minerais identificados por DRX do anortosito. An: plagioclásio cálcico (anortita/labradorita); Hbl: hornblenda; Agt: augita; Alm: almandina.

7.1.2 Horizonte Bauxítico Poroso (HBP)

O Horizonte Bauxítico Poroso (HBP) é encontrado por toda a extensão do depósito, principalmente na Lavra 1, 2, 5 e SELA. Parece estar relacionado a grandes zonas de cisalhamento com orientação N40, sendo possível detectar na bauxita a orientação preferencial do anortosito. Na Lavra 2, em uma trincheira de 3,60m a 2,55m, em cota de 1380m, observa-se o Horizonte Bauxítico Poroso (Fig. 4A).

Apresenta litologia bastante heterogênea cor acinzentada a rosada, preservando texturas de lineação do anortosito, evidenciado por orientações de minerais máficos reliquias, alterados para óxidos e hidróxidos de ferro (Fig. 7C e 7D) feições de fraturamentos ou brechas, formando estruturas tipo *stockwork* (Fig. 7A e 7B). A bauxita porosa também é seccionada por veios de caulim flint.

A gibbsita é majoritária nos horizontes de bauxita porosa (Fig. 7E), acompanhada por vezes por minerais acessórios (almandina e piropo), que segundo (Oliveira *et al.* 2011) foram pseudomorfizados por óxidos e hidróxidos de ferro. Os veios ou vênulas de caulim flint (Fig. 7B) são constituídos de caulinita. Na lavra 5 neste horizonte a presença de gibbsita é superior a 95% seguida de óxidos e hidróxidos de ferro (menos de 5%), formando verdadeiros “gibbsititos”, com muitos poros e entre os poros estruturas tipo *boxwork* (Fig. 8C).

A formação também de uma gibbsita macrocristalina, coesa, por vezes drúsica e sobreposta a gibbsita mais fina e compacta, de aspecto botrioidal. Ela forma corpos isolados, aparentemente desconectados do conjunto maior de bauxitas, em bolsões de dezenas de metros de largura e profundidades superiores a 40 m (Fig. 9A, 9B, 9C, 9D e 9E).

Ao microscópio óptico observa-se a presença de formas reliquias ou pseudomorfos, provavelmente de plagioclásio, não restando nem um indício do mineral primário, apenas uma massa gibbsítica microcristalina, com porosidade incipiente (Fig. 8A e 8B). Em algumas porções, há uma mudança no tamanho dos cristais de gibbsita microcristalina para gibbsita macrocristalina, envolvendo e substituindo pseudomorfos de minerais ferromagnesianos primários como a granada (almandina e piropo) para óxido e hidróxidos de ferro como a hematita e goethita, que são parcialmente preservados (Fig. 8C, 8D, 8E e 8F).

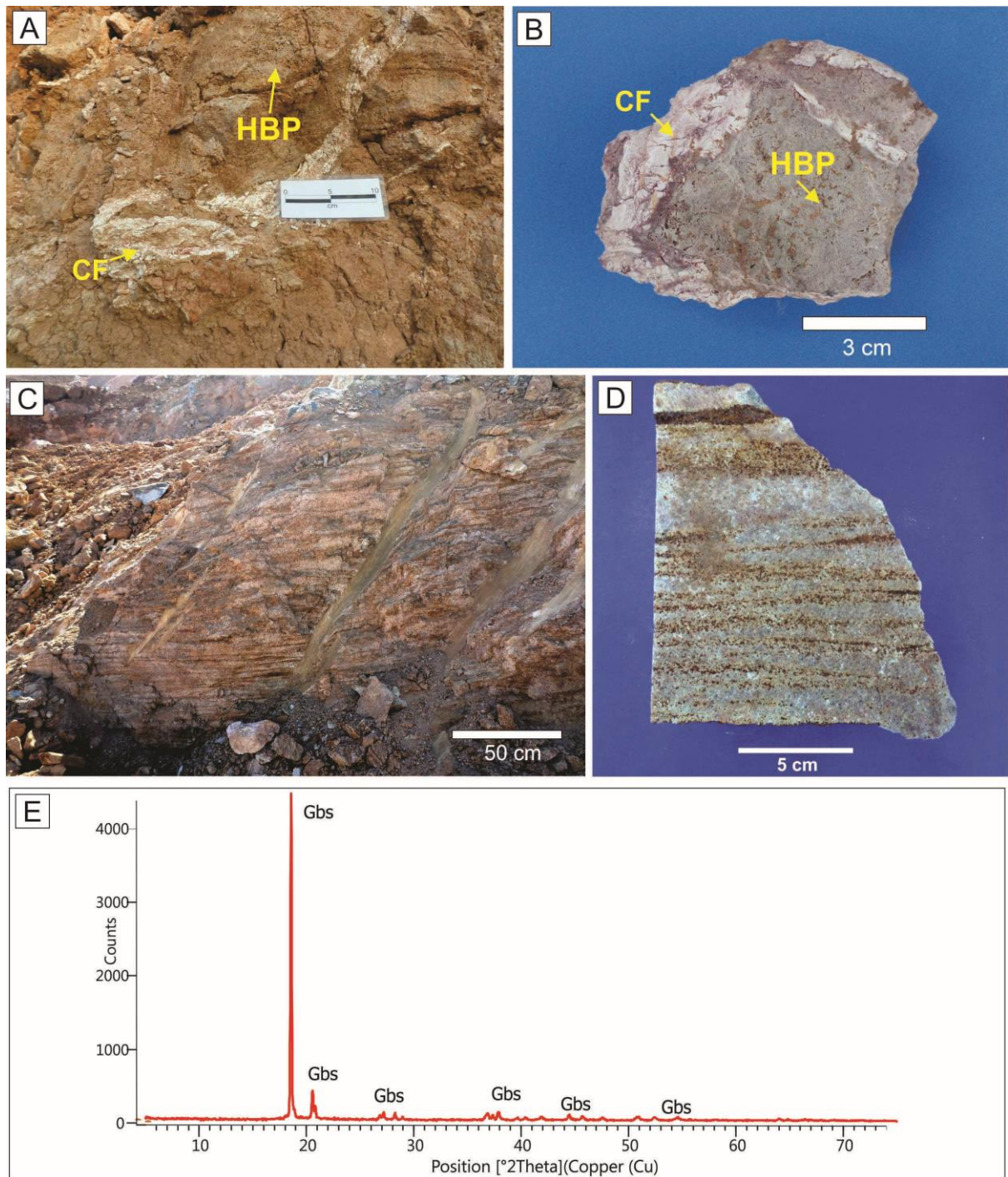


Figura 7- A) Horizonte Bauxítico Poroso com estrutura tipo *stockwork*, localizado na Lavra 2; B) Detalhe dos veios de caulim flint e a bauxita porosa; C) Bauxita com foliação remanescente do anortosito; D) Amostra de bauxita porosa com bandamento mineral remanescente; E) Difratoograma de raios X de amostra do Horizonte Bauxítico Poroso, praticamente formada apenas de gibbsita. Gbs: gibbsita.

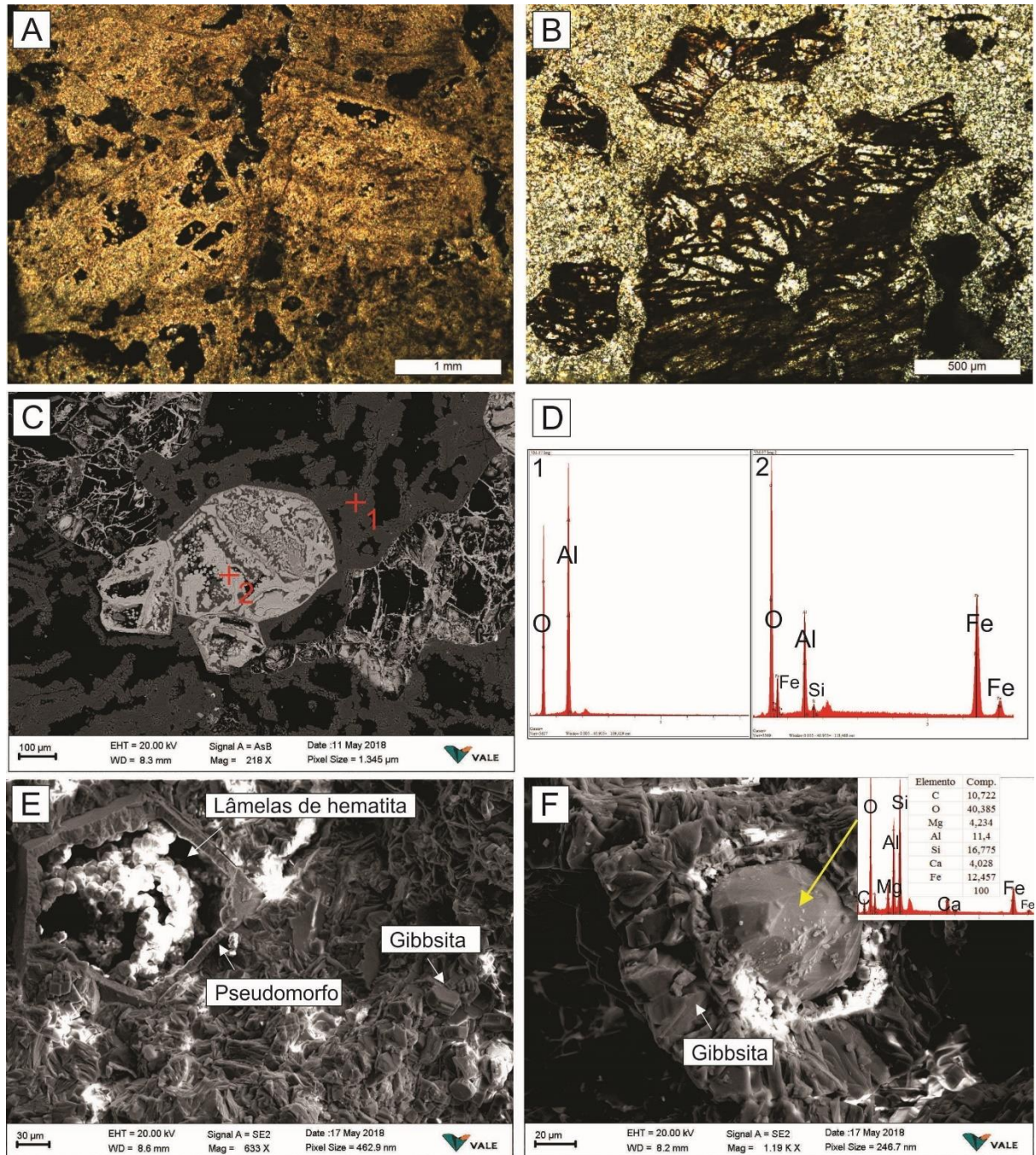


Figura 8- Fotomicrografias em amostra do Horizonte Bauxítico Poroso. A) Gibbsita microcristalina com aspecto maciço a reticular, sugestiva de alteração diretamente de plagioclásio (nicóis paralelos); B) Gibbsita microcristalina granular e gibbsita alternada com óxi-hidróxido de ferro opaco, sugerindo derivação de granadas, em processo pseudomórfico (nicóis cruzados). C) Imagem de MEV da almandina parcialmente alterada em cimento gibbsítico. D) Espectros de MEV/EDS evidenciando a matriz gibbsítica (1) e a almandina alterada (2). E) Imagem de elétrons secundários de MEV sugerindo cristais de granada substituídos pseudomorficamente por gibbsita e hematita em cimento gibbsítico; F) Mineral relíqui, provavelmente piroxênio ou granada, envolvida por cimento gibbsítico microcristalino.

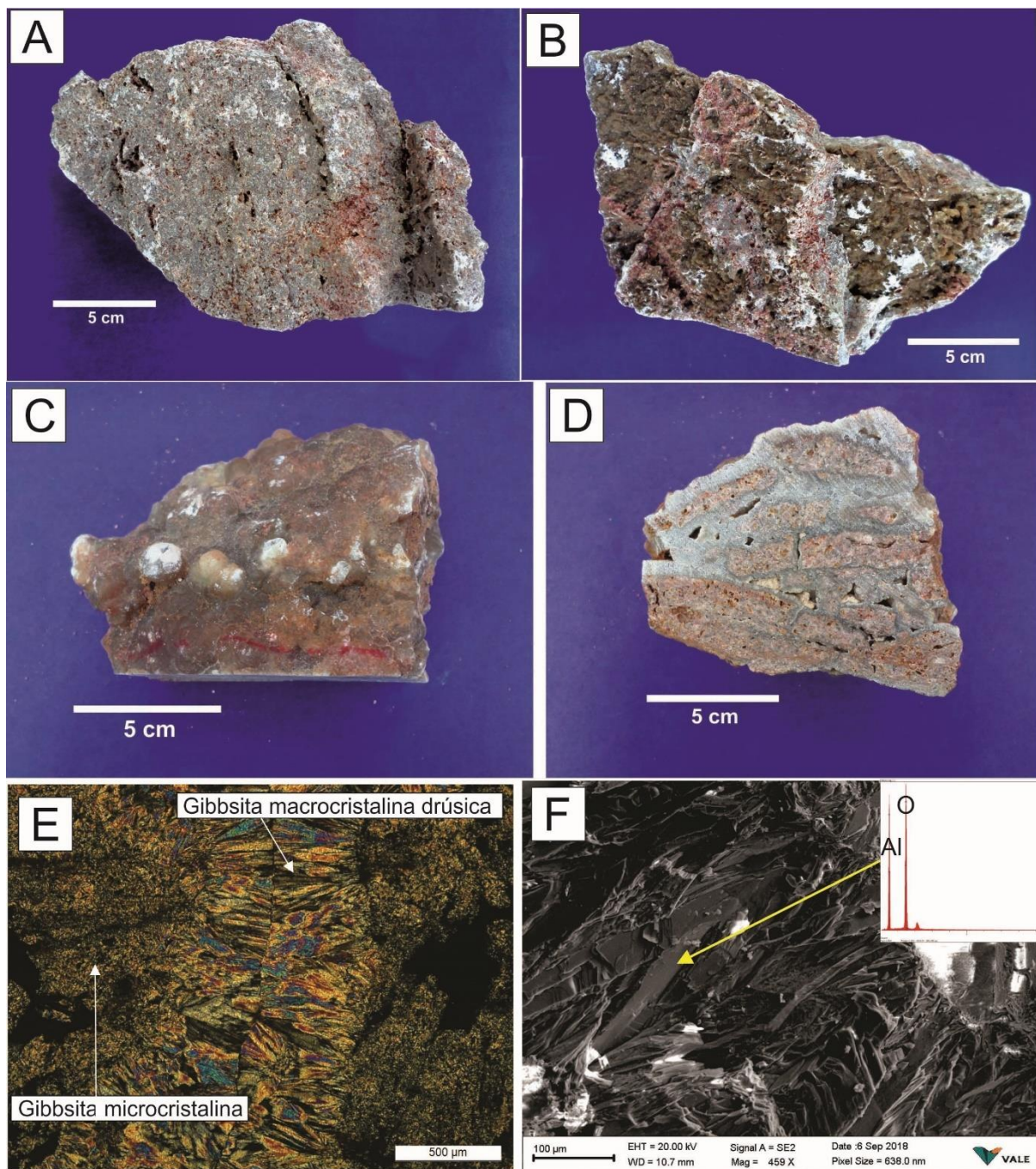


Figura 9- A) Vista de baixo de amostra de gibbsita microcristalina com aspecto maciço; B) Vista de cima de amostra de gibbsita microcristalina com aspecto maciço e *boxwork* macrocristalino. C) Amostra de gibbsita botrioidal; D) Amostra de gibbsita botrioidal apresentando veios de formato drúsico; E) Detalhe do veio de gibbsita macrocristalina em formato acicular plano simétrico drúsico, em matriz gibbsita microcristalina (nicóis cruzados); F) Imagem de MEV da gibbsita macro, com o espectro de EDS evidenciando a sua composição.

O Horizonte Bauxítico Poroso com Coríndon (HBPC) foi melhor observado na SELA, que já foi citado por Santos (2011) no horizonte bauxítico, sem discutir a sua origem. Os dados de campo mostram claramente que o coríndon é um constituinte do anortosito, e, portanto um mineral relíquiar nas bauxitas (Fig. 10A, 10B e 10C). Portanto na SELA a bauxita além de dominada por gibbsita, contém coríndon como acessório herdado, além de hematita/goethita conforme as análises de MEV-EDS, (Fe, O, Al) e pequenas quantidades de Ti, Si e C (Fig. 11A, 11B, 11C e 11D), talvez originadas a partir de magnetita associada ao coríndon.

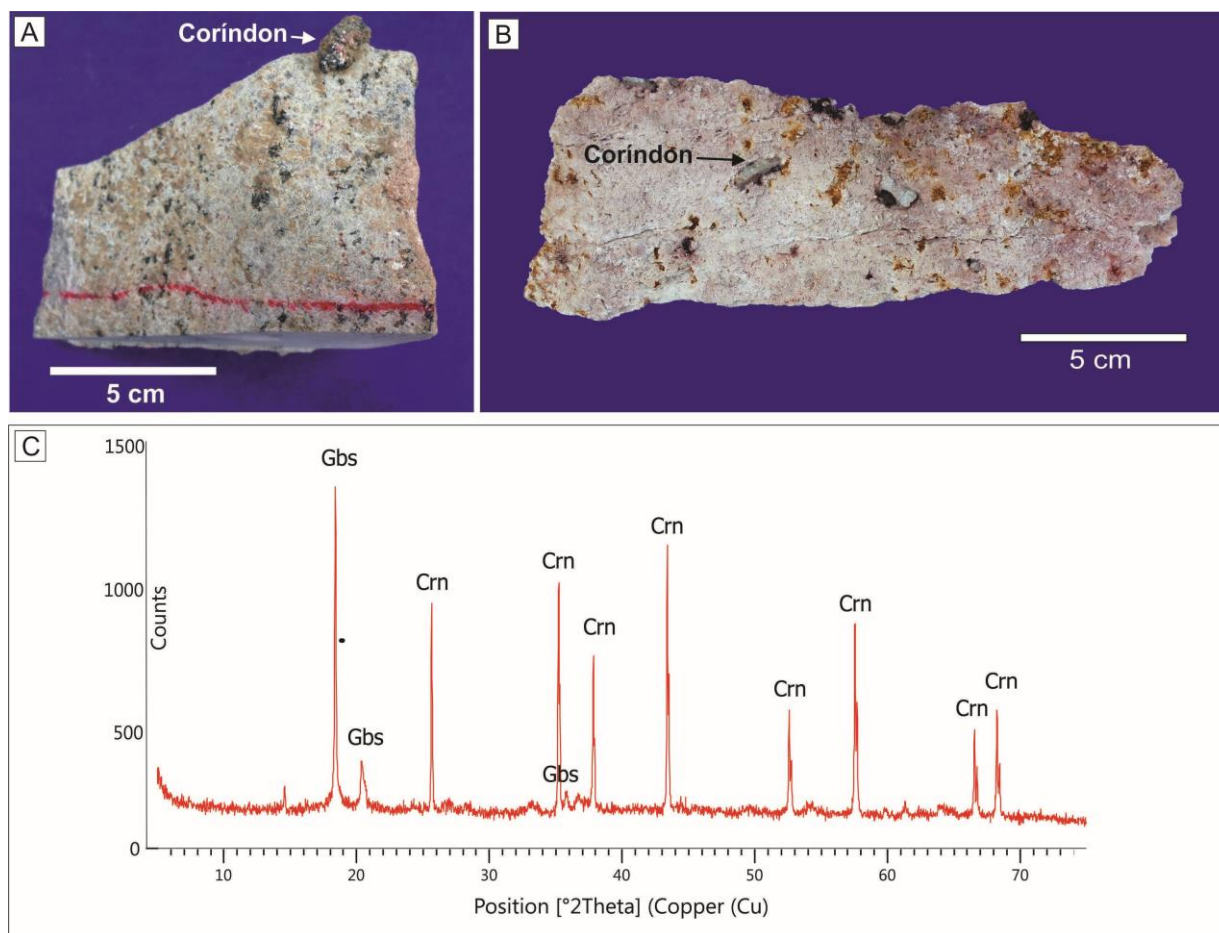


Figura 10- A) Anortosito com coríndon em destaque; B) Amostra da trincheira SELA do Horizonte Bauxítico Poroso com coríndon; C) Minerais identificados por DRX em amostra do Horizonte Bauxítico Poroso com coríndon da trincheira SELA. Crn: coríndon, Gbs: gibbsita.

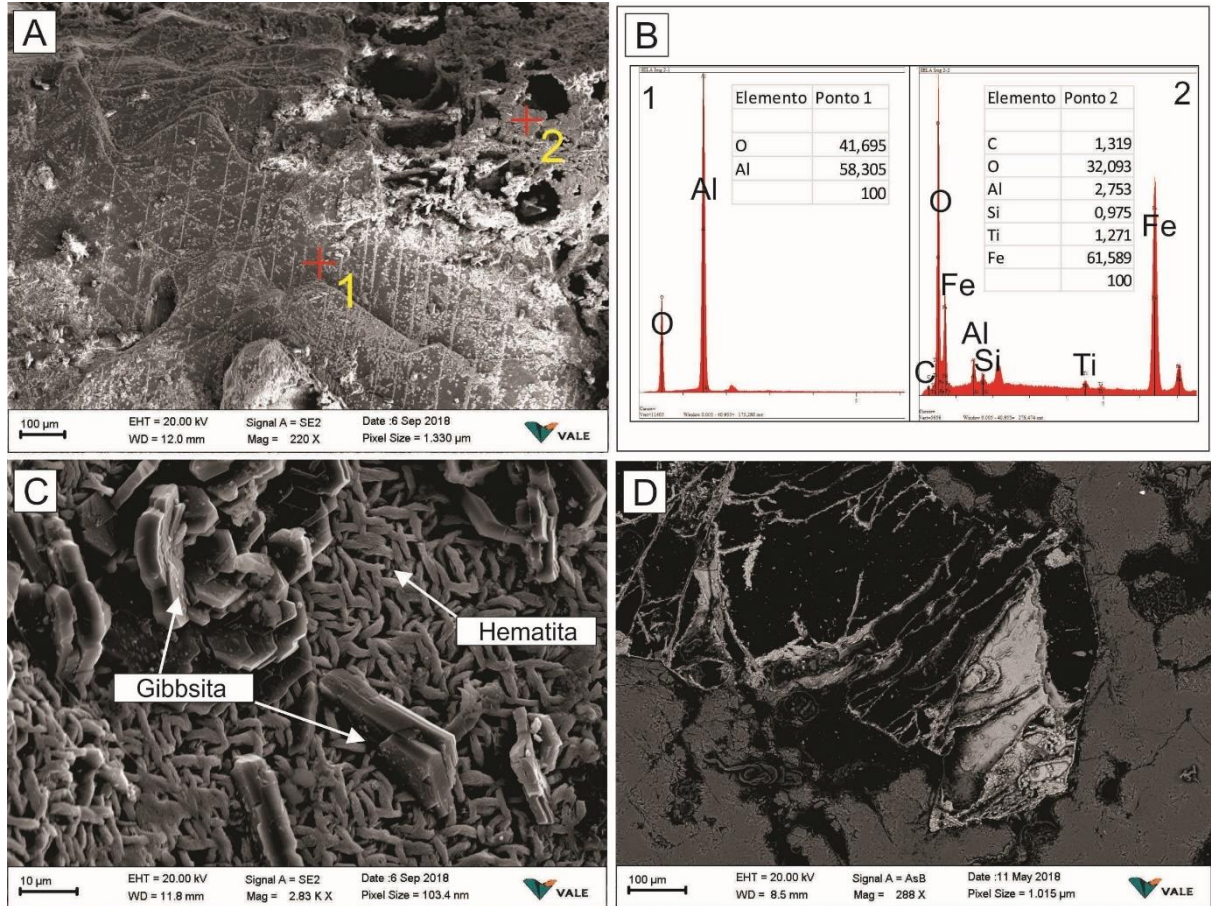


Figura 11- Fotomicrografias de MEV em amostra do Horizonte Bauxítico Poroso com coríndon da trincheira SELA. As fotomicrografias foram obtidas com elétrons secundários. A) Detalhe da superfície do cristal de coríndon com partição típica e bordejado por hematita/goethita secundária, provavelmente; B) Espectro de EDS evidenciando a presença do coríndon (1) e de hematita, provavelmente uma alteração de magnetita associada ao coríndon (2). C) detalhe no alo de alteração do coríndon, com a identificação de lamelas típicas de hematita associadas com cristais pseudo-hexagonais de gibbsita. D) Fotomicrografia por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. Mostrando esqueleto de hematita/goethita dentro ou no entorno do coríndon (em cinza).

7.1.3 Caulim Flint (CF)

O caulim flint nas bauxitas de Barro Alto ocorre normalmente como veios ou vênulas, geralmente seccionando a bauxita porosa, em contato abrupto (Fig. 12A e 12B). O caulim flint ocorre também seccionando rochas gabróicas ou corpos máficos (Fig. 10B), apresentando alta porosidade e formando estruturas *boxwork*. Sua coloração varia de esbranquiçada a amarelo-creme. Localmente se apresenta de fato bem dura, daí a denominação “caulim flint” (Fig. 12C e 12E), mas pode ser também bastante friável. É composto de caulinita e halloysita segundo DRX (Fig. 12D e 12F) e as análises de microscopia óptica (Fig. 13A e 13B).

Ao microscópio eletrônico o caulim flint que secciona porções máficas contém ainda gibbsita e oxi-hidróxidos de ferro (Fig 13C e 13D). Neste, a halloysita se apresenta como cristais tubulares, constituindo a massa do caulim flint, enquanto a caulinita forma cristais placosos (Fig. 13E e 13F).

No corpo máfico, o plasma argiloso ocorre normalmente ocupando os interstícios, associado à pseudomorfos de almandina, com goethita ao longo das fissuras formando estruturas do tipo *boxwork* e preenchidas por gibbsita.

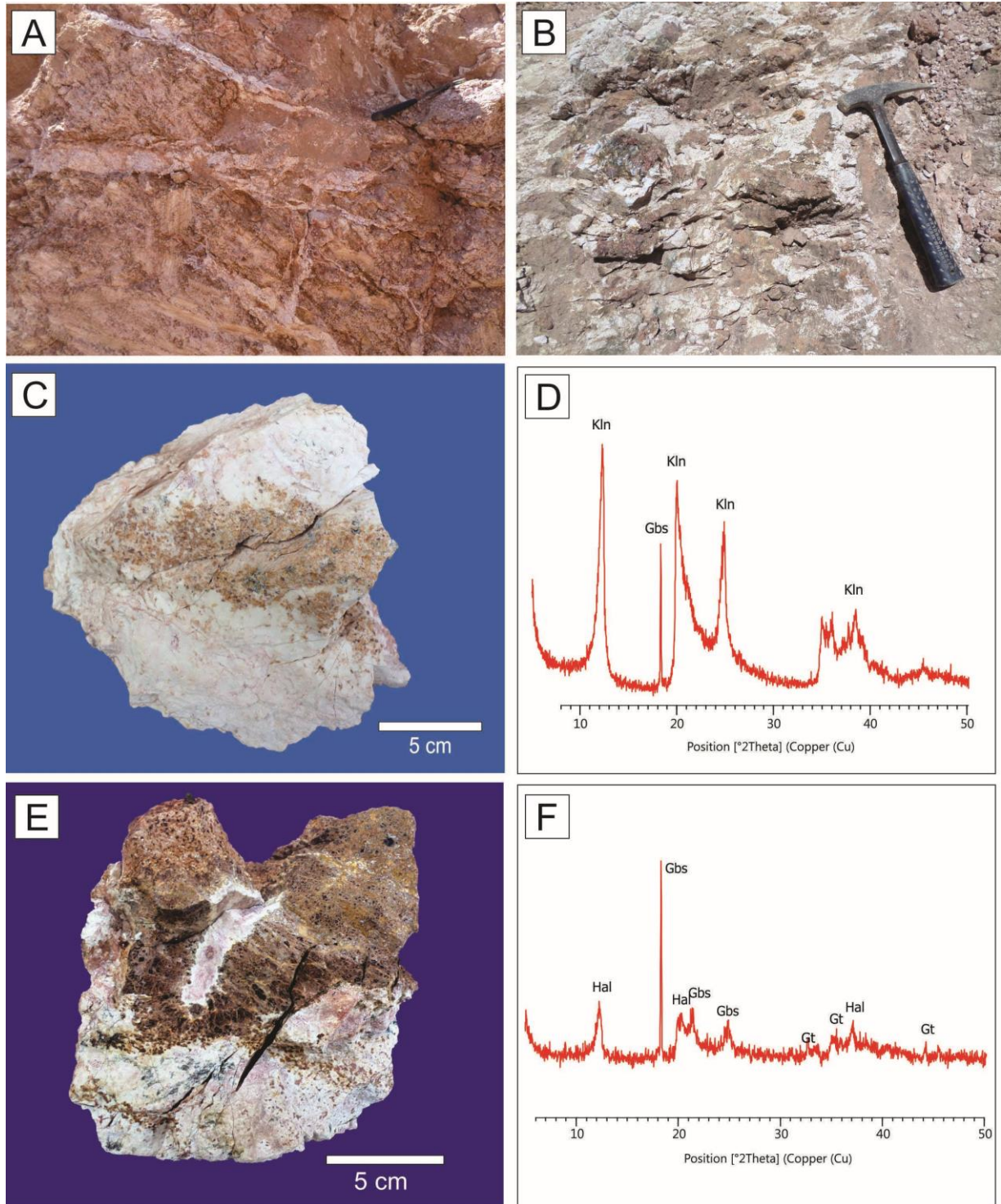


Figura 12- A) Exposição na lavra 2 do Horizonte Bauxítico Poroso com estrutura tipo *stockwork* e os veios de caulim flint; B) Vênulas ou veios que geram o aspecto brechoso, ou *stockworks*, em corpo máfico alterado; C) Amostra de caulim flint coletado na Lavra 1; D) Minerais identificados por DRX em amostra de caulim flint (VM-24). Kln: caulinita; Gbs: gibbsita. E) Amostra com caulim coletada do corpo máfico alterado com ligeira foliação e bastante porosa; F) Minerais identificados por DRX em amostra de caulim flint junto à rocha máfica alterada (VM-17). Hal: halloysita; Gbs: gibbsita; Gt: goethita.

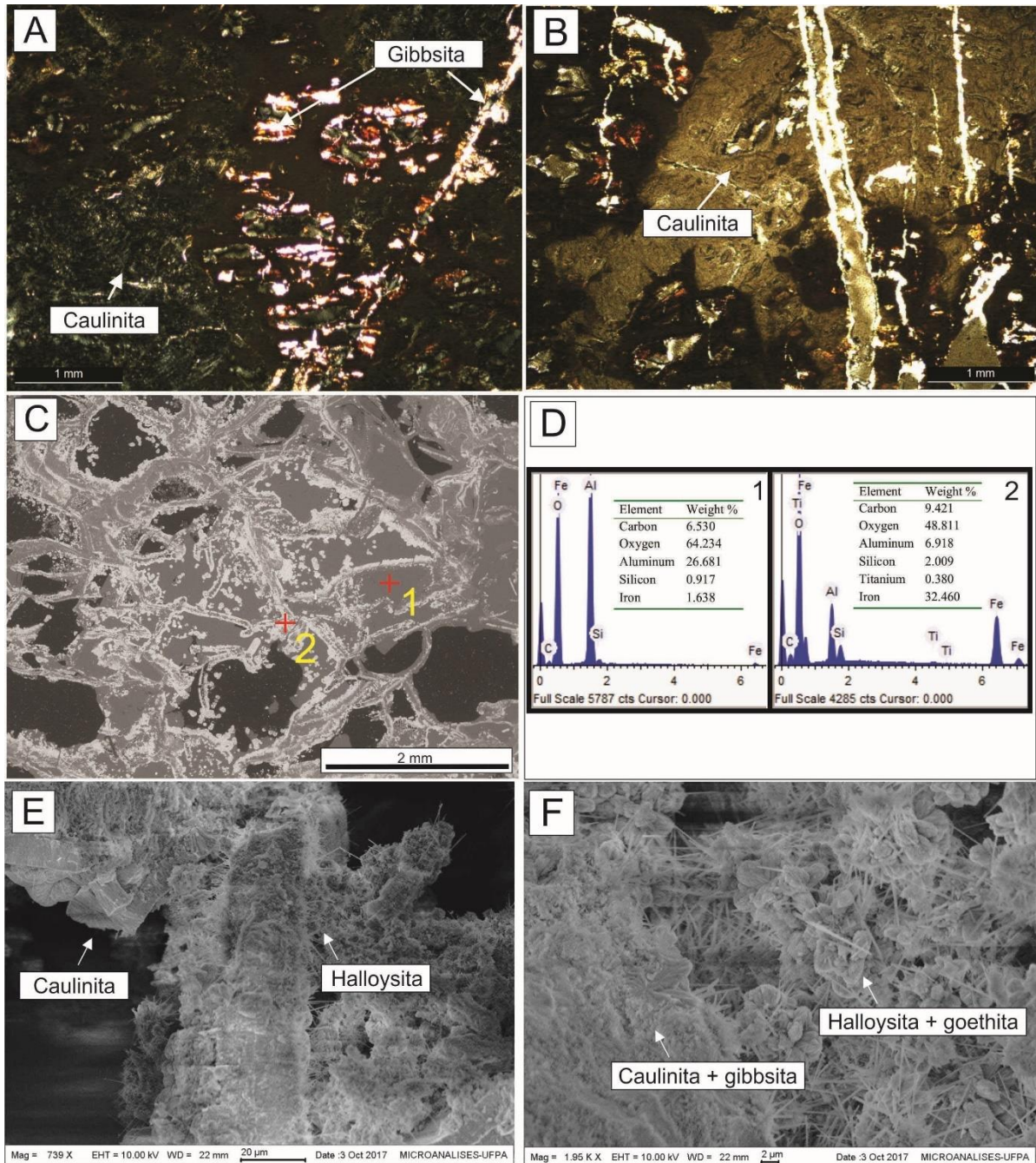


Figura 13- Fotomicrografias ópticas em amostra de corpo máfico com caulim flint. A) Vênulas de caulim (nicóis cruzados); B) Vênulas de caulim (nicóis cruzados). Fotomicrografia por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. C) Massa de caulinita com gibbsita e hematita reticulada; D) Espectro de EDS indicando o domínio da gibbsita criptocristalina (1) e possivelmente hematita intercrescida com gibbsita e ainda caulinita (2); Fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários. E) Massa formada de caulinita e halloysita; F) Caulinita intercrescida com gibbsita e halloysita tubular com goethita tabular, com aspecto geral em forma de lâ.

7.1.4 Zona Argilosa Bauxítica (ZAB)

Zonas argilosas bauxíticas foram observadas na Lavra 2, dentro da trincheira, uma variação do horizonte bauxítico maciço (Fig. 14A e 14B). A porção estudada da ZAB apresenta cor variando de branco a amarelo creme, sendo bastante friável constituído principalmente por halloysita + caulinita e nódulos de gibbsita, identificados por DRX (Fig. 14E), sendo acessórios hematita e goethita.

Halloysita + caulinita além de formar zonas ou bolsões na bauxita maciça, também parece seccionar a bauxita porosa, em que os contatos por ser gradacionais, ora abruptos, sendo possível reconhecer estruturas primárias como lineações remanescentes (Fig. 14B). Essa zona poderia ser considerada como equivalente ao caulim Flint.

Ao microscópio óptico observa-se o domínio de um plasma argiloso escuro, e em que pequenas zonas se manifestam como gibbsita criptocristalina amarelada (Fig. 14C). Sob os nicóis percebe-se o domínio da caulinita envolvendo cristais de gibbsita, de micro a macro (Fig. 14D). As estruturas em *boxwork* mantêm-se preservadas e minerais ferromagnesianos parecem ter sido substituídos pseudomorficamente por gibbsita. (Fig. 15A, 15B e 15C). E a halloysita se apresenta na forma de cristais tubulares (Fig. 15D).

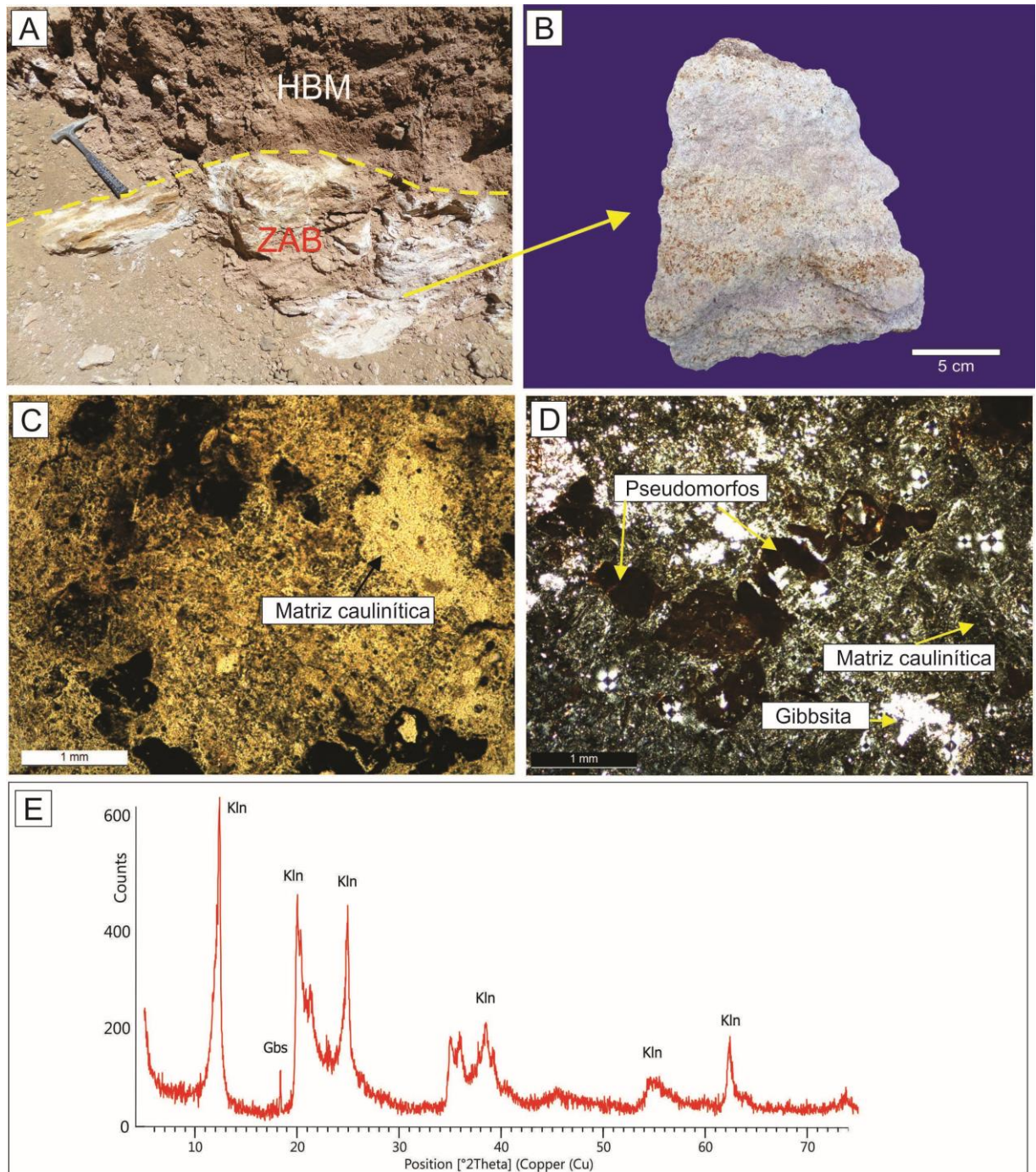


Figura 14- A) Zona Argilosa Bauxítica com foliação remanescente, localizado na Lavra 2. B) Amostra da Zona Argilosa Bauxítica; C) Matriz caulinitica amarelada (nicóis paralelos); D) Matriz caulinitica escura e gibbsita microcristalina preenchendo poros e substituindo pseudomorfos (nicóis cruzados); E) Minerais identificados por DRX em amostra da Zona Argilosa Bauxítica. Kln: caulinita; Gbs: gibbsita.

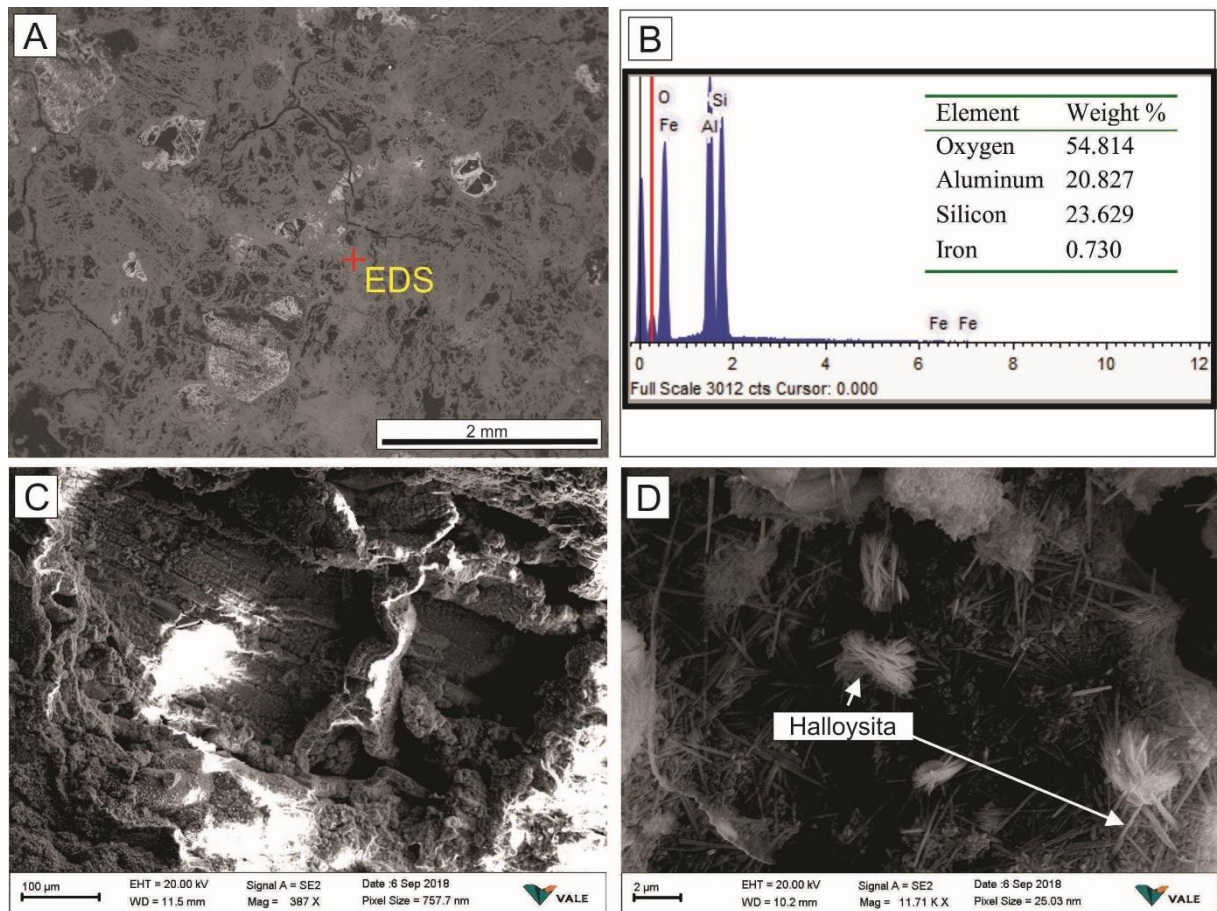


Figura 15- Fotomicrografia por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. A) Aspecto da matriz argilosa com cavidades tipo *boxworks*, prováveis pseudomorfos de minerais ferromagnesianos como piroxênios e também granadas; B) Espectro de EDS evidenciando o domínio de minerais tipos caulinita e/ou halloysita. Fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários (C e D). C) Estrutura em *boxwork* da matriz argilosa; D) Agregados de tubos de halloysita.

7.1.5 Horizonte Bauxítico Maciço (HBM)

O HBM foi observado na lavra 2, constituído por gibbsita e caulinita (Fig. 16A, 16B, 16C e 16D), bem como nódulos esbranquiçados de caulinita. São acessórios hematita e goethita (Fig. 16E).

Os nódulos são arredondados ou angulosos, com tamanho variando de milímetros a centímetros, coloração branca a marrom, e em alguns casos apresentam estrutura de *boxwork* milimétrico formado por gibbsita, estão dispersos em matriz argilosa, de coloração rosada a amarronzada, às vezes com aspecto brechado (Fig. 16C e 16D).

Ao microscópio óptico observa-se o domínio de um plasma criptocristalino gibbsítico amarelado (Fig. 17A), respondendo pelo aspecto porcelanado, além de apresentar pseudomorfos orientados, prismáticos, angulosos ou arredondados, constituídos por gibbsita microcristalina (Fig. 17B). Neste horizonte a fragmentação ou aspecto brechado dos nódulos de caulinita no plasma gibbsítico é nítido em imagens de MEV (Fig. 17C e Fig. 17D), onde esta mistura de cristais de gibbsita e caulinita só é perceptível em escala micro (Fig. 17E e Fig. 17F).

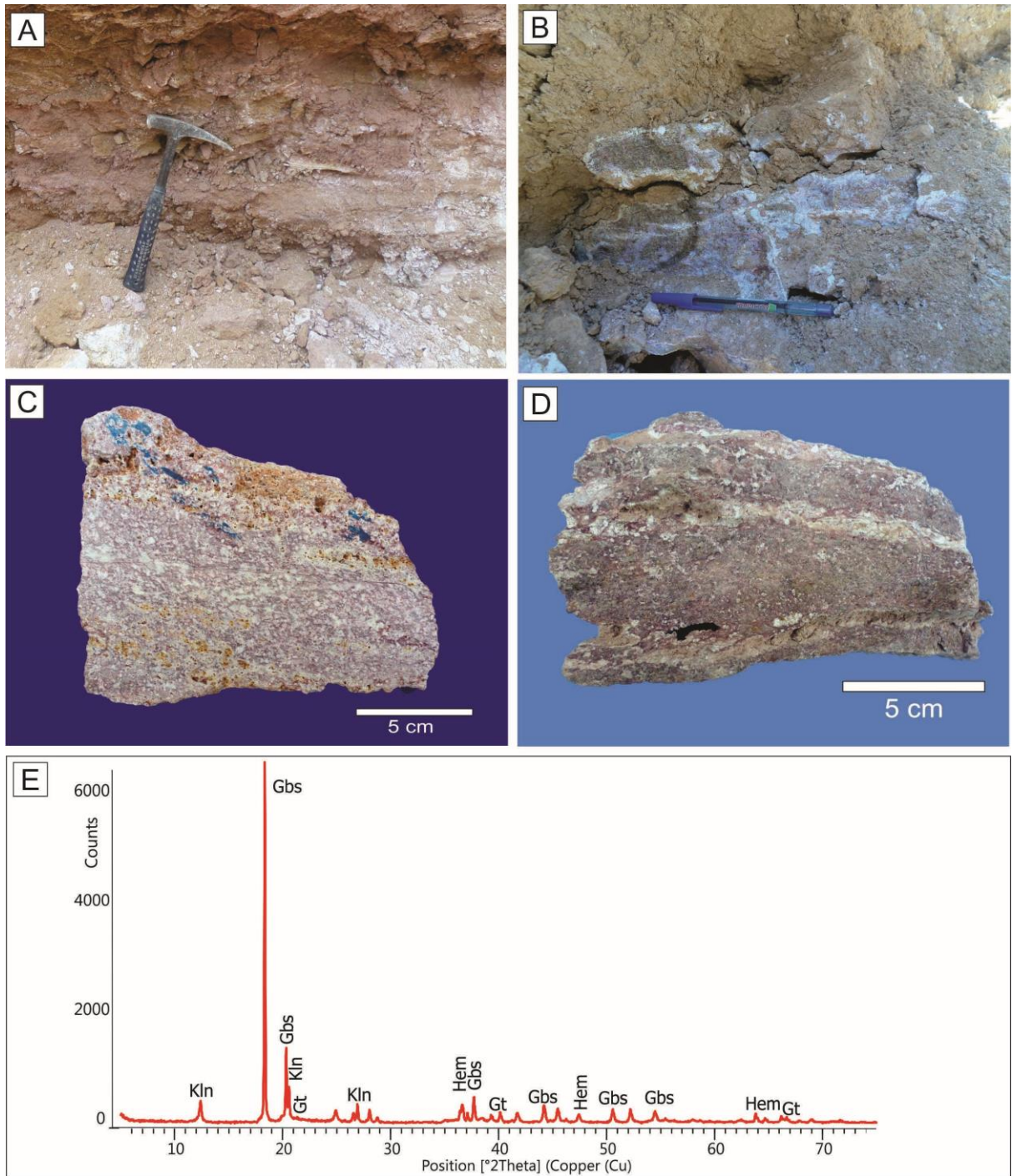


Figura 16- A) Horizonte Bauxítico Maciço ligeiramente, localizado na Lavra 2; B) Detalhe da bauxita maciça, apresentando veios ou vênulas de caulim e aspecto corroído; C) Amostra de bauxita maciça, compacta, em que uma massa rosada envolve pontuações esbranquiçadas, como se fosse nódulos; D) Amostra de bauxita Maciça semelhante a com vênulas formadas por caulinita/halloysita, em que se observa os nódulos esbranquiçados; E) Minerais identificados por DRX em amostra do Horizonte Bauxítico Maciço. Gbs: gibbsita; Kln: caulinita; Hem: hematita; Gt: goethita.

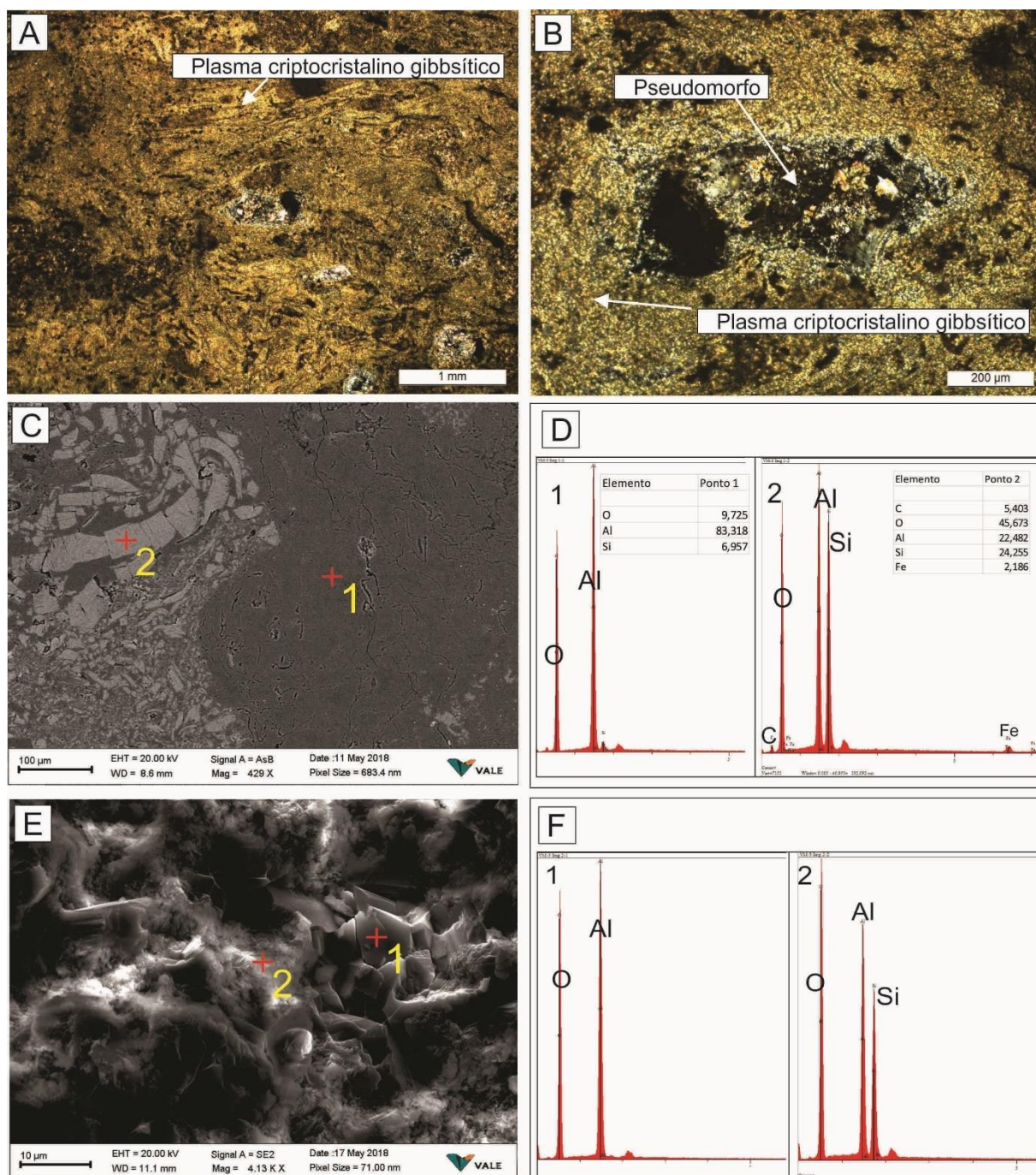


Figura 17- Fotomicrografias de amostra do Horizonte Bauxítico Maciço. A) Plasma gibbsítico, de aspecto porcelanado, portanto maciço (nicóis cruzados). B) Cristal de mineral pseudomorfizado para gibbsita microcristalina em plasma criptocristalino gibbsítico. (nicóis cruzados). Fotomicrografias por microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons retroespalhados. C) Matriz gibbsítica (cinza escuro) com massa de caulim muito fratura e quebrada; D) Espectros de EDS evidenciando a matriz gibbsítica (1) e o caulim fragmentado formado provavelmente por caulinita (2). E) Fotomicrografia de microscopia eletrônica de varredura utilizando elétrons secundários de cristais gibbsita pseudo-hexagonal (1) e de caulinita/halloysita (2); F) Espectros de EDS dos cristais de gibbsita (1) e caulinita/halloysita (2).

7.1.6 Horizonte Bauxítico Argiloso com Nódulos Bauxíticos (HBANB)

Neste horizonte os nódulos de material bauxítico são envoltos por uma matriz argilosa com oxi-hidróxidos de ferro, em tonalidade marrom clara a amarela. Enquanto os nódulos são compostos principalmente por gibbsita, a matriz é formada por este mineral e caulinita (Fig. 18E). Esses nódulos em geral são maciços, com até 20 cm de comprimento ou diâmetro, em formato esferoidal, cônico ou sub-cilíndrico, em geral com furo longitudinal, por vezes preenchido com material argiloso marrom ou ainda com ligeiro revestimento de oxi-hidróxidos de Fe (Fig. 18A, 18B, 18C e 18D). Eles se acumulam para o topo do horizonte, ou seja, do perfil, formando uma cobertura de 20 cm de espessura. Nesse horizonte ocorrem alguns outros nódulos de oxi-hidróxidos de ferro, roxos ou avermelhados, bem menores do que os bauxíticos.

Sob o microscópio óptico os nódulos são dominados por massa gibbsítica criptocristalina amarela e dentro dela nódulos esbranquiçados de caulinita (Fig. 19A e 19B), de aspecto porcelanado, além de apresentar formas colunares a angulosos ou arredondados, formados por gibbsita microcristalina e elevada porosidade (Fig. 19B e 19C). Além destes pseudomorfos, apresenta minerais reliquiares como a titanita ou a alteração de alguns minerais ferromagnesianos. Em imagens de MEV, os poros podem ser bem identificados, além da identificação da matriz gibbsítica da matriz argilosa (Fig. 19C e 19D).

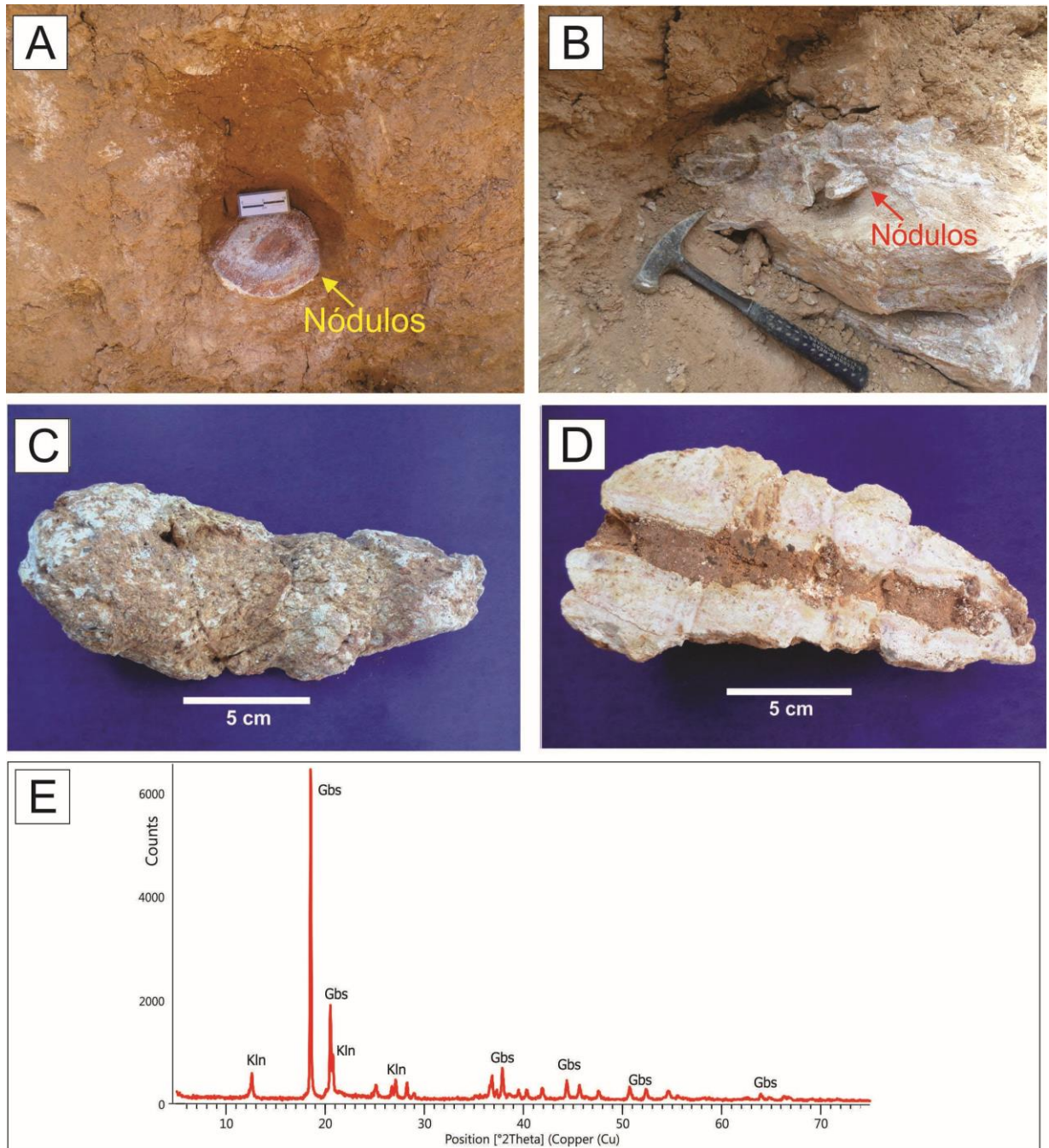


Figura 18- A e B) Nódulos bauxíticos expostas em trincheira localizada na Lavra 2, com formatos arredondados ou esferoidais; C) Detalhe de um nódulo; D) Vista interior do nódulo anterior, com canal preenchido por material argiloferruginoso; E) Minerais identificados por DRX em amostra de nódulo do Horizonte Bauxítico. Kln: caulinita; Gbs: gibbsita.

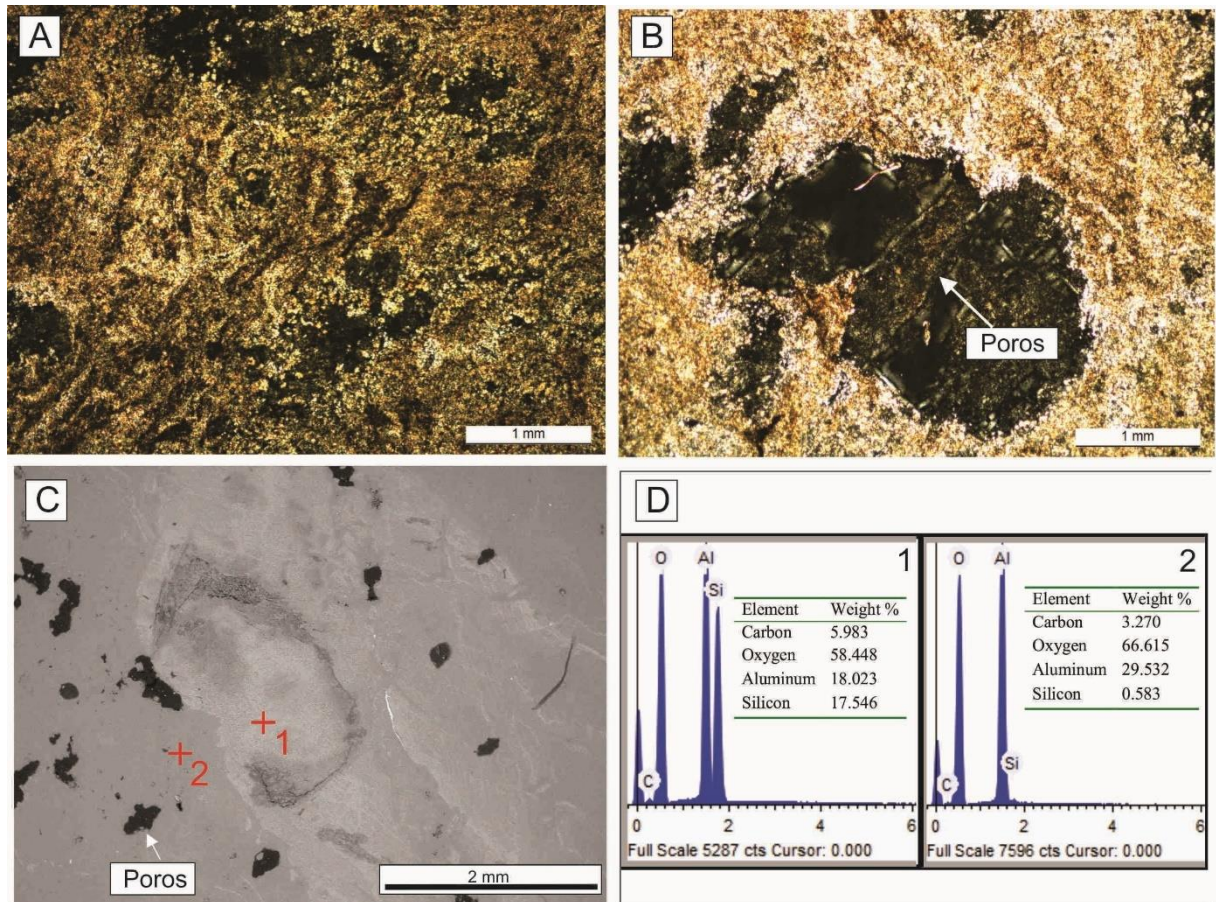


Figura 19- Fotomicrografias em amostra do Horizonte Bauxítico com Nódulos Bauxíticos. A) Matriz gibbsítica e aspecto porcelanado, ou maciço (nicóis cruzados); B) Pseudomorfos apresentando porosidade elevada (nicóis cruzados); C) Matriz gibbsítica com nódulos caulíníticos e alguns poros entre eles; D) Espectro de EDS evidenciando a composição de gibbsita (1) e caulinita (2).

7.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA E MINERALÓGICA DO PERFIL BAUXÍTICO

7.2.1 Elementos Maiores

Os horizontes bauxíticos e zonas associadas são compostos basicamente por Al_2O_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 e PF (Tabela 2). As concentrações de CaO, MgO, K_2O , MnO, Na_2O e P_2O_5 são muito baixas (em geral $< 0,09$), até mesmo abaixo do limite de detecção analítica. Os teores de TiO_2 também são relativamente baixo, em geral $< 0,2$ %. Essa composição química é bem distinta da do anortosito, exceto para Al_2O_3 , com 31,12%, portanto com alto potencial para formar bauxita, com valor máximo 63,8%, portanto o fator máximo de enriquecimento relativo seria apenas 2.0. Os relativos baixos teores de Fe_2O_3 , 1,9 %, no anortosito explicariam o seu baixo teor nas bauxitas, < 2.0 %, e a presença restrita dos oxi-hidróxidos de Fe nelas, e, por conseguinte sua cor variando de creme claro a branca. Enriquecimento de Fe na forma de oxi-hidróxidos é uma característica universal das bauxitas lateríticas reconhecidas em todos os trabalhos, a exemplo dos mais recentes (Costa *et al.* 2016, Santos *et al.* 2016, Lima 2018). Os teores de TiO_2 no anortosito também são pouco expressivos, 0,19 %, sendo em geral muito abaixo de 0,2 % nas bauxitas. Em geral esse elemento enriquece-se nas bauxitas, em fator 2 a 3 (Valeton 1972, Costa 1997). Por sua vez a perda de metais alcalinos e alcalinos terrosos e sílica, como aqui verificado, estão de conformidade com a evolução laterítica. A perda em CaO foi a mais forte relativamente. Porém se tivesse havido esta perda, não teria sido possível a formação das bauxitas, obviamente.

A distribuição das principais fases mineralógicas, ao longo da toposequência bauxítica que em Barro Alto é muito simples, calculada a partir da composição química total (Fig. 20) mostra o domínio da gibbsita e de caulinita/halloysita conforme os horizontes e zonas individualizados. Goethita é expressiva apenas em parte no perfil da lavra 1.

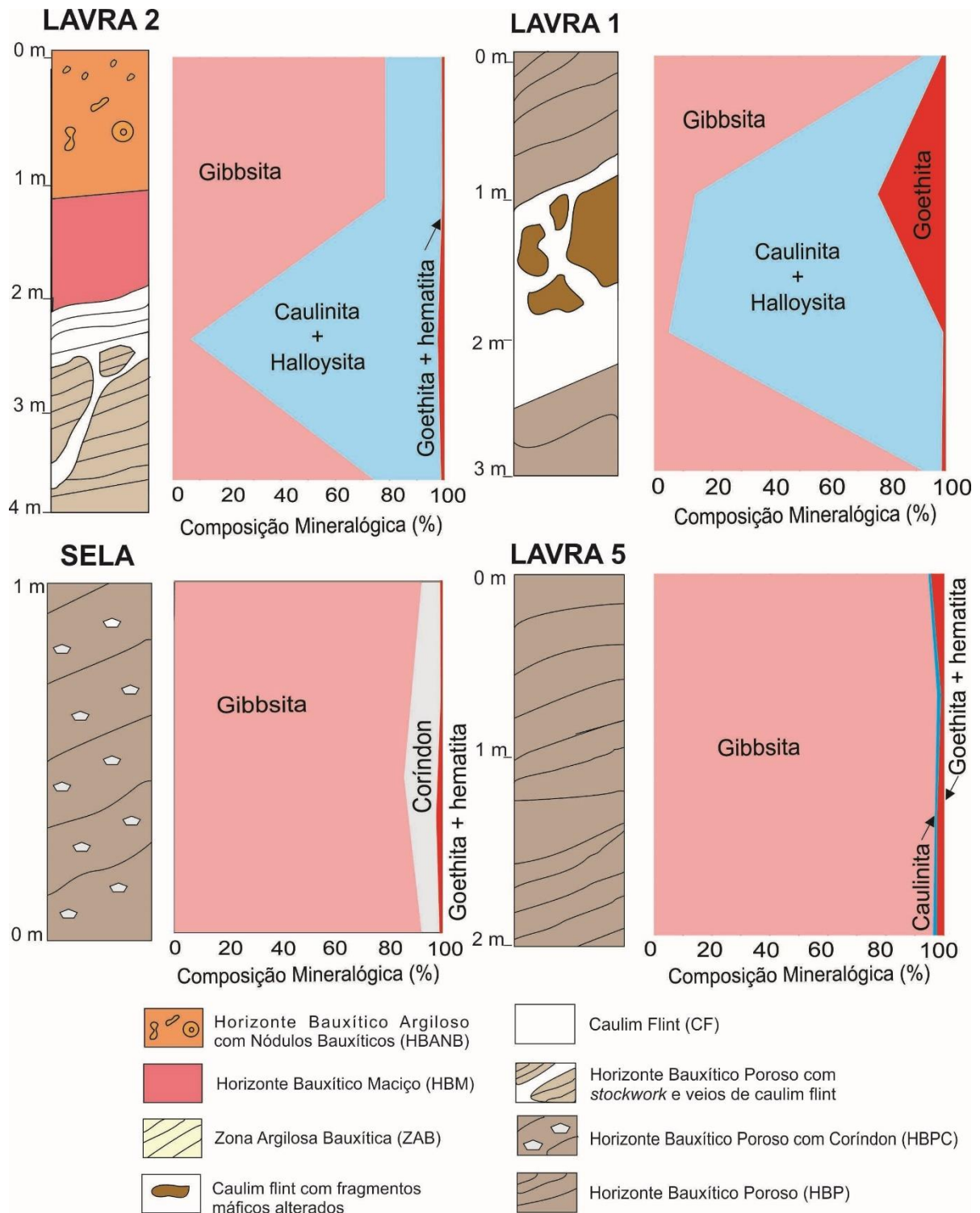


Figura 20- Distribuição mineral obtida por estequiometria para os perfis das Lavras 1, 2, 5 e SELA.

Tabela 2- Composição química total dos perfis bauxíticos de Barro Alto, alumina aproveitável e sílica reativa, incluindo a rocha mãe (Anortosito). (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Rudnick (2003).

Horizonte Perfil Amostras	Anortosito	HBP		HBPC	CF		ZAB	HBM		HBANB		Média Crustal ¹
	Lavra 1	Lavra 2	Lavra 5	SELA	Lavra 1	Lavra 1	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	
	VM - 22	VM - 8	VM - 37	SELA	VM - 17	VM - 24	VM - 6A	VM - 1A	VM - 3	VM - 1B	VM - 9	
Alumina Aproveitável	1,33	44,47	62,54	55,01	7,15	2,56	3,48	45,16	45,82	45,26	36,77	-
Sílica Reativa	6,74	10,56	0,62	0,59	22,59	33,76	33,79	1,9	8,7	8,52	15,07	-
SiO ₂	47,98	12,86	0,72	0,71	28,64	47,53	44,68	2,59	12,29	12,01	19,63	66.62
Al ₂ O ₃	31,12	58,28	63,81	60,27	33,1	39,73	39,29	65,53	61,87	61,68	55,89	15.40
Fe ₂ O ₃	1,91	0,94	2,46	1,19	18	0,55	1,86	1,94	0,61	0,77	0,44	5.04
TiO ₂	0,19	0,09	0,27	0,08	1,8	0,05	0,16	0,09	0,05	0,06	0,05	0.64
CaO	15,42	0,01	0,02	0,18	<0,01	0,48	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	3.59
K ₂ O	0,01	<0,01	0,01	0,04	<0,01	<0,01	0,03	0,06	0,02	0,02	0,01	2.80
MgO	0,68	<0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	2.48
MnO	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	<0,01	0.10
Na ₂ O	2,06	0,04	0,04	0,04	0,04	0,11	0,04	0,05	0,04	0,04	0,04	3.27
P ₂ O ₅	<0,01	0,02	0,05	<0,01	0,13	<0,01	0,04	0,04	<0,01	0,05	<0,01	0.15
PF	1,59	28,43	33,26	33,38	16,55	14,66	15,08	32,19	28,32	28,29	25,47	-
Total	101	100,71	100,67	95,93	98,43	103,19	101,23	102,54	103,26	102,97	101,59	-
SiO ₂ anort / SiO ₂ bxt	1	3,7	66,6	67,6	1,7	1	1,1	18,5	3,9	4	2,4	-
Al ₂ O ₃ anort / Al ₂ O ₃ bxt	1	0,5	0,5	0,5	0,9	0,8	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	-
Fe ₂ O ₃ anort / Al ₂ O ₃ bxt	1	2	0,8	1,6	0,1	3,5	1	1	3,1	2,5	4,3	-
TiO ₂ anort / TiO ₂ bxt	1	2,1	0,7	2,4	0,1	3,8	1,2	2,1	3,8	3,2	3,8	-
CaO anort / CaO bxt	1	1542	771	85,7	1542	32,1	1542	1542	1542	1542	1542	-
K ₂ O anort / K ₂ O bxt	1	1	1	0,3	1	1	0,3	0,2	0,5	0,5	1	-
MgO anort / MgO bxt	1	68	68	68	22,7	34	68	68	68	68	34	-
MnO anort / MnO bxt	1	2	2	2	0,5	0,7	1	1	1	1	2	-
Na ₂ O anort / Na ₂ O bxt	1	51,5	51,5	51,5	51,5	18,7	51,5	41,2	51,5	51,5	51,5	-
P ₂ O ₅ anort / P ₂ O ₅ bxt	1	0,5	0,2	1	0,1	1	0,3	0,3	1	0,2	1	-
PF anort / PF bxt	1	0,1	0	0	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,1	-

Tabela 3- (continuação). Composição química total dos elementos maiores e menores dos perfis bauxíticos de Barro Alto, incluindo a rocha mãe (Anortosito). (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Rudnick (2003).

Horizonte Perfil Amostras	Anortosito	HBP		HBPC	CF		ZAB	HBM		HBANB		Média Crustal ¹
	Lavra 1	Lavra 2	Lavra 5	SELA	Lavra 1	Lavra 1	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	
	VM - 22	VM - 8	VM - 37	SELA	VM - 17	VM - 24	VM - 6A	VM - 1A	VM - 3	VM - 1B	VM - 9	
Ba	11	34	<10	21	26	30	83	43	28	30	20	624
Be	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	2.1
Co	6,9	0,7	1	0,6	2,9	3,6	1,4	2,1	0,7	2,9	0,9	17.3
Cr	6	3	<3	12	210	<3	4	<3	<3	5	<3	92
Cs	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	4.9
Ga	18	18,7	35,4	24,4	23,2	5,7	19,5	20,9	13,3	12,3	17,5	17.5
Hf	0,45	<0,05	0,2	<0,05	3,06	0,06	0,13	0,23	0,09	0,14	0,66	5.3
Nb	1,12	0,35	4,76	<0,05	23,49	0,68	1,47	2,17	0,91	1,01	1,41	12
Rb	<0,2	<0,2	0,3	<0,2	<0,2	0,3	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2	0,3	84
Sc	<5	<5	<5	<5	41	<5	<5	<5	<5	<5	<5	14.0
Sn	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	1,5	1,6	<0,3	<0,3	<0,3	<0,3	0,5	2.1
Sr	198	<3	<3	8	6	9	5	3	6	8	<3	320
Ta	<0,05	<0,05	0,09	<0,05	1,26	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	0,08	0.9
Th	<0,1	0,1	0,4	<0,1	2	<0,1	0,3	0,6	<0,1	0,1	0,9	10.5
U	0,08	0,11	0,17	0,35	0,25	0,09	0,16	0,33	0,2	0,22	0,17	2.7
V	62	<5	<5	22	454	122	50	<5	<5	121	<5	97
W	22,1	1,4	<0,1	2	<0,1	<0,1	0,7	<0,1	<0,1	1,5	<0,1	1.9
Y	10,78	0,37	1,03	0,29	3,71	1,49	1,37	0,85	0,61	1,41	0,67	21
Zr	16	<10	12	<10	137	<10	27	34	20	27	25	193
Ag	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	53
As	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	4.8
Bi	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	0.16
Cd	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	<3	0.09
Cu	4	11	6	5	86	25	29	<3	<3	6	4	28
Mo	<2	<2	<2	<2	3	<2	<2	<2	<2	<2	<2	1.1
Ni	10	41	<3	<3	138	66	51	<3	3	4	4	47
Pb	<8	44	<8	<8	<8	20	21	<8	<8	<8	<8	17
Sb	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	0.4
Se	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	<20	0.09
Zn	11	<3	<3	4	54	17	10	5	<3	3	<3	67

Tabela 4- (continuação). Composição química total dos elementos traços dos perfis bauxíticos de Barro Alto, incluindo a rocha mãe (Anortosito). (1) Composição média da Crosta Terrestre segundo Rudnick (2003).

Horizonte Perfil Amostras	Anortosito	HBP		HBPC	CF		ZAB	HBM		HBANB		Média crustal ¹
	Lavra 1	Lavra 2	Lavra 5	SELA	Lavra 1	Lavra 1	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	Lavra 2	
	VM - 22	VM - 8	VM - 37	SELA	VM - 17	VM - 24	VM - 6A	VM - 1A	VM - 3	VM - 1B	VM - 9	
La	11,8	2,1	7,1	0,9	6,7	7,8	5,2	2,6	3,9	5,8	2,9	31
Ce	8,1	0,8	2,7	0,3	9,2	7,5	2,5	1,1	2	1,9	1,5	63
Pr	1,88	0,15	0,83	1,6	0,83	0,48	0,28	0,11	0,25	0,23	0,18	7.1
Nd	8,1	0,4	2,7	5,7	3,6	1,8	1,2	0,6	0,8	0,8	0,5	27
Sm	1,7	0,1	0,2	0,1	0,9	0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	4.7
Eu	0,93	0,05	0,05	0,05	0,38	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	1.0
ΣETRL	32,51	3,6	13,58	8,65	21,61	17,97	9,33	4,56	7,1	8,88	5,23	-
Gd	1,91	0,05	0,16	1,3	1	0,2	0,16	0,07	0,06	0,25	0,05	4.0
Tb	0,29	0,05	0,05	0,05	0,18	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0.7
Dy	1,83	0,09	0,24	0,11	1,19	0,28	0,24	0,17	0,13	0,26	0,11	3.9
Ho	0,36	0,05	0,05	0,05	0,21	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0.83
Er	1,04	0,07	0,13	0,07	0,69	0,16	0,17	0,14	0,07	0,16	0,09	2.3
Tm	0,65	0,54	0,6	0,05	0,5	1	0,66	0,97	0,42	0,53	0,76	0.30
Yb	0,8	0,1	0,1	0,1	0,7	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1	2.0
Lu	0,13	0,05	0,05	0,05	0,09	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0.31
ΣETRP	7,01	1	1,38	1,78	4,56	1,89	1,58	1,7	0,93	1,45	1,26	-
ΣETR(Total)	39,52	4,6	14,96	10,43	26,17	19,86	10,91	6,26	8,03	10,33	6,49	-
ΣETRL/ΣETRP	4,63	3,6	9,84	4,85	4,73	9,50	5,90	2,68	7,63	6,12	4,15	-

A (Fig. 21) sumariza a distribuição dos teores dos elementos químicos mais abundantes, que constituem a mineralogia do perfil bauxítico como um todo, permitindo distinguir as diferenças marcantes ou similitudes entre eles, conforme apresentado anteriormente.

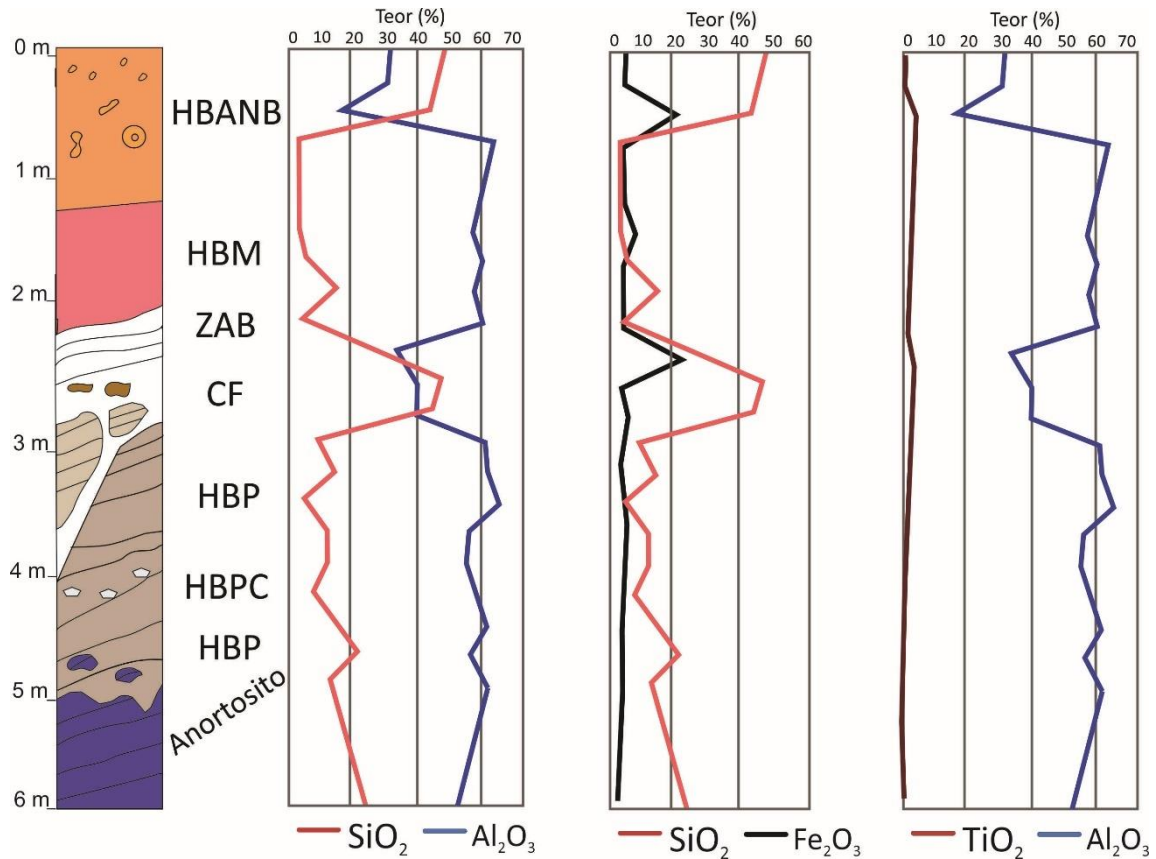


Figura 21. Distribuição dos teores dos elementos químicos principais (em óxidos) do perfil

7.2.2 Elementos-Traço

As concentrações dos elementos traços nas bauxitas de Barro Alto quando comparadas com os valores médios da Crosta Superior da Terra (CST) se mostram em geral em valores muito baixos. As concentrações de elementos como Cr, Co, Cu, Zn, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Cs, Ba, Hf, Pb, Th e U estão em níveis inferiores a CST em todos os horizontes. Apenas Mo apresenta valores mais concentrados em todos os horizontes (Fig. 22A). Por outro lado, a V, Ni, Cu, Cr, Ga, e Pb que podem apresentar eventualmente valores superiores mais especificamente, porém apenas em parte na CF e ZAB (Fig. 22). Essa relação positiva ocorre apenas nos materiais com manifestação mais elevada dos teores de Fe, observado em CF e ZAB. As concentrações dos elementos-traço, se por sua vez, forem comparadas com as do anortosito, cujas concentrações per si só já são inferiores a da média crustal, nos horizontes bauxíticos, os seus teores também são inferiores aos dessa rocha, indicado pelas respectivas razões, em geral, inferiores a 1.0, exceto V, Ni, Cu, Zn, Ba, Pb e (U), mas apenas na amostra CF que inclui parte de máfica alterada com 18 % Fe_2O_3 . V, Ni, Cu, Zn e Ba são elementos de forte assinatura a rocha máfica. Elementos como Zr, Hf, Nb, Ta, Ga, ETR, que normalmente se concentram residualmente em perfis laterito-bauxíticos, se comparados às concentrações do anortosito, em Barro Alto, não apresentam claramente este comportamento, podendo estar abaixo ou acima dos valores do anortosito, indicados razões ou fatores <1.0 a >1.0 . Esses elementos por outro lado se correlacionam positivamente com Fe_2O_3 e TiO_2 (Fig. 23, Apêndice A). São positivas as correlações clássicas Zr-Hf, e Nb-Ta, mesmo estando em baixas concentrações, porém as razões são variáveis, demonstrando certa perda de afinidade mineral específica entre eles, certamente em parte pelas concentrações muito baixas. Entre os elementos terras raras, os ETRP tendem a apresentar melhor correlação positiva. Portanto, com hematita/goethita; minerais de titânio como titanita, foram identificados muito raramente, e isto é demonstrado pela baixa concentração de TiO_2 no anortosito e nas bauxitas. Ao contrário da maioria dos depósitos de bauxitas, titânio se apresenta como anatásio, nanocristalino, e com teor acima 0.8 %, em geral, de 1,5 a 4.0 % (Costa *et al.* 2016). Anatásio não foi identificado em Barro Alto nas amostras investigadas.

Portanto, o conteúdo dos elementos traços analisados em níveis similares ou abaixo daqueles do anortosito, reforça o que já foi demonstrado pela geologia e mineralogia, a íntima relação das bauxitas com o anortosito, pois o material de alteração guarda a mesma assinatura representada pelas baixas concentrações.

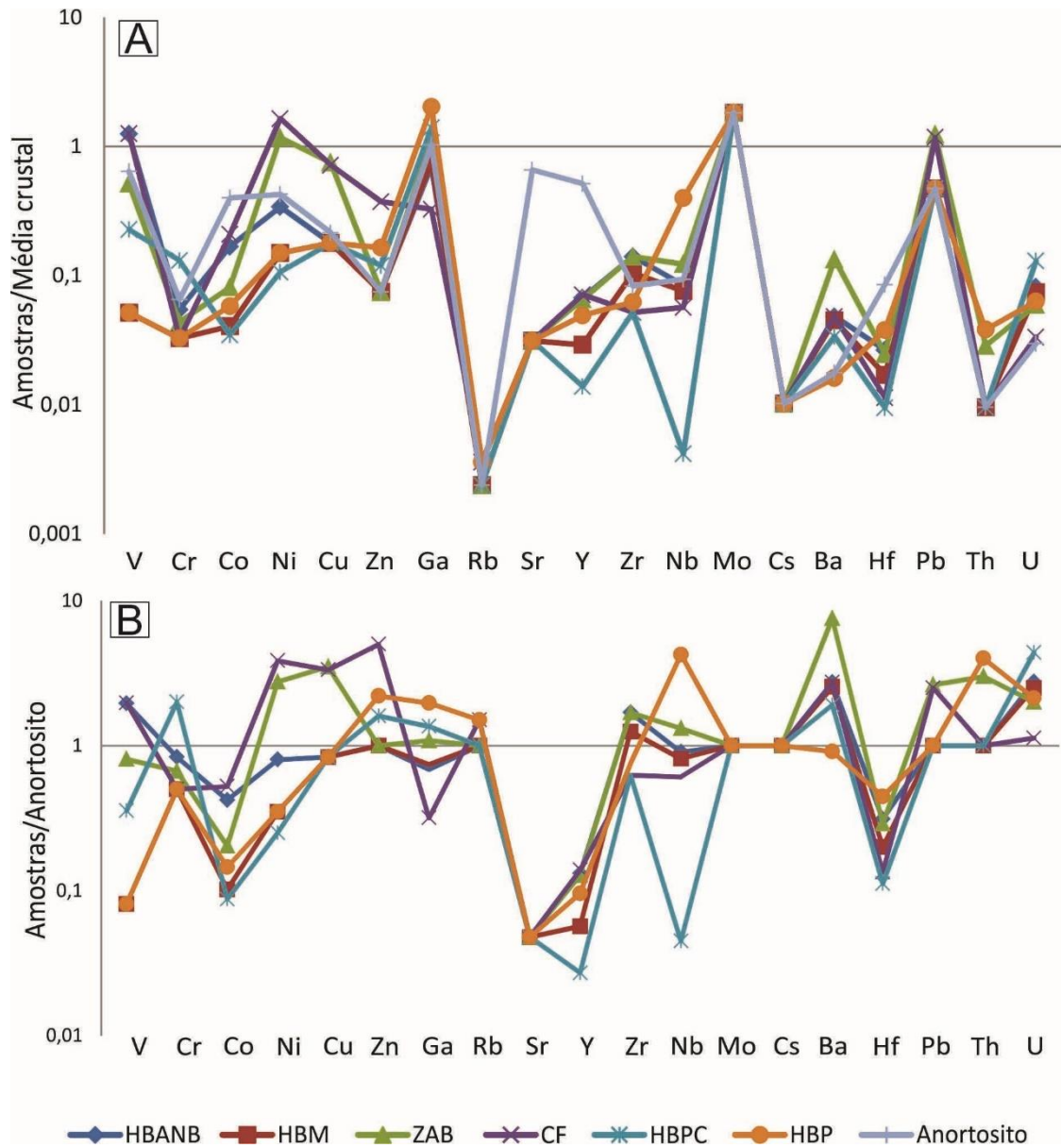


Figura 22- Distribuição das concentrações dos elementos-traço normalizados pela média da crosta superior da Terra (A) e pelo anortosito (B).

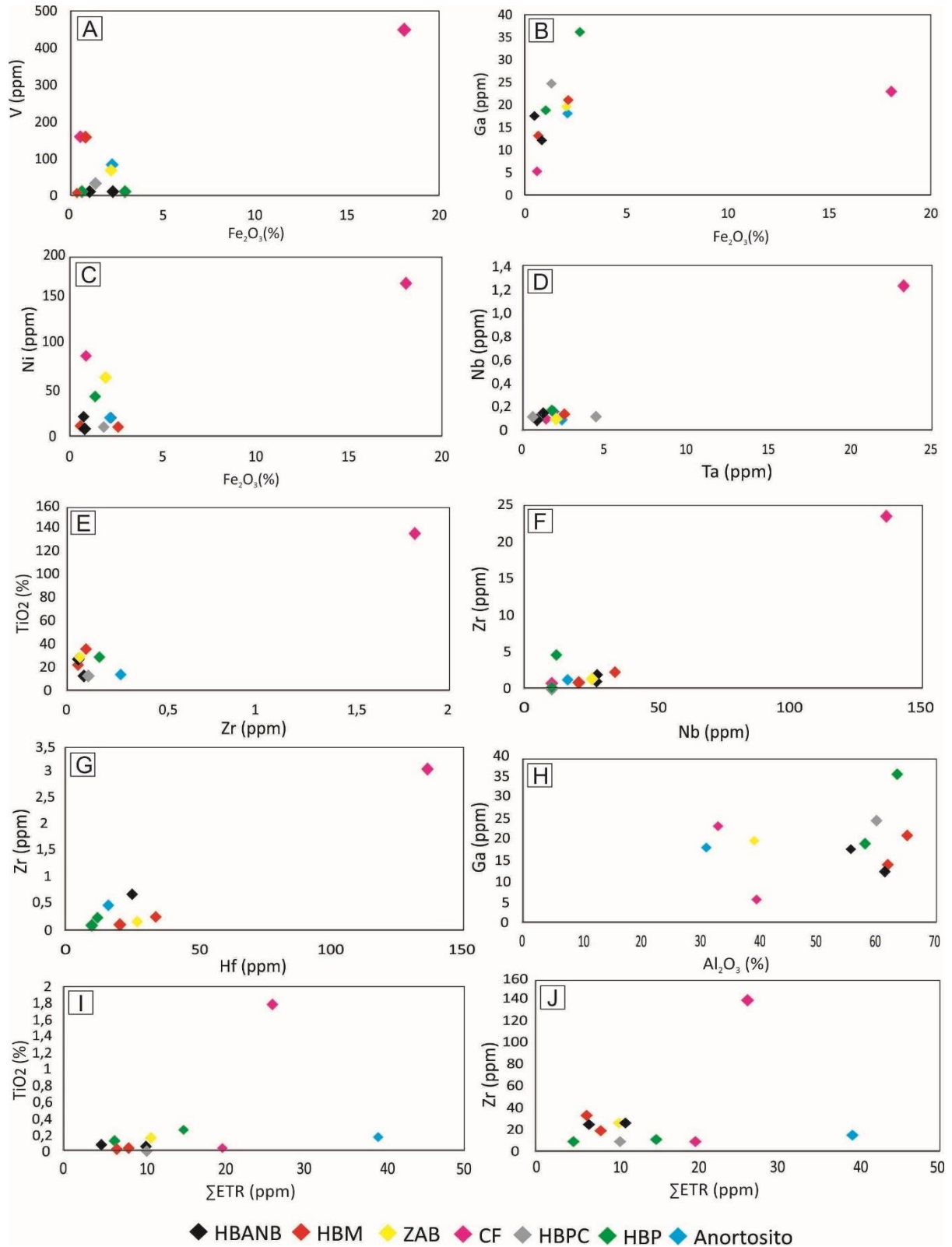


Figura 23- Diagramas de dispersão mostrando a correlação positiva entre Fe_2O_3 e TiO_2 , Zr e alguns elementos-traço. (A) V x Fe_2O_3 ; (B) Ga x Fe_2O_3 ; (C) Ni x Fe_2O_3 ; (D) TiO_2 x Zr; (E) Nb x Ta; (F) Zr x Nb; (G) Zr x Hf; (H) Ga x Al_2O_3 ; (I) TiO_2 x ΣETR ; (J) Zr x ΣETR .

A imobilidade dos elementos-traço ao longo dos perfis está vinculada provavelmente aos oxi-hidróxidos de ferro bem como aos minerais resistentes, como zircão ou neoformados e estáveis, como anatásio (Costa *et al.* 2014, Santos *et al.* 2016). Estas demonstram que existem dois grupos principais de elementos com forte afinidade geoquímica. O grupo I é formado pelos elementos associados ao Al_2O_3 (Ga, Ni, Cr, Ba) e também com a água estrutural, representada pela perda ao fogo (PF) e tem forte correlação positiva com Al_2O_3 . O grupo II é formado por MgO , Th, Na_2O , Pr, Tm, Sn, Dy, Gd, Hf, Yb, Er, Sm, Ta, Rb, Lu, P_2O_5 , MnO , Cs, K_2O , Cr_2O_3 , TiO_2 , Nb e Fe_2O_3 . Este grupo mostra forte afinidade com Fe_2O_3 e TiO_2 (Fig. 24). Além disso, a matriz de correlação (Apêndice A) também demonstra a forte afinidade entre esses elementos.

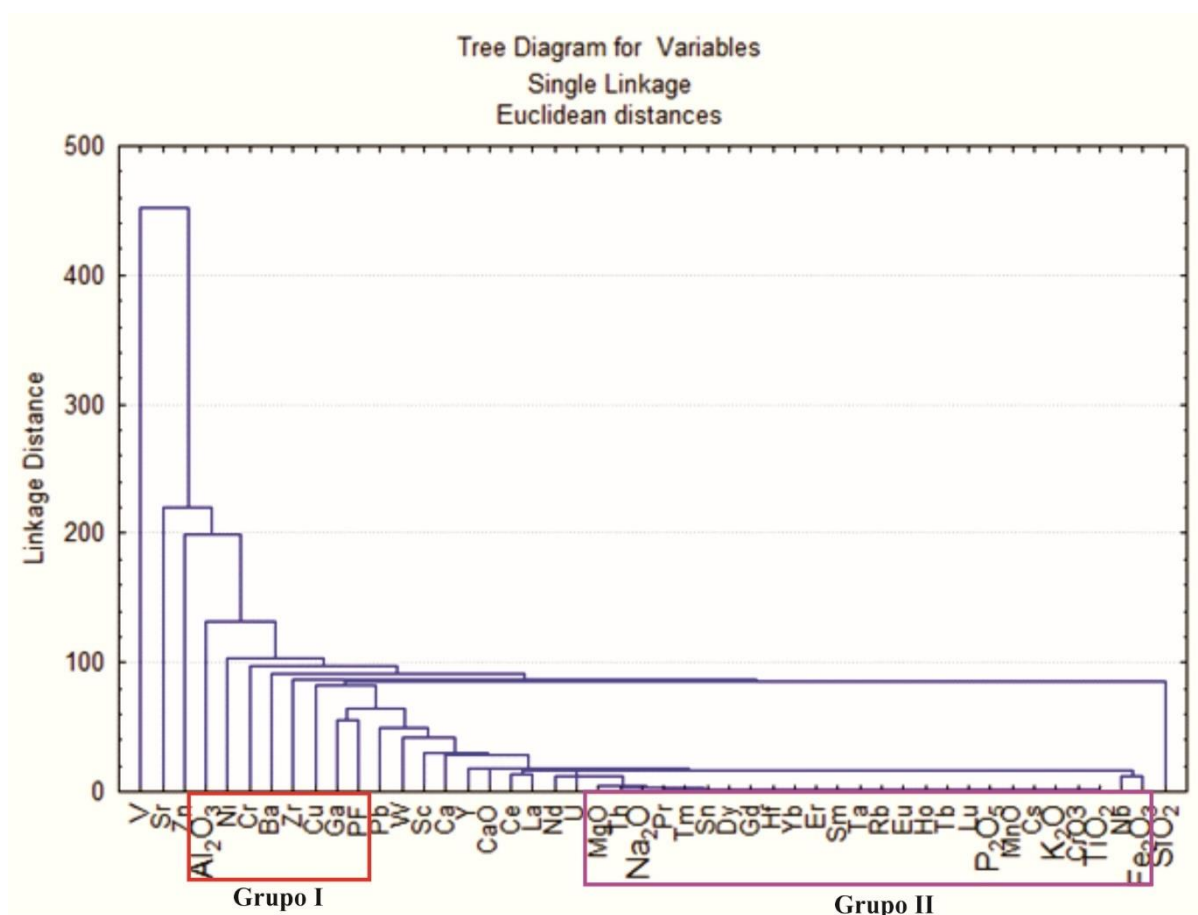


Figura 24- Análise de agrupamento dos dados dos elementos químicos do perfil de Barro Alto.

7.2.3 Elementos Terras Raras

As concentrações dos elementos terras raras (ETR) estão abaixo da média crustal em todas as amostras estudadas (Tabela 3) e também do anortosito (Fig. 25). As concentrações mais elevadas estão tipicamente relacionadas às unidades mais argilosas com CF, ZAB e também a presença dos oxi-hidróxidos de Fe (HBPC). Quando normalizados aos condritos, as curvas exibem padrão de distribuição ligeiramente semelhante entre si, exceto para a bauxita porosa com coríndon. Observa-se sutil enriquecimento em ETRL e tendência aos pesados, mas apenas de Tm ao Lu. Esse comportamento se assemelha ao do anortosito, apenas com concentrações bem mais baixas, com exceção do Tm. É nítida as anomalias negativas em Ce e positiva em Tm anomalias atreladas ao empobrecimento dos ETRL e ligeiro enriquecimentos dos ETRP (Fig. 25). Essas duas anomalias foram observadas no anortosito (Fig. 25). Portanto elas se preservaram nas bauxitas. Em perfis lateríticos em geral a anomalia de Ce é positiva (Horbe & Costa 1997), e relacionada a neoformação de cerianita. Principalmente ligadas a grande presença de minerais resistatos em alguns horizontes como no HBPC, que apresenta uma anomalia positiva de cerca de 1,3 em Gd e uma anomalia positiva de Tm no caulim flint. Provavelmente a fonte dos ETR, cujos teores são muito baixos, tanto no anortosito como nas bauxitas, não pode ser relacionada a minerais clássicos como zircão, já que os teores de Zr estão em concentrações muito baixas (< 16 ppm no anortosito; <34 nas bauxitas; 137 na amostra CF: caulim flint com rocha máfica alterada). Em bauxitas da Amazônia derivadas de rochas sedimentares os teores de zircônio variam de 600 a 4000 ppm (Costa *et al* 2016). Da mesma forma não estão em apatitas, pois os teores de P_2O_5 estão em níveis subcrustais (Tabela 2). Zircão e apatitas são geralmente os minerais portadores de ETR em níveis mais elevados. Portanto os ETR nos anortositos devem estar nos plagioclásios, minerais dominantes desta rocha, os quais intemperizados, liberaram esses elementos, que não encontraram minerais neoformados compatíveis, exceto em parte os óxi-hidróxidos de Fe. Daí a relativa correlação positiva verificada entre ETR- Fe_2O_3 .

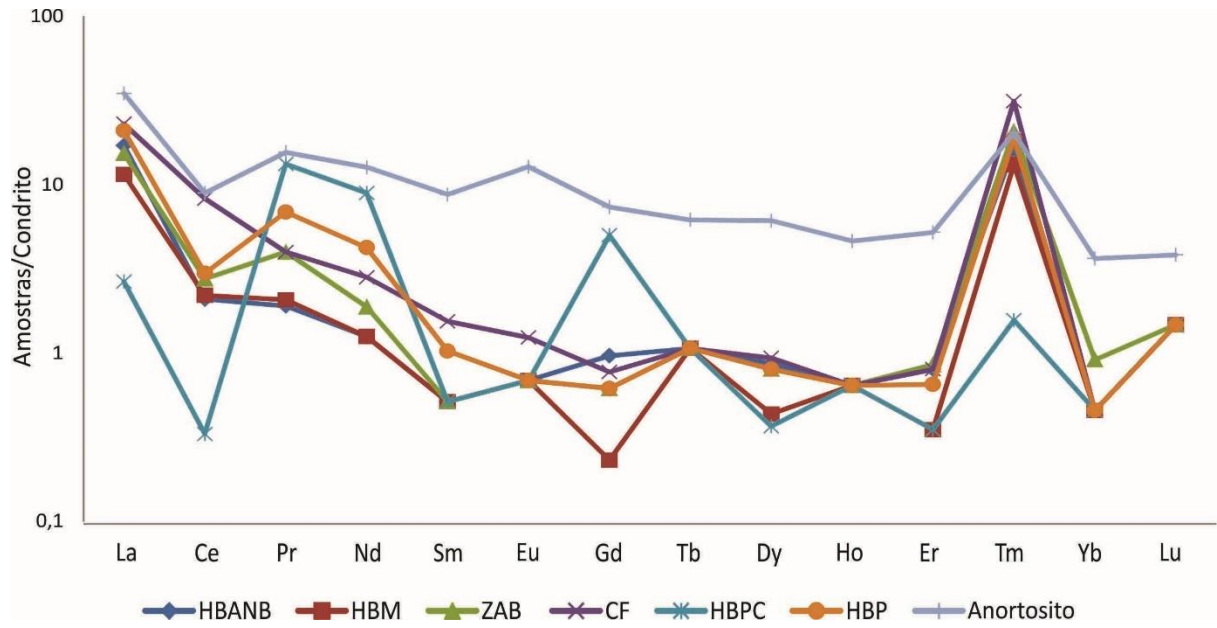


Figura 25- Curvas de distribuição das concentrações de ETR normalizadas as dos condritos para as amostras de bauxitas e o anortosito.

8 DISCUSSÕES

A composição mineral da amostra de anortosito analisada do depósito de bauxitas de Barro Alto é muito simples, e extremamente favorável à formação de bauxita, pois é constituído essencialmente plagioclásio cálcico (labradorita), desprovido de quartzo, que ao lado de augita, hornblenda, almandina e coríndon, lhes conferem elevado teor de Al_2O_3 , 31,12%. A composição químico-mineralógica desta amostra de anortosito está plenamente compatível com aquelas descritas em muito mais detalhe por (Santos 2011, Oliveira *et al.* 2011). Esses minerais, a exceção do coríndon, acessório aleatório, são extremamente susceptíveis a alteração intempérica e/ou hidrotermal, com aptidão a formação de aluminossilicatos e hidróxidos de alumínio, e claro pouca quantidade de oxi-hidróxidos de Fe. O anortosito dispõe apenas de 1,9 % de Fe_2O_3 . Os teores de CaO muito altos (15,4%) e os de Na_2O (2,06%), relativamente baixos, são os únicos elementos metais alcalinos e alcalinos, facilmente solúveis no ambiente intempérico e/ou hidrotermal, passíveis de lixiviação. Toda a sílica está nos silicatos (plagioclásios, augita, hornblenda) também com alta susceptibilidade a alteração intempérica e/ou hidrotermal, portanto disponíveis a lixiviação, se foram estabelecidas as condições para assim acontecer. Além disso, o anortosito, de Barro Alto, apresenta uma razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, baixa (1,46), o que mostra uma tendência favorável à alitização (Oliveira *et al.* 2011). Tão importante quanto o conteúdo de Al, é a baixa relação $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ da ordem de 0,06 o que favorece a formação de bauxita de boa qualidade, baixo conteúdo de minerais de ferro, como hematita/goethita. A ausência de quartzo no anortosito é outro fator extremamente favorável, pois a dissolução parcial deste mineral poderia elevar o teor de H_4SiO_4 nas águas, dificultando a cristalização da gibbsita e favorecendo a formação da caulinita (Oliveira 1985). Portanto, as condições químicas e mineralógicas iniciais estavam ideais para a formação de bauxitas. A presença de coríndon no pacote bauxítico e no anortosito é mais um forte argumento para a formação desse minério a partir dessa rocha, como a ausência de quartzo na rocha e nas bauxitas. Bauxitas de alto teor em alumina aproveitável (gibbsita), desprovidas de quartzo e pobres em hematita e goethita se formaram em Barro Alto, isto é um fato contundente, que as tornaram o melhor minério de alumínio até o presente encontrado em território brasileiro. Porém ao contrário da maioria dos depósitos de bauxitas no Brasil, as de Barro Alto não apresentam um horizonte argiloso subjacente clássico. Por sua vez as argilas estão presentes, no entanto na forma de bolsões e também zonas subverticais, ou ainda como zonas de vênulas e veios que interceptam a bauxita, portanto disposição espacial lateral nos corpos dos horizontes de bauxitas, o que de certa

forma as torna imprevisíveis, e até um problema para o acompanhamento seguro da lavra. Enquanto a caulinita e gibbsita são os minerais dominantes, que conferem um aspecto macio e compacto, em geral com padrão mosqueado nas bauxitas em geral, em Barro Alto, as argilas são brancas, com tendência a caulim semiflint a flint, desprovida de mosqueamento, e constituída de caulinita, halloysita e gibbsita, e como dito, não ocorrem como horizontes e sim como bolsões, diques, veios e vênulas. Esse modo de ocorrência encontra paralelo nas bauxitas de Poços de Caldas-MG (Valeton *et al.* 1997) e Arkansas (Goldman & Tracey 1946). Mesmo as bauxitas de Pitinga-AM, derivadas de riolitos, ricas em feldspatos, portanto também com alto teor de Al_2O_3 , desenvolveram perfil laterito-bauxítico completo com espesso horizonte argiloso amarelo a mosqueado subjacente ao bauxítico, dominado por caulinita. São bauxitas de alto teor, pobres em ferro e sílica reativa, mas com bastante quartzo (Costa *et al.* 1988, Horbe & Costa, 1999). Halloysita é um mineral que ocorre com frequência em perfis lateríticos, porém sempre restrito, e em especial a porção inferior do horizonte argiloso. Porém é um mineral comum em zonas hidrotermalizadas associada à dickita e nacrita (Robb 2013). A presença de halloysita na base dos perfis de alteração em zonas tropicais, o horizonte argiloso, já foi constatada por (Fujimore 1975) nas lateritas de Salvador e Por (Moniz 1969) em Poços de Caldas. A halloysita parece, portanto, característica das fases iniciais da alteração, enquanto que caulinita acompanha preferencialmente materiais mais evoluídos como a bauxita (Oliveira 1985).

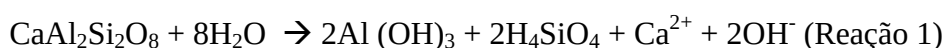
O anortosito como rocha geradora das bauxitas de Barro Alto é também demonstrada em parte pelas relações químicas. O alto teor de Al_2O_3 explica per si só o alto teor das bauxitas, e da mesma os baixos teores de Fe_2O_3 . No entanto os teores de TiO_2 , embora baixos no anortosito, deveriam se enriquecer nas bauxitas, que normalmente se encontra como anatásio nas bauxitas, o que não se verifica. Os baixos teores de elementos-traços, incluindo os ETR, no anortosito, também são baixos, aliás, em geral mais baixos do que no anortosito, mesmo aqueles relacionados a minerais refratários, como Zr, Hf, Nb, Ta, Y, Sc, que se situam conforme o horizonte bauxítico, abaixo, similar ou ligeiramente acima nas bauxitas. As curvas de distribuição dos ETR também mantêm a assinatura do anortosito, embora em concentrações inferiores as dessa rocha.

Outro aspecto contundente nas bauxitas de Barro Alto é a presença de gibbsita macrocristalina em agregados compactos, formações botrioidais, com desenvolvimento de drusas, em tonalidade ligeiramente esverdeada, e expressivo volume local na mina, poderia ser denominada simplesmente de gibbsitito. Materiais assim ainda não foram descritos nos

depósitos laterito-bauxíticos do Brasil, nem das Guianas, Venezuela e nem mesmo da África Equatorial. Nas bauxitas de Trombetas-PA, se encontra por vezes, drusas de cristais mm de gibbsita em bolsões centimétricos dentro do horizonte bauxítico (Costa *et al.* 1996, Choque Fernandez, 2018), que são muito raros. São conhecidos cristais bem desenvolvidos de diásporo em bauxitas metamorfizadas Mesozoicas na Turquia, inclusive em qualidade gemológica Web Mineral (2019), (Marcondes Lima da Costa, comunicação verbal). No morro do Cruzeiro em Ouro Preto bauxitas em massas botrioidais foram expostas nas encostas do morro, associadas com hematita, com aspecto acicular radial (Marcondes Lima da Costa, comunicação verbal).

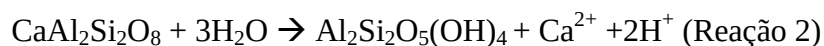
Outro aspecto muito característico das bauxitas de Barro Alto é a completa ausência de uma crosta ferro-aluminosa, mesmo que parcialmente desenvolvida ou subsistida, crosta deste tipo é um aspecto clássico da grande maioria dos depósitos de bauxitas lateríticas cenozoicas e mesmo mesozoicas pelo mundo (Valeton 1972; Bardossy & Aleva 1990, Kotschoubey *et al.* 2005). O baixo teor de Fe_2O_3 no anortosito, próximo a 2 %, não é argumento plausível, pois muitos depósitos de bauxitas se formaram a partir de rochas graníticas e riolitos, argilitos, pobres também em ferro, mas com desenvolvimento da crosta ferro-aluminosa (Horbe & Costa 1999).

Outro fato de grande destaque é que as bauxitas em Barro Alto, em geral, estão diretamente sobre o anortosito, em contato abrupto ou quase, raramente com uma transição argilosa, embora localmente ela possa ser até mesmo métrica. A transformação direta de plagioclásio como labradorita e/ou bytonita para gibbsita, por hidrólise, requer imediata e concomitante lixiviação de SiO_2 (H_4SiO_4) e dos álcalis (no caso, Ca e Na, os principais disponíveis no anortosito) conforme reação química (Reação 1) a seguir, que tende produzir ambiente pouco ácido a ligeiramente alcalino, sob forte hidrólise, muita água circulando. Condição essa muito improvável em processo alteração intempérica, portanto exigindo uma condição especial localizada, e Barro Alto representa um planalto quilométrico.



A pervasiva formação de caulim semiflint a flint, como vênulas, veios e bolsões, formados por caulinita, halloysita, além gibbsita, sugere por sua vez uma possível atividade hidrotermal. Halloysita é um mineral mais frequente em ambientes hidrotermais de baixa temperatura, onde se apresenta como formas microtubulares, como é o caso em Barro Alto. Gibbsita por sua vez não é típica desse ambiente, sendo mais frequente o diásporo, que em

geral está associado à pirofilita. Neste caso a reação química (Reação 2) a partir dos plagioclásios é bem mais plausível, com lixiviação parcial, gerando ambiente ácido, portanto uma hidrólise menos forte.



Esta reação à temperatura superior a ambiental, ou seja, hidrotermal, produziria então o caulim flint, ao longo fraturas e fissura ou como bolsões. Isso é frequente em atividades vulcânicas terminais, como fumarolas.

A formação de gibbsita em ambiente hidrotermal de baixa temperatura é possível através de mineral precursor, por exemplo, a lesukita. A lesukita é formada a partir da alteração dos plagioclásios através de bactérias específicas que atacam esses minerais (Filatov *et al.* 2012). Um exemplo típico acontece no topo do vulcão Kolbatchik na península de Kamtschka, Rússia (Filatov *et al.* 2012). Na superfície subplana a ondulada deste edifício vulcânico, está se formando atualmente uma “camada” descontínua de gibbsita e lesukita, portanto um horizonte bauxítico, em meio a forte atividade de fumarolas, que denotam a ambiência hidrotermal tardia.

Para Oliveira *et al.* (2013) as bauxitas de Barro Alto derivaram por alteração intempérica do anortosito em dois estágios. O primeiro envolveu a alitização, ou seja, a direta formação da bauxita representada pelo horizonte bauxítico poroso, com a perda de álcalis e sílica e o acúmulo relativo de alumínio, gerando a estrutura isalterítica. O segundo envolveu a transformação de minerais ferromagnesianos em goethita. Isto corresponde a reação 1 apresentada anteriormente, que parece em parte compatível. Mas não explica a formação de caulim flint e/ou semiflint, em vênulas, veios e bolsões, e até transgredindo os corpos solitários de rochas máficas. Como teriam se formado o caulim flint? Por que não se formou o horizonte argiloso e também a crosta-ferro aluminosa? Por que a espessura é tão irregular e localmente muito espessa, mais de 50 m? Por que blocos métricos de anortositos flutuam dentro do pacote bauxítico em contato abrupto? Por que zonas verticais de caulim estão em contato com as bauxitas? Essas características não se coadunam a formação intempérica clássica ou laterítica como é o caso de bauxitas.

Além disso, os dados obtidos permitem distinguir três gerações de gibbsita:

1. Gibbsita (I) do horizonte bauxítico poroso, que parece ser aquela formada diretamente dos plagioclásios e almandina, em que a intensa lixiviação é demonstrada pela forte perda de SiO_2 , Ca^{2+} e Na^+ , para a formação desse mineral microcristalino e, criou a elevada microporosidade. Corresponderia a alitização, mas não necessariamente intempérica. A mobilidade dos complexos de Fe foi pequena, permanecendo praticamente nos esqueletos de augita e esqueleto parcial de almandina.
2. Gibbsita (II) está associada ao caulim flint, portanto a caulinita, halloysita e mesmo localmente gibbsita. Essa gibbsita parece ser microcristalina, porém por vezes se torna o mineral dominante, descrevendo bauxitas brancas, compactas e duras, em veios e bolsões. Muitas vezes é confundida na mina com caulim flint. Parece representar uma formação hidrotermal típica.
3. Gibbsita (III) macrocristalina coesa, por vezes drúsica e sobreposta a gibbsita mais fina e compacta, de aspecto botrioidal. Ela forma corpos isolados, aparentemente desconectados do conjunto maior de bauxitas, em bolsões de dezenas de metros de largura e profundidades superiores a 40 m. Constitui o que convencionou chamar de gibbsitito, expressão essa empregada pelos técnicos da mina. Essa gibbsita não apresenta qualquer vestígio de uma formação laterítica, e seus grandes cristais e a massa botrioidal, se assemelham às formações de calcedônia e/ou ágata, e, portanto, sugere uma formação típica de ambiente hidrotermal de baixa temperatura.

A gibbsita (I) é o resultado da alteração dos plagioclásios, sem estágio intermediário, uma acumulação relativa (Stoops *et al.* 1979, Mutakyahwa & Valetton, 1995). Este tipo de gibbsita ocorre como massas microcristalinas em substituição pseudomórfica de plagioclásio e mesmo da almandina; septos de gibbsita se interligam formando um padrão reticular. Os planos de clivagem dos feldspatos e fraturas anteriores são claramente reconhecidos pela presença de cristais de hematita ou goethita interligando os de gibbsita, preservando assim a textura primária. Gibbsita deste tipo é geralmente de cor clara, exibindo cristais polissintéticos, que não são preenchidos por óxidos/hidróxidos de ferro (Mutakyahwa 1991). O acúmulo absoluto de alumina se inicia ao longo das linhas de fraqueza como clivagens e

fraturas pela dissolução de minerais primários levando à formação de septos de gibbsita. Com o avanço das dissoluções dos silicatos como augita, anfibólio e granadas, surgem pseudomorfos de gibbsita segundo aqueles minerais e formação de textura tipo *boxwork*, frequentes no horizonte bauxítico poroso.

A gibbsita (II) parece ter sido formada a partir de massa de caulim flint a semiflint micro a criptocristalino, que inicialmente formava vênulas e veios, que ocuparam fissuras e fraturas e cavidades irregulares. Portanto é uma gibbsita microcristalino a criptocristalino. Nódulos bauxíticos centimétricos também podem conter este tipo de gibbsita. Em lâminas delgadas ela se apresenta em *booklets*, herdados das caulinitas pré-existentes ou mesmo derivadas diretamente de plagioclásios microcristalinos.

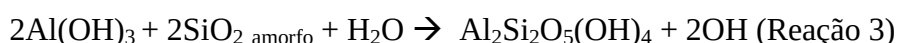
A gibbsita (III) macrocristalina, que constitui os gibbsititos, parece representar o acúmulo absoluto de alumínio, movidos por soluções ou muito ácidas ou muito alcalinas, provavelmente prevalecendo às alcalinas, pois não foram identificados minerais da ambiência ácida, e a reação típica de hidrólise direta, proporciona ambiente ligeiramente alcalino. Ao longo das zonas de fraturas e falhas mais intensivas, essas soluções complexas de alumínio, ao se tornarem menos alcalinas, em contato com as encaixantes gibbsíticas, se precipitaram em formações botrioidais, com desenvolvimento de gibbsita macrocristalina nas inúmeras cavidades geradas pelo intenso faturamento.

Da mesma forma os dados obtidos permitem individualizar três gerações principais de caulinita:

1. Caulinita (I) na interface gibbsita - anortosito. Essa caulinita constitui as auréolas de alteração do anortosito, quando este não passa direto para gibbsita. Essa zona de caulinita pode atingir milímetro a dezenas de centímetros de espessura, também pode alcançar metros de espessura, porém sem desenvolver claramente um horizonte argiloso típico. Parece ser aquela caulinita formada a partir dos plagioclásios com hidrólise limitada (Reação 2), e, portanto, lixiviação parcial da sílica, mas total de Ca e Na. Sua distribuição na mina é bastante irregular e quase imprevisível, mesmo perante os furos de sondagem de curto prazo, para avanço da lavra.
2. Caulinita (II) corresponderia aquela do caulim flint ou simplesmente caulim, associada à halloysita e por vezes gibbsita e ocorrendo sob a forma de vênulas, veios e bolsões e zonas fraturadas verticalizadas, os *stockworks* em geral. Ela deve

ser também um produto da hidrólise parcial, via reação 2, com ambiente ligeiramente mais aquoso e lixiviação dos álcalis. A temperatura deve ter sido de condições hidrotermais baixas, < 300 °C, que permitiu dar a natureza semiflint a elas, e ainda formação parcial de gibbsita. Provavelmente houve a formação parcial de opala CT ou amorfa.

3. Caulinita (III) corresponde àquela encontrada principalmente no horizonte bauxítico argiloso com nódulos, em que esse mineral se apresenta em massa amarelada, terrosa, invadindo a massa bauxítica e envolvendo os nódulos centimétricos a decamétricos. É nitidamente formada pelos processos de alteração intempérica atual e subatual, em que a atividade radicular tem tido uma importância enorme, decompondo e desagregando a bauxita porosa e/ou maciça, originando os nódulos e também nódulos com perfurações, cujos condutos também foram preenchidos parcial ou totalmente por esta caulinita, que ainda contém gibbsita herdada. A formação da caulinita (III) representa a alteração das gibbsitas pré-existentes e seu contato com SiO₂ amorfa, proveniente do decaimento dos tecidos vegetais, conforme reação 3. Esta reação é muito efetiva e intensiva sobre bauxitas situadas sob florestas tropicais, como na Amazônia e na África Equatorial (Costa *et al.* 1991, Tardy *et al.* 1991) que leva a formação de espessos argissolos e latossolos amarelos.



O anortosito, sobre o qual e partir do qual se desenvolveu os seus ricos depósitos de bauxitas, é parte do complexo Mafico-Ultramáfico de Barro Alto que se situa na grande zona tectônica da Faixa Brasília. O anortosito de Barro Alto em forma de bumerangue se situa numa zona de cisalhamento NE-SW, que se manifesta pelo intenso fraturamento e fortes lineações impressas no corpo anortosítico. Essas rochas segundo Ferreira *et al.* (2010) foram metamorfizadas nas fácies granulito a anfíbolito. Isto explicaria a formação de coríndon no anortosito, além de ser um possível indicio da presença de fluidos metasomáticos gerados por metamorfismo ao longo da rocha. Segundo Pirajno (1992) durante o metamorfismo é possível gerar sistemas hidrotermais que proporcionam formações argílicas, devido à geração intensa de H⁺, um metassomatismo ácido, com lixiviação, a temperaturas entre 100 - 300°C, a partir

de aluminossilicatos, gerando caulinita e halloysita, que se alojam em fissuras e fraturas decorrentes, desenvolvendo formações tipo brechas, características de ambientes hidrotermais.

O presente entendimento apresentado para a formação das bauxitas de Barro Alto não se enquadra naquele proposto por Santos (2011) em que reconhece um perfil intempérico clássico com formação de bauxitas, portanto um perfil laterítico. Ele reconhece da base para o topo à rocha primária (anortosito), saprólito (horizonte bauxítico poroso), a zona de transição (caulim flint, horizonte argiloso bauxítico e horizonte bauxítico maciço) e ao topo o horizonte bauxítico argiloso com concreções, na verdade nódulos bauxíticos.

No Brasil alguns depósitos de bauxitas relacionados com rochas vulcânicas e subvulcânicas apresentam algumas características de forte contribuição hidrotermal. Um exemplo está representado pelo depósito de Poços de Caldas. Trata-se de um dos maiores complexos alcalinos magmático do cretáceo superior, com múltiplas caldeiras, fortemente modificado por mestassomatismo, que atingiu inclusive as rochas encaixantes (Valeton *et al.* 1997). Os autores admitem a formação laterítica para as bauxitas, mas reconhecem que boa parte dos argilo-minerais como caulinita, illita e esmectita são metassomáticos e relacionados com as fraturas e juntas anelares. Os autores por sua vez nas conclusões reconhecem que a atividade hidrotermal/metassomática pré-laterítica foi fundamental para a formação do saprolito (minerais de argila) e da bauxita. Similarmente pode ser observado nas bauxitas do maciço nefelina sienito de Passo Quatro (Boulangé & Colin 1994).

9 CONCLUSÕES

O modo de ocorrências das bauxitas de Barro Alto de um modo geral não se enquadra dentro da sucessão de horizontes típicos verificados em perfis laterito-bauxíticos no Brasil, na África, Índia e Austrália. Ele não apresenta o horizonte argiloso típico e nem a crosta ferro-aluminosa. É uma bauxita muito rica em alumina aproveitável (gibbsita), com baixa sílica reativa e muito baixo teor de ferro e desprovida de quartzo. Sua origem a partir do anortosito é inquestionável segundo os vários dados de campo (geológicos), mineralógicos e químicos, podendo localmente conter enclaves de rochas máficas. A presença dos mesmos cristais de coríndon no anortosito e nas bauxitas, por exemplo, reforça essa afinidade. Embora ocupando o topo do quase platô, as bauxitas também ocupam zonas baixas, vales, encostas e até se encontram topograficamente abaixo dos lajedos de anortosito. A espessura do corpo bauxítico é extremamente variável, de poucos metros a mais de 50 m. Lateralmente apresenta descontinuidade e faz contato com zonas de caulim flint e semiflint, que é muito frequente seccionando as bauxitas ou intercaladas a essas, muitas vezes como verdadeiros *stockworks*. As assinaturas geoquímicas em geral são comuns entre as bauxitas e o anortosito, mas em geral as concentrações de TiO_2 , Fe_2O_3 e dos elementos traços estão abaixo daquelas do anortosito, até mesmo para os elementos refratários.

As gerações de gibbsita, I, II e III, principalmente II e III não são compatíveis com evolução laterítica, da mesma forma as gerações de caulinita, I, II, e III, em que I e II não são claramente intempéricas lateríticas, e a III parece ser pedogenética atual a sub-atual.

A intensa preservação de estruturas primárias nas bauxitas demonstra que sua formação envolveu lixiviação intensa, favorecendo a substituição *in situ*, que promove colapso do corpo bauxítico, exceto para a gibbsita (III). É nítida a atividade hidrotermal representada pelo caulim flint, branco e seu modo de ocorrência, fortemente condicionado a zonas de fraturas e brechação, bem como pela gibbsita (III).

Pelo exposto provavelmente a bauxita de Barro Alto seja produto principalmente de intensa atividade hidrotermal subsuperficial dos anortositos por conta da forte deformação estrutural a que foram submetidas essas rochas em seus estágios finais pós-emplacement. Em toda a região, embora com rochas favoráveis a formação laterito-bauxíticas, apenas as estudadas, são conhecidas. Na base do platô Barro Alto, destacam-se mineralizações lateríticas niquelíferas sobre rochas ultramáficas, mas restritas a zona saprolítica inferior, em que também a alteração hidrotermal parece ser o principal evento de formação desse minério.

Ele também é recortado por zonas venulares de caulim branco, com enclaves ultramáficos e calcedônicos (Marcondes Lima da Costa, comunicação verbal).

As bauxitas de Barro Alto por suas características químico-mineralógicas, em especial pelos baixos teores de elementos-traço, enfatizando-se os metais “pesados” e radioativos, em níveis sub crustais, deveria ser classificada como um minério de qualidade prêmio, ecologicamente sustentável, e, portanto, de alto valor mercadológico.

REFERÊNCIAS

- Arantes D., Osborne G.A., Buck P., Porto C.G. 1991. The Mara Rosa volcano-sedimentary sequence and associated gold mineralization. *In: Brazil gold'91*. Balkema, Rotherdam, 1991. *Proceedings*, Belo Horizonte, 221-229.
- Bates T.F. 1962. Halloysite and gibbsite formation in Hawai. *Clays and Clay Minerals*. Proceedings of the Ninth National Conference on Clays and Clay Minerals: 315-324, 324a-324b, 325-328.
- Bardossy G. & Aleva G.J.J. 1990. *Lateritic bauxites*. Amsterdam, Elsevier, 624p. (Developments in Economic Geology, 27).
- Boulangé B & Colin F. 1994. Rare earth element mobility during conversion of nepheline syenite into lateritic bauxite at Passa Quatro, Minas Gerais, Brazil. *Appl. Geochem.* **9**: 701-711.
- Brito Neves B.B & Cordani UG. 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. Crustal Evolution in the Late Proterozoic. *Precambrian Research*, **53**: 23-40.
- Correia C. T., Girardi V.A.V., Tassinari C.C.G., Jost H., 1997. Rb-Sr and Sm-Nd geochronology of the Cana Brava layered mafic-ultramafic intrusion, Brazil, and considerations regarding its tectonic evolution. *Revista Brasileira de Geociências*. **27**, 163-168.
- Costa M.L., Horbe M.A., Horbe A.M.C., Teixeira J.T., Costa W.A.M., 1988. A região laterítica bauxítica do Pitinga-AM. Congr. Bras. Geologia, 35, Belém, Resumo, Belém, Pará, SBG, Núcleo Norte, v.1, pp. 22-26.
- Costa M.L., 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências* v. 21 (**2**), p. 146-160.
- Costa M.L., Fonseca L.R., Angélica R.S., Lemos V.P., Lemos R, L., 1991, Geochemical exploration of the Maicuru alkaline-ultramafic-carbonatite complex, northern Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*, **40**: 193-204
- Costa M.L., Angelica R.S., Fonseca L.R. da, 1996. Geochemical exploration for gold in deep weathered lateritised gossans in the Amazon region, Brazil: A case history of the Igarapé Bahia deposit. *Geochimica Brasiliensis*, **10**(1): 013-026.
- Costa M.L., 1997. Lateritization as a major process of ore deposit formation in the Amazon region. *Explore Mining Geology*. **6**(1): 79-104.
- Costa M.L., Cruz G.S., Almeida H.D.F., Poellmann H. 2014. On the geology, mineralogy and geochemistry of the bauxite-bearing regolith in the lower Amazon basin: Evidence of genetic relationship. *Journal of Geochemical Exploration*, **146**: 58-74.
- Costa M. L., Leite A.S., Poellmann H. 2016. A laterite-hosted APS deposit in the Amazon region, Brazil: the physical-chemical regime and environment of formation. *Journal of Geochemical Exploration*, **170**: 107-124.

Costa M.L., Veiga A.T.C. 2016. As gerações de gibbsita e caulinita em Barro Alto e a ausência de crosta ferro-aluminosa: uma contribuição para avaliar os processos lateríticos e hidrotermais. 7p. (Projeto de Pesquisa).

Choque Fernandez O.J., Monteiro M.A.H., Figueira B.A.M., Gomes L.G. 2018. Gibbsita da bauxita nodular na mina Bela Cruz em Porto Trombetas, Pará. *BOMGEAM*, Belém. 13 p.

Dardenne M.A. 2000. The Brasília fold belt. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.). *Tectonic Evolution of South America. 31st International Geological Congress*, Rio de Janeiro, p. 231-236.

Delvigne J.E., 1998. Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering, 3rd ed. *Canadian Mineralogist Special Publication*, 509 pp.

Della Giustina M.E.S., Pimentel M.M., Ferreira Filho C.F., Hollanda M.H.B.M. 2011. Dating coeval mafic magmatism and ultrahigh temperature metamorphism in the Anápolis-Itaçu Complex, Central Brazil. *Lithos*, **124**:82-102.

Ferreira Filho C.F., Kamo S.L., Fuck R.A., Krogh T.E., Naldrett A.J. 1994. Zircon and rutile U-Pb geochronology of the Niquelândia layered mafic and ultramafic intrusion, Brazil: constraints for the timing of magmatism and high grade metamorphism. *Precambrian Research*, **68**:241-255.

Ferreira Filho, C.F., 1998. Geology and petrology of the large layered intrusions of central Brazil: implications for PGE mineralization. In: Platinum Symposium, Rustenburg, *South Africa*, p. 107–110.

Ferreira Filho C.F., Pimentel M.M., Araujo S.M., Laux J. 2010. Layered Intrusions and Volcanic Sequences in Central Brazil: Geological and Geochronological Constraints for Mesoproterozoic (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) Igneous Associations. *Precambrian Research*, **183**:617-634.

Filatov S. K., Vergasova L.P., Kutusova R.S., 2012. Decomposition of aluminosilicates and accumulation of aluminum by microorganisms on volcano. *EMC 2012 Conference*, Frankfurt-Germany.

Formoso, M.L.L., Dani, N., Valetton, I. 1997. A bauxita de Lages. In: Brazilian Bauxites (eds: Carvalho A.C., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y). USP, São Paulo, FAPESP; Osrtom, Paris; 275-308p.

Fuck R.A., Danni J.C.M., Winge M., Andrade G.F., Barreira C.F., Leonardos O.H., Kuyumjian R.M., 1981. Geologia da região de Goianésia. In: Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, 1, Goiânia. Ata... Goiânia: Sociedade Brasileira de Geologia - Núcleos Centro-Oeste e Brasília, 447-469.

Fuck RA, Pimentel MM and D'el Rey Silva LJH. 1994. Compartimentação tectônica da porção orien zoic crustal accretion in central Brazil. *Precambrian*, Res **81**: 229-310.

Fujimore S., 1975. Halloysita no embasamento cristalino alterado de Salvador (BA). *Revista Brasileira de Geociências*.

Girardi V A V. & Kurat G. 1982. Precambrian lower crustal mafic and ultramafic rocks of the Cana Brava Complex Brazil: mineral composition and evolution. *Revista Brasileira de Geociências*, **12**(1-3):312-323.

Girardi V A V.; Riv Alenti, G.; Sinigoi S. 1986. The petrogenesis of the Niquêlandia layered basic-ultrabasic Complexo Central Goiás, Brazil. *Journal of Petrology*, **27**(3):715-744.

Giovanardi T., Girardi V.A.V., Correia C.T., Tassinari C.C.G., Sato K., Cipriani A., Mazzucchelli M., 2017. New U–Pb SHRIMP-II zircon intrusion ages of the Cana Brava and Barro Alto layered complexes, central Brazil: Constraints on the genesis and evolution of the Tonian Goiás Stratiform Complex. *Lithos*. 282-283, 339-357.

Goldman M.I. & Tracey Jr J.I. 1946. Relations of Bauxite and Kaolin in the Arkansas Bauxite Deposits. *Economic Geology and the Bulletin of The Society of Economics Geologists*. Vol. XLI, nº.: **6**, 567-575p.

Google Earth-Mapas. <http://mapas.google.com>. Consulta realizada em 25/09/2018.

Hill I.G., Worden R. H. & Meighan, I. G., 2001. Formation of interbasaltic laterite horizons in NE Ireland by early Tertiary weathering processes. *Proceedings of the Geologists' Association*, **112**, 339-348.

Horbe A.M.C., Costa M.L., 1997. Geoquímica dos ETR no perfil laterítico da Serra do Madeira - Mina Pitinga (Amazonas - Brasil). *Geochimica Brasiliensis*, v. 11, n.3, p. 309-324.

Horbe A.M.C., Costa M.L., 1999. Geochemical evolution of lateritic Sn, Zr, Th, Nb, Y and REE-bearing ore body derived from apogranite: the case of Pitinga, Amazonas — Brazil. *Journal of Geochemical Exploration*. **66**, 339–351

Kotschoubey B., Calaf J.M.C., Lobato A.C.C., Leite A.S., Azevedo C.H.D. 2005. Caracterização e Gênese dos depósitos de Bauxita da Província Bauxitífera de Paragominas, Nordeste da Bacia do Grajaú, Nordeste do Pará, oeste do maranhão. In: Marini O.J., Queiroz E.T., Ramos B.W. (eds.). *Caracterização de depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, CT-MINERAL/FINEP/ADIMB, p. 691-782.

Lima J.D.O. 2018. *Micromorfologia, mineralogia e geoquímica da bauxita nodular de Trombetas - PA*. MS Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará. 81 p.

Moniz A. C. 1969. Estudo Mineralógico de Argilas do maciço alcalino de Poços de Caldas. *Boletim da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da Universidade de São Paulo. Mineralogia*, (**19**), 5-114.

Moraes R., Fuck R.A., 1994. Deformação e metamorfismo das sequências Juscelândia e Serra da Malacacheta, Complexo Barro Alto, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências*. **24**, 189–197.

Moraes R., Fuck R.A., 2000. Ultrahigh-temperature metamorphism in central Brazil: the Barro Alto complex. *Journal of Metamorphic Geology*, **18**, 345 e 358.

Moraes R., Fuck R. A., Pimentel M. M., Gioia S. M. C. L., & Figueiredo A. M. G. 2003. Geochemistry and Sm-Nd isotopic characteristics of bimodal volcanic rocks of Juscelândia, Goiás, Brazil: Mesoproterozoic transition from continental rift to ocean basin. *Precambrian Research*, **125**(3-4), 317-336.

Mutakyahwa M.K.D., 1991. *Mineralogy, Geochemistry and Genesis of Laterites and Bauxite on the Precambrian Basement of Eastern Tanzania, East Africa*. Ph.D. Thesis, Hamburg, Germany, 304pp.

Mutakyahwa M. K. D. & Valetton I. 1995. Late Cretaceous-Lower Tertiary Weathering Event and its Laterite-Bauxite Formation in Tanzania. *Mitteilung Geol.-Palaeont*, 1-65.

Oliveira S. B. 1985. Gênese da bauxita de Lages-SC. *Boletim IG-USP. Série Científica*, **16**, 46-81.

Oliveira F. S. 2011. *A bauxita de Barro Alto (GO): gênese e evolução mineralógica, micromorfológica e geoquímica*. 2011. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 149 p.

Oliveira F. S., Varajão A. F. D. C., Varajão C. A. C., Boulangé B., & Gomes N. S. 2011. Bauxitisation of anorthosites from Central Brazil. *Geoderma*, **167**, 319-327.

Oliveira F. S., Varajão A. F. D. C., Varajão C. A. C., Boulangé B., & Soares C. C. V. 2013. Mineralogical, micromorphological and geochemical evolution of the facies from the Bauxite deposit of Barro Alto, Central Brazil. *Catena*, **105**, 29-39.

Oliveira F. S., Varajão A. F. D. C., Varajão C. A. C., Schaefer C. E. G. R., & Boulangé B. 2014. The role of biological agents in the microstructural and mineralogical transformations in aluminium lateritic deposit in Central Brazil. *Geoderma*, **226**, 250-259.

Oliveira S. B., Costa M. L., & Prazeres Filho H. J. 2016. The lateritic bauxite deposit of Rondon do Pará: A new giant deposit in the Amazon Region, Northern Brazil. *Economic Geology*, **111**(5), 1277-1290.

Pimentel M.M & Fuck R.A. 1992. Neoproterozoic crustal accretion in central Brazil. *Geology* **20**: 375-379.

Pimentel M.M., Fuck R.A., Jost H. Ferreira Filho C.F., Araujo S.M. 2000. The Basement of the Brasília Fold Belt and the Goiás Magmatic Arc. In: Tectonic Evolution of South America, Eds: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomaz Filho, A. Campos, D.A. 31° International Geological Congress, Rio de Janeiro. 195- 230p.

Pimentel M. M., Ferreira Filho C. F., Armstrong R. A., 2004. SHRIMP U-Pb and Sm-Nd ages of the Niquelândia layered complex: Meso (1.25 Ga) and Neoproterozoic (0.79 Ga) extensional events in central Brazil. *Precambrian Research*. **132**:132-135.

Pimentel M.M., Ferreira Filho C.F., Armele A. 2006. Neoproterozoic age of the Niquelândia Complex, central Brazil: Further ID-TIMS U-Pb and Sm-Nd isotopic evidence. *Journal of South American Earth Sciences*, **22**:228-238.

- Pirajno F. 1992. *Hydrothermal mineral deposits: principles and fundamental concepts for the exploration geologist*. Berlin, Springer. 709 p.
- Robb L. 2013. *Introduction to ore-forming processes*. John Wiley & Sons, 85 p.
- Rudnick R.L. and Gao S. 2003. Composition of the Continental Crust. In: Rudnick, R.L., Ed., *Treatise of Geochemistry*, Vol. 3, Elsevier, Amsterdam, 1-64.
- Santos W.M., 2011, *Mineralogia e Geoquímica da Bauxita derivada de anortosito, Barro Alto, Goiás*. UnB, Dissertação de Mestrado.
- Schwarz T., 1997. Lateritic bauxite in central Germany and implications for Miocene palaeoclimate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. **129**:37-50.
- Schullmann A., Carvalho A. & Valetton I. 1997. Bauxite of Poços de Caldas. In: (eds: Carvalho, A.C., Boulangé, B., Melfi, A.J., Lucas, Y.) *Brazilian Bauxites*: São Paulo/SP: USP, FAPESP, 229-254p.
- Stoops G., Altemuller J.H., Bisdom E.B.A., Delvigine L., Dobro-Volsky V.V., Fitzpatrick E.A., Paneque, G., Sleeman, J., 1979. Guidelines for the description of mineral alterations in soil micromorphology. *Pedologie*. **29**, 121-135.
- Sígolo J.B. & Boulangé B. 1997. The bauxites of Passa Quatro Massif. In: (eds: Carvalho A.C., Boulangé B., Melfi A.J., Lucas Y.) USP, São Paulo, FAPESP. *Brazilian Bauxites*. 255-272 p.
- Tardy Y., Kobilsek B. & Paquet H., 1991, Mineralogical composition and geographical distribution of African and Brazilian periatlantic laterites. The influence of continental drift and tropical paleoclimates during the past 150 million years and implications for India and Australia. *Journal of African Earth Sciences*, **12**(1): 283-295.
- Valetton I., 1972. *Bauxites. Development in Soils Sciences*. Elsevier, **1**, 226p.
- Valetton I. & Schumann A., Vinx R., Wieneck M. 1997. Supergene alteration since the upper cretaceous on alkaline igneous and metasomatic rocks of the Polos de Caldas ring complex, Minas Gerais, Brazil. *Applied Geochemistry*, **12**: 133-154.
- Veiga A.T.C., Girodo A.C. 2008. Modelamento geológico e abordagem geoestatística da jazida de bauxita de Barro Alto – GO, Brasil. Relatório Interno GEOS Consultoria. 157 pp.
- Vessani L. & Veiga, T. 2008. A bauxita de Barro Alto – GO. SIMEXMIN 2008, Ouro Preto.
- Vessani L., Gambier L., Walcacer M., Rocha L. & Guerra G. 2014. A jazida de bauxita de Barro Alto. Maio 2014. EDEM e Mineração Santo Expedito. Apresentação pdf com 38 slides.
- Web Mineral. <http://www.webmineral.com/data/Diaspore.shtml>. Acessado em 02/08/2019.
- Winge M., 1995. *Evolução dos Terrenos Granulíticos da Província Estrutural Tocantins, Brasil Central*. Tese (Doutorado em Geociências), Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade de Brasília. Brasília, 294 pp.

APÊNDICES

APÊNDICE A - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DO PERFIL BAUXÍTICO DE BARRO ALTO.

(Continua)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	PF	Ba	Sr	Co	Cu	Ga	Hf	Mo	Nb	Ni	Rb	Sc
SiO ₂	1,00	-0,89	0,32	0,42	0,38	0,68	0,64	-0,02	0,36	0,27	-0,95	0,26	0,60	0,42	0,47	-0,43	0,36	0,15	0,33	0,56	0,14	0,32
Al ₂ O ₃		1,00	-0,63	-0,66	-0,63	-0,77	-0,64	-0,01	-0,67	-0,56	0,95	-0,01	-0,57	-0,67	-0,73	0,26	-0,64	-0,31	-0,62	-0,75	0,03	-0,63
Fe ₂ O ₃			1,00	0,70	0,63	0,28	0,07	0,08	0,97	0,85	-0,44	-0,16	-0,01	0,63	0,92	0,14	0,96	0,73	0,97	0,89	-0,14	0,98
MnO				1,00	0,99	0,50	0,18	0,29	0,84	0,87	-0,56	-0,15	0,06	0,98	0,87	-0,14	0,74	0,06	0,77	0,76	-0,08	0,72
MgO					1,00	0,56	0,24	0,28	0,78	0,82	-0,54	-0,23	0,12	1,00	0,80	-0,11	0,67	-0,05	0,70	0,67	-0,10	0,65
CaO						1,00	0,94	0,05	0,36	0,29	-0,86	-0,21	0,89	0,59	0,33	-0,17	0,31	-0,09	0,28	0,29	-0,15	0,26
Na ₂ O							1,00	-0,05	0,10	0,01	-0,79	-0,14	0,99	0,28	0,05	-0,16	0,08	-0,08	0,04	0,06	-0,13	0,04
K ₂ O								1,00	0,13	0,19	-0,03	0,23	-0,07	0,28	0,15	0,05	0,06	-0,16	0,12	0,05	-0,28	0,06
TiO ₂									1,00	0,92	-0,50	-0,19	0,00	0,78	0,97	0,07	0,97	0,57	0,99	0,92	-0,11	0,97
P ₂ O ₅										1,00	-0,39	-0,10	-0,10	0,82	0,92	0,00	0,87	0,40	0,91	0,84	-0,12	0,89
PF											1,00	-0,08	-0,73	-0,58	-0,55	0,33	-0,48	-0,16	-0,45	-0,58	0,00	-0,43
Ba												1,00	-0,12	-0,23	-0,06	-0,09	-0,16	0,00	-0,15	0,02	-0,15	-0,18
Sr													1,00	0,16	-0,05	-0,13	0,00	-0,07	-0,04	-0,03	-0,14	-0,05
Co														1,00	0,81	-0,15	0,67	-0,04	0,70	0,68	-0,10	0,65
Cu															1,00	-0,07	0,92	0,50	0,94	0,97	-0,06	0,94
Ga																1,00	0,07	0,15	0,11	-0,14	0,03	0,01
Hf																	1,00	0,68	0,98	0,90	-0,06	0,97
Mo																		1,00	0,66	0,60	-0,09	0,72
Nb																			1,00	0,91	-0,06	0,98
Ni																				1,00	0,00	0,91
Rb																					1,00	-0,14
Sc																						1,00
Sn																						
Th																						
U																						
V																						
W																						
Y																						
Zr																						
Pb																						
Zn																						
La																						
Ce																						
Pr																						
Nd																						
Sm																						
Eu																						
Gd																						
Tb																						
Dy																						
Ho																						
Er																						
Tm																						
Yb																						
Lu																						

(Conclusão)

	Sn	Th	U	V	W	Y	Zr	Pb	Zn	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
SiO ₂	0,54	-0,11	-0,25	0,25	0,60	0,47	0,36	0,19	0,50	0,57	0,41	0,41	0,46	0,49	0,58	0,43	0,44	0,46	0,44	0,45	0,35	0,43	0,41
Al ₂ O ₃	-0,63	-0,10	0,15	-0,49	-0,78	-0,71	-0,60	-0,04	-0,77	-0,64	-0,64	-0,65	-0,71	-0,74	-0,80	-0,69	-0,69	-0,71	-0,70	-0,71	-0,32	-0,69	-0,67
Fe ₂ O ₃	0,70	0,52	-0,09	0,76	0,46	0,65	0,96	-0,13	0,90	0,44	0,61	0,57	0,63	0,70	0,66	0,68	0,70	0,71	0,69	0,71	0,26	0,72	0,67
MnO	0,55	0,14	-0,09	0,41	0,78	0,96	0,73	-0,07	0,92	0,51	0,67	0,74	0,86	0,95	0,86	0,94	0,97	0,97	0,97	0,97	0,48	0,95	0,97
MgO	0,44	0,09	-0,07	0,33	0,82	0,97	0,64	-0,09	0,87	0,49	0,65	0,76	0,87	0,96	0,87	0,95	0,98	0,97	0,97	0,97	0,44	0,95	0,98
CaO	0,14	-0,12	-0,11	0,11	0,89	0,65	0,24	-0,13	0,47	0,57	0,47	0,65	0,68	0,66	0,78	0,62	0,60	0,62	0,62	0,61	0,16	0,58	0,58
Na ₂ O	-0,01	-0,18	-0,11	0,00	0,71	0,36	0,02	-0,12	0,19	0,46	0,28	0,43	0,42	0,37	0,54	0,33	0,30	0,32	0,32	0,31	0,01	0,28	0,27
K ₂ O	-0,07	-0,19	-0,16	-0,15	0,21	0,23	0,18	-0,15	0,20	-0,21	-0,10	0,18	0,22	0,19	0,14	0,28	0,23	0,23	0,22	0,24	0,05	0,34	0,31
TiO ₂	0,70	0,43	-0,09	0,71	0,58	0,80	0,95	-0,11	0,97	0,50	0,68	0,68	0,75	0,83	0,77	0,81	0,83	0,84	0,83	0,84	0,35	0,85	0,82
P ₂ O ₅	0,58	0,30	0,12	0,70	0,56	0,81	0,88	-0,11	0,91	0,49	0,71	0,62	0,72	0,82	0,73	0,80	0,84	0,85	0,84	0,85	0,46	0,84	0,82
PF	-0,48	0,06	0,22	-0,29	-0,80	-0,63	-0,45	-0,05	-0,62	-0,62	-0,51	-0,57	-0,63	-0,65	-0,75	-0,60	-0,60	-0,62	-0,61	-0,62	-0,31	-0,59	-0,57
Ba	-0,09	-0,17	-0,23	-0,20	-0,20	-0,25	-0,02	0,36	-0,16	-0,27	-0,36	-0,37	-0,33	-0,28	-0,29	-0,28	-0,26	-0,26	-0,26	-0,25	0,16	-0,25	-0,27
Sr	-0,08	-0,20	-0,11	-0,05	0,62	0,24	-0,06	-0,12	0,08	0,41	0,20	0,35	0,33	0,25	0,45	0,22	0,18	0,20	0,20	0,20	-0,05	0,17	0,15
Co	0,46	0,08	-0,03	0,36	0,84	0,97	0,64	-0,10	0,88	0,52	0,68	0,76	0,87	0,96	0,88	0,95	0,98	0,97	0,97	0,97	0,45	0,96	0,98
Cu	0,77	0,35	-0,07	0,70	0,58	0,81	0,92	0,01	0,98	0,51	0,69	0,65	0,74	0,83	0,75	0,81	0,84	0,85	0,83	0,85	0,43	0,85	0,82
Ga	-0,29	0,42	-0,32	-0,21	-0,17	-0,12	0,03	-0,16	-0,09	-0,11	-0,28	0,08	0,00	-0,10	-0,11	-0,07	-0,10	-0,11	-0,11	-0,10	-0,19	-0,08	-0,09
Hf	0,71	0,51	-0,11	0,73	0,48	0,70	0,97	-0,15	0,91	0,47	0,62	0,59	0,67	0,75	0,71	0,72	0,74	0,75	0,74	0,75	0,40	0,75	0,72
Mo	0,56	0,54	-0,05	0,72	-0,09	0,02	0,70	-0,07	0,42	0,15	0,25	0,09	0,08	0,09	0,12	0,07	0,07	0,09	0,06	0,09	-0,02	0,12	0,03
Nb	0,71	0,46	-0,10	0,72	0,50	0,72	0,97	-0,14	0,93	0,47	0,63	0,60	0,67	0,75	0,70	0,73	0,76	0,77	0,75	0,77	0,36	0,78	0,74
Ni	0,86	0,35	-0,10	0,74	0,48	0,70	0,90	0,16	0,93	0,52	0,67	0,56	0,64	0,73	0,68	0,70	0,73	0,74	0,72	0,74	0,45	0,73	0,70
Rb	0,33	-0,02	-0,10	-0,11	-0,16	-0,12	-0,13	0,06	-0,07	0,17	-0,02	-0,04	-0,08	-0,10	-0,14	-0,14	-0,12	-0,12	-0,13	-0,13	0,32	-0,17	-0,13
Sc	0,73	0,47	0,03	0,83	0,46	0,67	0,97	-0,12	0,91	0,44	0,68	0,57	0,64	0,71	0,66	0,69	0,72	0,73	0,71	0,73	0,29	0,73	0,69
Sn	1,00	0,31	-0,11	0,67	0,28	0,46	0,70	0,07	0,74	0,48	0,59	0,40	0,45	0,51	0,46	0,47	0,49	0,50	0,49	0,50	0,46	0,49	0,47
Th		1,00	-0,10	0,40	-0,05	0,10	0,46	-0,20	0,31	0,22	0,32	0,12	0,11	0,14	0,11	0,11	0,14	0,13	0,13	0,14	0,10	0,13	0,11
U			1,00	0,44	-0,11	-0,05	-0,11	-0,09	-0,10	0,08	0,46	-0,07	-0,07	-0,07	-0,08	-0,06	-0,05	-0,03	-0,03	-0,04	-0,03	-0,07	-0,08
V				1,00	0,20	0,39	0,73	-0,11	0,64	0,49	0,76	0,36	0,39	0,43	0,42	0,41	0,42	0,45	0,43	0,45	0,21	0,43	0,38
W					1,00	0,82	0,44	-0,12	0,70	0,48	0,55	0,69	0,78	0,81	0,83	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,24	0,78	0,79
Y						1,00	0,67	-0,11	0,88	0,64	0,72	0,84	0,93	1,00	0,96	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	0,46	0,97	0,99
Zr							1,00	-0,13	0,90	0,41	0,57	0,53	0,61	0,70	0,65	0,68	0,71	0,72	0,70	0,72	0,36	0,73	0,68
Pb								1,00	-0,07	-0,12	-0,13	-0,16	-0,15	-0,11	-0,12	-0,13	-0,10	-0,12	-0,11	-0,12	0,14	-0,13	-0,11
Zn									1,00	0,55	0,72	0,73	0,82	0,90	0,84	0,88	0,91	0,91	0,90	0,91	0,43	0,91	0,90
La										1,00	0,77	0,65	0,66	0,66	0,72	0,58	0,60	0,63	0,61	0,62	0,47	0,55	0,56
Ce											1,00	0,65	0,70	0,73	0,72	0,69	0,71	0,74	0,72	0,73	0,37	0,68	0,67
Pr												1,00	0,98	0,86	0,88	0,91	0,83	0,83	0,83	0,83	0,24	0,79	0,80
Nd													1,00	0,94	0,94	0,97	0,92	0,93	0,93	0,92	0,33	0,89	0,90
Sm														1,00	0,97	0,98	0,99	1,00	1,00	0,99	0,46	0,97	0,98
Eu															1,00	0,94	0,94	0,95	0,95	0,95	0,42	0,92	0,92
Gd																1,00	0,98	0,98	0,98	0,98	0,38	0,96	0,97
Tb																	1,00	1,00	1,00	1,00	0,46	0,98	0,99
Dy																		1,00	1,00	1,00	0,45	0,98	0,99
Ho																			1,00	1,00	0,46	0,98	0,99
Er																				1,00	0,45	0,99	0,99
Tm																					1,00	0,39	0,42
Yb																						1,00	0,99
Lu																							1,00

