



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

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº 471

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS PERFIS BAUXÍTICOS
DA MINA MILTÔNIA 3, REGIÃO DE PARAGOMINAS/PA**

Dissertação apresentada por:

CARLA BRAGA PEREIRA

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica (UFPA)

**BELÉM
2015**

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/SIBI/UFPA

Pereira, Carla Braga, 1987-
Mineralogia e geoquímica dos perfis bauxíticos da mina Miltônia
3, região de Paragominas/PA / Carla Braga Pereira. – 2015.

xvi, 77 f. : il. ; 30 cm Inclui

bibliografias

Orientador: Rômulo Simões Angélica

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto
de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica,
Belém, 2015.

1. Bauxita – Paragominas (PA). 2. Caulinita – Paragominas (PA).
I. Título.

CDD 22. ed. 549.53098115



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica

**MINERALOGIA E GEOQUÍMICA DOS PERFIS BAUXÍTICOS
DA MINA MILTÔNIA 3, REGIÃO DE PARAGOMINAS/PA**

DISSERTAÇÃO APRESENTADA POR

CARLA BRAGA PEREIRA

**Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de
GEOQUÍMICA E PETROLOGIA**

Data de Aprovação: 16 / 10 / 2015

Banca Examinadora:

Prof. Dr. RÔMULO SIMÕES ANGÉLICA

(Orientador - UFPA)

Dr. REINER NEUMANN

(Membro - CETEM)

Prof. Dr. NORBERTO DANI

(Membro - UFRGS)

*Dedico aos meus pais Maria Cristina e José Antônio
pelo incentivo e amor incondicional.*

AGRADECIMENTOS

A Deus por me conceder saúde, conhecimento e paz para concluir mais essa etapa da minha vida pessoal e profissional. As suas bênçãos são inigualáveis e imensuráveis.

Em especial aos meus pais Maria Cristina e José Antônio, e meu irmão Júnior Pereira, pelo suporte, apoio e carinho. Vocês são o norte da minha caminhada.

Ao programa de Pós-graduação em Geologia e Geoquímica do Instituto de Geociências da UFPA, pois se tornou o meio institucional imprescindível para a realização desta dissertação. Fazendo jus por estar entre os melhores programas de Pós-Graduação do país.

Agradeço imensamente ao professor Dr. Rômulo Simões Angélica que me deu a oportunidade de realizar este trabalho, pelas orientações, discussões e pacientemente me guiou durante esta fase da minha vida acadêmica. Muito obrigada!

À empresa Norsk Hydro, na pessoa dos geólogos Vincent Carboni, Waldirney Calado e Welka Moraes, pelo apoio logístico, coleta de amostras, discussões a respeito da geologia e por conceder gentilmente parte dos resultados geoquímicos. Todos sempre solícitos.

Ao grupo LCM por me acolherem de braços abertos. Em especial aos amigos Manoella Cavalcante, Andre do Carmo, Pedro Torres, Kelly Oliveira, Suzianny Arimatéia, Bruna Sena e Caio Melo, pela grande importância de se trabalhar e conviver em grupo, jamais esquecerei os momentos de descontrações e apoio acadêmico.

Ao professor Dr. Roberto Neves pelos conselhos, ajuda e por me instruir de várias maneiras para melhor aprimoramento do meu trabalho.

Aos funcionários do Instituto de geociências (UFPA) e aos técnicos dos laboratórios de Laminação, de Caracterização Mineral (LCM), de Microscopia Eletrônica de Varredura (LabMev), de Sedimentação e Oficina de Preparação de amostras (OPA).

À minha amiga Joelma Lobo, uma das maiores riquezas que a geologia me presenteou, muito obrigada pelo apoio laboratorial e pelas indispensáveis conversas. Sua amizade é de grande valia para a minha caminhada profissional e pessoal. És única!

Aos amigos geólogos Luisa Barros e Rafael Estumano pela amizade e por me auxiliarem em diversas formas na confecção da presente dissertação. Sempre prestativos e atenciosos.

Aos meus grandes amigos que me acompanham desde a graduação por ter tornado o meu dia a dia na UFPA mais agradável, em especial ao Juvenal Neto, Carla Batista, Ingrid Viana, Carlos Alberto e Paulo Soares.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação. Muito obrigada!

RESUMO

A Província Bauxitífera de Paragominas situa-se na porção leste do estado do Pará e oeste do estado do Maranhão, ocupando a porção NW da Bacia do Grajaú e a parte meridional da plataforma Bragantina, com área em torno de 50.000 km². Os importantes depósitos de bauxita dessa região foram originados a partir de intenso intemperismo químico sobre rochas siliciclásticas do Cretáceo. Este trabalho tem como foco o estudo mineralógico e geoquímico de perfis bauxíticos na área da mina de Bauxita pertencente à empresa Norsk Hydro, na mina Miltônia 3, município de Paragominas-PA. Visa contribuir para o entendimento da origem e desenvolvimento dos perfis. Foram amostrados dois perfis lateríticos representativos da mina Miltônia 3, atentando-se para as diferenças químicas, mineralógica e textural dos horizontes que estruturam os perfis em questão. Assim utilizou-se os seguintes procedimentos metodológicos e/ou técnicas instrumentais: Difração de Raios-X (DRX), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), Petrologia e Análise Química. Os perfis lateríticos estudados neste trabalho foram descritos segundo a sua estruturação em horizontes, nomeados da base para o topo de: Bauxita Amorfa (BA), Bauxita Cristalizada-Bauxita Amorfa (BCBA), Bauxita Cristalizada (BC), Laterita Ferruginosa (LF), no perfil 1 o horizonte sobrejacente a LF é descrito como Bauxita Nodular (BN), entretanto no perfil 2, trata-se do Horizonte Bauxita Cristalizada Nodular (BNC). Ambos os perfis são cobertos por horizonte areno-argiloso inconsolidado, de coloração vermelho alaranjado, denominada por muitos autores de Argila de Belterra. Petrograficamente os horizontes apresentam os seguintes minerais típicos de um perfil bauxítico/lateríticos: gibbsita, caulinita, goethita, hematita e anatásio. Esta paragênese foi confirmada por meio da análise por DRX, cujo conteúdo varia para cada horizonte. Assim aliada a análise via MEV pode-se perceber o aspecto morfológico dos cristais de gibbsita e caulinita. Nota-se a presença de três gerações de gibbsita, a fase precoce faz parte da matriz, por vezes, associada com oxi-hidróxido de Fe, apresentando caráter criptocristalino. A segunda geração compreende cristais microcristalinos que preenchem parcialmente ou totalmente os poros. A geração mais tardia são cristais criptocristalinos que encontram-se preenchendo totalmente e/ou revestindo as paredes dos *cutans*. O comportamento geoquímico das fases residuais Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂ e TiO₂ apresentam similaridade em ambos os perfis, assim como, os presentes teores de Al₂O₃_aproveitável e SiO₂_reativa. Ao longo do perfil o teor de SiO₂ e SiO₂_reativa são mais expressivos nas camadas mais argilosas, e refletem o conteúdo de caulinita. O teor de Al₂O₃_aproveitável segue o mesmo comportamento de Al₂O₃: pois a primeira está relacionada à gibbsita, e os teores mais elevados estão no topo da BA, BCBA e BC, o último representa a nível economicamente explorável. Ao avaliar o grau

de ordem e desordem da caulinita presente nos perfis estudados verificou-se um aumento dos resultados de FWHM (aumento do alargamento dos picos) da base em direção ao topo, mostrando a possibilidade de: 1) degradação das caulinitas com o processo de desenvolvimento do perfil laterítico; e/ou neoformação de novas gerações de caulinita de baixa cristalinidade. Os dados levantados durante as análises deram suporte para entendimento dos processos que favoreceram as diferenças e semelhanças mineralógicas, químicas e texturais existentes entre os horizontes bauxíticos, assim como a retomada do processo de bauxitização (Duas fases de bauxitização) que resultou na formação do horizonte Bauxita Nodular e Bauxita Nodular Cristalizada, levantando a hipótese da evolução complexa e polifásica dos perfis estudados, culminando na origem dos depósitos bauxíticos/lateríticos.

Palavras-chave: Província Bauxitífera. Paragominas (PA). Gibbsita. Ordem/desordem da caulinita.

ABSTRACT

The Paragominas Bauxite Province is located in eastern of Pará state and western of Maranhão state, occupying the NW portion of Grajaú Basin and the southern of Bragantina platform, with an area of approximately 50.000 km². The important bauxite deposits from that area were originated by an intense chemistry weathering above siliciclastic rocks from Cretaceous age. This research focus on the mineralogical e geochemistry studies of bauxite profiles in the area of Bauxite mine that belongs to the Norsk Hydro Company, in Miltonia 3 mine, municipality of Paragominas, Pará state. This research aims to contribute to understanding of the origin and developing of these profiles. Were conducted two sample collections of lateritic profiles representatives of Miltonia 3 mine, following the chemistry, mineralogy and texture differences of the horizons that structures the studied profiles. We used the following methodological procedures and/or instrumental techniques: X-rays Diffraction (XRD), Scanning Electron Microscopy (SEM), petrology and chemical analysis. The lateritic profiles studied in this research were described according to their horizons structuring: Amorphous Bauxite (AB), Crystallized Amorphous Bauxite (CAB), Crystallized Bauxite (CB), Ferruginous Laterite (FL). In the profile 1, the overlying horizon to FL is described as Nodular Bauxite (NB), while in the profile 2, it is the Crystallized Nodular Bauxite (BNC). Both of these profiles are covered by unconsolidated sandy-clay horizon, with an orange red coloring, called by many authors as Belterra clay. Petrographically, the horizons show the following typical mineral of a bauxitic/lateritic profile: gibbsite, kaolinite, goethite, hematite e anatase. This paragenesis was confirmed by XRD analysis, which the mineral content varies for each horizon. Allied to the SEM analysis it is possible to describe the morphologic aspect of gibbsite and kaolinite crystals. It is noticeable the presence of three gibbsite generations, which the precocious phase is part of matrix, sometimes, associated with iron oxide-hydroxide, showing a cryptocrystalline character. The second generation comprises microcrystalline crystals that fill partially or totally pores. The latest generation is cryptocrystalline crystal found occupying totally or covering the cavity walls of cutans. The geochemical pattern of Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂ and TiO₂ residual phases are similar in both profiles, as well as the contents of Al₂O₃_available e SiO₂_reactive. Over the profile, the contents of SiO₂ e SiO₂_reactive are more expressive in the most clayey layers, and they reflect the kaolinite content. The content of Al₂O₃_available has the same Al₂O₃ behavior due to: the first is related to gibbsite, the most elevated contents are in top of AB, CAB e CB, and the last represents the most economically exploitable level. According to the order/disorder

degree of this kaolinite in the soil profile, it was verified an elevation of the FWHM (Full Width at Half Maximum) results from base towards top, that showed the possibilities of: 1) kaolinite degradation with the process of developing of lateritic profile; and/or neoformations of new kaolinite generations with low crystallinity. The new data furnished during the analysis give support to understand the process that produced the mineralogical, chemistry and textural differences and similarities that exist between bauxite horizons, as well as the recovery of bauxitization process (two phases of bauxitization) that resulted in formation of Nodular Bauxite (NB) and Crystallized Nodular Bauxite horizons, leading the hypothesis of polyphasic and complex evolution of studied profile, wich culminated in the origin of bauxitic/lateritic deposits.

Keywords: Bauxite Province. Gibbsite. Paragominas (PA). Order/disorder of the kaolinite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo, mostrando as principais cidades ao redor de Paragominas (Nova Esperança do Piriá, Ipixuna do Pará e Ulianópolis).....	2
Figura 2.1 - Mapa geológico simplificado com destaque para a bacia sedimentar São Luís-Grajaú.	3
Figura 3.1 - Frente de lavra da Mina Miltônia 3, faixa 250. A) Aspecto panorâmica da mina. B) Coleta da amostra representativa de cada horizonte do perfil bauxítico 1.	12
Figura 4.1 - Desenho esquemático do perfil 1, destacando as principais feições e descrição de cada horizonte.....	17
Figura 4.2 - Desenho esquemática do perfil 2, exibindo as principais feições e descrição de cada horizonte.....	18
Figura 4.3 - Principais feições macroscópicas do Horizonte Bauxita Amorfa (BA).....	19
Figura 4.4 - Difratoograma de Raios-X de amostra total representativa do horizonte BA.....	20
Figura 4.5 - Difratoogramas de Raios-X pela técnica da micropreparação de porções distintas da amostra representativa do horizonte BA.....	21
Figura 4.6 - Feições microscópicas do Horizonte BA.....	22
Figura 4.7 - Aspectos macroscópicos do Horizonte Bauxita Cristalizada-Bauxita Amorfa (BCBA).....	23
Figura 4.8 - Difratoograma representativo do Horizonte BCBA por amostra total mostrando gibbsita como fase dominante e caulinita perfazendo a fase subordinada.	24
Figura 4.9 - Difratoogramas de Raios-X , técnica da micropreparação, de porções distintas da amostra representativa do horizonte BCBA.	24
Figura 4.10 - Principais feições microscópicas do Horizonte BCBA	25
Figura 4.11 - Imagens macroscópicas do horizonte Bauxita Cristalizada (BC).....	27
Figura 4.12 - Difratoograma de Raios-X representativo do horizonte BC (amostra total)	28
Figura 4.13 - Difratoogramas de Raios-X, amostra de detalhe, das porções distintas da amostra representativa do horizonte BC	28
Figura 4.14 - Aspectos microscópicos do horizonte BC.	29
Figura 4.15 - Feições macroscópicas do horizonte Laterita Ferruginosa (LF).....	31
Figura 4.16 - Difratoograma demonstrativo do horizonte LF (amostra total) exibindo a elevada intensidade do pico de reflexão d_{001} da gibbsita.....	32
Figura 4.17 - Detalhamento mineralógico, por DRX pela técnica de micropreparação, das porções distintas da amostra representativa do horizonte LF.....	32

Figura 4.18 - Fotomicrografia das principais feições do Horizonte LF.	34
Figura 4.19 - Feições macroscópicas do horizonte Bauxita Nodular (BN).....	35
Figura 4.20 - Difratoograma de Raios-X representativo do horizonte BN exibindo as principais fases mineralógicas que compõe o horizonte BN.....	36
Figura 4.21 - Difratoogramas de Raios-X de porções distintas, técnica da micropreparação, da amostra representativa do horizonte BN.	36
Figura 4.22 - Principais feições microscópicas do horizonte BN.....	37
Figura 4.23 - Feições macroscópicas do horizonte Bauxita Nodular Cristalizada (BNC).....	38
Figura 4.24 - Difratoograma de Raios-X representativo do horizonte BNC (amostra total)	39
Figura 4.25 - Difratoogramas de Raios-X de porções distintas da amostra representativa do horizonte BNC (amostra de detalhe).....	40
Figura 4.26 - Aspectos microscópicos do horizonte BNC.	41
Figura 4.27 - Padrão geoquímico dos óxidos maiores, alumina aproveitável, sílica reativa e PPC do perfil 1.	44
Figura 4.28 - Distribuição dos teores de óxidos Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 do perfil 1.	45
Figura 4.29 - Diagrama SiO_2 - FeO_2 - Al_2O_3 relacionado ao perfil 1, mostrando a tendência das amostras serem mais aluminosas.....	46
Figura 4.30 - A) Gráfico de correlação entre os teores de TiO_2 x Al_2O_3 . B) Diagrama de correlação entre os teores TiO_2 x Fe_2O_3	47
Figura 4.31 - Padrão de distribuição dos ETR normalizado para os condritos (Taylor & McLennan 1985) dos diferentes horizontes que estruturam o perfil 1.....	50
Figura 4.32 - Comportamento dos teores dos elementos maiores, alumina aproveitável, sílica reativa e PPC do perfil 2.....	52
Figura 4.33 - Padrão de distribuição dos ETR normalizado para condritos dos horizontes que estruturam o perfil 2.	55
Figura 4.34 - Distribuição da composição química dos elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 do perfil 2.	56
Figura 4.35 - Diagrama SiO_2 - Al_2O_3 - Fe_2O_3 exibe a tendência geoquímica das amostras representativas de cada horizonte do perfil 2.	57
Figura 4.36 - A) Gráfico de Correlação entre os teores de TiO_2 x Al_2O_3 e B) TiO_2 x Fe_2O_3 . .	57
Figura 4.37 - Imagem ilustrativa da distribuição quantitativa dos principais minerais do perfil 1.	59
Figura 4.38 - Imagem ilustrativa da distribuição quantitativa dos principais minerais do perfil 2.	60

Figura 4.39 - Quadro esquemático de descrição das gerações de gibbsita referente ao relatório técnico da CVRD.....	61
Figura 4.40 - Quadro descritivo das gerações de gibbsita da presente dissertação.	62
Figura 4.41 - Correlação entre as gibbsitas descritas nesse trabalho e as encontradas no relatório técnico da CVRD.	63
Figura 4.42 - Modelo esquemático exibindo a distribuição das diferentes gerações e teor de Fe ao longo dos perfis, do relatório técnico da Vale e da presente dissertação.....	64
Figura 4.43 - Desenho esquemático revelando a tendência dos valores de largura a meia altura em relação aos planos basais d_{001} e d_{002} da caulinita, do perfil 1	66
Figura 4.44 - Desenho esquemático exibindo o aumento dos valores de FWHM da base para o topo ao longo do perfil 2, observa-se o comportamento semelhante ao perfil 1	67
Figura 4.45 - Correlação entre os perfis definidos	69
Figura 4.46 - Correlação entre as nomenclaturas definidas para cada horizonte segundo os referidos autores.	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Coluna litoestratigráfica integrada da Bacia do Grajaú e da Plataforma Bragantina.....	8
Tabela 2.2 - Coluna litoestratigráfica da Província Bauxitífera de Paragominas.....	9
Tabela 4.1 - Composição química em porcentagem dos elementos maiores, perda por calcinação (PPC), alumina aproveitável (Al_2O_3 Ap) e sílica reativa (SiO_2 Reat), cedidas pela empresa Hydro, dos horizontes do perfil 1.....	42
Tabela 4.2 - Composição geoquímica dos elementos maiores e PPC do perfil 1, obtida pela ACME, dos horizontes do perfil 1.....	43
Tabela 4.3 - Valores geoquímicos dos elementos traços correspondentes a cada horizonte que estruturam o perfil 1.	45
Tabela 4.4 - Teores geoquímicos de ETR dos horizontes que estruturam o perfil 1.....	49
Tabela 4.5 - Composição química dos elementos maiores, PPC, Al_2O_3 Ap e SiO_2 Reat distribuídos ao longo do perfil 2, de acordo com as análises cedidas pela empresa Hydro.	50
Tabela 4.6 - Composição química dos elementos maiores distribuídos ao longo do perfil 2, analisadas pela ACMELabs.....	51
Tabela 4.7 - Quadro geoquímico dos elementos menores analisados no perfil 2.	53
Tabela 4.8 - Concentração dos teores de ETR, no perfil 2.....	54
Tabela 4.9 - Cálculo estequiométrico referente a cada mineral.	58
Tabela 4.10 - Composição química dos principais minerais presentes no perfil bauxítico.....	58

LISTA DE ABREVIACOES

Ant	Anatásio
ARV	Argila Variegada
BA	Bauxita Amorfa
BCBA	Bauxita cristalizada-bauxita amorfa
BC	Bauxita Cristalizada
BN	Bauxita Nodular
BNC	Bauxita Nodular Cristalizada
CAP	Capeamento Argiloso
DRX	Difraco de Raios-X
EDS	Espectroscopia de Energia Eletrônica
FRX	Fluorescência de Raios- X
FWHM	<i>Full Width at Half Maximum</i>
Gbs	Gibbsita
Gt	Goethita Aluminosa
Hem	Hematita
ICCD	<i>Internacional Center for Diffraction Data</i>
ICP-MS	Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente
ICP-OES	Espectrometria de Emissão Atmica com Plasma Acoplado Indutivamente
Kln	Caulinita
LF	Laterita Ferruginosa
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MME	Ministério de Minas e Energia
MPSA	Minerao Paragominas S. A.
PPC	Perda por calcinao
Rt	Rutilo
UFPA	Universidade Federal do Pará

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	iv
AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	x
LISTA DE TABELAS	xiii
LISTA DE ABREVIACÕES	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ÁREA DE ESTUDO.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 GEOLOGIA REGIONAL.....	3
2.1.1 Bacia São Luis-Grajaú	3
2.1.2 Plataforma Bragantina	5
2.2 GEOLOGIA LOCAL.....	8
2.1 TRABALHOS ANTERIORES.....	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	12
3.1 TRABALHOS DE CAMPO – AMOSTRAGEM.....	12
3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS.....	13
3.3 ANÁLISES MINERALÓGICAS E QUÍMICAS.....	13
3.3.1 Petrografia	13
3.3.2 Análise Mineralógica por Difratomia de Raios – X	13
3.3.2 Microscopia Eletrônico de Varredura (MEV)	14
3.3.4 Análises Químicas	15
4 RESULTADOS	16
4.1 ESTRUTURAÇÃO GERAL DOS PERFIS BAUXÍTICOS.....	16
4.2 MINERALOGIA.....	19
4.3 GEOQUÍMICA.....	42
4.4 ANÁLISE MINERALÓGICA RACIONAL.....	58
4.5 AS DIFERENTES GERAÇÕES DE GIBBSITA.....	61
4.6 AVALIAÇÃO DO GRAU DE ORDEM-DESORDEM DA CAULINITA.....	65

5	CONCLUSÃO	71
	REFERENCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO

O estado do Pará apresenta um papel de destaque no cenário mineral brasileiro, ocupando o segundo lugar no *ranking* nacional de produção, perfazendo em torno de 22%.

O minério de bauxita é uma das matérias-primas que fomenta a economia mineradora do estado com aproximadamente 2,7 bilhões de toneladas detendo de quase 75% das reservas totais brasileiras, e dentre seus municípios, a cidade de Oriximiná apresenta a maior quantidade das reservas de bauxitas, seguida de Paragominas e Juruti (MME, 2009).

A região de Paragominas é uma das áreas onde se concentra grandes depósitos de bauxita, atualmente é explorada pela empresa Norsk Hidro, que em 2008 assumiu o controle de todos os negócios da cadeia do Alumínio pertencentes historicamente à empresa Vale, se tornando majoritária na exploração do minério na região.

Diferentes estudos sobre os depósitos lateríticos-bauxíticos dessa região têm sido realizados desde os anos 1970, muitos de pesquisadores do próprio Instituto de Geociências da UFPA (Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Truckenbrodt *et al.* 1981; Kotschoubey *et al.* 1984; Kotschoubey *et al.* 1987; Costa, 1991; Horbe, 1995; Kotschoubey *et al.* 1997; Horbe & Costa, 1999; Kotschoubey *et al.* 2005; Oliveira, 2011).

Dentre esses trabalhos, merece destaque o trabalho de síntese e integração de resultados de Kotschoubey *et al.* (2005), onde os mesmos concluíram que a disposição do perfil laterítico\bauxítico estrutura-se em 6 horizontes distintos, os quais foram denominados da base para o topo de: 1) horizonte saprolítico, 2) horizonte bauxítico inferior, 3) horizonte ferruginoso, 4) horizonte bauxítico superior, 5) horizonte de cascalho ou psolítico e 6) capeamento argiloso. Esses autores ao observarem a existência de dois níveis bauxíticos propuseram um modelo poligenético.

A mina Miltônia 3 resulta de um processo evolutivo supergênico atuante em rochas sedimentares siliciclásticas do Depósito Itapecuru do Cretáceo. Em virtude de variações no âmbito mineralógico, textural, químico, estrutural e particularidade espacial, esta área serviu de alvo de estudo geológico da presente dissertação.

1.2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é o estudo mineralógico e geoquímico de perfis bauxíticos na área da mina de Bauxita pertencente à empresa Hydro, no platô Miltônia 3. Visa contribuir para o entendimento da origem, desenvolvimento dos perfis e hipótese da evolução policíclica – várias fases de bauxitização. Assim como avaliar o grau de ordem/desordem da caulinita e a identificação das várias gerações de gibbsita ao longo dos perfis estudados.

1.3 ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho foi realizado na Mina Miltônia 3, pertencente a empresa Norsk Hydro. Está localizada na porção nordeste do Pará, região de Paragominas (Figura 1.1) à aproximadamente 300 km da capital Belém. O acesso terrestre, partindo de Belém, é feito pela rodovia BR-316, passando pela cidade de Castanhal, até o entroncamento com a rodovia BR-010, no município de Santa Maria do Pará. A partir deste ponto, esta estrada atravessa os municípios de São Miguel do Guamá, Mãe do Rio, Aurora do Pará e Ipixuna do Pará, até chegar ao Km 12, em Paragominas. Dobra-se a direita para a PA-256 percorrendo mais 17 Km onde encontra-se o trevo que dá acesso a estrada Mineração, segue-se nessa rodovia por 32 Km até a entrada da mina.

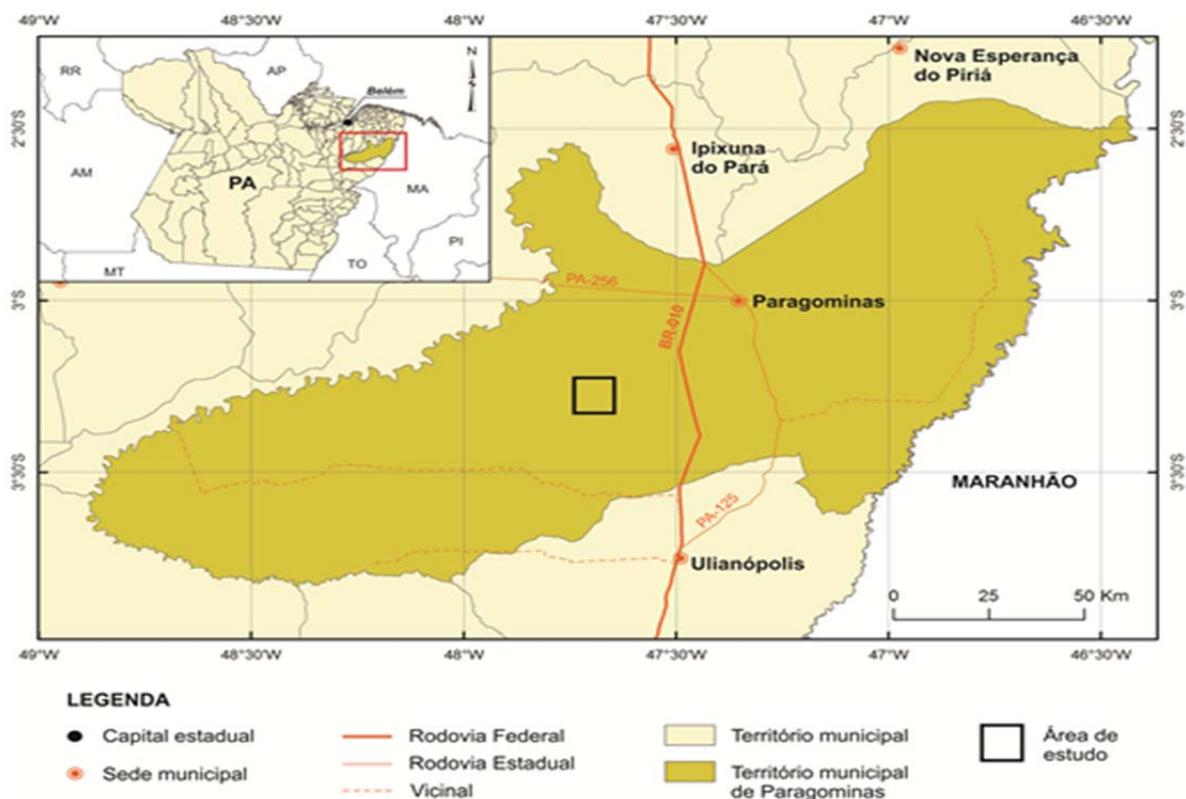


Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo, mostrando as principais cidades ao redor de Paragominas (Nova Esperança do Piriá, Ipixuna do Pará e Ulianópolis).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOLOGIA REGIONAL

A Província Bauxitífera de Paragominas está inserida na porção noroeste da Bacia São Luís-Grajaú e na porção sul da Plataforma Bragantina.

2.1.1 Bacia São Luís-Grajaú

A Bacia São Luís-Grajaú (Figura 2.1) estende-se pela porção leste do Pará, oeste do Maranhão e região leste do estado do Piauí ocupando uma área de aproximadamente 50.000 km². Separa-se da bacia paleozóica do Parnaíba a sul, pelo Lineamento Estrutural Xambioá (Góes & Coimbra, 1996; Góes & Rossetti, 2001), a leste pelo Lineamento do Rio Parnaíba e a noroeste pelo Arco do Capim.

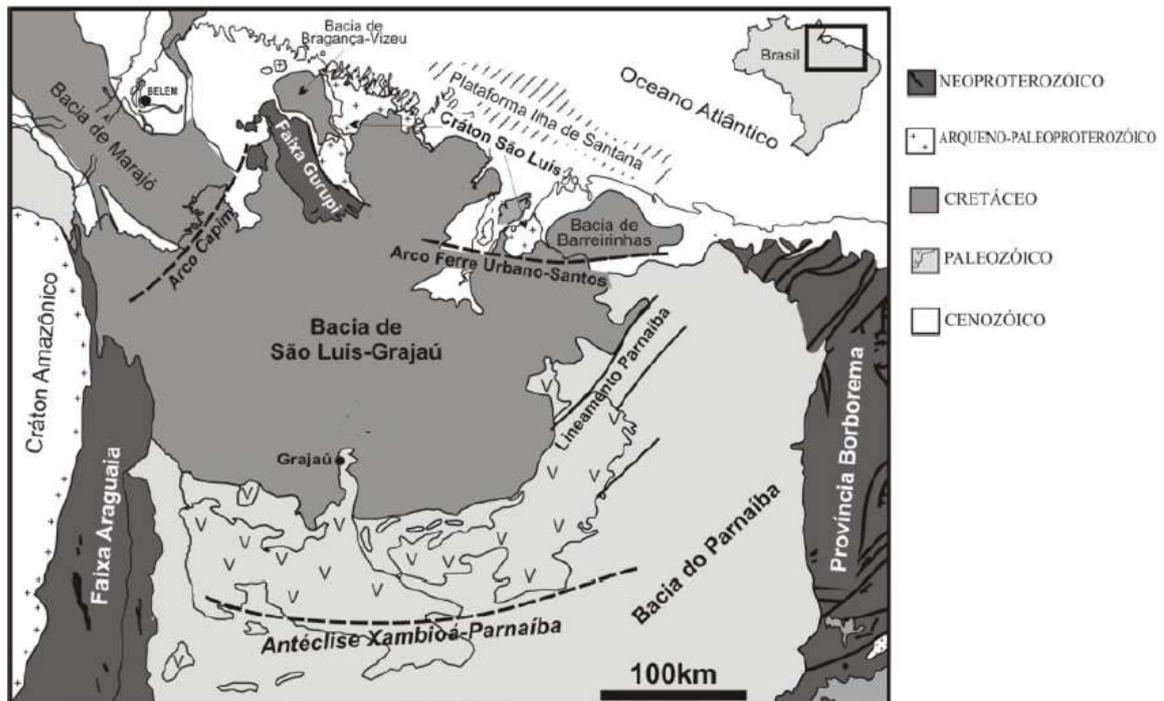


Figura 2.1 - Mapa geológico simplificado com destaque para a bacia sedimentar São Luís-Grajaú. Fonte: Modificado de Nascimento (2007).

A gênese da Bacia de São Luís-Grajaú está relacionada ao rompimento dos continentes sul americano e africano e sua evolução é caracterizada em três fases: Pré-rift, que ocasionou uma ampla depressão com baixa subsidência e com predomínio de deposição de sedimentos terrígenos; Rift, que ocorreu forte tectonismo extencional acompanhado de rebaixamento da Bacia e a deposição de espessos pacotes de sedimentos com predomínio de ambientes transicionais-marinhos; e por fim a fase de drift ocorrendo ampliação e aprofundamento

oceânico com predomínio de sedimentação marinha (Aranha *et al.* 1990; Chang *et al.* 1990; Dias *et al.* 1990; in Miranda 2005).

O preenchimento da Bacia ocorreu durante o Cretáceo e é representado pelas seguintes sucessões litoestratigráficas: Codó – Grajaú – Itapecurú. A sedimentação iniciou-se no Aptiano (120-112 Ma) com deposição de folhelhos negros, evaporitos, calcários lacustres da formação Codó. Logo acima desta unidade há os depósitos fluvio-deltaicos da Formação Grajaú. Na sequência ocorrem rochas de idade Albiano-Neocretáceo-Eoterciário, anteriormente definida como Formação Itapecurú por Cerqueira & Marques (1984); in Miranda (2005), contudo com dados mais recentes e com base em estudos faciológicos e estratigráficos esta unidade adquiriu uma elevação na hierarquia estratigráfica passando a ser nomeada de Grupo Itapecurú (Rossetti & Truckenbrodt, 1997). No topo observam-se sedimentos areno-argilosos cauliniticos, finos e bem selecionados com siltitos e argilitos vermelhos intercalados depositados em ambiente flúvio-estuarinos da Formação Ipixuna (Santos Jr & Rossetti, 2003).

Formação Codó

As melhores exposições desta unidade estão localizadas em minas a céu aberto, próximas à cidade de Codó. Podendo também ser vistas ao longo das margens dos rios que drenam o centro da Bacia, desde a margem oeste, na confluência do rio Tocantins e Araguaia até próximo a margem do rio Parnaíba, na cidade de Brejo. As rochas que compõem a base da Formação Codó, de acordo com Leite *et al.* (1974) e Lima & Leite (1978) perfazem de sedimentos pelíticos, com folhelhos cinza-esverdeados, laminações plano-paralela, calcíferos com estracodes e gastrópodes, intercalando folhelhos preto betuminosos. A parte superior é constituída de calcários argilosos de coloração creme acinzentada.

Formação Grajaú

A parte superior é composta por arenitos de cor creme amarelado, granulometria fina a média, quartzosos, bimodais, com boa esfericidade. Neste pacote é visível intensa estratificação cruzada acanalada. A base é constituída por conglomerados oligomíticos com seixos de quartzo. Esta unidade é típica de ambiente desértico, com dunas de deposição eólica (Lovato *et al.* 1994), o contato desta unidade com as rochas mais antiga ocorre de maneira discordante (Petri & Fúlfaro, 1983).

Grupo Itapecuru

Esta unidade foi considerada durante muito tempo como Formação por Goés (1981), entretanto, Anaisse Jr (1999) por meio de estudos na área, mudou a denominação para “Depósito Itapecuru”.

O termo Itapecuru foi nomeado por Campbel (1949) para a designação de arenitos vermelhos a cinzas, arcoseanos, de intensa estratificação cruzada. Este arenito posteriormente passou por elevado desgaste devido ao intenso intemperismo. Siltitos e folhelhos estão intercalados e ocorrem de forma subordinada. Presença de brechas intraformacionais, estruturas de corte e preenchimentos. Esta unidade provavelmente foi depositada em ambiente fluvial sobre condições climáticas áridas, em concordância a Formação Codó.

Formação Ipixuna

Formado essencialmente por sedimentos areno-argilosos caulíníticos, finos e bem selecionados com siltitos e argilitos vermelhos intercalados. Exibe estratificação cruzada marcante e contem brechas intraformacionais. De acordo com Goés (1981) este material foi depositado em ambiente fluvio-lacustre. Atualmente esta formação foi considerada como parte integrante do nível superior do Grupo Itapecuru (Santos Jr & Rosseti, 2003).

Em algumas áreas, a exemplo do Rio Capim, os depósitos da Formação Ipixuna apresentam grande interesse comercial, pois correspondem a zona de caulim *soft*, podendo atingir no máximo até 40 m de espessura (Kotschoubey *et al.* 1996).

2.1.2 Plataforma Bragantina

O embasamento na porção norte da Plataforma Bragantina (Figura 2.2) é constituída por unidades pré-cambrianas do domínio Cráton São Luís/Faixa Gurupi e na porção meridional por sedimentos Ipixuna da Bacia do Grajaú.

Sedimentos químicos da Formação Pirabas do final do Oligoceno-Mioceno Inferior constituem a base da Plataforma, e na porção superior, os sedimentos litorâneos e continentais da Formação Barreiras do Mioceno Médio (Goés, 1981; Ferreira *et al.* 1984; Costa & Hasui 1997; Rosseti, 2001). Esses sedimentos fazem contato com a cobertura laterítica do Mioceno Superior (Rosseti, 2001; Kotschoubey *et al.* 2005). A unidade mais recente registrada na região é denominada de Sedimentos Pos-Barreiras, formada por sedimento areno-argilosa a argilo-arenoso, de idade quaternária (Sá, 1969; Rosseti *et al.* 1989), entretanto Rosseti (2007) a posiciona na idade pliocênico a pleistocênico.

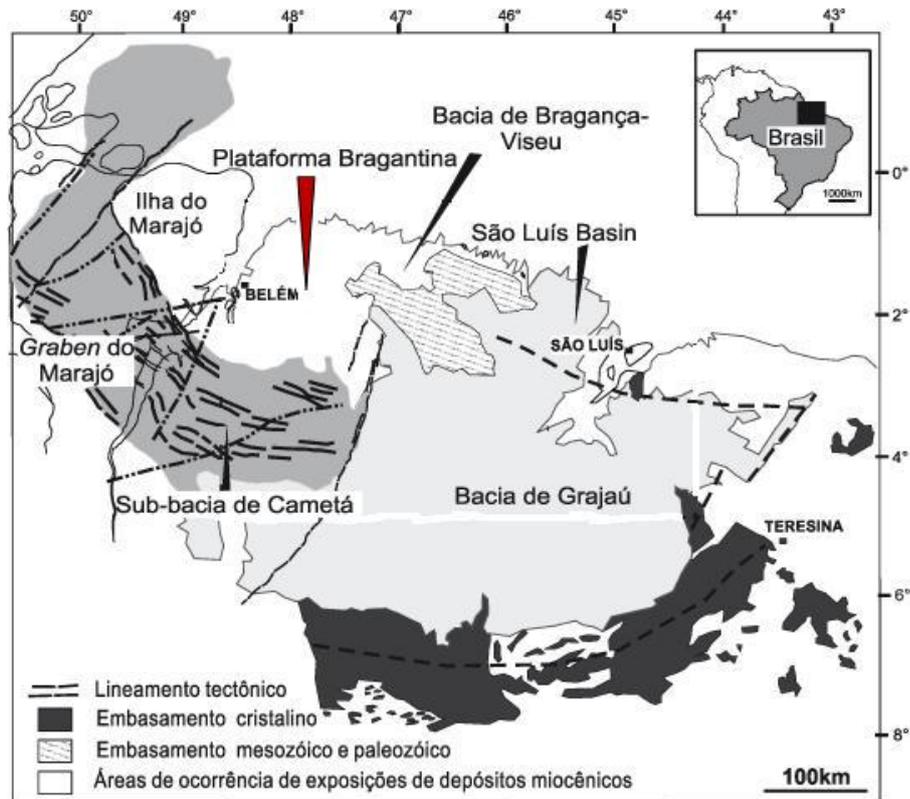


Figura 2.2 - Mapa de localização da plataforma Bragantina (indicada pela seta vermelha) e bacias sedimentares na região norte

Fonte: Adaptada e modificada de Rosseti (2006).

A plataforma Bragantina é cortada na direção leste-oeste por um alto-estrutural, o Arco do Guamá, em sua porção norte, na região em que o Arenito do Guamá do Eopaleozóico está exposto (Truckenbrodt & Alves, 1982; Truckenbrodt *et al.* 2005).

A Província Bauxitífera de Paragominas apresenta sequências geológicas citadas acima na direção Sul. Essa constatação foi feita em base de trabalhos desenvolvidos na região por Calaf (2000) e Kotschoubey *et al.* (2005).

De acordo com análises estratigráficas e sedimentológicas, serão descritas a seguir as unidades constituintes da plataforma Bragantina.

Formação Pirabas

A Formação Pirabas ocorre nos estados do Pará, Maranhão e Piauí, foi registrado primeiramente por Ferreira Pena (1876), no qual observou calcários intensamente fossilíferos na ilha de Fortaleza. Seus melhores afloramentos estão expostos nas regiões litorâneas do nordeste do Pará. Composicionalmente é formada por rochas carbonáticas e margas intensamente fossilíferas com intercalação de folhelhos e arenitos calcíferos, depositada

durante o Mioceno Inferior em plataforma carbonática marinha rasa, em lagunas e mangues, em clima quente.

Esta formação está distribuída na parte norte da Província Bragantina (Ferreira, 1982), na região sul foi apenas diagnosticada por meio de sondagem realizada no município de Mãe do Rio.

Formação Barreiras

A Formação Barreiras corresponde a uma intensa faixa litorânea que se estende desde a foz do Amazonas até o Rio de Janeiro, formada na parte inferior por alternância de níveis argilosos e arenosos, contendo pequenos fragmentos de argila *semi-flint*, a sequência superior é composta por argila-arenosa maciça e seixos de quartzos dispersos no pacote.

Sedimentos Pós-Barreiras

Os Sedimentos Pós-barreiras são considerados como resultantes de espesso manto de alteração intempérica da Formação Barreiras (Mabesoone *et al.* 1972; Mabesoone, 1984).

As exposições mais expressivas de Sedimentos Pós-Barreiras do Norte e Nordeste do Brasil estão localizadas no litoral maranhense, principalmente entre as cidades de Alcântara e Guimarães (Rosseti *et al.* 2013).

Este pacote sedimentar foi dividido em duas unidades estratigráficas: a unidade superior é constituída predominantemente por areias de coloração creme-avermelhado a alaranjada, maciças, localmente bioturbadas de forma intensa, de seleção moderada a boa, granulometria fina a média, podendo ser localmente grossas a conglomeráticas. Pelitos e argilitos bioturbados estão presentes nessa sequência sedimentar. A unidade superior é composta por areias de granulometria fina a muito fina e bem selecionadas, não apresenta estrutura sedimentar. A coloração deste pacote varia em diversos tons de amarelo.

A tabela 2.1 explana um breve resumo das unidades estratigráficas descritas acima, de acordo com sua idade e os principais autores.

Tabela 2.1 - Coluna litoestratigráfica integrada da Bacia do Grajaú e da Plataforma Bragantina.

Unidade estratigráfica	Idade	Referências
Sedimentos Pós-Barreiras	Quaternário/ Plio-Pleistoceno/Plioceno	Rosseti <i>et al.</i> (1989) Rosseti (2001) Kotschoubey <i>et al.</i> (2005)
Couraça ferruginosa/ Stone-layers	Final do terciário/ início do quaternário Mioceno superior/ Plioceno inferior Mioceno superior	Kotschoubey <i>et al.</i> (1996) Rosseti (2001) Kotschoubey <i>et al.</i> (2005)
Formação Barreiras	Mioceno a Plio-Pleistoceno Mioceno Médio	Rosseti <i>et al.</i> (1989) Rosseti (2001)
Formação Pirabas	Oligoceno final-Mioceno Inf. Mioceno Inferior	Ferreira <i>et al.</i> (1984) Goés <i>et al.</i> (1990) Rosseti (2001)
Argila de Belterra (protólito)	Anterior à Formação Pirabas	Kotschoubey <i>et al.</i> (1996)
Couraça laterítica- bauxítica	Eoceno-Oligoceno	Truckenbrodt <i>et al.</i> (1982)
Formação Ipixuna	Cretáceo Superior- Terciário inferior ?	Francisco <i>et al.</i> (1971) Rosseti & Truckenbrodt (1999) Santos Jr. & Rosseti (2003)
Depósito Itapecurú	Cretáceo Superior	Rosseti & Truckenbrodt (1997) Rosseti & Truckenbrodt (1999) Anaisse Jr. (1999)
Formação Codó	Cretáceo (Aptiano)	Petri & Fúlfaro (1983)
Formação Grajaú	Cretáceo (Aptiano)	Petri & Fúlfaro (1983)

Fonte: Adaptado de Kotschoubey *et al.* (2005).

2.2 GEOLOGIA LOCAL

A Província Bauxitífera de Paragominas, localizada na Amazônia Oriental, situada na porção leste do estado do Pará e oeste do estado do Maranhão, ocupa a porção noroeste da Bacia do Grajaú e a parte meridional da plataforma Bragantina, apresenta área em torno de

50.000 Km². Em termo de extensão, mede na direção norte-sul aproximadamente 300 Km e na orientação leste-oeste possui cerca de 200 Km.

A parte meridional da Província é representada por depósitos do sistema estuarino-lagunar, composto por arenitos intercalados com argilitos e níveis conglomeráticos com seixos de quartzo do Grupo Itapecuru do Cretáceo (Góes, 1995; Rosseti & Truckenbrodt, 1999; Anaisse *et al.* 2001). A porção setentrional caracteriza-se por arenitos caulíníticos e argilitos flúvio-estuarinos da formação Ipixuna do Cretáceo Superior (Santos Jr. & Rosseti, 2002). Cobrindo estes depósitos repousa uma cobertura laterítica de idade Paleógeno, na porção sul se concentra material ferruginoso, na porção central e norte há a ocorrência de material aluminoso e bauxítico (Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Kotschoubey & Truckenbrodt, 1994; Kotschoubey *et al.* 1987, 1997). E por último, há um contato discordante desta cobertura com argila de Belterra, este caracteristicamente de coloração amarelada, latossolo argiloso, medindo em algumas porções até 20 m de espessura (Kotschoubey & Truckenbrodt, 1981; Truckenbrodt *et al.* 1991; Kotschoubey *et al.* 1987; Horbe & Costa, 1999).

As rochas mais antigas da Província datam do Cretáceo Superior, são representadas por depósitos siliciclásticos do Depósito Itapecuru (tabela 2.2), o pacote sotoposto denomina-se cobertura laterítica/bauxitífera. Em seguida, a sequência é formada por arenitos argiloso avermelhado, mal selecionado e friável, de até 30 m de espessura, que contém pequenos fragmentos dispersos de laterita ferruginosa e seixos de quartzo, estes sedimentos foram interpretados por Calaf (2000) e Kotschoubey *et al.* (2005) como depósitos continentais derivados de fluxos de lama e de detritos. Sobre os sedimentos argilosos do Mioceno, estão em contato uma crosta ferruginosa, logo acima, em contato brusco ocorre depósitos areno-argilosos amarelados, praticamente ausência de estruturas sedimentares, e de forma dispersa observa-se pequenos fragmentos de lateritas (*stone-lines*).

Tabela 2.2 - Coluna litoestratigráfica da Província Bauxitífera de Paragominas.

Sedimentos argilo-arenosos/areno-argilosos amarelados	Plioceno? / Pleistoceno
Couraça ferruginosa/ <i>Stone-layer</i>	Mioceno Superior
Arenito argiloso avermelhado	Mioceno Inferior e Médio

Tabela 2.2: Continuação

Inconformidade Maior	
Argila de Belterra (sedimentos pretéritos)	Oligoceno
Couraça laterita/ Bauxítica	Paleoceno-Eoceno? – Oligoceno Inferior
Depósitos Itapecurú/ Ipixuna	Cretáceo Superior

Fonte: Kotschoubey *et al.* (2005).

2.3 TRABALHOS ANTERIORES

Por sua enorme relevância no contexto geológico, dimensional e econômico da região amazônica a Província de Bauxitífera de Paragominas foi e está sendo alvo de intenso estudo científico.

A pesquisa na Amazônia iniciou nos anos de 1960 por Towse & Vinson, geólogos da empresa Kaiser Aluminium Company. Em meados da década de 70, esta empresa deixou o Brasil e passou os seus negócios para a companhia Mineração Vera Cruz, pertencente a empresa Rio Tinto Zinc, em que iniciou a exploração em um dos platôs mais viáveis economicamente da Província, denominado Miltônia. Mais tarde, a empresa Companhia Vale do Rio Doce, em meados da década de 80, tomou frente em relação à exploração na região.

Os primeiros registros de lateritas no nordeste do Pará foram identificados por Sombroek em 1966, entretanto não observou a ocorrência de bauxita na região, porém assemelhou o capeamento argiloso do manto laterítico ao mesmo material encontrado no topo de depósito observado por ele mesmo na região do Baixo Amazonas.

Wolf (1972) e Wolf & Silva (1973) interpretaram os horizontes bauxíticos encontrados nas cidades de Paragominas e Trombetas, como formações residuais formadas *in situ*, esta afirmação recebeu apoio de Dennen & Norton (1977), Grubb (1979) e Aleva (1981).

Greig (1977) relacionou as lateritas aluminosas e sedimentos terciários da Bacia da Amazonas, por ambas apresentarem similaridades composicionais, texturais e estruturais.

Primeiramente as bauxitas sobre rochas siliciclásticas da Bacia do Amazonas foram classificadas como consequência de processo monofásico, contudo Dennen & Norton (1977) por meio de estudos na área observaram que os perfis bauxíticos apresentavam um horizonte

ferruginoso entre dois horizontes gibbsíticos, resultado da ocorrência de dois períodos de gibbsitização separadas, pelo tempo, por uma fase de deposição de material arenoso que passou por ferruginização em ambiente podzólito, levantando a hipótese de uma evolução polifásica. Mais tarde tal afirmação foi sustentada por Kotschoubey & Truckenbrodt (1981) que individualizaram 5 momentos para a esta evolução polifásica: 1) laterização inicial do saprólito, 2) formação da crosta ferro-aluminosa e seu retrabalhamento parcial, 3) primeira e principal fase de gibbsitização da crosta: formação do horizonte bauxítico inferior, 4) segunda fase de retrabalhamento da crosta e formação do cascalho ferruginoso no topo do perfil, 5) segunda fase de gibbsitização e bauxitização da parte superior da crosta. Além disto, os mesmos autores diagnosticaram que a cobertura ferro-aluminosa gerou em função dos sedimentos siliciclásticos das formações Itapecuru e Ipixuna do Cretáceo Superior (Goés, 1981).

Truckenbrodt *et al.* (1981) determinaram que as bauxitas foram geradas no Terciário inferior, contra provavelmente, no mesmo período em que se formaram as bauxitas da Guiana e do Suriname (Krook, 1979).

Kotschoubey *et al.* (1984) descobriram uma terceira etapa de gibbsitização proveniente da formação de gibbsita criptocristalina e no desaparecimento da estrutura acamadada preexistente no manto ferro-aluminoso, na região de Paragominas no setor Jabuti-Ipixuna.

A teoria verticalista foi proposta por Boulangé & Carvalho (1989, 1997) e Bardossy & Aleva (1989), aplicada para os depósitos bauxitíferos/lateríticos, e tem como propósito a evolução de um perfil laterítico ser *in situ* por meio da redistribuição de Fe e Al pelas águas percolantes. Estes autores propuseram um modelo explicando a evolução do manto bauxítico sendo individualizado em vários horizontes que são distintos em termos composicionais, texturais e estrutural.

A Província Bauxitífera de Paragominas, por meio de pesquisas realizadas por Kotschoubey *et al.* (1997), foi dividida em quatro zonas, esta divisão está baseada na evolução do grau de bauxitização da cobertura laterítica e no progressivo enriquecimento em alumínio que ocorre na direção sul-norte.

Kotschoubey & Truckenbrodt (1981) e Kotschoubey *et al.* (1987 e 1997) sugeriram vários modelos genéticos, em que a evolução da crosta laterítica/bauxítica foi principalmente controlada por fatores químicos e subordinadamente por influência física. Oscilações climáticas teriam sido o motor para a individualização dos horizontes nos perfis lateríticos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 TRABALHOS DE CAMPO – AMOSTRAGEM

Foram realizadas duas viagens de campo a Mina de Miltônia 3. A primeira ocorreu em junho de 2013 e a segunda em janeiro de 2014.

O trabalho consistiu na descrição e amostragem de dois perfis na frente de lavra correspondente à faixa 250, bloco b. O local dos perfis foi selecionado de modo a coincidir, aproximadamente, com as canaletas de amostragem realizadas pela empresa para o controle de lavra, no caso, as canaletas 3 e 5, e distam uma da outra em aproximadamente 20 metros (Figuras 3.1A e B).

Tanto a descrição do perfil, como a amostragem é orientada pela estruturação dos horizontes do perfil de intemperismo. Procurou-se seguir a nomenclatura adotada pela empresa e que será apresentada no capítulo dos resultados. Em cada horizonte, procurou-se detalhar as variações texturais/estruturais e mineralógicas, além das possíveis relações de contato entre os horizontes.

Ao todo foram coletadas 12 amostras provenientes dos 2 perfis. As mesmas foram acondicionadas em sacos de plásticos e numeradas, segundo as siglas previamente estabelecidas para cada horizonte, e encaminhadas para o Instituto de Geociências na UFPA.



Figura 3.1 - Frente de lavra da Mina Miltônia 3, faixa 250. A) Aspecto panorâmica da mina. B) Coleta da amostra representativa de cada horizonte do perfil bauxítico 1.

3.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS

Todas as amostras foram lavadas superficialmente apenas com a intenção para a eliminação do excesso de argila e secas ao ar. Para a secagem (retirada da umidade), as mesmas foram colocadas em estufa a 60°C durante 24 horas.

A preparação física (moagem) foi realizada na Oficina de Preparação de Amostras (OPA) com o equipamento *Shatterbox*, para redução granulométrica abaixo de 1 mm. Depois as amostras foram pulverizadas manualmente no gral de ágata, de modo a obter o passante na peneira de 0.105 mm. Finalmente, as amostras foram homogeneizadas e quarteadas para encaminhamento as diferentes técnicas analítica-instrumentais que serão descritas a seguir.

Porções maiores das amostras in natura foram encaminhadas para confecção de lâminas petrográficas.

3.3 ANÁLISES MINERALÓGICAS E QUÍMICAS

Todos os procedimentos metodológicos e/ou técnicas instrumentais descritas a seguir, exceto a análise química, foram realizados em laboratórios ligados ao Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica (PPGG), do Instituto de Geociências.

3.3.1 Petrografia

Foram confeccionadas 24 lâminas petrográficas sem lamínula das 12 amostras coletadas, no Laboratório de Laminação.

Como algumas amostras encontravam-se bastante friáveis houve a necessidade de aplicar resina epoxilica BR-837 e endurecedor GY-951 com o objetivo de impregnar o material e deixa-lo coeso para confecção das referidas lâminas.

As lâminas foram analisadas ao microscópio óptico de luz transmitida e refletida, da marca Zeiss, com o intuito de descrever as feições mineralógicas, texturais, estruturais, relação de alteração e contatos entre as fases presentes em cada amostra. Acoplada ao microscópio tem-se uma câmera da marca Leica, juntamente com o *software* Leica *Microsystem*s para o processamento das imagens petrográficas.

3.3.2 Análise Mineralógica por Difractometria de Raios-X (DRX)

As análises foram feitas em difratômetro modelo X'Pert Pro MPD (PW 3040/60) PANalytical, com goniômetro PW3050/60 (teta/teta) e com tubo de Raios-X cerâmico de ânodo de Cu ($K\alpha_1=1,540598 \text{ \AA}$) modelo PW3373/00, foco fino longo, filtro $K\beta$ de Ni,

detector X'Celerator RTMS (Real Time Multiple Scanning) no modo *scanning* e com *active length* 2,122°, passo angular 0,033°.

Após o resultado da análise, os difratogramas foram tratados por meio do *software X'Pert High Score Plus* versão 3.0, que compara os resultados com as fichas do banco de dados PDF (Power Diffraction File) do *International Center for Diffraction Data – ICCD*, 2003, com o intuito de identificar as fases minerais presentes na amostra analisada.

O procedimento utilizado foi o método do pó total por meio da técnica *back-loading*. Inicialmente foi pulverizada uma alíquota de 5 gramas de cada amostra em gral de ágata, em seguida, são dispostas e prensadas em porta-amostra de Si de maneira que o material não tenha orientação preferencial, finalmente, armazenadas em magazine para posterior análise.

Para análise de detalhe de porções mineralógicas distintas, utilizou-se a técnica de micropreparação, para isto fez-se o uso de um mini *drill* modelo Dremel 3000 EZ, consistindo na obtenção de pequenas quantidades de amostras, exceto a etapa de prensagem, seguiu o mesmo modo de análise do método do pó total.

Os valores relativos à Largura a meia altura (FWHM- *full width at half maximum*) foram obtidos por meio dos difratogramas de pó total de acordo com o método aplicado por Amigó *et al.* (1994), consistindo na análise dos picos d_{001} e d_{002} da Caulinita, na região entre os ângulos 10-14° e 21-25°, respectivamente, em seguida ativa-se o *fit profile* em cada um dos picos com a finalidade de ajustes entre o difratograma calculado e o real.

3.3.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a obtenção de imagens por MEV e análises químicas por energia dispersiva (EDS), as amostras de bauxita foram fragmentadas e com a ajuda de uma lupa binocular modelo STEMI SR foi feita a seleção de partículas. Posteriormente, os fragmentos foram montados em *stubs*, metalizados com ouro, tempo de recobrimento foi de 1,5 minutos, a fim de torná-los eletricamente condutivos, em um sistema automático de metalização, modelo EMITECH – K550XR®.

Após a preparação, as amostras foram levadas ao microscópio eletrônico (MEV) modelo LEO-1430.

Para imagens em elétrons retroespalhados, as análises consistiram em corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho = 15 mm e tempo de contagem para análise dos elementos = 30 s.

As condições de análises para imagens de elétrons secundários foram: corrente do feixe de elétrons = 90 μ A, voltagem de aceleração constante = 10 kV, distância de trabalho =

15 mm. Foi dado ênfase as características morfológicas, texturais e para a determinação semiquantitativa de sua composição química por EDS.

3.3.4 Análises Químicas

As doze amostras coletadas nos dois perfis estudados foram encaminhadas para análises químicas de elementos maiores e traço no laboratório comercial ACMELabs, em Vancouver, no Canadá. Foi utilizada uma combinação de métodos, sendo os elementos maiores analisados por Espectrometria de Fluorescência de Raios-X e os elementos traço por ICP-MS, após digestão multiácida com HF-HNO₃-HClO₄.

Adicionalmente, a empresa Hydro forneceu os resultados analíticos referentes às amostras das canaletas 3 e 5, aproximadamente na mesma posição dos perfis estudados neste trabalho, conforme já descrito anteriormente. As análises realizadas pela empresa são: SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ e TiO₂, por ICP-OES, após abertura ácida, e perda por calcinação (PPC), por gravimetria. Também foram fornecidos os resultados de sílica reativa e alumina aproveitável, muito utilizado em controle de processo de bauxitas, cuja análise é realizada através de digestão alcalina (via úmida), em auto-claves (digestores) específicas, Método ALCAN.

4. RESULTADOS

4.1 ESTRUTURAÇÃO DOS PERFIS

Para a descrição dos dois perfis bauxíticos deste trabalho, foi mantida a mesma nomenclatura para os horizontes adotada pela empresa Mineração Paragominas S.A (MPSA), terminologia esta que já vem sendo utilizada pelo menos desde os anos 1970 pelas equipes de exploração da antiga Docegeo e Vale.

Os dois perfis estão representados, esquematicamente, nas Figuras 4.1 e 4.2 e apresentam, aproximadamente, a seguinte sucessão de horizontes, da base para o topo: **BA**: Bauxita Amorfa; **BCBA**: Bauxita Cristalizada-Bauxita Argilosa; **BC**: Bauxita Cristalizada; **LF**: Laterita Ferruginosa; **BNC**: Bauxita Cristalizada Nodular; **BN**: Bauxita Nodular; e **CAP**: Capeamento Argiloso.

O nível principal de bauxita que é lavrado consiste no horizonte BC (Bauxita Cristalizada). O principal ponto a ser destacado é em relação aos horizontes BN e BNC, que não ocorrem em todos os perfis, e que, eventualmente, também podem ser lavrados como minério, conforme relato dos técnicos da empresa Norsk Hydro.

Em relação a base dos perfis, é frequentemente descrito na literatura um horizonte argiloso, rico em caulinita e sem gibbsita (Kotschoubey *et al.* 2005), subjacente ao horizonte BA. Neste trabalho, este horizonte não aflorava, por se tratar de uma frente de lavra e não apresentar interesse econômico.

Os horizontes BA e BC mostram variações mineralógicas e texturais no perfil 1. A base de ambos os horizontes é mais argilosa, entretanto o topo da BA é constituído, em maiores proporções por nódulos gibbsíticos. Por outro lado, o horizonte BC é formado basicamente por concreções ferruginosas.

Quando equiparados os perfis, observa-se que apenas no perfil 1 o horizonte BN está presente, por outro lado no perfil 2 o horizonte sobrejacente a LF é denominado de BNC.

Finalmente, em relação ao topo dos perfis, o horizonte mais superior é o capeamento argiloso (CAP), regionalmente conhecido como Argila de Belterra. Pode apresentar até mais de 10 m de espessura, sendo considerado como estéril, durante a lavra. O mesmo não foi amostrado e não será considerado neste trabalho.

A seguir será apresentada a descrição detalhada dos horizontes.

PERFIL 1

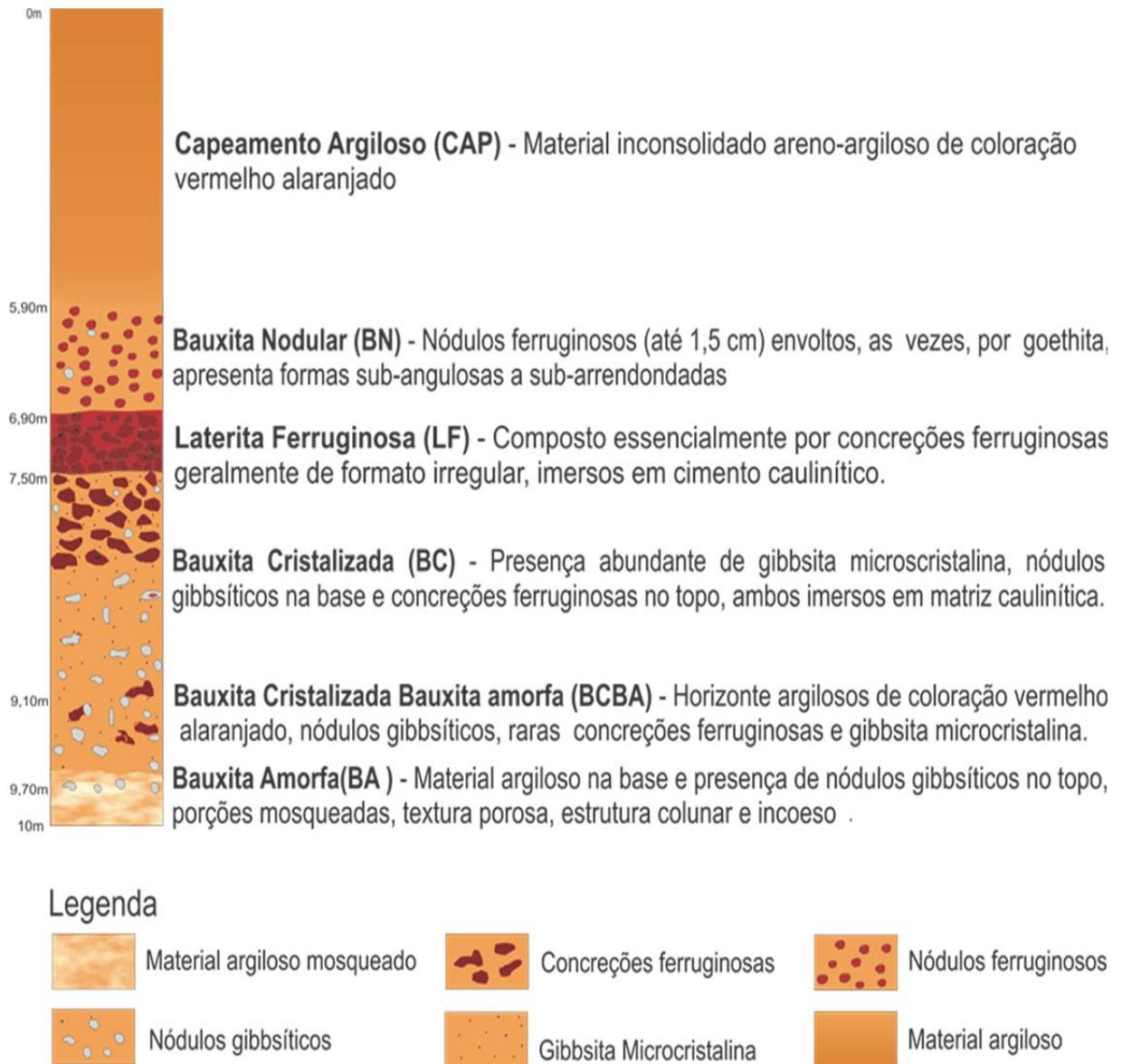


Figura 4.1 - Desenho esquemático do perfil 1, destacando as principais feições e descrição de cada horizonte.

PERFIL 2



Figura 4.2 - Desenho esquemática do perfil 2, exibindo as principais feições e descrição de cada horizonte.

4.2 MINERALOGIA

Horizonte Bauxita Amorfa (BA)

Constitui a base do perfil laterítico, com espessura em média de 40 cm e coloração vermelho alaranjado. Formado essencialmente por material argiloso de composição caulínica. Texturalmente apresenta elevada porosidade e heterogeneidade. Estruturas primárias reliquias, como laminações plano-paralelas, ocasionalmente podem ser encontradas, apesar do intenso processo de lateritização. Ocorrem localmente porções ferruginosas, incoesas e, por vezes, porosas.

No perfil 1, este horizonte possui duas variações texturais distintas: a base é formada, essencialmente, por material argiloso (Figura 4.3A), incoeso. Frequentemente são observadas porções mosqueadas (Figura 4.3B) em função da dispersão de micro-partículas de óxi-hidróxido de Fe que se posicionam nos planos de clivagem e fraturas (Costa, 1991), e estruturas colunares (Figura 4.3C) ocasionada pelas bioturbações, provavelmente de origem singenética (Aleva, 1982). A parte superior apresenta nódulos porcelanados (Figuras 4.3D e E) de coloração cinza esbranquiçado, com formas irregulares e diâmetro centimétrico (0,5 – 1,5 cm). Encontram-se dispersos no horizonte, geralmente, associados com porções amareladas, possivelmente de composição goethítica.

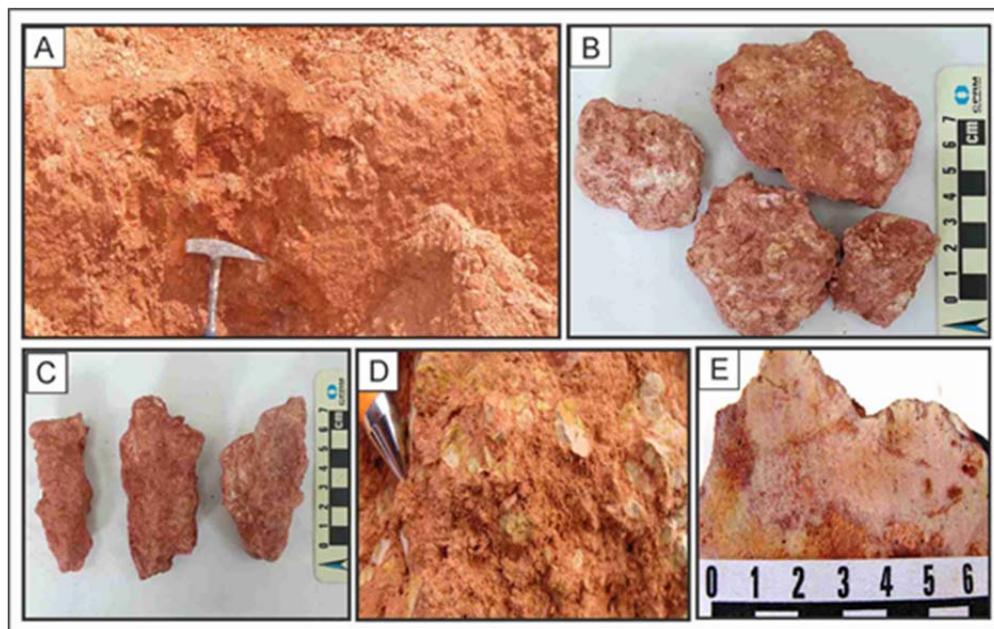


Figura 4.3 - Principais feições macroscópicas do Horizonte Bauxita Amorfa (BA). A) Base do horizonte constituída essencialmente por material caulínico; B) Amostras representativas do horizonte exibindo porção mosqueada; C) Estrutura colunar típica da base do perfil; D) Nódulos gibbsíticos imersos em cimento caulínico; e E) Detalhe do corte em perfil do nódulo gibbsítico.

O horizonte BA do perfil 2 é homogêneo, ou seja, não apresenta maiores variações mineralógicas, estruturais ou texturais, mas apresenta em geral as mesmas feições descritas anteriormente para o perfil 1 (presença da matriz caulinítica, nódulos gibbsíticos e concreções ferruginosas).

De um modo geral, este horizonte apresenta contato gradativo com o horizonte subjacente.

Os resultados mineralógicos por DRX (amostra total), para este horizonte, mostram que a fase dominante é a caulinita (Figura 4.4), representada pelos dois picos principais relacionados as reflexões basais $d_{(001)} = 7 \text{ \AA}$ e $d_{(002)} = 3,5 \text{ \AA}$. Esta caulinita possui características de “elevada ordem estrutural”, demonstrada pela boa resolução (separação) entre os três picos (triplet) na posição $2\Theta \sim 20-22^\circ$, indicada pela área tracejada na Figura 4.4, apesar da sobreposição do pico principal da goethita. Gibbsita (pico principal em $4,84 \text{ \AA}$) e Al-goethita ocorrem em menor proporção, seguido de traços de anatásio.

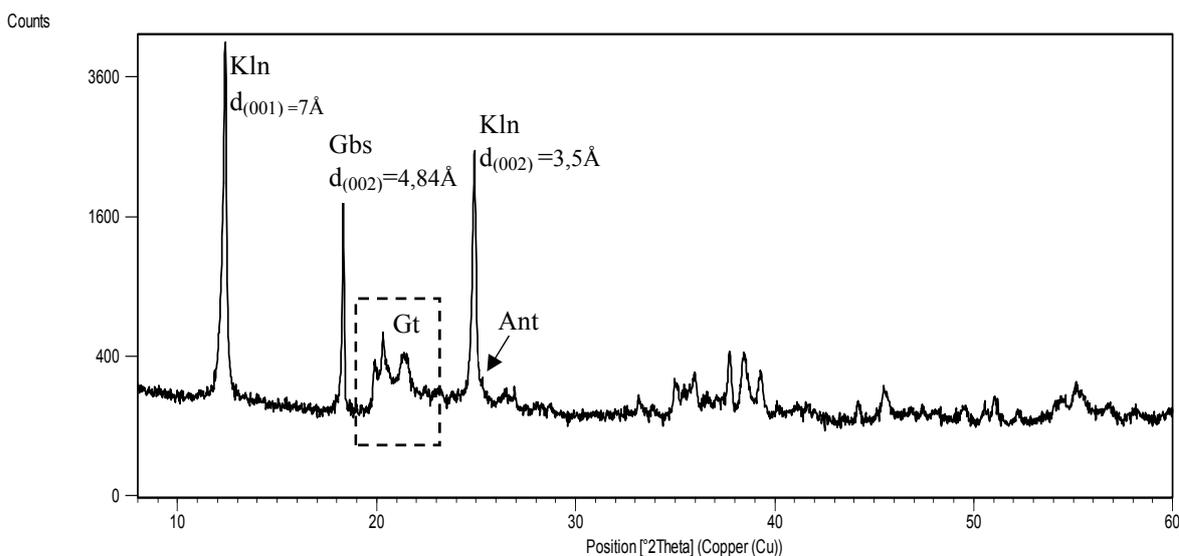


Figura 4.4 -. Difratograma de Raios-X de amostra total representativa do horizonte BA. A região tracejada destaca elevada ordem estrutural da caulinita. Kln=Caulinita, Gbs=Gibbsita, Gt=Goethita e Ant=Anatásio.

Além das análises da amostra total, porções específicas (matriz argilosa e nódulos) de amostras desse horizonte foram separadas e analisadas por DRX pela técnica da micropreparação (Figura 4.5). Na porção argilosa, que corresponde ao material vermelho amarelado, o mineral dominante é a caulinita, sendo a gibbsita subordinada. Já os nódulos mostram que o mineral dominante é a gibbsita, enquanto a caulinita é subordinada.

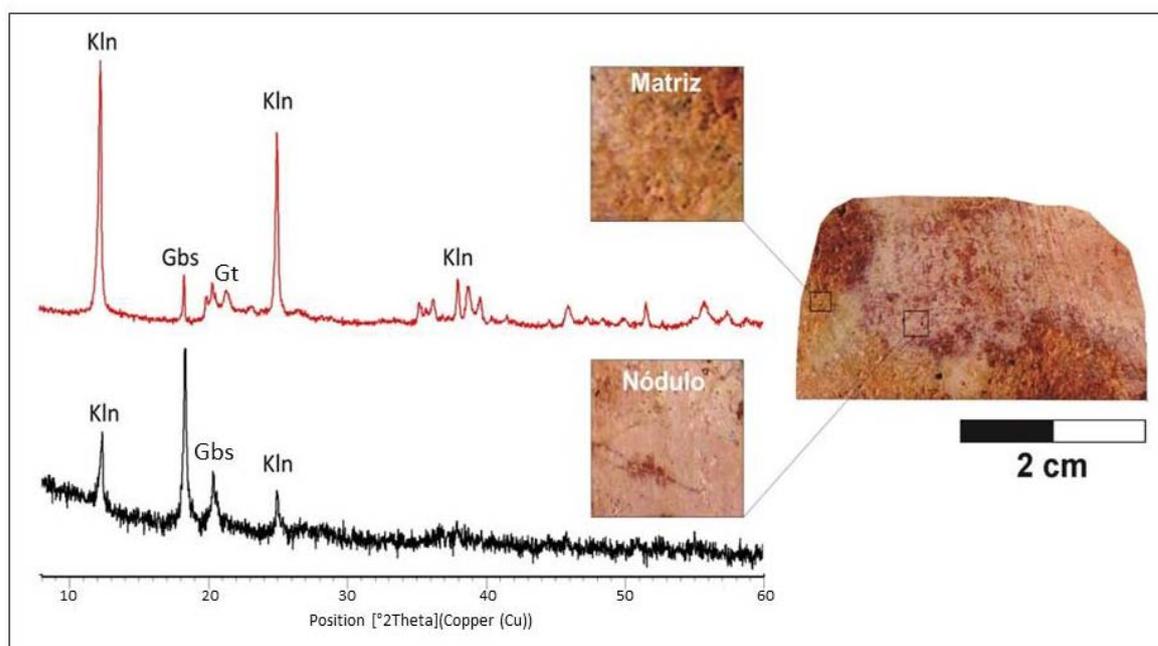


Figura 4.5 - Difratoigramas de Raios-X pela técnica da micropreparação de porções distintas da amostra representativa do horizonte BA (matriz argilosa e nódulos). Kln= Caulinita, Gbs= Gibbsita e Gt= Goethita aluminosa.

Ao microscópico petrográfico, uma feição textural típica deste horizonte são os plasmas caulinitico-gibbsítico (Figura 4.6A), representado por uma massa difusa e densa de coloração vermelho alaranjado.

Feições de desferrificação são observadas, principalmente formando uma borda ao redor dos poros e *cutans*, assim como porções de alta concentração de oxi-hidróxidos de Fe. Texturalmente apresenta porosidade, em virtude da possível lixiviação de minerais como caulinita e quartzo.

As cavidades estão interconectadas ou isoladas, ora encontram-se vazias, ora preenchidas totalmente ou parcialmente por gibbsita microcristalina e criptocristalina. A gibbsita microcristalina exhibe cristais euédricos a subédricos (Figuras 4.6B e C), cujas dimensões encontram-se em torno de 10 μm .

Aspectos radiais estão presentes em sistema de *cutans* que recortam a matriz argilosa. Cristais de zircão, minerais opacos e turmalina são encontrados, raramente, dispersos no plasma ferruginoso.

As imagens por MEV revelam diferentes aspectos morfológicos dos cristais de caulinita, na forma de hábito lamelar (Figura 4.6D), predominantemente anédrica, por vezes, subédrica, de dimensões de 1 μm a 4 μm . Esses cristais estão dispostos de forma empilhada e sem orientação preferencial visível. Entretanto, estruturas reliquiares do tipo *booklets* (Figura 4.6E) podem ser observadas, comumente associadas à hidrólise dos cristais preexistentes de

feldspato. Cristal de quartzo parcialmente corroído (Figura 4.6F) está associado com minerais de Fe e caulinita.

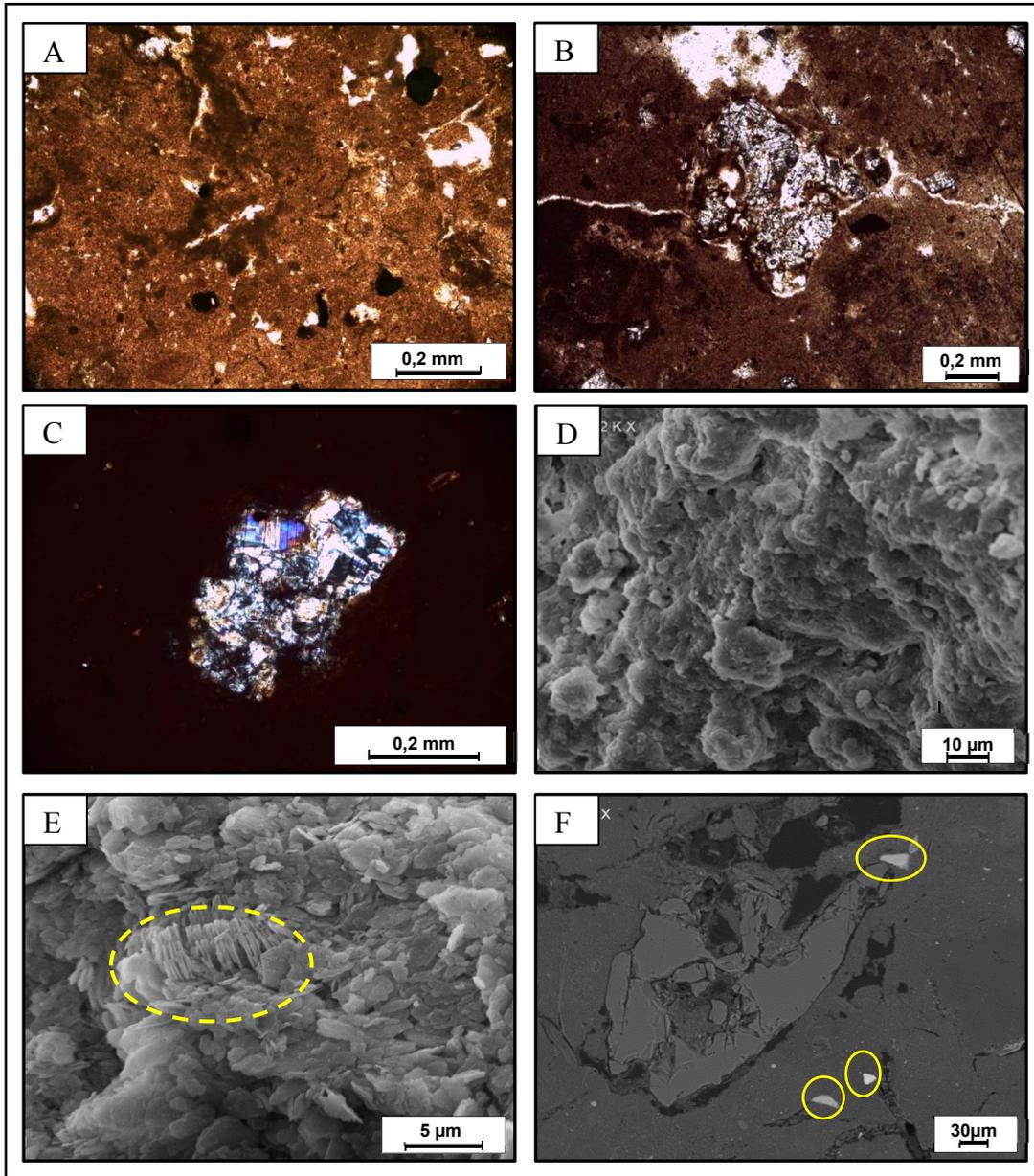


Figura 4.6 - Feições microscópicas do Horizonte BA. A) Plasma caulinitico-gibbsítico obtido por microscópico óptico, observa-se porções com elevada concentração ferruginosa e presença de cristais opacos. B) Poros e *cutans* preenchidos por cristais de gibbsita microcristalinos e criptocristalinos, respectivamente. C) Cristal de gibbsita de dimensões em torno de 0,35 mm, imagem capturada em luz polarizada. D) Aspecto micromorfológico do horizonte em estudo, das lamelas de caulinita, obtida via MEV por detector de elétrons secundários. E) Empilhamento dos cristais de caulinita em forma de *booklets*, feição típica de estrutura reliquiar. F) Cristal de quartzo parcialmente alterado associado com cristais ferro-titaníferos (circundados por círculos em amarelo), detectada por elétrons retroespalhados.

Horizonte Bauxita Cristalizada-Bauxita Amorfa (BCBA)

O Horizonte BCBA mede em torno de 60 centímetros de espessura, coloração vermelho alaranjado.

Mineralogicamente é composto por nódulos gibbsíticos (Figuras 4.7A e B), de coloração cinza esbranquiçado, diâmetros variados (0,6 a 1,5 cm) e formas sub-angulosas, podendo também ser irregulares. Alguns estão impregnados por oxí-hidróxidos de Fe e estão dispostos sem orientação preferencial no horizonte. Tais nódulos estão envoltos por matriz de composição majoritariamente caulinitica, com gibbsita, hematita e goethita em quantidades subordinadas.

Porções hematíticas podem ser encontradas localmente, todavia porções goethíticas são observadas com mais frequência no horizonte. Os poros estão presentes de maneira abundante, podendo ser vistos isolados e interconectados (Figura 4.7C).

A relação de contato entre o horizonte BA e BCBA ocorre de maneira gradacional. De acordo com os geólogos da Hydro, esta transição é definida por meio da distinção geoquímica entre tais horizontes.

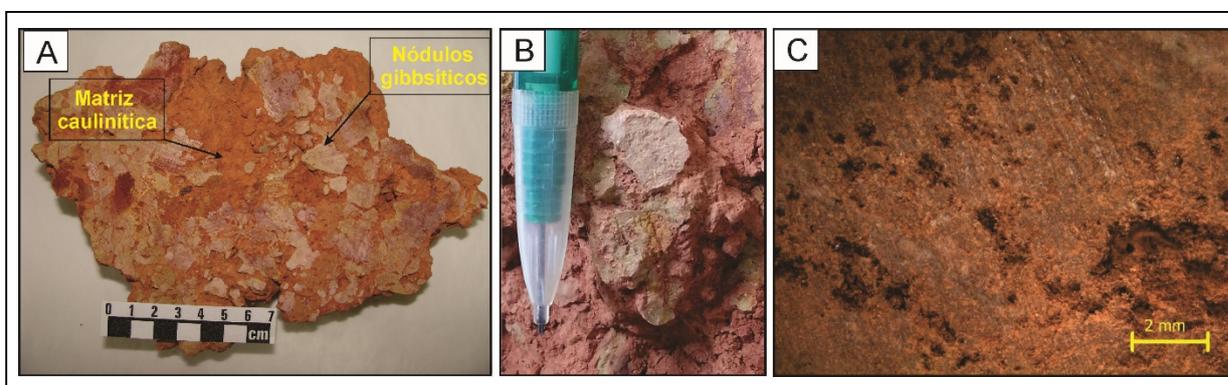


Figura 4.7 - Aspectos macroscópicos do Horizonte Bauxita Cristalizada-Bauxita Amorfa (BCBA). A) Amostra representativa mostrando os nódulos envoltos por matriz argilosa. B) Detalhe dos nódulos gibbsíticos. C) Abundância de poros isolados e interconectados na matriz caulinitica.

A Figura 4.8 apresenta o difratograma de Raios-X da amostra total representativa deste horizonte. A gibbsita representa a fase dominante.

Caulinita ocorre em quantidades subordinadas e, diferente do horizonte BA anteriormente descrito observa-se a ausência do triplet na posição $2\Theta \sim 20-22^\circ$ (evidenciada pela área tracejado), possivelmente o intenso intemperismo provocou mudança incipiente na ordem estrutural deste mineral. Além da caulinita, goethita aluminosa e traços de anatásio também compõe a matriz argilosa.

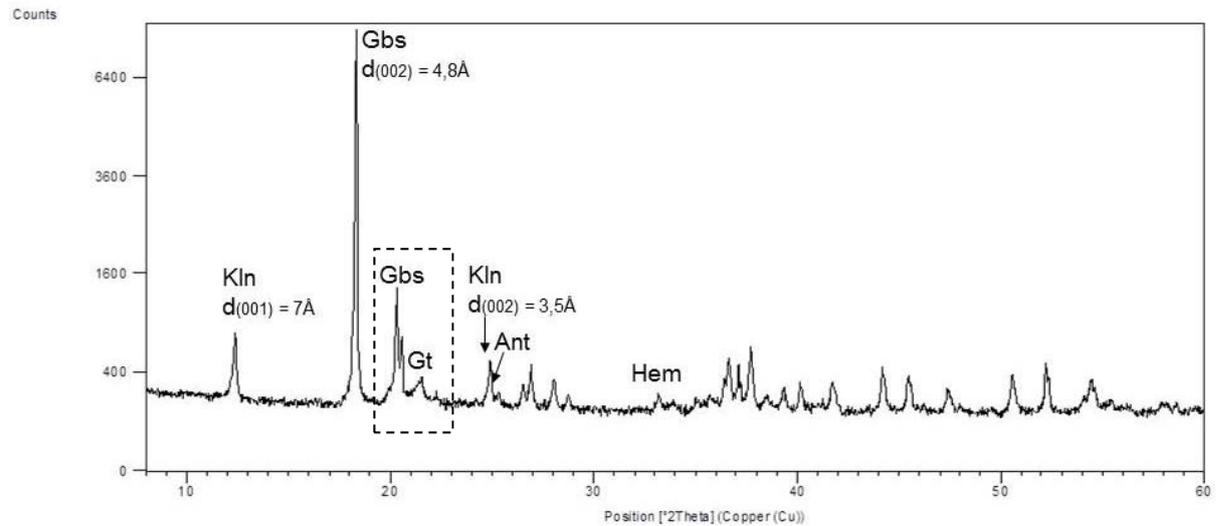


Figura 4.8 - Difratoograma representativo do Horizonte BCBA por amostra total mostrando gibbsita como fase dominante e caulinita perfazendo a fase subordinada. Kln= Caulinita, Gbs= Gibbsita, Gt=Goethita, Hem= Hematita e Ant= Anatásio.

A Figura 4.9 exibe os difratogramas gerados a partir das análises de porções heterogêneas (nódulos e matriz argilosa) presentes na amostra em estudo.

Os nódulos são compostos majoritariamente por gibbsita, e quantidades subordinadas de caulinita e hematita. Por outro lado, a matriz é composta principalmente por caulinita, os minerais de gibbsita, goethita e hematita compõem a fase subordinada.

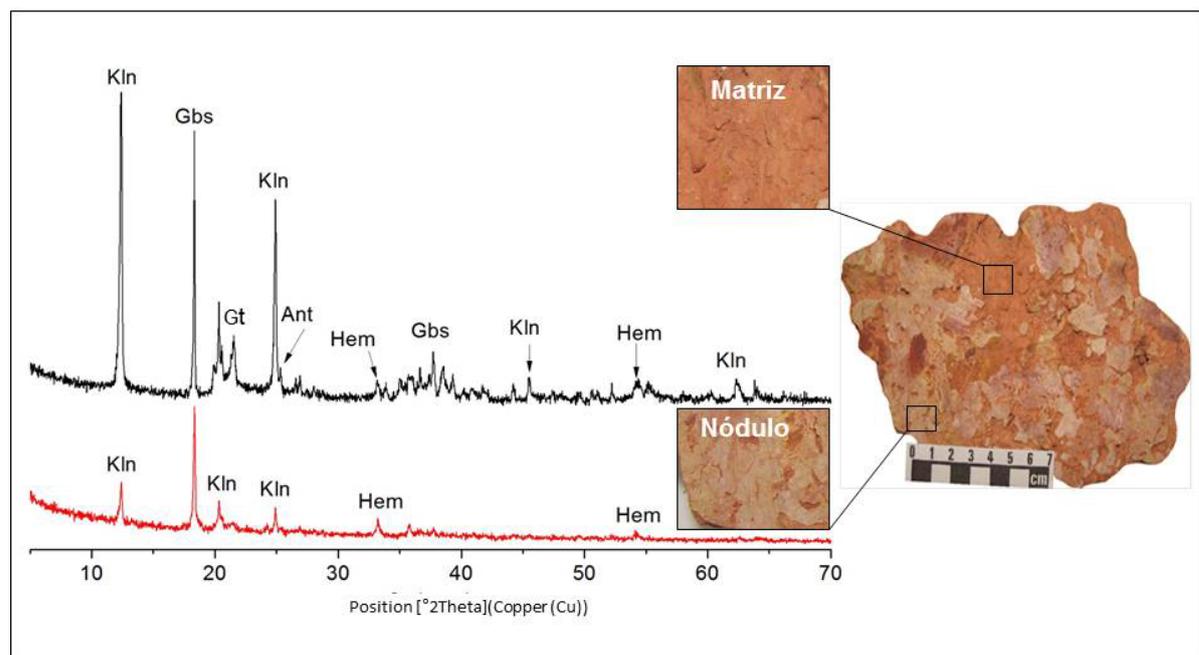


Figura 4.9 - Difratoogramas de Raios-X , técnica da micropreparação, de porções distintas da amostra representativa do horizonte BCBA.

Microscopicamente, a matriz apresenta composição essencialmente caulinitica, com gibbsita criptocristalina e oxi-hidróxido de Fe formando as fases subordinadas (Figura 4.10A). Este conjunto exhibe, texturalmente, característica de um plasma heterogêneo de coloração vermelha ocre.

Os cristais de gibbsita microcristalina (Figura 4.10B), possuem dimensões que oscilam entre 9 -11 μm , encontram-se preenchendo totalmente ou parcialmente as cavidades (poros e *cutans*).

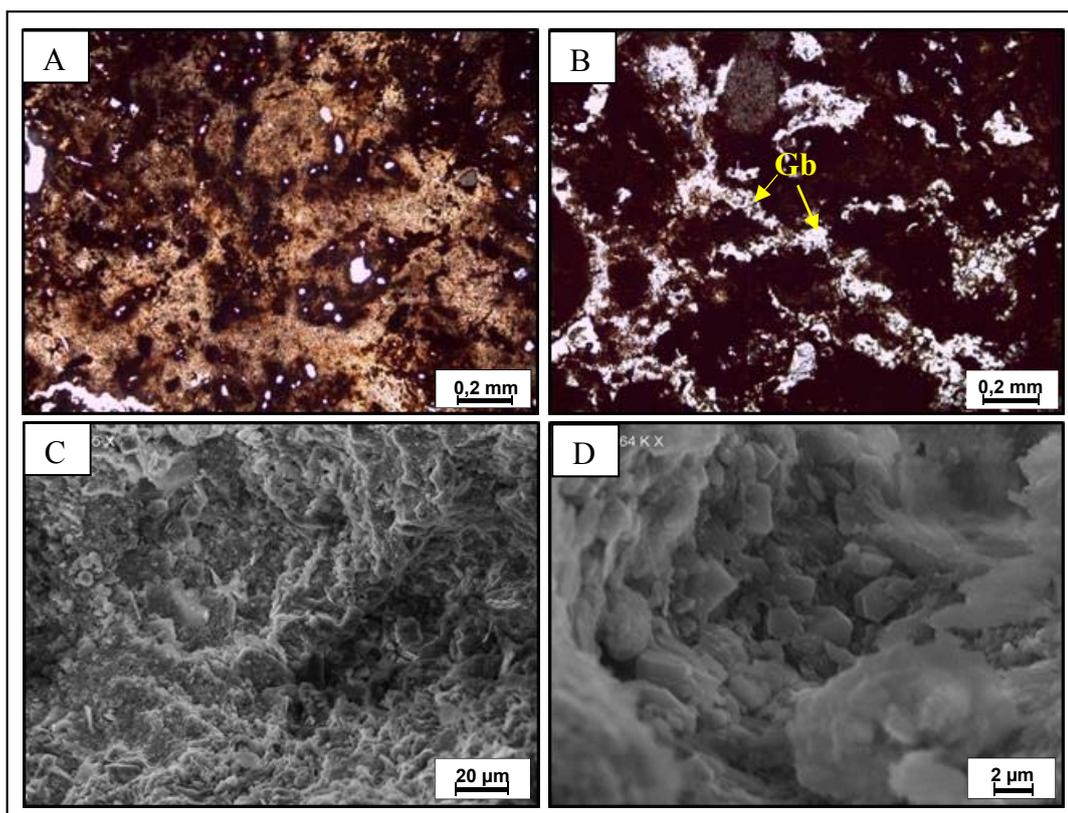


Figura 4.10 - Principais feições microscópicas do Horizonte BCBA. A) Matriz plasmática composta por cristais de caulinita e gibbsita criptocristalina associados com oxi-hidróxido de Fe. B) *Voids e cutans* preenchidas por gibbsita microcristalina. C) Imagem por MEV detectado por elétrons secundários da matriz caulinita exibindo textura lamelar, ampliada 615x. D). Em segundo plano, cristais hexagonais microcristalino de gibbsita alojados em cavidades.

Os oxi-hidróxidos de Fe (hematita e goethita) estão presentes de duas formas: comumente são mais vistos como material de coloração vermelho amarronzado impregnado na matriz e na forma de cristais desenvolvidos.

Os poros recortam intensamente a matriz, geralmente estão interconectados formando uma estrutura *network*, quase sempre estão preenchidos por cristais. Delvigne (1998) denomina essa textura de *alteromorfo*, relacionada ao processo de dissolução, ou com o padrão interno dos minerais (fraturas e clivagens). Tais características influenciam nas

reações que ocorrem durante o intemperismo, resultando na distribuição, orientação e morfologia dos produtos secundários.

Em observações ao MEV, os cristais lamelares subédricos de caulinita estão presentes na matriz do material (Figura 4.10C), distribuídos de forma aleatória. Texturalmente é intensamente porosa.

Poros e *cutans* estão preenchidos e revestidos internamente por cristais de gibbsita microcristalina (Figura 4.10D) de formato hexagonal. Todavia, alguns cristais apresentam bordas irregulares e/ou corroídas e ocorrem comumente de maneira agregada.

Tanto a matriz como os cristais de gibbsita estão associados com material de alto teor ferro-titânico, podendo estar relacionado aos óxidos gerados por alteração de Ilmenita ou titano-magnetita (Kotschoubey *et al.* 2005).

Horizonte Bauxita Cristalizada (BC)

O horizonte BCBA apresenta maior espessura dentre os horizontes estudados, alcançando até 1,70 metros. Apresenta coloração variando de vermelho alaranjado a marrom avermelhada.

Quando se trata do perfil 1, este horizonte destaca-se por conter variações mineralógicas e texturais: A base é constituída essencialmente por matriz caulínítico, com menores proporções de hematita, goethita e gibbsita (Figura 4.11A). Texturalmente é intensamente porosa, bastante incoeso.

Nódulos porcelanados são frequentes, geralmente apresentam dimensões superiores (alcançando até 5 cm) quando comparado com os nódulos do horizonte sotoposto. Exibem formas sub-angulosas e irregulares, são vistos tanto agrupados e isolados, em alguns, os oxihidróxidos de Fe estão impregnados de maneira superficial ou penetrativa.

O topo do horizonte é caracterizado por ser bastante coeso, principalmente nas porções onde há concentração de concreções ferruginosas, estas constituem cerca de 70% desse arcabouço. Tais concreções apresentam formas irregulares e estão cimentadas por material caulínítico de coloração vermelho alaranjado.

Observa-se localmente a presença de nódulos porcelanados. Os poros, em geral, estão interconectados, e são mais expressivos nas concreções ferruginosas (Figura 4.11B), conferindo-lhe assim textura *boxwork*.

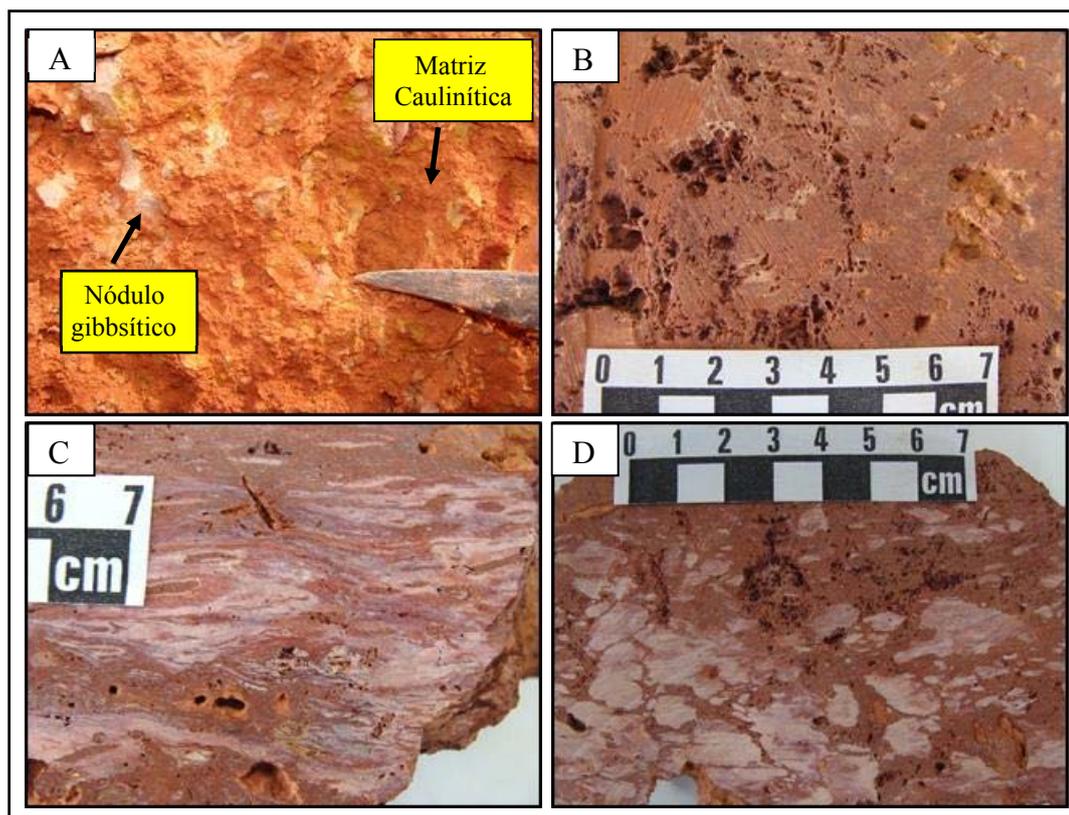


Figura 4.11 - Imagens macroscópicas do horizonte Bauxita Cristalizada (BC). A) Horizonte *in situ*, exibindo os nódulos gibbsíticos envolvidos pela matriz argilosa. B) Abundância de poros conectados e isolados na concreção ferruginosa. C) Estruturas laminares presentes no perfil 2. D) Estruturas em formato sub-anguloso presentes no perfil 2.

Este horizonte, no perfil 2, se comporta de maneira “homogênea”, pois não existe variação mineralógica, nem textural.

As concreções ferruginosas e nódulos gibbsíticos estão dispostos de maneira aleatória em todo o horizonte, ambos estão envolvidos por matriz caulinítica.

Pontualmente, as concreções apresentam algumas peculiaridades em relação ao perfil 1. Localmente, porções caulinitas estão dispostas como laminações plano-paralelas (Figura 4.11C) e porções sub-arredondadas (Figura 4.11D), ambas de dimensões milimétricas.

A identificação da mineralogia representativa deste horizonte por DRX (amostra total), indicado na Figura 4.12, permite observar que a fase dominante é a gibbsita, indicada pelo pico $d_{(002)} = 4,48 \text{ \AA}$, caracterizado pela elevada intensidade e definição.

Nota-se, porém, que os picos correspondentes às fases subordinadas (caulinita, goethita e hematita) apresentam-se menos intensos.

Em estudo de detalhe na amostra verificou-se que a porção argilosa (matriz) é composta predominantemente por gibbsita, em menores proporções é formada por caulinita, hematita e goethita-aluminosa (Figura 4.13).

A porção correspondente à concreção ferruginosa é também composta por gibbsita, onde seus picos estão orientados e bem definidos. As fases subordinadas são formadas pelos minerais caulinita, hematita e goethita-aluminosa.

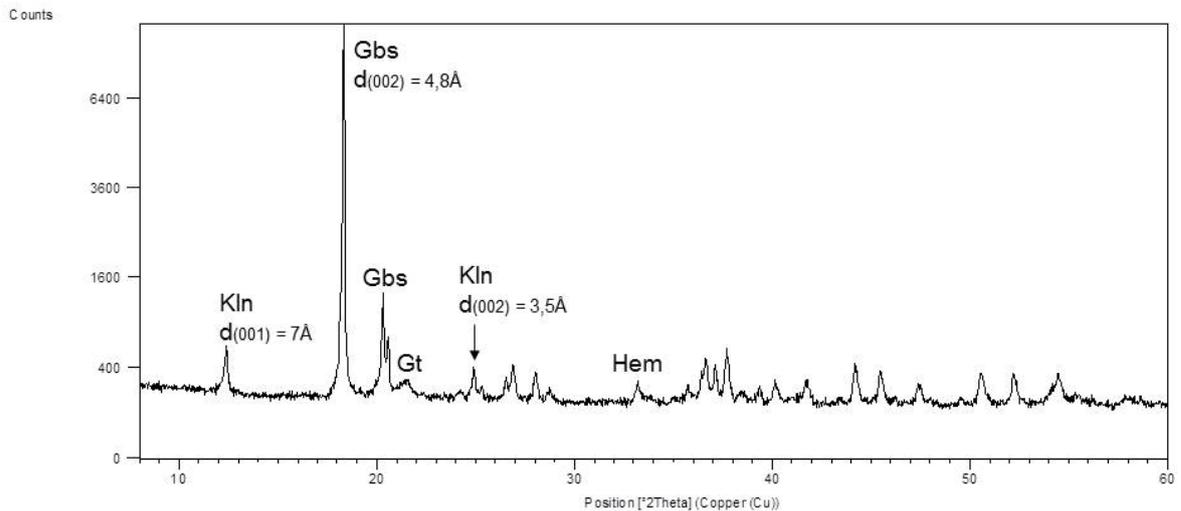


Figura 4.12 - Difratograma de Raios-X representativo do horizonte BC (amostra total), exibindo mineral de gibbsita como fase principal. Kln = Caulinita, Gbs= Gibbsita Gt= Goethita-aluminosa e Hem= Hematita, compõem a fase subordinada.

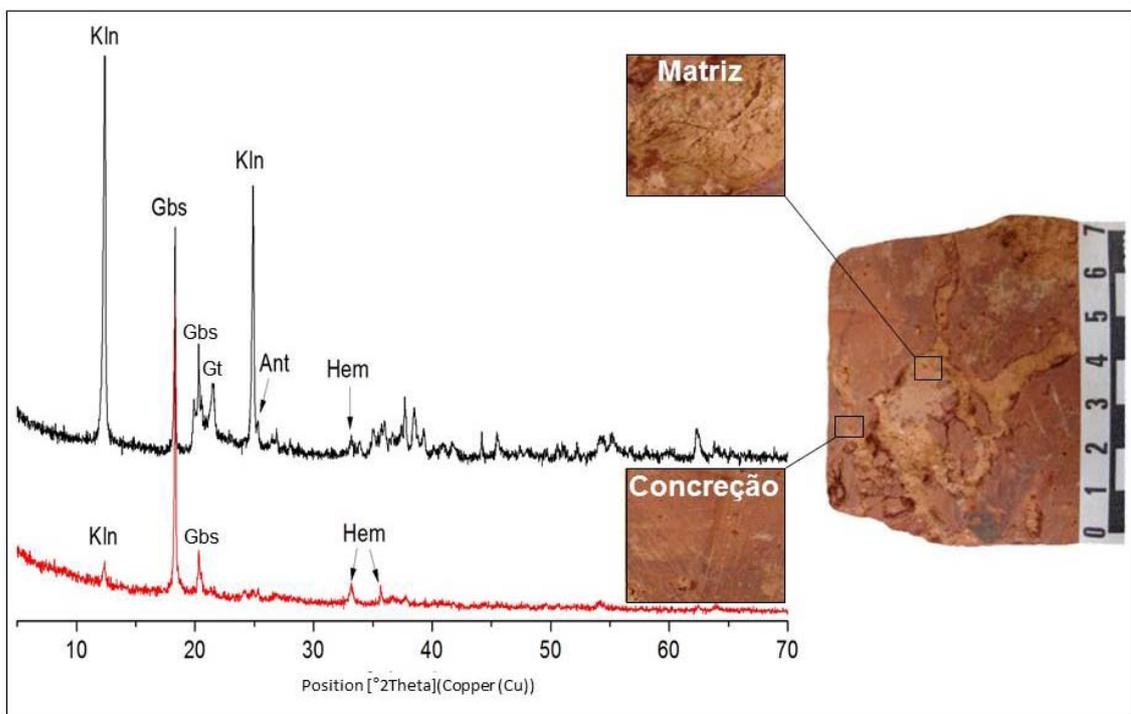


Figura 4.13 - Difratogramas de Raios-X, amostra de detalhe, das porções distintas da amostra representativa do horizonte BC, que compreendem a matriz e concreção ferruginosa. Gbs= Gibbsita, Kln = Caulinita, Gt = Goethita-aluminosa, Ant = Anatásio e Hem = Hematita.

Microscopicamente foi identificado um plasma caulínítico-gibbsítico, de coloração amarelo acinzentado (Figura 4.14A). Composicionalmente é formado por caulinita, gibbsita criptocristalina e oxi-hidróxido de Fe.

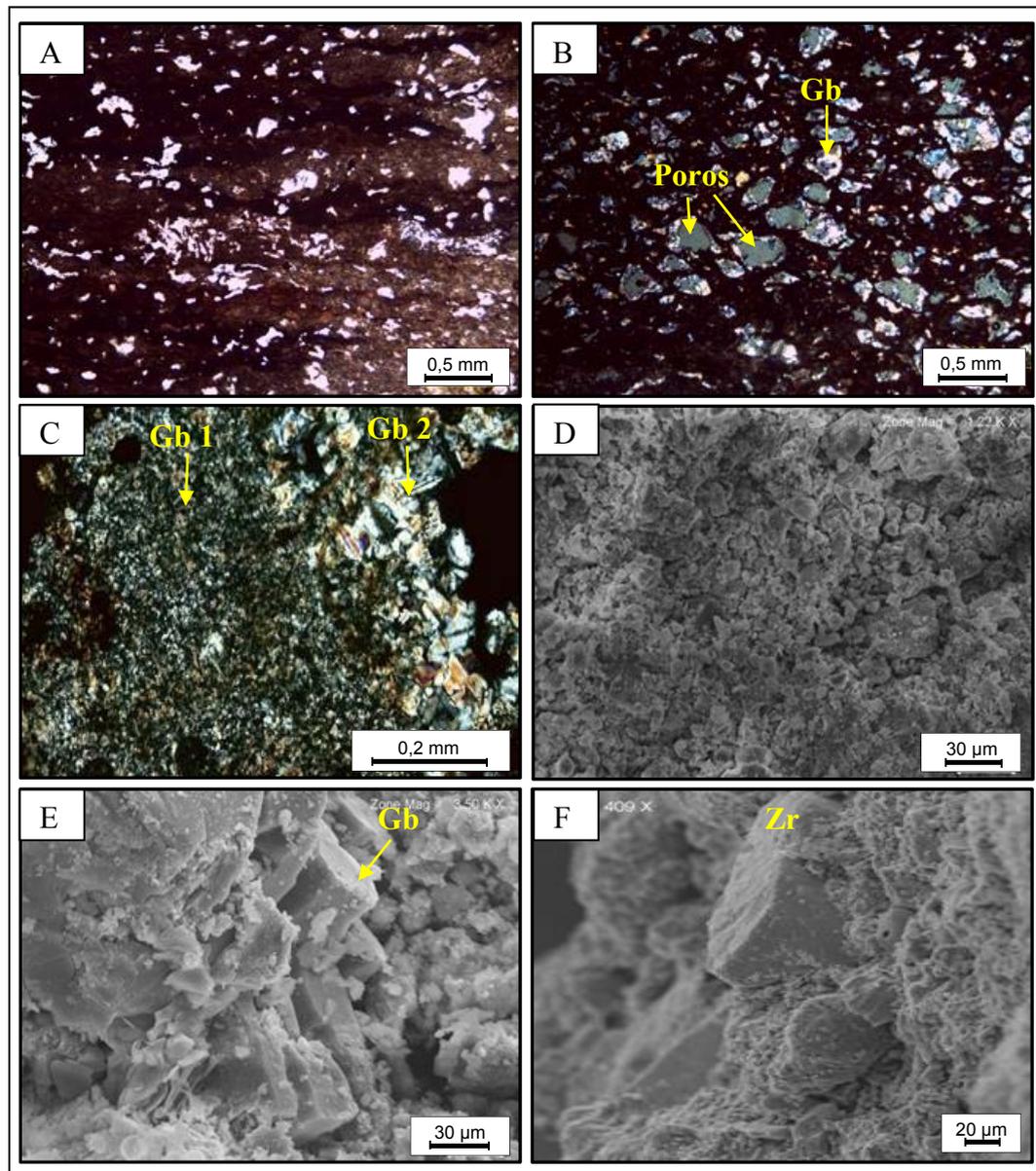


Figura 4.14 - Aspectos microscópicos do horizonte BC. A) Porções caulíníticas associadas com porções contendo alto teor de Fe, ambas constituem a matriz deste horizonte, observa-se poros preenchidos por gibbsita microcristalina (pontos luminosos). B) Poros de forma sub-arredondados a irregular de dimensões em torno de 3 mm, isolados e por vezes interconectados, revestidos e preenchidos por gibbsita. C) Associação entre gibbsita criptocristalina (matriz argilosa) – Gb 1, e gibbsita microcristalina (revestindo a parede dos poros) – Gb 2. D) Imagem obtida via MEV da matriz caulínítica de hábito lamelar. E) Detalhe dos cristais hexagonais de gibbsita, agregados, preenchendo poros. F) Cristal de zircão alojada na matriz caulínítica, o contorno original do mineral encontra-se parcialmente preservado. Gb= Gibbsita e Zr= Zircão.

Em geral, apresenta textura intensamente porosa. Poros e *cutans* apresentam dimensões milimétricas, e estão totalmente ou parcialmente preenchidos por cristais de gibbsita microcristalina e criptocristalina (Figura 4.14B). Estes cristais apresentam dimensões em torno de 12,5 μm , formas subédricas e alongados.

Concentrações de oxi-hidróxido de Fe, de coloração vermelho ocre, comumente são observadas na matriz, apresentam contato irregular com porções caulíníticas.

Minerais opacos são encontrados de maneira frequente, alguns cristais estão alterando na borda, em virtude da desestabilização dos mesmos.

Em imagens detectadas por elétrons secundários por MEV, foi possível visualizar as lamelas de caulinita (Figura 4.14D) e estão dispersas de maneira aleatória por toda matriz.

Os cristais de gibbsita apresentam hábito hexagonal (Figura 4.14E), ocorrem de maneira agregada, e são encontrados abundantemente em *voids e cutans*, estão associados à matriz caulínítica-gibbsítica.

Ao longo do estudo micromorfológico foi possível encontrar o mineral zircão, parcialmente corroído como observado na Figura 4.14F.

Horizonte Laterita Ferruginosa (LF)

Este horizonte está localizado na porção intermediária do perfil, com espessura em torno de 65 cm em ambos os perfis. Apresenta coloração vermelho amarronzado, texturalmente poroso e bastante coeso.

Nódulos ferruginosos estão presentes de maneira abundante no arcabouço deste horizonte, de dimensões equivalentes a 1 cm, possuem formatos sub-angulosos a irregular (Figuras 4.15B e C).

Geralmente ocorrem de maneira agregada (Figura 4.15C), por vezes, isolados, e sem orientação preferencial. Internamente, as cavidades são preenchidas por cristais de gibbsita.

Tais nódulos são revestidos externamente por córtex milimétrico de goethita (Figura 4.15A), em conjunto apresenta aspecto semelhante à “pele de onça”, análogo ao que foi descrito por Costa (1991), em estudo acerca das lateritas da Amazônia.

Além de nódulos, concreções ferruginosas (alcançando dimensões de até 2 cm) também fazem parte do arcabouço geral deste horizonte. Sua gênese se deve ao mecanismo de cimentação e endurecimento, por acúmulo de material em condições centrípetas, em poros de pequenas dimensões (Tardy, 1993).

Esses materiais ferruginosos (nódulos e concreções) estão envoltos por matriz argilosa, esta é formada mineralogicamente por caulinita, e em menores proporções por gibbsita criptocristalina, hematita e goethita, este último mineral ocorre localmente (Figura 4.15D).

Ao longo do estudo é notável a frequente associação de porções com elevada concentração de Fe com porções de alto teor caulínico-gibbsítico (Figura 4.15E).

A relação de contato com o horizonte sobreposto (BC) ocorre de maneira discordante, todavia ao se tratar do horizonte sotoposto (BN) se comporta de modo gradual (Figura 4.15F).

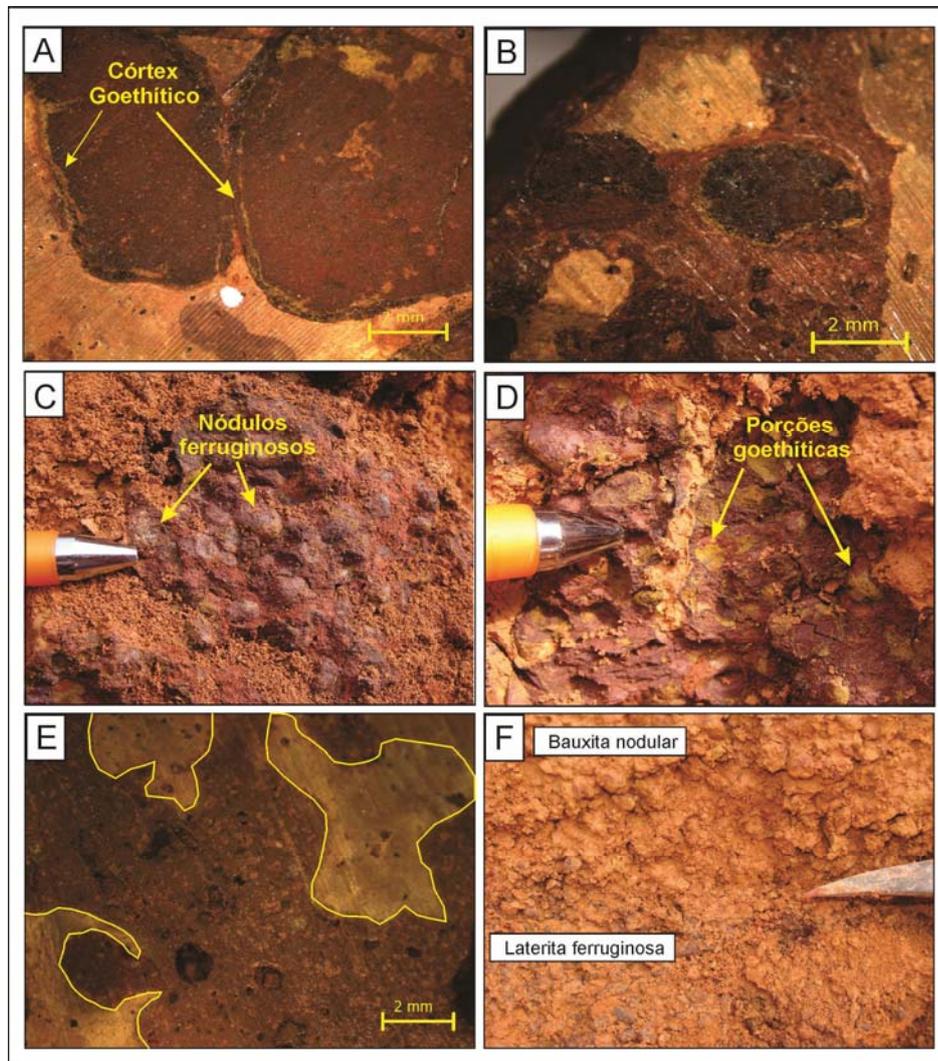


Figura 4.15 - Feições macroscópicas do horizonte Laterita Ferruginosa (LF). A) e B) Nódulos ferruginosos de formato sub-arredondados envoltos por córtex goethítico milimétrico. C) Agregação de nódulos ferruginosos de formato sub-arredondados associados com goethita-aluminosa. D) Moldes de goethita (amarelo) em concreções ferruginosas. E) Porções de composição caulínico-gibbsítico (coloração amarelada) associadas com matriz argilosa com alta concentração de oxihidróxido de Fe (coloração vermelho amarronzado). F) Contato gradativo entre o horizonte LF e BN

Análise por DRX (amostra total) mostra a presença da Gibbsita como fase dominante, atestado pelo pico $d_{(002)} = 4,84 \text{ \AA}$, conforme mostra o difratograma da figura 4.16.

A fase subordinada é formada pelos minerais de caulinita, goethita e hematita, este último apresenta picos de reflexão mais expressivos, além do *background* relativamente elevado, em relação aos difratogramas estudados.

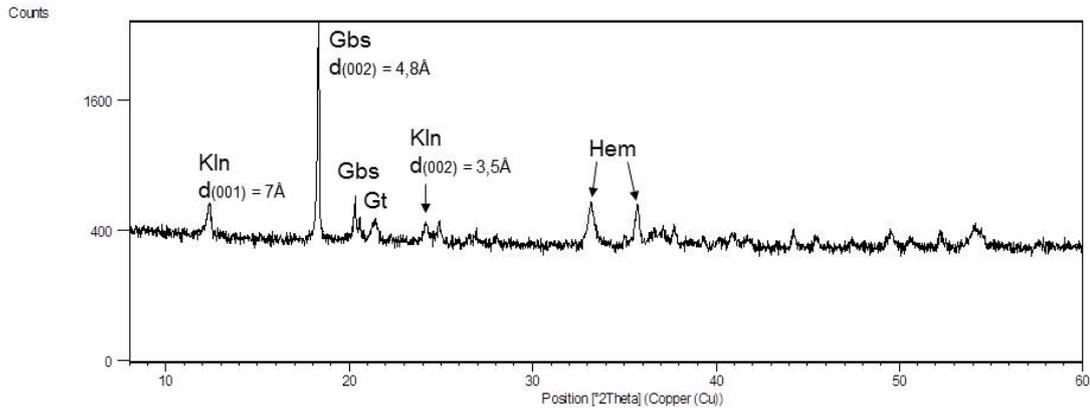


Figura 4.16 - Difratograma demonstrativo do horizonte LF (amostra total) exibindo a elevada intensidade do pico de reflexão d_{001} da gibbsita. Kln= Caulinita, Gbs= Gibbsita, Gt= Goethita e Hem= Hematita.

Porções específicas da amostra foram analisadas por DRX (micropreparação) (Figura 4.17). Análise da porção vermelha alaranjada corresponde a matriz do horizonte, exibindo a caulinita como mineral dominante. Gibbsita, goethita e traços de anatásio perfazem a fase secundária.

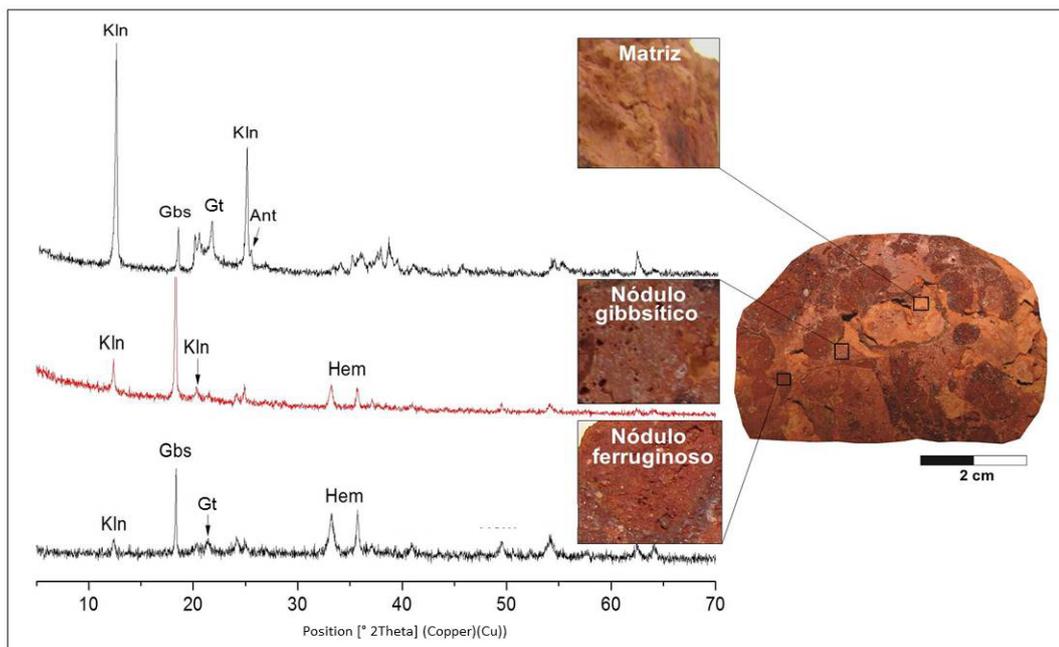


Figura 4.17 - Detalhamento mineralógico, por DRX pela técnica de micropreparação, das porções distintas da amostra representativa do horizonte LF. Kln= Caulinita, Gbs= Gibbsita, Gt= Goethita-aluminosa e Hem= Hematita

Conforme mostra o difratograma representativo da mineralogia dos nódulos vermelho roxeado, a fase dominante é formada por gibbsita. Entretanto, é possível visualizar, em menores proporções, picos de caulinita e hematita.

O difratograma correspondente aos nódulos de coloração vermelho amarronzado revelou como fase dominante o mineral gibbsita. Nota-se elevada intensidade dos picos correspondentes à hematita, além deste mineral, a caulinita também forma a fase subordinada deste material.

Em análise petrográfica observa-se a presença de um plasma de caulínítico, formada em menores proporções por gibbsita, goethita e hematita.

Associados com o plasma encontram-se nódulos ferruginosos de coloração vermelho amarronzado, com dimensões em torno de 3 mm. Geralmente de formato sub-anguloso, entretanto, podem ser vistos formas irregulares (Figura 4.18A).

Alguns nódulos são revestidos externamente por córtex goethítico de coloração amarelo ocre. Internamente contem inúmeros poros de formato irregular, que estão preenchidos totalmente por gibbsita microcristalina subédrica (Figura 4.18B), estes nódulos correspondem aproximadamente a 60% do arcabouço.

Sistemas de poros recortam a matriz em apreço, os quais estão preenchidos totalmente ou parcialmente por cristais de gibbsita (Figura 4.18D). Costa *et al.* (2014) explica que este padrão ocorre em virtude da contração do plasma gibbsítico, gerando microfissuras e cavidades irregulares por meio da percolação de soluções composta essencialmente por complexos de hidróxido de alumínio, que conseqüentemente precipita em forma de gibbsita mesocristalina.

Por meio de estudo morfológico em microescala por MEV, observa-se a textura intensamente porosa da matriz ferro-caulínítica (Figura 4.18E).

Cristais hexagonais de gibbsita (Figuras 4.18F e G) estão alojados nos poros, geralmente são visualizados de maneira agregadas, e alguns apresentam bordas corroídas.

Vários minerais são dissolvidos em detrimento da desestabilização provocada pelo meio. Cristais de quartzo comumente sofrem essa ação durante o processo intempérico, resultando em moldes negativos (Figura 4.18H), gerando assim inúmeros poros na matriz.

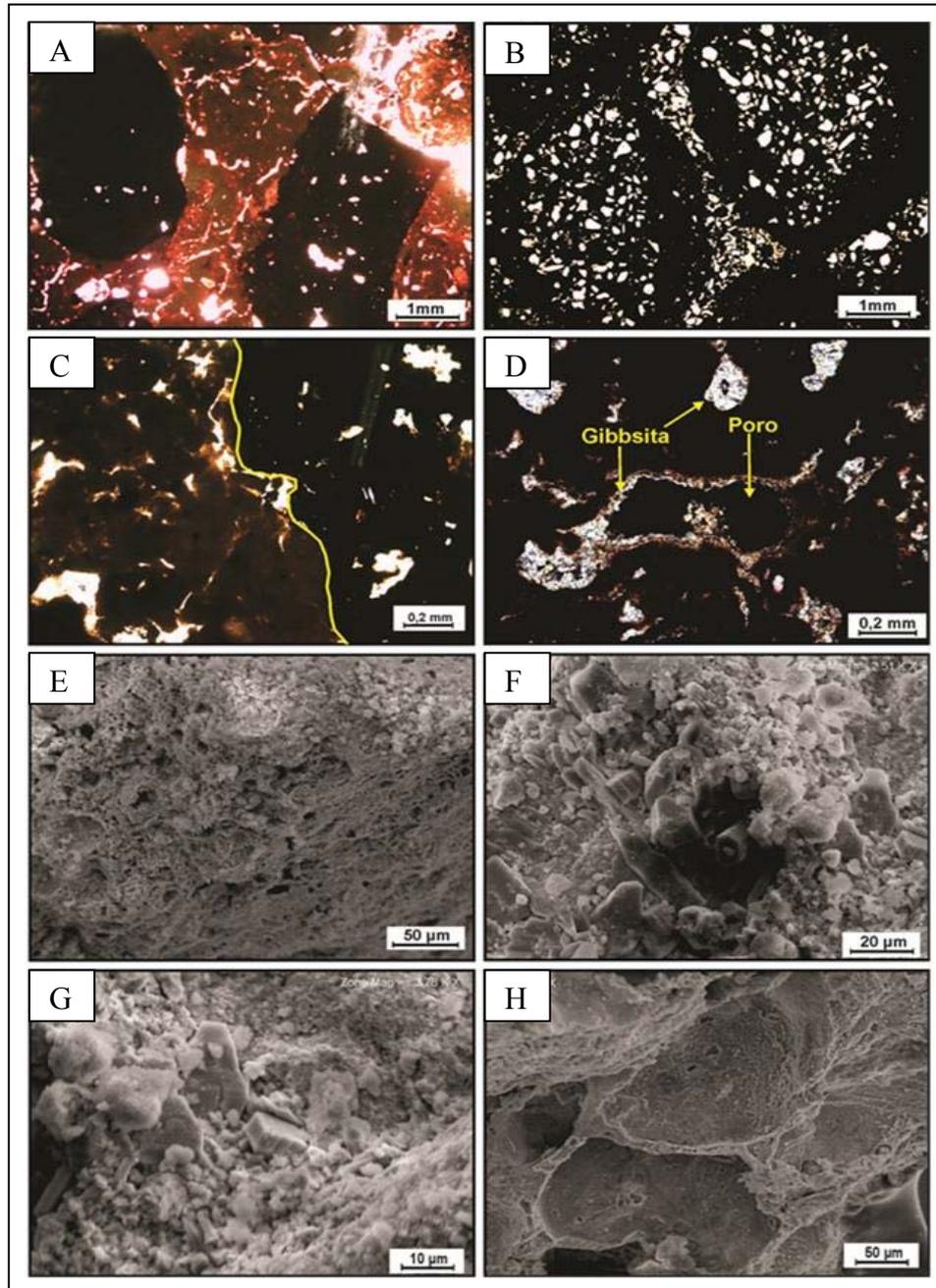


Figura 4.18 - Fotomicrografia das principais feições do Horizonte LF. A) Nódulos ferruginosos de formato sub-anguloso imersos em matriz caulinitica. B) Gibbsita criptocristalina presente na matriz e preenchendo poros em nódulos ferruginosos. C) Contato entre as porções mais caulinitizada (vermelho amarelado) e mais ferruginosa (vermelho amarronzado). D) Poros irregulares interconectados medindo em torno de 0,5 mm, encontram-se parcialmente e totalmente preenchidas por gibbsita microcristalina. e) Imagem da matriz ferro-caulinita obtida via MEV, observa-se a grande quantidade de poros irregulares presentes. F) e G) Cristais microcristalino de gibbsita em hábito prismático associados com material caulinitico. H) Moldes de dissolução em virtude da lixiviação de elementos.

Horizonte Bauxita Nodular (BN)

Presente apenas no perfil 1, medindo em torno de 1 m de espessura, este horizonte apresenta coloração amarelo alaranjado.

Texturalmente é bastante poroso, por vezes, estão isolados e interconectados (Figura 4.19A).

Constituído por nódulos hematíticos (Figuras 4.19B e C), de dimensões em torno de 1 cm, apresenta formas angulosas e sub-angulosas (Figura 4.19D). Alguns estão revestidos externamente por fina película goethítica.

Concreções gibbsíticas também formam o arcabouço deste horizonte, apresentam coloração cinza avermelhado. Exibem formas irregulares e dimensões variadas. Em geral são bastante compactos.

Tanto concreções como nódulos estão interconectados por uma matriz caulínica-gibbsítica de granulometria fina.

O contato com o horizonte sobreposto, denominando de capeamento argiloso, é discordante.

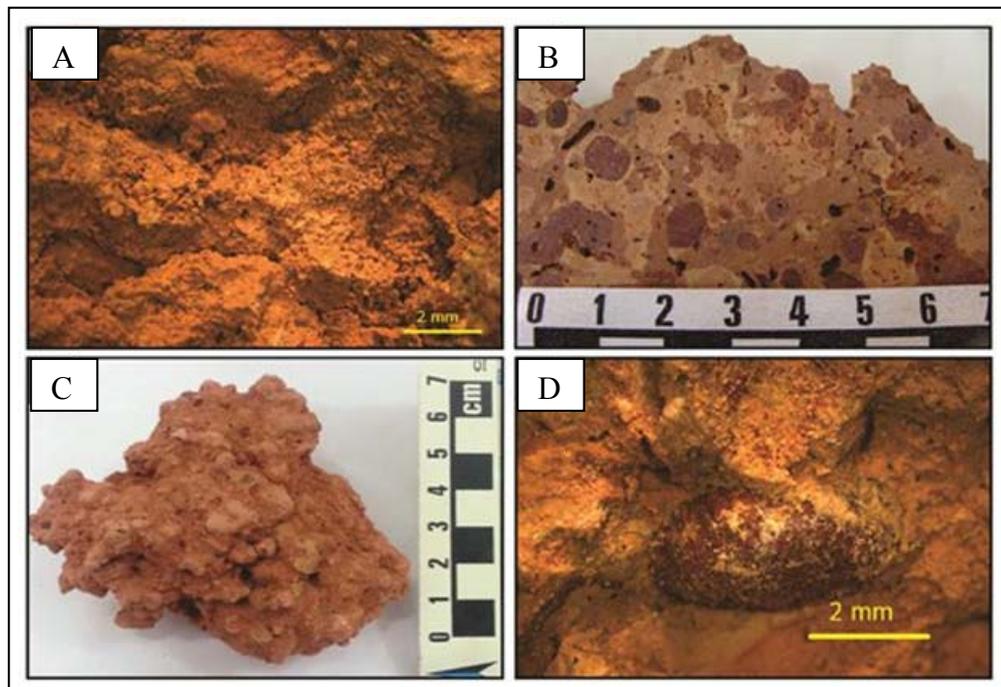


Figura 4.19 - Feições macroscópicas do horizonte Bauxita Nodular (BN). A) Matriz caulínica exibindo a densidade dos poros. B) Seção de perfil da amostra representativa deste horizonte, exibindo porções distintas tais como: nódulos ferruginosos, porção gibbsítica e matriz caulínica. C) Amostra exibindo o arcabouço mineralógico e textural. D) Nódulo ferruginoso de formato ovalado medindo em torno de 4 mm, imerso na matriz caulínica.

O padrão difratométrico obtido pela análise em amostra total do horizonte BN (Figura 4.20), revelou o pico mais intenso e bem definido, pertencente ao mineral gibbsita, indicada pela reflexão basal $d_{(001)} = 4,84 \text{ \AA}$. Caulinita, goethita-aluminosa e hematita correspondem a fase subordinada.

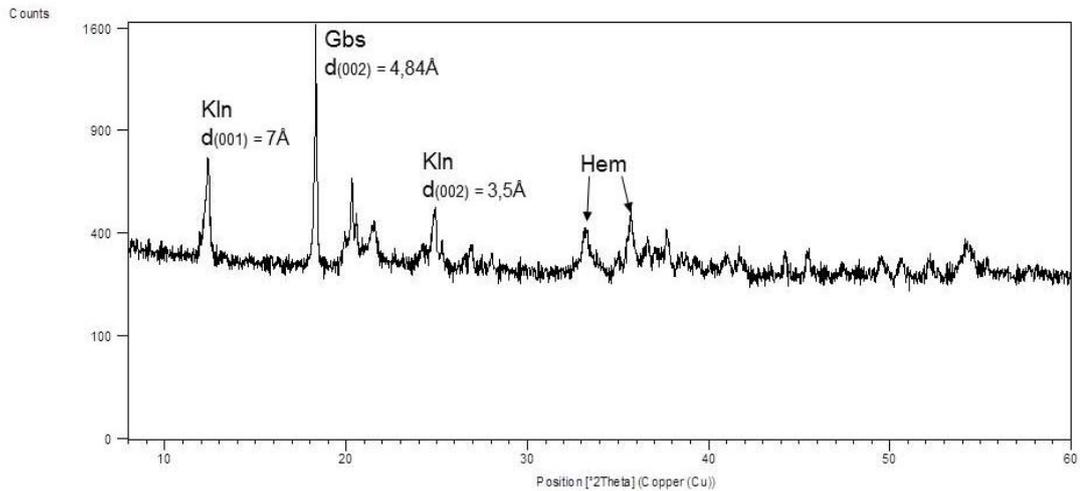


Figura 4.20 - Difratograma de Raios-X representativo do horizonte BN exibindo as principais fases mineralógicas que compõe o horizonte BN, a gibbsita apresenta-se como a fase dominante, e os cristais de caulinita e hematita formam a fase subordinada do conjunto. Kln= Caulinita, Gbs= Gibbsita e Hem= Hematita.

A figura 4.21 mostra os difratogramas analisados pela técnica da micropreparação correspondentes às porções distintas mineralogicamente e texturalmente.

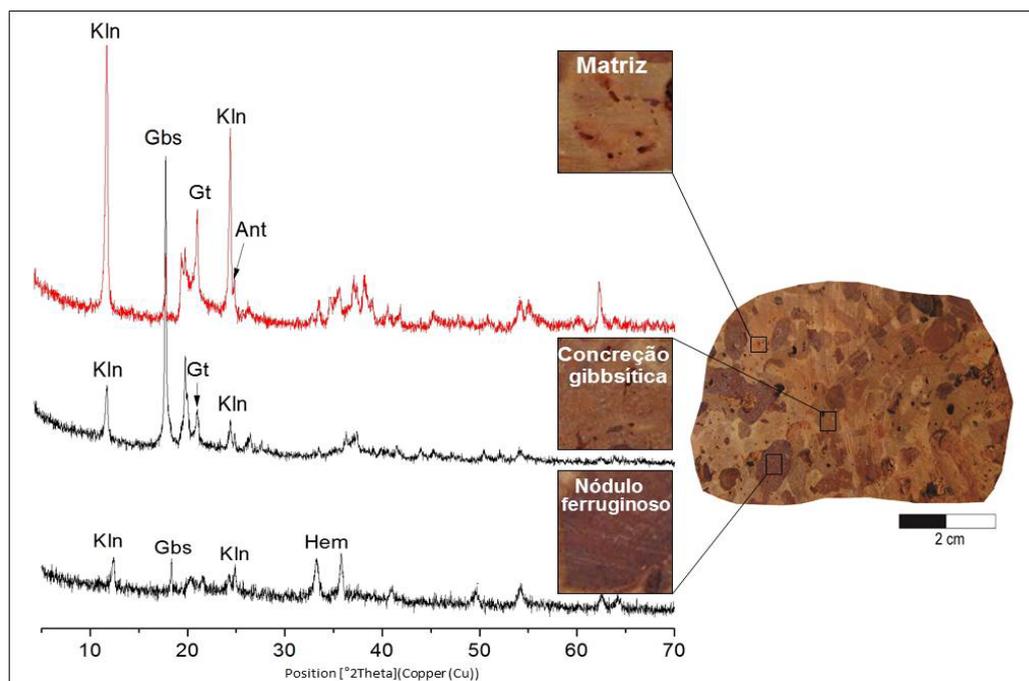


Figura 4.21 - Difratogramas de Raios-X de porções distintas, técnica da micropreparação, da amostra representativa do horizonte BN.

Em estudo petrográfico observa-se um plasma caulínítico-gibbsítico (Figura 4.22A) que envolve nódulos ferruginosos de coloração marrom avermelhado, de formatos angulosos a sub-arredondados (Figura 4.22B), de dimensão variando 0,6 – 1.5 mm, internamente podem ser vistos cristais microcristalino de gibbsita.

Em algumas porções há maior concentração de oxi-hidróxido de Fe, em outras há ocorrência de um material mais caulínítico, associado por vezes, com oxi-hidróxido de Fe.

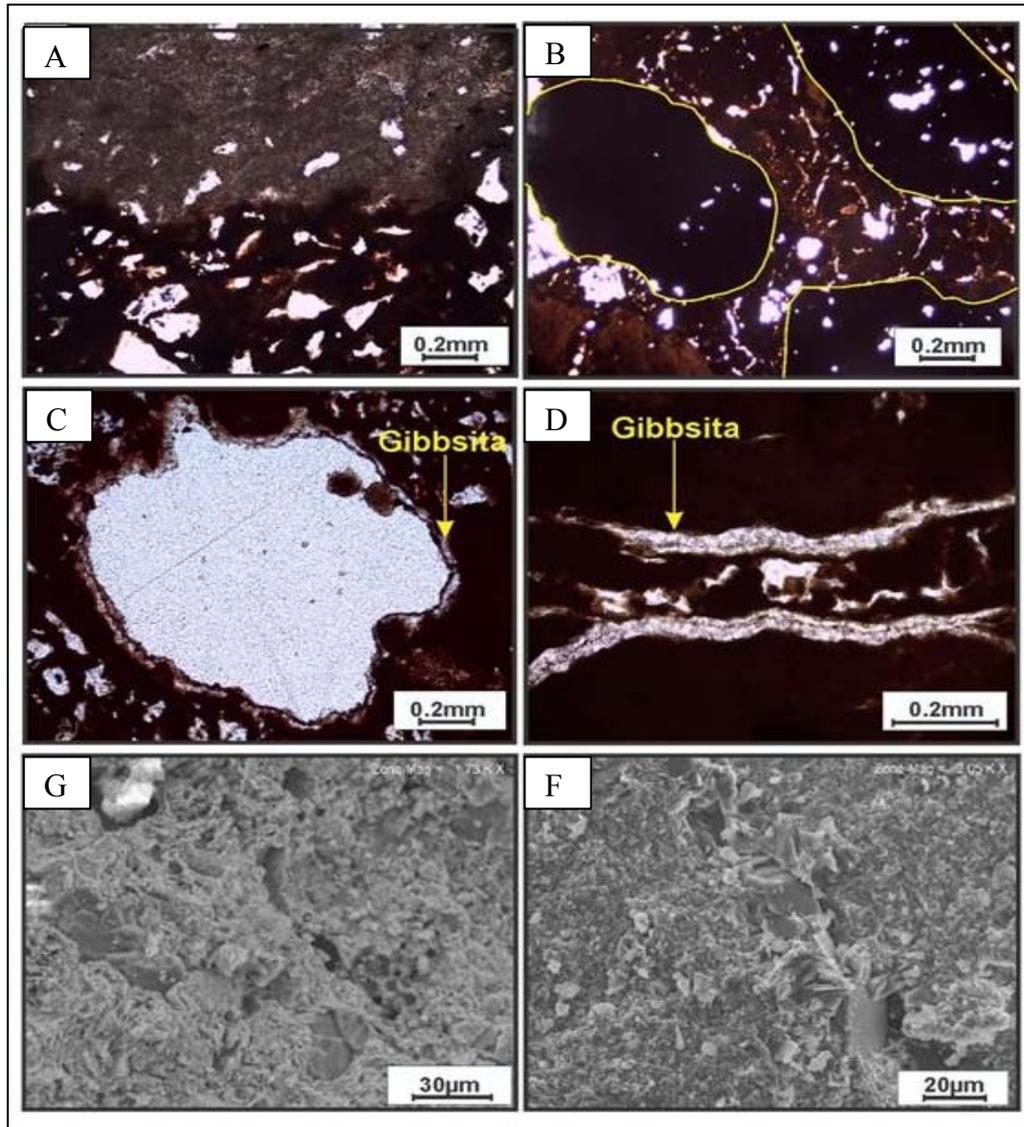


Figura 4.21 - Principais feições microscópicas do horizonte BN. A) Contato entre a porção mais ferruginosa e caulínítica. B) Nódulos ferruginosos sub-arredondadas imersos em matriz caulinita-ferruginosa. C) Cavidade medindo em torno de 0,6 mm, apresenta parede revestida por cristais de gibbsita. D) Cristais criptocristalino de gibbsita preenchendo *cutans*. E) Micrografia obtida em MEV mostrando a intensa porosidade na matriz. F) Imagem ampliada em 200 x mostrando os cristais hexagonais de gibbsita preenchendo *cutans*.

As cavidades, geralmente, estão preenchidas totalmente ou revestindo suas paredes por cristais gibbsita microcristalina (Figura 4.22C), de forma subédrica e euédrica. *Cutans* estão presentes com bastante frequência na seção estudada (Figura 4.22D).

Em algumas porções há maior concentração de oxi-hidróxido de Fe e porções mais ricas em caulinita também podem ser vistos na Figura 4.22E.

Imagens micromorfológicas obtidas via MEV por detector de elétrons secundários, exibem a matriz caulinitica (Figura 4.22D), como relatada nos registros anteriores, as lamelas de caulinita não possuem ordenamento preferencial visível. Cristais criptocristalinos de gibbsita são observados por toda a seção, assim como cristais hexagonais alojados em *cutons*.

Horizonte Bauxita Cristalizada Nodular (BNC)

Este horizonte está presente somente no topo do perfil 2, as principais feições macroscópicas estão ilustradas na Figura 4.23. Em termos de dimensão apresenta espessura em média de 1 m.

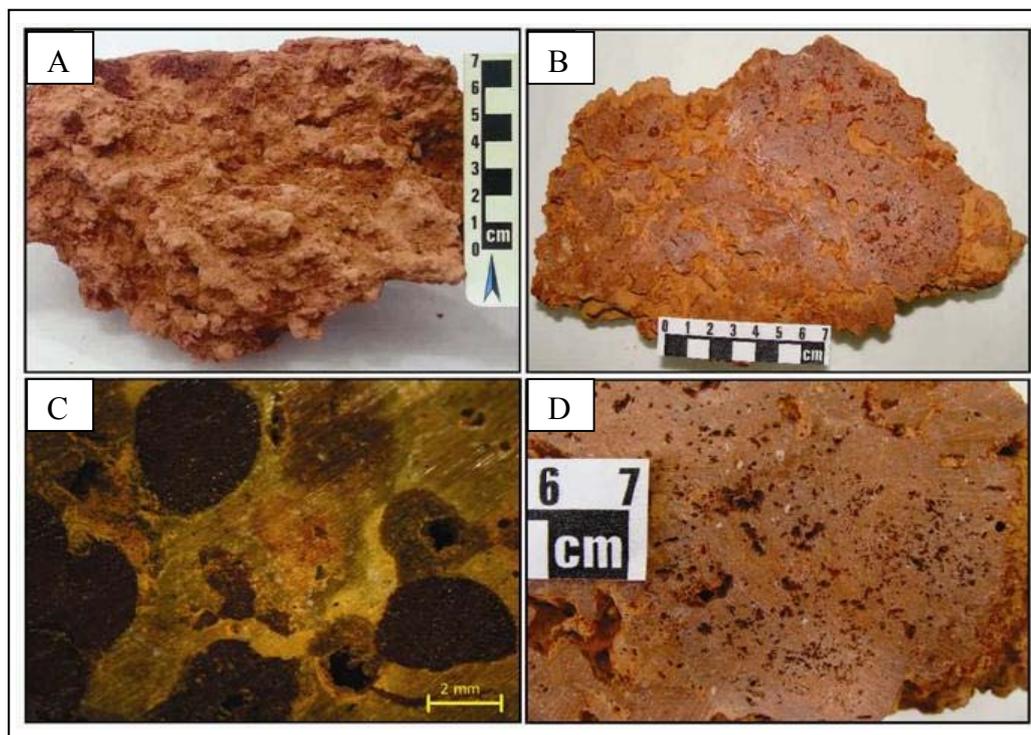


Figura 4.23 - Feições macroscópicas do horizonte Bauxita Nodular Cristalizada (BNC). A) Amostra de mão representativa do horizonte, constituída por nódulos ferruginosos e gibbsítico imersos em matriz caulinitica-gibbsítica. B) Corte em perfil da amostra, mostrando os nódulos de formato irregular, interconectadas. C) Imagem exibindo nódulos ferruginosos sub-arredondados de dimensões em torno de 3 mm, porções gibbsítica e caulinitica apresentando contorno difuso. D) Presença abundante de poros isolados, por vezes, interconectados, de dimensões milimétricas.

Em geral as características são bem similares ao horizonte bauxita nodular (BN), também constituído essencialmente por nódulos hematíticos de coloração vermelho amarronzado (Figuras 4.23A e B), de dimensões em média de 1 cm, formato sub-angulosos, por vezes, sub-arredondadas (Figura 4.23C). Raramente estão circundados por córtex goethítico.

Estes nódulos encontram-se dispersos e sem orientação preferencial no pacote horizontal, estão densamente empacotados por material caulínico, e em quantidades menores por hematita, goethita e gibbsita, e por porções gibbsíticas bastante coesas.

Os poros (Figura 4.23D) são vistos com frequência, geralmente estão interconectados e possuem contornos irregulares. O contato entre o horizonte sobreposto é discordante, caracterizando textura granodecrescente.

Ao se tratar do horizonte Bauxita nodular cristalizada, as análises por DRX por amostra total (Figura 4.24) apresenta como fase predominante a gibbsita, observada pela elevada intensidade do pico 4,8 Å. Representando a fase subordinada temos os minerais de caulinita e hematita, ambos apresentam pico de baixíssima intensidade em relação a gibbsita.

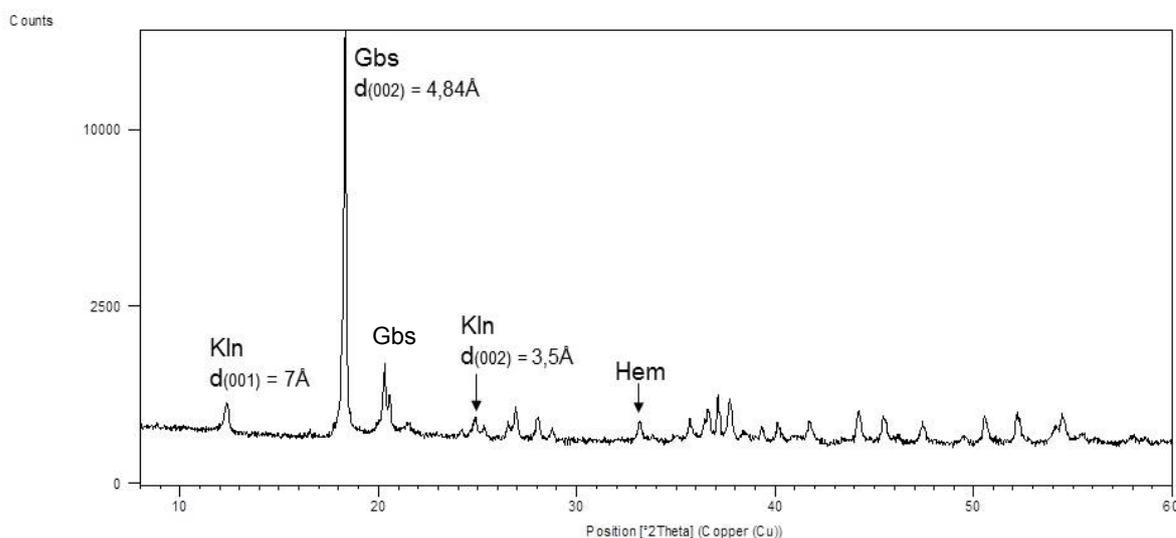


Figura 4.24 - Difratograma de Raios-X representativo do horizonte BNC (amostra total), exibindo mineral de gibbsita como fase principal, caulinita e hematita compõe a fase subordinada. Gbs= Gibbsita, Hem= Hematita e Kln= Caulinita.

As porções distintas mineralogicamente e texturalmente da amostra foram analisadas por meio da micropreparação (Figura 4.25). A porção compacta avermelhada foi diagnosticada com elevada concentração de hematita, entretanto a fase dominante é formada pelo mineral gibbsita e em pequenas proporções por caulinita. O difratograma correspondente

a matriz revela o mineral caulinita como fase dominante, apresentando picos de elevada intensidade e bem definidos. Os picos elevados e definidos de gibbsita representam a fase subordinada mais abundante, em menores proporções são visualizados os picos de hematita, goethita, anatásio e rutilo.

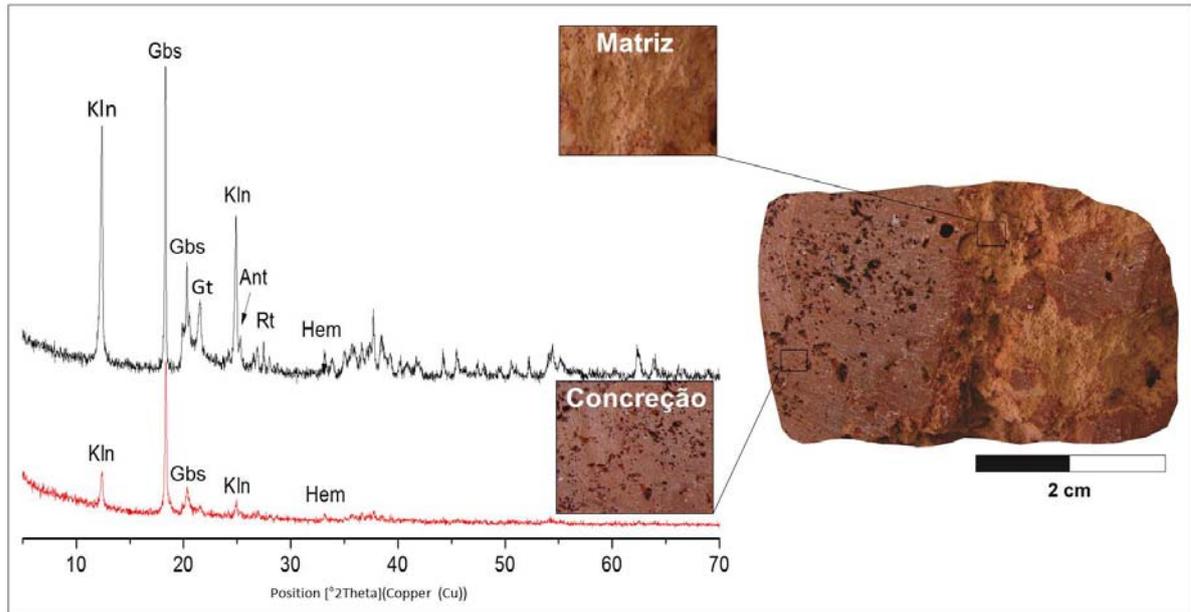


Figura 4.25 - Difratoformas de Raios-X de porções distintas da amostra representativa do horizonte BNC (amostra de detalhe), a matriz correspondente à porção alaranjada apresenta como fase dominante o mineral gibbsita, e as fases subordinadas formadas por cristais de caulinita, anatásio, rutilo e hematita, em relação aos nódulos, o difratograma mostra como fase principal o mineral gibbsita, e fase subordinada pelos cristais de caulinita e hematita.

A análise sob o microscópico óptico apresenta a matriz como um plasma difuso heterogêneo de composição caulinitica-ferruginoso-gibbsítico de granulação criptocristalina de coloração vermelho ocre, por vezes, há elevada concentração do teor de oxi-hidróxido de Fe, I_he conferindo uma coloração de marrom avermelhado.

Nódulos ferruginosos estão imersos nesses plasmas, em geral, apresentam dimensões em torno de 1 mm, entretanto é comum observar nódulos de tamanho inferiores e superiores. Internamente observa-se cristais de gibbsita alojados nos poros (Figura 4.26A).

Os poros estão presentes de maneira abundante nessa seção (Figura 4.26B), em algumas porções estão interconectados formando textura tipo *network*, quase sempre preenchidos totalmente por cristais de gibbsita microcristalina (Figura 4.26C), entretanto também são vistos estes cristais apenas revestindo sua parede. A disposição dos cristais de gibbsita nesses vazios, por vezes se assemelha ao hábito radial.

Fotomicrografias obtidas via MEV mostram aspecto morfológico da matriz caulinita-gibbsítica, assim como a presença abundante de poros (Figura 4.26D), tais cristais estão dispostos de maneira aleatória. Frequentemente são vistos cristais de gibbsitas agregados preenchendo cavidades (Figura 4.26E), também é comum a presença de poros em virtude da dissolução de minerais (Figura 4.26F).

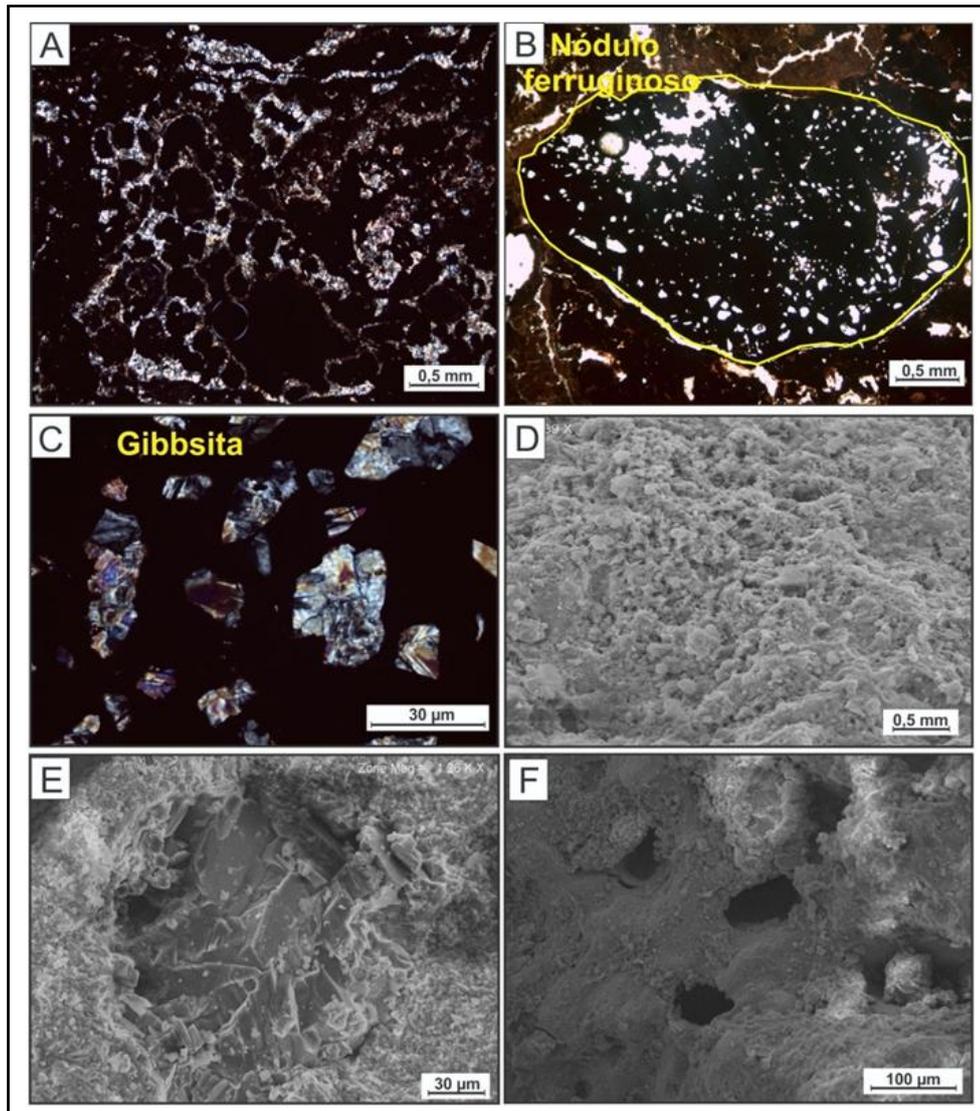


Figura 4.26 - Aspectos microscópicos do horizonte BNC. A) Presença de cristais de gibbsita criptocristalina e microcristalina associados à matriz caulinitica-gibbsítica. B) Cavidades de contorno irregulares, por vezes, interconectadas, apresentam paredes revestidas por cristais de gibbsita, observa-se a presença de *cutons* preenchidos pelos mesmos cristais. C) Poro de formato sub-arredondado revestido na parede por cristais de gibbsita. D) Aspecto da matriz caulinitica-gibbsítica obtida via MEV por elétrons secundários, imagem ampliada 639 x. E) Cristais de gibbsita alojados em cavidade, imagem ampliada 96 x. F) Presença de poros provenientes da dissolução de minerais, imagem ampliada 203 x.

4.3 GEOQUÍMICA

Os valores geoquímicos exibem o comportamento dos elementos nos distintos horizontes que edificam os perfis estudados.

Ambos os perfis apresentam dados semelhantes entre si e encontram-se ilustrados em formas de tabelas e gráficos que serão exibidos nesse tópico.

Perfil 1

A distribuição geoquímica do perfil 1 (Tabelas 4.1 e 4.2) revela o conteúdo de SiO₂ mais expressivo no horizonte Bauxita Amorfa, em média de 37,05%, em virtude da elevada concentração da caulinita que conseqüentemente contribui para maior quantidade de material argiloso.

No horizonte Bauxita Cristalizada os valores de SiO₂ diminuem para 6,02% e 3,47% nas subfácies argilosa e ferruginosa, respectivamente. A sílica presente no horizonte LF está em média de 8,04%, e este valor aumenta para 13,98% quando se trata do horizonte Bauxita Nodular.

O teor de Al₂O₃ se mantém equilibrado na parte intermediária do perfil (Figura 4.27). Os valores mais elevados estão nos horizontes BCBA e BC, em torno de 55%, devido a maior concentração de minerais de alumínio como a gibbsita. Os teores deste óxido permanecem em média de 37% nos horizontes Bauxita Argiloso (topo), Laterita Ferruginosa e Bauxita Nodular.

Tabela 4.1 - Composição química em porcentagem dos elementos maiores, perda por calcinação (PPC), alumina aproveitável (Al₂O₃ Ap) e sílica reativa (SiO₂ Reat), cedidas pela empresa Hydro, dos horizontes do perfil 1.

Horizonte	Elementos Maiores (%)				PPC (%)	Total	Al ₂ O ₃ Ap	SiO ₂ Reat
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂				
BN	13,98	37,88	26,9	1,58	19,37	99,71	24,00	7,83
LF	8,04	37,14	34,22	1,2	19,56	100,16	29,01	4,45
BC(B)	3,47	52,28	12,57	2,58	27,74	98,64	49,22	1,58
BC(A)	6,02	55,74	7,21	1,44	28,78	99,19	49,65	3,00
BCBA	8,12	53,82	7,1	1,79	27,88	98,71	45,64	4,49
BA(B)	19,8	49,25	4,93	1,42	23,5	98,9	32,07	10,41
BA(A)	37,55	37,07	7,33	1,79	15,13	98,87	5,29	21,99

Tabela 4.2 - Composição geoquímica dos elementos maiores e PPC do perfil 1, obtida pela ACME, dos horizontes do perfil 1.

Horizonte	Elementos Maiores (%)				PPC (%)	Total
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂		
BN	14,18	38,5	25,36	1,54	20,71	100,29
LF	8,73	37,61	31,97	1,22	20,1	99,63
BC(B)	3,72	52,54	12,64	2,68	27,9	99,48
BC(A)	6,16	55,75	7,1	1,53	29,2	99,74
BCBA	8,28	54,38	6,87	1,91	28,1	99,54
BA(B)	19,73	49,74	4,63	1,55	23,9	99,55
BA(A)	37,57	37,67	6,68	1,92	15,7	99,54

Os valores Fe₂O₃ se comportam de forma inversa do Al₂O₃ ao longo do perfil (Figura 4.27). O horizonte LF contém o maior teor de Fe, na ordem aproximada de 34%. Por outro lado, esse valor decai em relação a base do perfil, atingindo números de 4,93%.

Dentre os quatro maiores elementos, o TiO₂ apresenta os menores teores. O horizonte BCBA apresenta teor na ordem 1,79%, todavia ao atingir o topo do horizonte BC (subfácies ferruginosa) esse teor aumenta (2,58%). Nos horizontes LF e BN os valores estão na ordem de 1,20% e 1,58%, respectivamente.

Os valores de alumina aproveitável são significativos ao longo do perfil e apresentam características bastante semelhantes ao teor de Al₂O₃. O horizonte BA caracteriza-se por ter o menor teor, em torno de 5,29%. Entretanto esses valores apresentam acréscimos no horizonte BCBA, topo e base do horizonte BC, sinalizando os teores de 45,64%, 49,65% e 49,22%, respectivamente.

No horizonte LF essa média diminui para 29,01%. Esse valor decresce no horizonte BN com teor em média de 24%.

A sílica reativa está relacionada ao elevado teor de caulinita, onde este mineral compõe majoritariamente a paragênese dos horizontes mais argilosos. O teor mais expressivo corresponde ao horizonte BA (22%). Tal valor decresce significativamente até atingir o horizonte LF.

Os valores referentes à perda por calcinação (PPC) são significativos nos horizontes BCBA e BC, devido a maior quantidade de minerais hidratados. Os horizontes BA, LF e BN contêm os menores teores, 15, 20 e 21%, respectivamente.

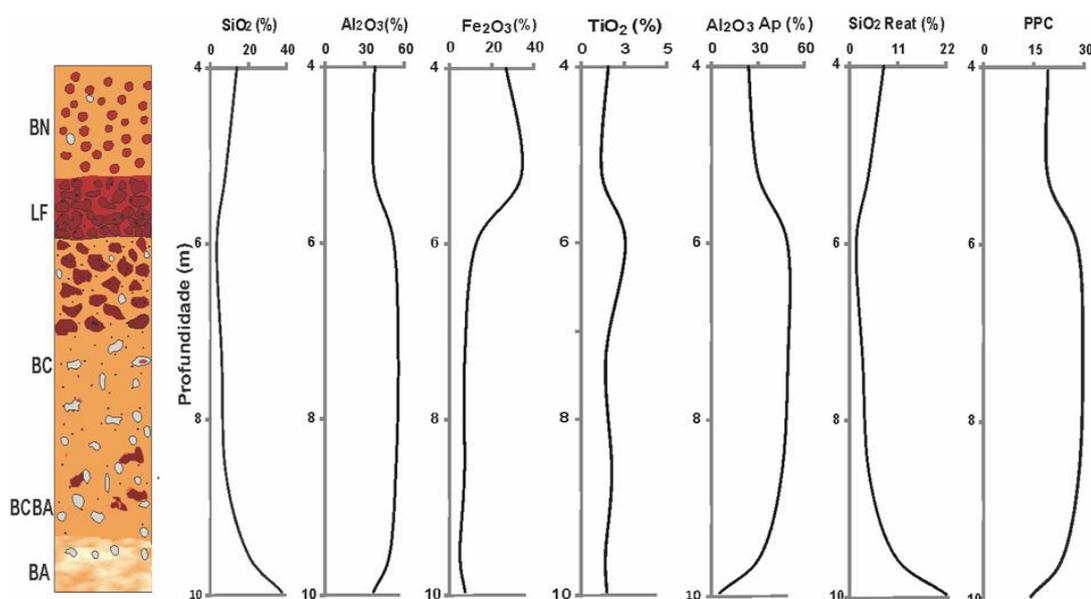


Figura 4.27 - Padrão geoquímico dos óxidos maiores, alumina aproveitável, sílica reativa e PPC do perfil 1.

Os elementos traços com seus respectivos valores estão dispostos na Tabela 4.3.

Os elementos mais enriquecidos ao longo do perfil bauxítico são representados por Zr e V. O primeiro apresenta seu maior teor (2295 ppm) no sub-horizonte BC(B), enquanto que o teor do vanádio é mais significativo (519 ppm) no horizonte LF.

Os valores de Ba e U, praticamente, decrescem em direção da base para o topo do perfil, exceto no sub-horizonte BC(B) que os teores apresentam um certo acréscimo.

Os elementos Nb, Hf, Sn e Ga se destacam no sub-horizonte BC(B) do perfil, entretanto são menos abundantes quando se trata do horizonte mais ferruginoso (LF) com exceção do Ga que apresenta seu menor teor na subfácies BC(A).

O Cu, Ni, Sb e Pb se mostram mais enriquecidos no horizonte Laterita Ferruginosa, na ordem de 1,6, 1, 1 e 21,4 ppm, respectivamente.

Os maiores teores Th (60 ppm) e Sc (15 ppm) ocorrem no sub-horizonte BC(B), por outro lado estão em menor concentração no sub-horizonte BC(A), com valores na ordem de 39 e 9 ppm.

O teor de Sr varia de 1,6 a 32 ppm, apresentando o seu teor mínimo no horizonte LF e o máximo no sub-horizonte BA(B). O W revela teores menor que 10 ppm. Os valores de Ta e Y destacam-se no horizonte BC(B), 5 e 47 ppm, respectivamente. O Co exhibe valores máximos na ordem de 6 ppm correspondente ao sub-horizonte BA(A).

Tabela 4.3 - Valores geoquímicos dos elementos traços correspondentes a cada horizonte que estruturam o perfil 1.

Elementos traços (ppm)	Horizonte																		
	Zr	V	Ga	Hf	Nb	Sn	Sr	Ta	Th	U	Co	W	Sc	Ba	Cu	Y	Ni	Pb	Sb
BN	1178	459	50	32	36,4	5	9	2,7	51,6	2,8	2	4,7	13	5	1	19	0,2	9	1
LF	801	519	57,6	22,5	26	3	6	2,2	57,8	2,5	3	3	12	4	1,6	13	1	21	1
BC(B)	2295	204	57,7	58,6	70,6	7	26	5	60	6,3	4	5,4	15	20	1,3	47	0,4	3	0,5
BC(A)	1201	108	38,4	31	36,7	4	16,3	2,2	39	3,4	4,7	5,6	9	14	1,5	23,4	0,5	1,8	0,4
BCBA	1816	110	47	44,8	48,6	4	22,6	3,6	50,3	4,5	2	3,7	12	16	1,5	35	0,3	1,7	0,2
BA(B)	1531	75	40,8	36,5	39	4	32	3	50	4	6	4,5	11	25	1,3	34	0,4	2,7	0,1
BA(A)	1871	101	44,8	51	50,6	5	29	4	53,7	4,5	2	3,7	14	24	1,2	39	0,3	2,5	0,2

A figura 4.28 ilustra a disposição dos elementos maiores mais abundantes ao longo do perfil bauxítico.

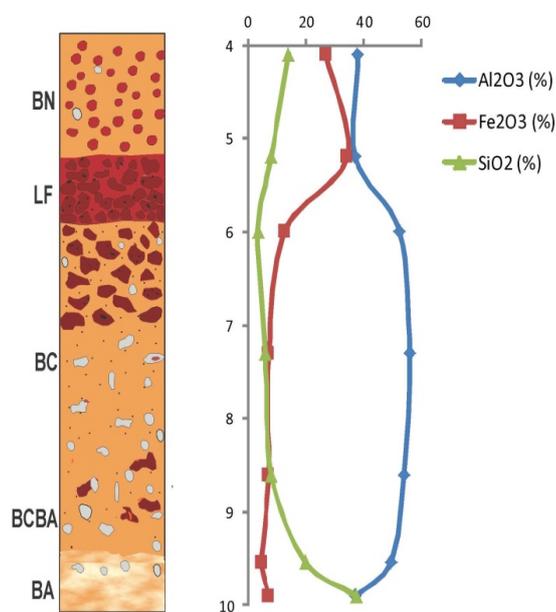


Figura 4.28 - Distribuição dos teores de óxidos Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 do perfil 1.

Vale ressaltar o comportamento inverso dos teores de Al_2O_3 em relação ao teor de Fe_2O_3 .

No horizonte BA, BCBA e base da BC os teores de Fe_2O_3 são baixos. Esses teores aumentam ao atingir os horizontes mais superiores do perfil (topo da BC, LF e BN). Os valores de Al_2O_3 são mais expressivos na porção inferior a intermediária do perfil, a partir deste ponto em direção ao topo, este valor decresce.

O diagrama triangular SiO_2 - Fe_2O_3 - Al_2O_3 (Figura 4.29) possui semelhança com o gráfico estudado por Varajão *et al.* (1989). Observa-se que as amostras estão concentradas na porção esquerda do diagrama, indicando o conteúdo significativo de Al nessas amostras, entretanto cada uma apresenta uma particularidade.

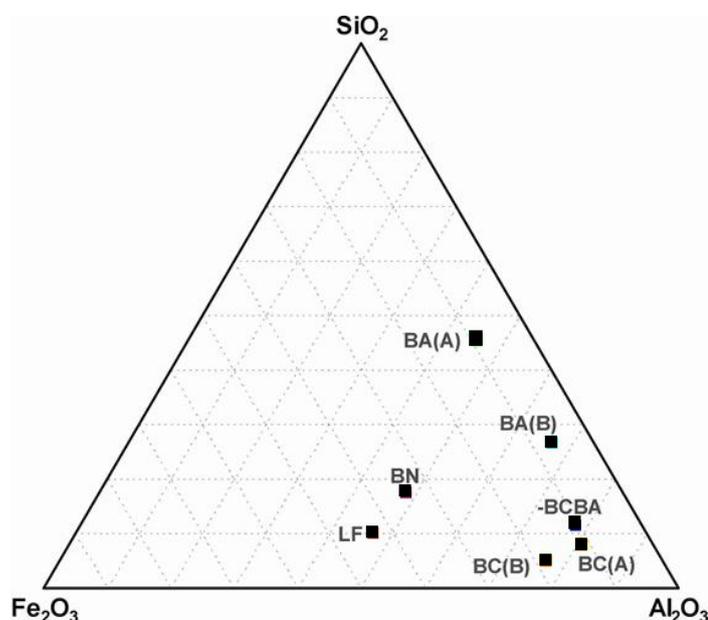


Figura 4.29 - Diagrama SiO_2 - Fe_2O_3 - Al_2O_3 relacionado ao perfil 1, mostrando a tendência das amostras serem mais aluminosas.

Os horizontes mais ricos em Al_2O_3 são BCBA, BC(A) e BC(B) devido a elevada quantidade de gibbsita. Os dois primeiros apresentam os menores teores de Fe_2O_3 em relação a BC(B).

As amostras mais ricas em caulinita advém dos sub-horizontes BA(A) e BA(B) pois o aporte de sílica é mais expressivo em detrimento da quantidade de matriz presente na base do perfil. Nos horizontes laterita ferruginosa (LF) e bauxita nodular (BN) ocorre o acréscimo de Fe_2O_3 e o decréscimo de SiO_2 .

Durante os estágios iniciais do intemperismo, os minerais primários de Ti a exemplo da biotita e Ilmenita, são mantidos na forma de anatásio (Boulangé & Carvalho, 1997).

Similar ao comportamento de Al e Fe, o Ti pode torna-se enriquecido relativamente ou absolutamente por meio de migração ou precipitação a partir de soluções (Valeton, 1972).

A relação entre os teores de Al_2O_3 x TiO_2 (Figura 4.30A) mostra-se positiva, caso semelhante as bauxitas estudadas por Boulangé & Carvalho (1997) e Kotschoubey *et al.* (2005).

O sub-horizonte BC(B) apresenta o valor máximo dessa correlação, uma vez que o valor de TiO_2 está por volta de 2,6% e de Al_2O_3 situa-se em 53%.

Por outro lado, a relação Fe_2O_3 x TiO_2 (Figura 4.30B) é negativa, uma vez que o valor de Fe_2O_3 mostra-se elevado quando comparado com o teor do TiO_2 .

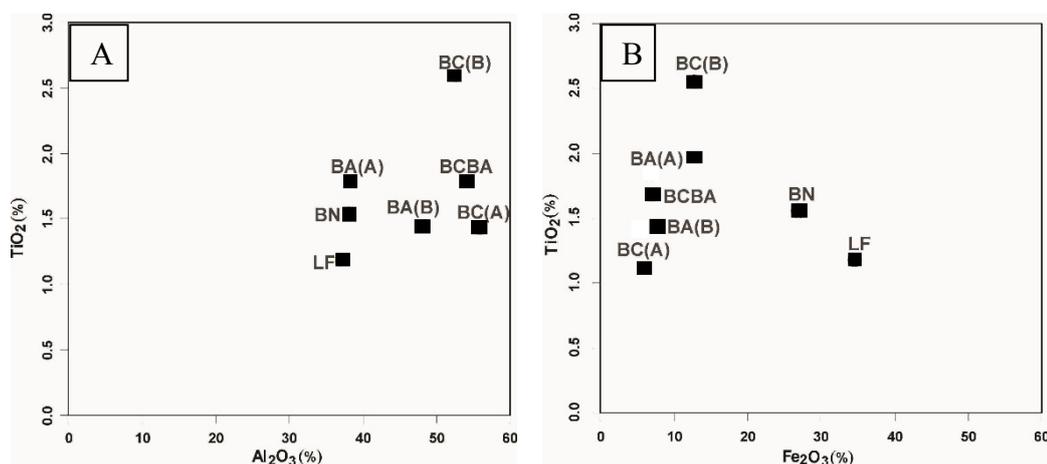


Figura 4.30 - A) Gráfico de correlação entre os teores de TiO_2 x Al_2O_3 . B) Diagrama de correlação entre os teores TiO_2 x Fe_2O_3 .

A análise dos elementos terras raras (ETR) nas amostras em estudo mostra que há predomínio do La e Ce sobre os demais elementos, em média de 108 e 110 ppm, respectivamente. Esses valores estão concentrados no topo do horizonte BA. Já o Eu, Tm e Tb apresentam os menores teores (Tabela 4.4).

Os elementos Nd, Sm, Gd, Y, Dy, Ho, Er, Yb e Lu possuem valores menores que 10 ppm, estes possuem valores elevados no topo do horizonte Bauxita Cristalizada, e seus menores teores são encontrados no horizonte Laterita Ferruginosa.

Em geral o menor teor de ETR no perfil corresponde ao horizonte LF, em média de 58 ppm. Enquanto que no topo do horizonte amorfo BA(B) este valor se eleva atingindo a ordem de 275 ppm.

Os ETRL (elementos terras raras leves) (49 – 225 ppm) são mais abundantes que ETRP (elementos terras raras pesados) (9 – 29 ppm) em todos os horizontes do perfil e representam em torno de 89 % do conteúdo total dos ETR. Em relação ao ETRL, o elemento mais abundante é o La seguido de Ce > Nd > Pr > Sm, entre os ETRP destaca-se o Dy, depois em ordem o Yb > Er > Gd > Ho > Tm > Lu > Eu.

O aumento grau de fracionamento entre os ETR leves e pesados dado pela razão $(La/Yb)_N$ na porção correspondente ao horizonte BA (15-10). Enquanto que na porção superior do perfil é de a razão $(La/Yb)_N$ é de cerca de 4,3 (BN), 4,4 (LF) e 7,1 (no topo do horizonte BC)

As variações nos valores da razão $(La/Yb)_N$ e $(La/Sm)_N$ e $(Gd/Yb)_N$ no perfil sugerem que no contexto geral, houve uma mobilização e fracionamento de ETR. O fracionamento tanto dos ETR leves quanto dos pesados é mais significativo na base do perfil.

A normalização dos ETR em relação ao condrito (Taylor & Maclann, 1985) (figura 4.31) resultou em curvas côncavas para cima e assimétrica para todos os horizontes em estudo, além da anomalia negativa em Eu.

O padrão da curva do horizonte amorfo - (BA(A) e BA(B)) – apresenta praticamente o mesmo comportamento do horizonte LF, com exceção do sutil aumento do teor de Pr. Já o padrão do horizonte BN diverge um pouco da base da BC(A). O primeiro apresenta um certo decréscimo no valor de Dy, enquanto o BC(A) revela maior enriquecimento em relação ao Pr. Ao se tratar do Horizonte BCBA, este exhibe sutil decaimento do teor de Ce.

Tabela 4.4 -Teores geoquímicos de ETR dos horizontes que estruturam o perfil 1.

Elementos ETR (ppm)																Σ ETRL	Σ ETRP	Σ ETR	(La/Yb) _n	(La/Sm) _n	(Gd/Yb) _n
	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu							
Horizonte																					
BN	20	28	2,3	6,6	1,4	0,3	1,6	0,4	2,5	0,8	2,6	0,4	3	0,6	58	12	70	4,3	8,2	0,5	
LF	17	24	2	5	1	0,3	1,3	0,3	2,3	0,5	1,8	0,3	2,5	0,4	50	10	60	4,4	10	0,4	
BC(B)	77	55	8,4	22	3,3	0,7	3,7	1	6,8	2	6	1	7	1,4	166	29	195	7,1	13	0,4	
BC(A)	53	46	5,4	13	1,8	0,4	2	0,4	3,4	0,8	3	0,5	3,6	0,7	120	14	134	9,5	17	0,5	
BCBA	67	59	7	17	2,3	0,5	3	0,6	5	1,4	4,4	0,7	5,7	1	152	22	174	7,6	17	0,4	
BA(B)	108	110	11	23	2,5	0,5	3	0,6	4,8	1,2	3,8	0,6	4,8	1	255	20	275	15	25	0,5	
BA(A)	90	100	8,7	20	2,7	0,6	3,2	0,7	5,7	1,6	5,4	0,8	6	1,2	222	25	247	10	19	0,5	

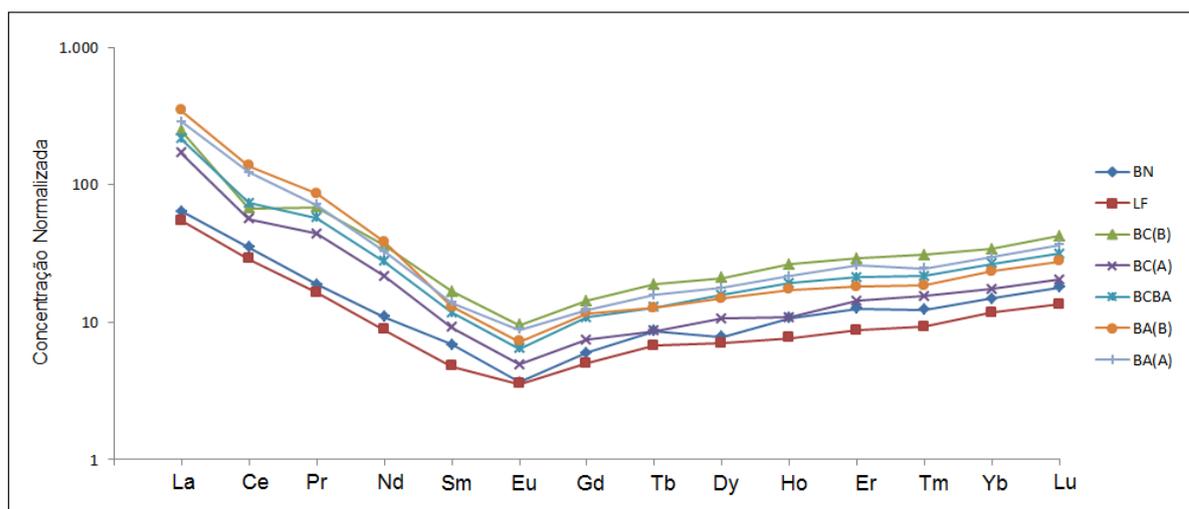


Figura 4.31 - Padrão de distribuição dos ETR normalizado para os condritos (Taylor & McLennan 1985) dos diferentes horizontes que estruturam o perfil 1.

Perfil 2

O comportamento geoquímico do perfil 2 (Tabelas 4.5 e 4.6) apresenta valores similares ao perfil 1.

O teor mais elevado de SiO_2 apresenta em torno de 13% no horizonte BA. Em relação ao Horizonte BCBA o valor deste elemento perfaz de 8,55%, SiO_2 apresenta-se em torno de 4,58 - 4,72%. O horizonte LF comporta o menor teor de SiO_2 ao longo do perfil, na ordem de 1,9%.

Tabela 4.5 - Composição química dos elementos maiores, PPC, $\text{Al}_2\text{O}_3\text{Ap}$ e SiO_2Reat distribuídos ao longo do perfil 2, de acordo com as análises cedidas pela empresa Hydro.

Horizonte	Elementos maiores (%)				PPC (%)	Total	$\text{Al}_2\text{O}_3\text{Ap}$	SiO_2Reat
	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2				
BNC	55,34	6,95	6,42	1,64	28,52	98,87	49,11	3,74
LF	36,74	40,59	1,89	0,97	20,27	100,46	34,62	0,69
BC	57,78	5,87	4,58	1,34	29,56	99,13	53,2	2,17
BCBA	56,65	4,35	8,55	1,02	28,18	98,75	49,21	4,04
BA	53,84	4	13	1,33	26,64	98,8	42,2	6,68

Os valores de Al_2O_3 são maiores nos horizontes BCBA, BC e BN, aproximadamente 56,65, 57,78 e 55,34%, respectivamente, uma vez que a gibbsita é o mineral mais abundante nestes horizontes. Por outro lado, o teor mais baixo corresponde ao horizonte LF (36,74%).

O Fe_2O_3 ocorre em proporção bastante significativa quando se trata do horizonte LF (40,59%), este teor reflete a elevada presença de concreções ferruginosas neste horizonte. Todavia, os teores nos demais horizontes não ultrapassam 7%.

O teor de TiO_2 é mais expressivo na parte superior do perfil (horizonte BNC), correspondendo ao valor de 1,64%.

A perda por calcinação (PPC) alcança os valores máximos, 29%, no horizonte BC. Esta perda resulta da eliminação de componentes voláteis H_2O e CO_2 (presente em matéria orgânica). O horizonte LF apresenta o menor valor, correspondendo a 20,27%.

A Al_2O_3 aproveitável deriva da quantidade de gibbsita presente no meio, portanto seu elevado teor corresponde ao horizonte BC, alcançando teor máximo na ordem de 53,2%. Entretanto o teor mínimo se concentra no horizonte LF, 34,62%.

Os teores mais expressivos de sílica reativa correspondem aos horizontes BA (6,6%) e BNC (3,74%). O horizonte LF comporta o menor valor, em torno de 0,7%.

Tabela 4.6 - Composição química dos elementos maiores distribuídos ao longo do perfil 2, analisadas pela ACMELabs.

Horizonte	Elementos maiores (%)				PPC (%)	Total
	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	TiO_2		
BNC	55,59	6,83	6,63	1,71	28,9	100,29
LF	37,03	39,44	2,01	0,93	20,3	99,63
BC	57,74	5,85	4,72	1,42	30	99,74
BCBA	57,21	4,21	8,76	1,17	28,4	99,54
BA	54,18	3,82	13,18	1,45	27,1	99,54

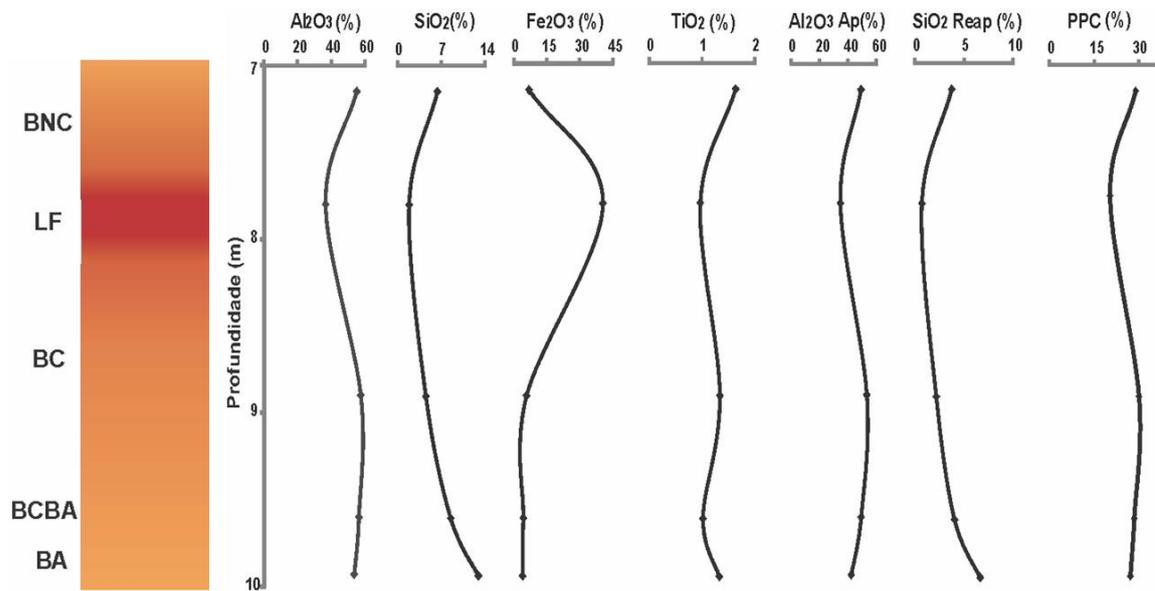


Figura 4.32 - Comportamento dos teores dos elementos maiores, alumina aproveitável, sílica reativa e PPC do perfil 2.

Em relação aos elementos menores, o Zr e V destacam-se por exibir os maiores valores no perfil bauxítico (Tabela 4.7).

O teor máximo de Zr se concentra no horizonte BNC, correspondendo ao valor de 1579 ppm. Por outro lado, o teor mínimo de 683 ppm foi identificado no horizonte LF.

O V é mais enriquecido no LF (639 ppm) e empobrecido nos horizontes BA e BCBA, ambos de valores na ordem de 64 ppm.

O teor de Ba decresce da base para o topo do perfil, os valores máximos e mínimos são 13 e 6 ppm, respectivamente.

Os elementos Ga, Hf, U e Sn apresentam maior teor no horizonte BNC, tais teores não ultrapassam 55 ppm. Enquanto que os teores de Th, Co, Pb e Sb são elevados no horizonte LF.

Os teores máximos de Nb, Sr, Ta estão concentrados no horizonte basal, seus valores são 35,3, 17, 2,6 ppm, respectivamente. Entretanto os valores desses elementos diminuem no horizonte ferruginoso.

O W apresenta-se associado com as porções bauxíticas, o valor máximo equivale a 4 ppm, entretanto o teor mínimo está na ordem de 2 ppm. Os valores de Cu praticamente decrescem do topo para base. Os teores de Ni não ultrapassam 20 ppm.

Tabela 4.7 - Quadro geoquímico dos elementos menores analisados no perfil 2.

Elementos Traços (ppm)	Zr	V	Ba	Co	Ga	Hf	Nb	Ni	Sn	Sr	Ta	Th	U	W	Cu	Ni	Pb
Horizonte																	
BNC	1579	124	6	4,3	52	39	34	<20	9	7,5	2,5	42	3,5	4	2,1	0,5	3,3
LF	684	639	7	6,6	52	18	22	<20	2	7,1	1,2	49	2,2	2,3	2,2	3,1	24
BC	1199	94	8	3,3	37	31	35	<20	3	9,2	2,2	33	2,9	4,1	0,9	0,4	2,7
BCBA	957	64	13	3,2	36	24	24	<20	2	15	1,9	32	2,4	2	1,2	0,2	2
BA	1367	64	13	1,4	38	34	35	<20	3	17	2,6	34	2,9	2,1	0,7	0,2	1,3

A Tabela 4.8 revela a concentração dos elementos terras raras (ETR), distribuída nos horizontes que estruturam o perfil 2.

A maioria dos elementos Ce, Gd, Y, Tb, Dy, Ho e Er possuem teores máximos na base do perfil, ou seja, no horizonte BA, e os teores mínimos estão relacionados ao horizonte LF.

O La apresenta decréscimo de teor em direção da base para topo, passando de uma concentração de 45,8 ppm no horizonte BA para 18,7 ppm no horizonte BNC.

Os teores de Yb e Lu são maiores no horizonte BNC, 4,35 e 28,9, respectivamente, e menores no horizonte ferruginoso.

Nd e Sm se caracterizam pelos valores elevados na base do perfil, entretanto o primeiro revela o menor teor no topo do manto bauxítico e o segundo no horizonte BCBA.

Os ETRL (54 – 117 ppm) apresentam o mesmo comportamento do perfil 1, ou seja, se destacam em termos numéricos quando comparado com ETRP (8 – 17 ppm). Perfazendo cerca de 86% do conteúdo total dos ETR.

Tabela 4.8 - Concentração dos teores de ETR, no perfil 2.

Elementos ETR (ppm)	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	Σ ETRL	Σ ETRP	Σ ETR	(La/Yb) _n	(La/Sm) _n	(Gd/Yb) _n
Horizonte																				
BNC	19	26	2,2	5,5	1,2	0,3	1,7	0,5	2,5	0,9	3,2	0,6	4,3	0,9	54	15	69	4,3	19	0,4
LF	27	17	2,9	8,3	1,2	0,3	1	0,2	2,3	0,4	1,4	0,2	1,8	0,5	56	8	64	11	17	0,6
BC	25	23	2,9	7,3	1,4	0,3	1,5	0,3	6,8	2	2,2	0,4	2,9	0,6	60	17	77	9	18	0,5
BCBA	46	46	4,3	9,5	1,2	0,3	1,5	0,3	5	1,4	2,1	0,4	3,1	0,3	107	14	121	15	39	0,5
BA	48	47	4,5	11	1,6	0,4	2,1	0,5	5,7	1,6	3,5	0,5	3,9	0,8	112	10	122	12	28	0,5

A porção basal do perfil corresponde aos maiores teores da razão $(La/Yb)_N$, $(La/Sm)_N$ e $(Gd/Yb)_N$, esses elementos normalizados representam o fracionamento entre os ETR. O menor valor da razão $(La/Yb)_N$ se concentra no horizonte BNC, do $(La/Sm)_N$ está indicada pelo horizonte LF e $(Gd/Yb)_N$ é sinalizada pelo BNC.

O padrão de normalização de ETR em relação ao condrito (Taylor & Maclann, 1985) apresenta similaridade para todos distintos horizontes.

Notável uma anomalia negativa de Eu, e enriquecimento sutil dos ETR leves e enriquecimento dos ETR pesados. Os valores de Ce são negativos nos horizontes BC e LF e menores valores de ETRP. O horizonte Bauxita Amorfa (BA) é mais enriquecido em ETR comparado ao horizonte superior do perfil (BNC), embora mostre uma anomalia negativo em Dy.

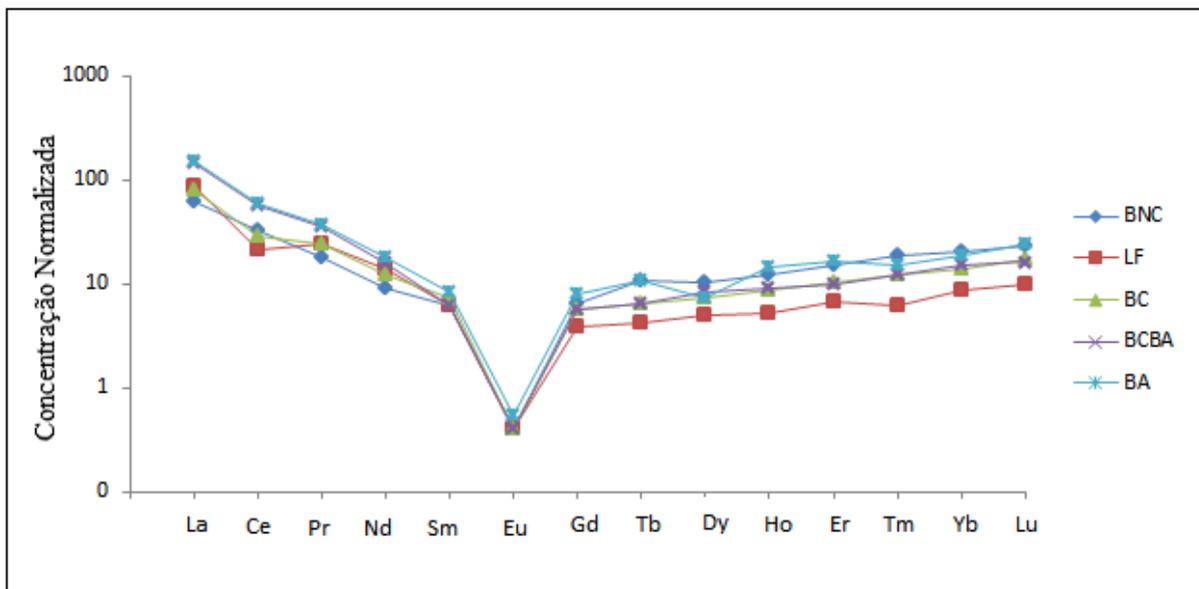


Figura 4.33 - Padrão de distribuição dos ETR normalizado para condritos (Taylor & McLennan, 1985) dos horizontes que estruturam o perfil 2.

As curvas que representam as variações dos teores de Al_2O_3 , Fe_2O_3 e SiO_2 ao longo do perfil exibem um comportamento diferenciado e oposto como observado na Figura 4.34.

A curva de teor de Al_2O_3 permanece constante na zona basal até a intermediária, a partir desse ponto a curva se desloca para direita em virtude do acréscimo no conteúdo de Al, passando pelos horizontes BC e BNC.

Ao analisar a curva do Fe_2O_3 observa-se que seu maior teor corresponde ao horizonte LF.

As curvas correspondentes aos teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3 se aproximam no horizonte LF, com valores na ordem de 37 – 39%.

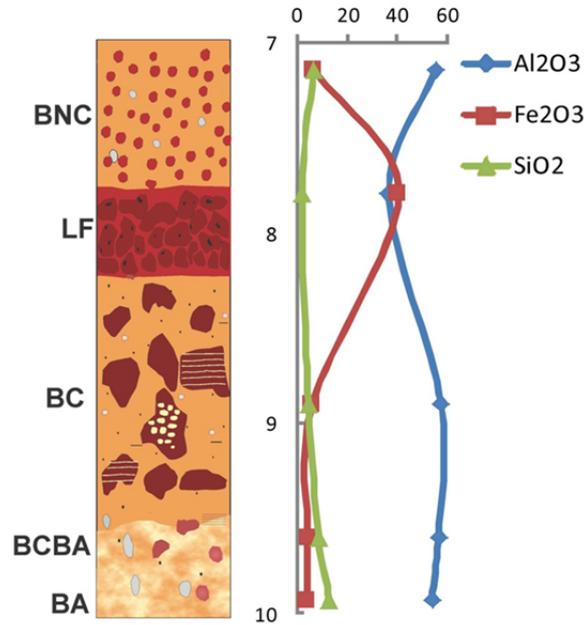


Figura 4.34 - Distribuição da composição química dos elementos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 do perfil 2.

As análises químicas dos principais elementos maiores das amostras estudadas foram plotadas no diagrama referente a Figura 4.35.

Observa-se que os teores se direcionam para o lado direito do gráfico, exceto o teor do horizonte LF, portanto apresentam tendência mais aluminosa.

Os maiores teores de SiO_2 estão concentrados nos horizontes BA e BCBA, em virtude do maior aporte de caulinita encontrada nos mesmos.

O Fe_2O_3 é nitidamente mais elevado no horizonte LF, nos demais horizontes esse teor é relativamente baixo.

O Al_2O_3 possui teores máximos nos horizontes BC e BNC, entretanto os outros horizontes também apresentam quantidade satisfatória desse óxido.

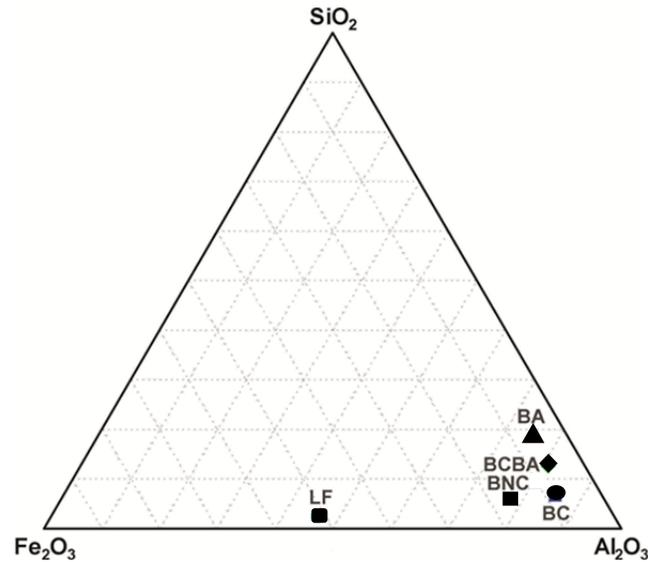


Figura 4.35 - Diagrama $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3$ exibe a tendência geoquímica das amostras representativas de cada horizonte do perfil 2.

A correlação entre os óxidos TiO_2 x Al_2O_3 (Figura 4.36A) apresenta-se, em geral, positiva. Observa-se que o horizonte BNC possui maior representatividade desta correlação, valores de TiO_2 próximo de 55% e Al_2O_3 de 1,6%. Porém o horizonte LF comporta-se de maneira inversa, onde os números estão na ordem de 36% para Al_2O_3 e 0,8% para valores de TiO_2 .

Ao se tratar da relação Fe_2O_3 x TiO_2 (Figura 4.36B) a tendência é negativa, pois os valores de Fe_2O_3 são superiores quando comparado com os valores de TiO_2 . O horizonte BCBA representa melhor este caso, com valores próximos a 0,5 e 1,0% para Fe_2O_3 e TiO_2 , respectivamente.

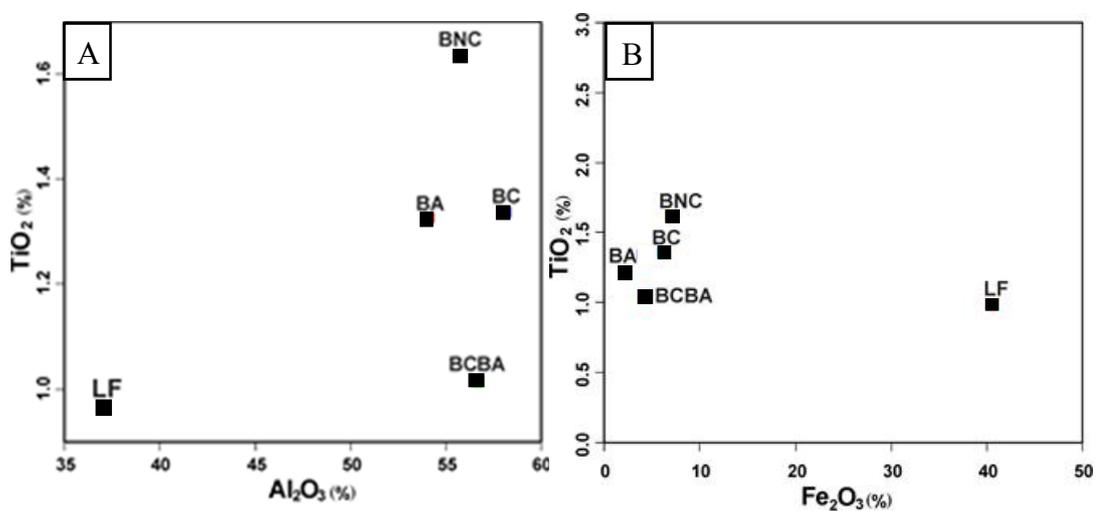


Figura 4.36 - A) Gráfico de Correlação entre os teores de TiO_2 x Al_2O_3 e B) TiO_2 x Fe_2O_3 .

4.4 ANÁLISE MINERALÓGICA RACIONAL

A fim de quantificar a porcentagem mineralógica ao longo do perfil, usou-se a metodologia aplicada por Peixoto & Horbe (2006). Estes autores empregaram cálculos estequiométricos (Tabela 4.9) a partir do emprego de dados difratométricos e de análise química (Tabela 4.10).

Nas amostras em estudo não foi possível encontrar quantidades significativas de quartzo, em razão disto o teor total de SiO₂ destinou-se a caulinita.

Uma parte do teor de Al₂O₃, por meio de cálculo, foi atribuído a caulinita e o restante foi direcionado para a gibbsita. A porcentagem total de Fe₂O₃ corresponde a hematita e goethita, assim como o teor de TiO₂ ao mineral anatásio.

Tabela 4.9 - Cálculo estequiométrico referente a cada mineral.

Mineral	Cálculo Composicional
Caulinita (C) SiO ₂ (CC)100	$C = \text{SiO}_2\text{total} \times \frac{100}{\text{SiO}_2(\text{CC})}$; $\text{Al}_2\text{O}_3(\text{C}) = C \times \frac{\text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC})}{\text{SiO}_2(\text{CC})}$
Gibbsita (G) Al ₂ O ₃ (CC)G	$\text{Al}_2\text{O}_3(\text{G}) = \text{Al}_2\text{O}_3\text{ total} - \text{Al}_2\text{O}_3(\text{C})$; $G = \frac{\text{Al}_2\text{O}_3(\text{G})}{\text{Al}_2\text{O}_3(\text{CC})} \times 100$
Hematita+Goethita (H+Gt)	$H + Gt = \text{Fe}_2\text{O}_3\text{ total}$
Anatásio (A)	$An = \text{TiO}_2\text{total}$

Fonte: Adaptado de Peixoto & Horbe (2006)

Tabela 4.10 - Composição química dos principais minerais presentes no perfil bauxítico.

Mineral	Composição Química
Caulinita (Al ₂ O ₃ (SiO ₂) ₂ .2H ₂ O)	Al ₂ O ₃ = 39,5 % SiO ₂ = 46,49 % H ₂ O = 14,01 %
Gibbsita (Al(OH) ₃)	Al ₂ O ₃ = 65,37 % H ₂ O = 34,63 %
Hematita/Goethita (Fe ₂ O ₃)	Fe ₂ O ₃ = 100 %
Anatásio (TiO ₂)	TiO ₂ = 100 %

Fonte: Adaptado de Peixoto & Horbe (2006)

Perfil 1

A figura 4.37 exibe a disposição dos principais minerais na estruturação vertical do perfil. O mineral predominante é a gibbsita, seguida, em menores proporções por caulinita, hematita e anatásio.

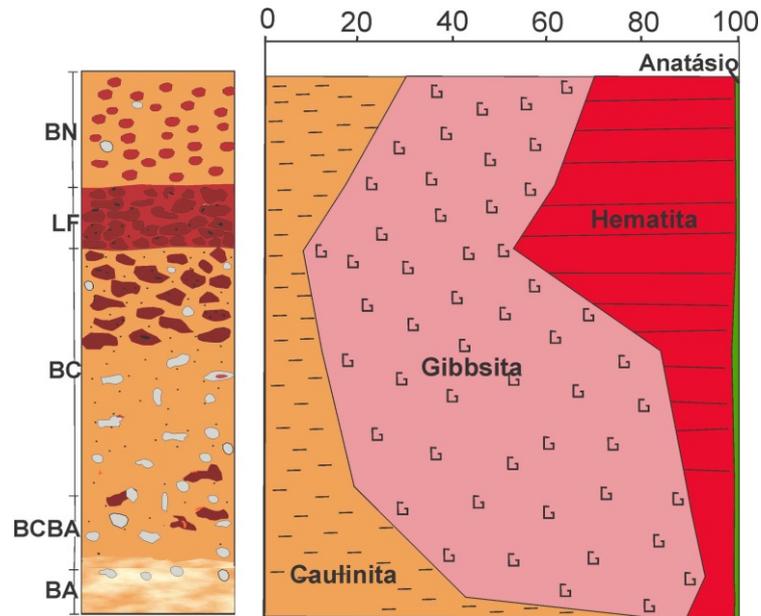


Figura 4.37 - Imagem ilustrativa da distribuição quantitativa dos principais minerais do perfil 1.

A caulinita apresenta seu teor mais expressivo em torno de 80% na base do perfil laterítico, essa porcentagem diminui ao alcançar o horizonte laterita ferruginosa, em torno de 8%. A partir desse ponto este teor apresenta um acréscimo, alcançando valores na ordem de 30% no horizonte bauxita nodular.

Representando os maiores teores no perfil bauxítico, o mineral gibbsita apresenta valores elevados no horizonte BC (70%), entretanto seu menor teor se concentra na base do horizonte BA, com teor aproximado de 11%.

Os teores de hematita e goethita estão concentrados no horizonte LF (47%), uma vez que as concreções ferruginosas compõem mais de 80% deste horizonte.

O anatásio representa o mineral de menor conteúdo em todo o perfil, seu teor não ultrapassa 1,5%, entretanto a análise correspondente ao horizonte BC exibiu números na ordem de 2%.

Perfil 2

Assim como no perfil 1, a gibbsita é o mineral mais abundante (Figura 4.38). Os horizontes BC (78%) e BNC (75%) comportam as maiores porcentagens deste mineral.

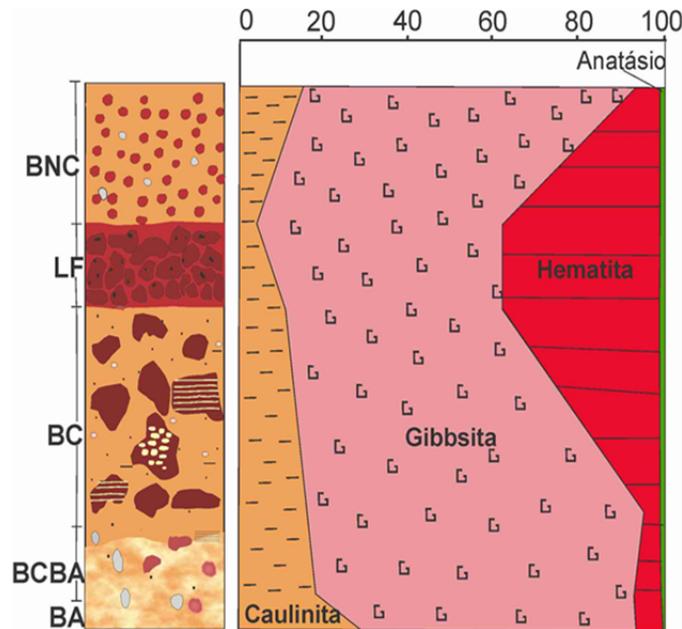


Figura 4.38 - Imagem ilustrativa da distribuição quantitativa dos principais minerais do perfil 2.

Por outro lado, os horizontes BA (60 %) e LF (50%) possuem em sua composição os menores teores.

A caulinita está presente em maior quantidade no horizonte BA (30%). Os menores valores estão na ordem de 5%, localizadas no horizonte LF.

O conteúdo mais expressivo de hematita e goethita estão concentrados no horizonte LF em formas de concreções ferruginosas, perfazendo cerca de 37% do volume total, enquanto os menores valores são encontrados no horizonte BC com valores de aproximadamente 4%.

O anatásio praticamente apresenta o mesmo valor ao longo do perfil, não ultrapassando a margem de 1,5%.

4.5 DIFERENTES GERAÇÕES DE GIBBSITA

Em dezembro de 2004, uma equipe técnica da Companhia Vale do Rio Doce realizou um estudo sistemático em 4 trincheiras de perfis bauxíticos e amostras de furo de sondagem oriundas dos Platôs Miltônia 3 e 5, na região de Paragominas.

O escopo desse estudo foi a confecção de um relatório interno técnico da empresa que teve como autores Vieira *et al.* (2004). Com o objetivo de analisar as características no âmbito textural, estrutural, mineralógico, atentando-se também para associação com minerais de oxi-hidróxido de Fe, maturidade evolutiva dos perfis em apreço e observações petrográficas.

E dentre várias conclusões, constatou-se a existência de cinco gerações de gibbsita ao longo do perfil bauxítico (Figura 4.39).

Gerações de Gibbsita	Descrição
Gibbsita criptocristalina (Gib1)	Macroscopicamente, apresenta coloração amarelo intenso atribuída à presença de Fe disseminado, aspecto porcelanado. Sob microscópio possui granulometria muito fina (1 µm).
Gibbsita microcristalina (Gib2)	Apresentando dimensões superiores à geração anterior, em torno de 10 µm. Esta variedade se formou a partir da recristalização da Gib1, em geral, ambos, estão associados.
Gibbsita granular "baixo ferro" (Gib3)	Macroscopicamente apresenta coloração branca e brilho intenso. Petrograficamente possui hábito granular, incolor, por vezes turvo. Se forma em rosetas sobre a caulinita do saprólito sub-adjacente.
Gibbsita granular "alto ferro" (Gib4)	Esse cristal possui hábito granular, de dimensões em média de 50 µm, e ocorre sempre associado com oxi-hidróxido de Fe. Desenvolve-se sobre a Gib1 e Gib2 na forma de vênulas ou bolsões, e sobre a Gib3 de modo mais disseminado.
Gibbsita criptocristalina (Gib5)	Similar a Gib1, entretanto esta alojada em vênulas e bolsões que interceptam a Gib4. Sendo formada posteriormente a todas as gerações

Figura 4.39 - Quadro esquemático de descrição das gerações de gibbsita referente ao relatório técnico da CVRD.

Fonte: Vieira *et al.* (2004).

Estudos realizados por Schulmann *et al.* (1997), explicam os mecanismos para a gênese de 3 diferentes tipos de gibbsita.

Esses autores mostraram as condições físico-químicas que proporcionaram a dissolução parcial e migração de gibbsita, e reprecipitação de uma gibbsita secundária nas cavidades, formando bauxita com características densas e compactas. Em condições ideais (acidez elevada e presença de matéria orgânica) essa gibbsita se torna instável e posteriormente dissolvida e se precipita para zonas mais baixas formando uma nova geração de gibbsita (gibbsita secundária).

A primeira geração é formada durante a gênese de formação do perfil e está relacionada à pequenos ambientes, a segunda está relacionada com a evolução de géis de aluminosa amorfa e composição alumino-silicosa. Por fim, a última geração é formada pela acumulação absoluta de alumínio por meio da migração em gel ou iônica e precipitação.

Por meio de observações microscópicas das seções polidas da presente dissertação foi possível distinguir três gerações de gibbsita (Figura 4.40), que foram correlacionados com o estudo de Vieira *et.al* (2004) (Figura 4.41), e serão distinguidas a seguir:

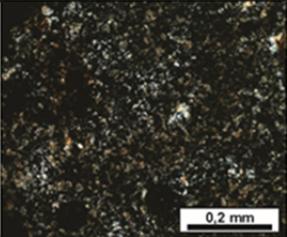
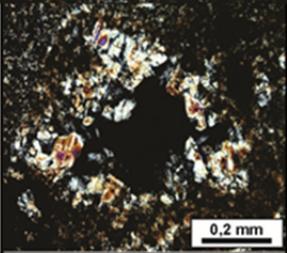
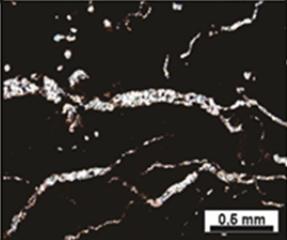
Gerações de Gibbsita	Imagem	Descrição
Gibbsita criptocristalina (Gib1)		Considerada como cristal mais precoce em relação aos demais, geração 1 (Gib 1), a gibbsita criptocristalina compõe a matriz argilosa do perfil bauxítico, geralmente associada com oxi-hidróxido de Fe.
Gibbsita microcristalina (Gib 2)		Classificada como geração 2 (Gib 2), a gibbsita microcristalina compreende os cristais desenvolvidos que revestem as paredes ou preenchem totalmente as cavidades de dissolução, geralmente apresentam formas subédricas e medem em torno de 10 µm.
Gibbsita Criptocristalina I (Gib 3)		A gibbsita criptocristalina, representando a geração 3 (Gib 3), está alojada em <i>cutons</i> de maneira agregada e compõem a fase mais tardia do grupo.

Figura 4.40 - Quadro descritivo das gerações de gibbsita da presente dissertação.

Correlação de Gerações de Gibbsita	
Dissertação	Vieira <i>et.al</i> (2004)
Gib1	Gib1
Gib2	Gib2
Gib3	Gib5

Figura 4.41 - Correlação entre as gibbsitas descritas nesse trabalho e as encontradas no relatório técnico da CVRD.

A distribuição das diferentes gerações de gibbsita e do teor de Fe ao longo dos perfis da presente dissertação e o relatório de Vieira *et al.* (2004), encontra-se visualizada didaticamente na Figura 4.42.

Os autores do relatório interno encontraram as gerações Gib 1 e Gib 2 somente no horizonte BA.

Presente nos primeiros horizontes (BA, BCBA e BC), Gib 3 correspondem à fase que tem baixa associação com ferro. Nos horizontes intermediários até próximos ao topo do perfil estão concentrados os maiores teores de oxi-hidróxido de Fe e cristais de Gib 4.

A gênese da quinta geração dos cristais de gibbsita é considerada a mais tardia entre as demais, preenchendo vênulas e bolsões, está situada nos horizontes mais próximos ao topo (LF, BN e BNC).

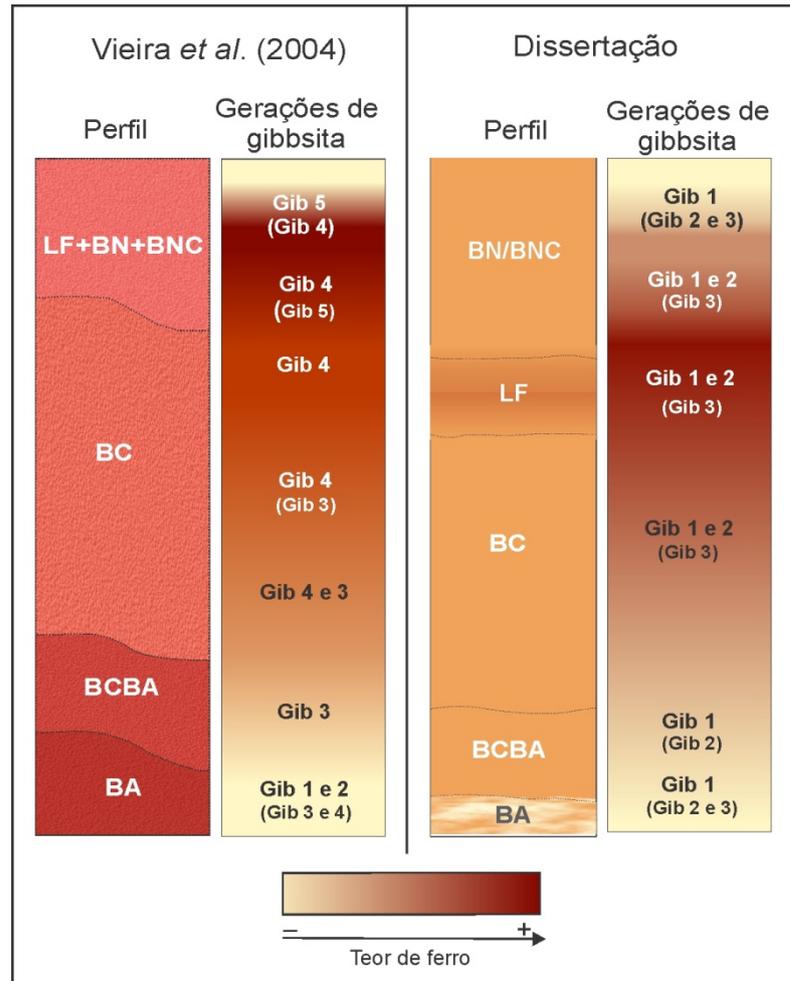


Figura 4.42 - Modelo esquemático exibindo a distribuição das diferentes gerações e teor de Fe ao longo dos perfis, do relatório técnico da Vale e da presente dissertação.

Fonte: Adaptado e modificado de Vieira *et al.* (2006).

Observações realizadas em cristais de gibbsita constatou-se que todas as gerações estão presentes ao longo do perfil, entretanto apresentam variações quantitativas nos horizontes distintos.

No presente trabalho a geração mais precoce (Gib1) está sempre associada com a caulinita, portanto é mais expressiva no nível basal, uma vez que horizonte BA é composto essencialmente por material argiloso.

Os cristais mais desenvolvidos de gibbsita (Gib2) estão evidentes, principalmente, no horizonte BC e LF, no primeiro há elevada concentração do mineral gibbsita, no último os cristais estão alojados, sobretudo, na porção interna dos nódulos ferruginosos.

A gibbsita 3 (Gib3) corresponde a fase subordinada em relação as demais gerações, apresenta praticamente a mesma proporção em todos os horizontes.

4.6 AVALIAÇÃO DO GRAU DE ORDEM-DESORDEM DA CAULINITA

O estudo da ordem estrutural da caulinita apresenta-se de grande valia para a indústria, uma vez que esse entendimento visa direcionar a aplicação dessa matéria prima para determinados processos industriais.

O Grau na alteração da ordem e periodicidade da estrutura cristalina pode ser somente descrito qualitativamente pelos termos “ordem” e “desordem”. A natureza dessa ordem e desordem em filossilicatos pode envolver sequência de empilhamento, substituição isomórfica, onde vários íons ou vacâncias ocorrem em certos sítios de coordenação e na disposição do material em intercadas (Guggenheim *et al.* 2006).

Vários autores pesquisaram os possíveis motivos para o desordenamento da estrutura cristalina da caulinita, Galán *et al.* (2006) constataram por meio de métodos experimentais de pressurização, que a pressão isostática eleva o grau de desordem da caulinita em ambiente seco; Mestdagh *et al.* (1980) afirmam que a quantidade de Fe^{3+} na estrutura da caulinita influencia positivamente na “baixa cristalinidade” do mineral; Ishida (2010) menciona que fatores geológicos como transporte, deposição e ação mecânica causam distorção no empilhamento da estrutura do mineral; Reynolds & Bish (2002), discutem que a desordem cristalográfica está relacionada à interstratificação das camadas de caulinita com os seus enantiomorfos.

Diante desses fatores acima mencionados alguns índices foram propostos para avaliar possíveis alterações na estrutura cristalina da caulinita, a exemplo de Amigó *et al.*, Hinckley, Range and Weiss, Stoch, Liènard, Hughes-Brown e Plançon-Zacharie, porém associações de caulinita com minerais amorfos e outros minerais como quartzo, feldspato, esmectita, clorita, halloysita e hidróxido de ferro oferecem limitações na quantificação desses índices de cristalinidade da caulinita (Aparicio; Galán, 1999).

Para a avaliação do grau de ordenamento estrutural das caulinitas dos perfis bauxíticos em estudo não foram aplicados nenhum desses índices, em virtude de condições instrumentais laboratorial, presença de quantidades subordinadas de gibbsita, hematita e goethita, uma vez que os picos desses minerais podem sobrepor picos de outras fases. Entretanto utilizou-se o mesmo princípio de Amigó *et al.* (1994) baseado na medida dos valores da largura a meia altura (FWHM - *full width at half maximum*) dos planos basais d_{001} e d_{002} da caulinita, avaliado em padrões difratométricos.

Ao avaliar o comportamento do grau de ordem e desordem da caulinita ao longo do perfil (Figuras 4.43 e 4.44) verificou-se um aumento dos resultados de FWHM (aumento do

alargamento dos picos) da base em direção ao topo, mostrando a possibilidade de: 1) degradação das caulinitas com o processo de desenvolvimento do perfil laterítico; e/ou neoformação de novas gerações de caulinita de baixa cristalinidade. Nota-se que a tendência de desordenamento estrutural se eleva da base para topo, portanto os horizontes BA e BCBA apresentam caulinita com melhor ordenamento estrutural quando comparado com os horizontes LF e BN, pois estes comportam caulinita com desordem estrutural, os valores do perfil 2 apresentam comportamento semelhante.

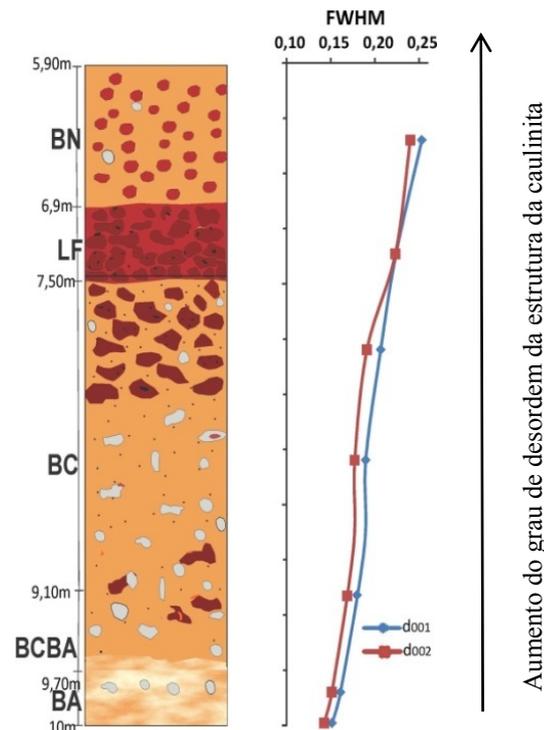


Figura 4.43 - Desenho esquemático revelando a tendência dos valores de largura a meia altura em relação aos planos basais d_{001} e d_{002} da caulinita, do perfil 1, observa-se que o aumento do grau de desordem da caulinita se eleva da base para o topo.

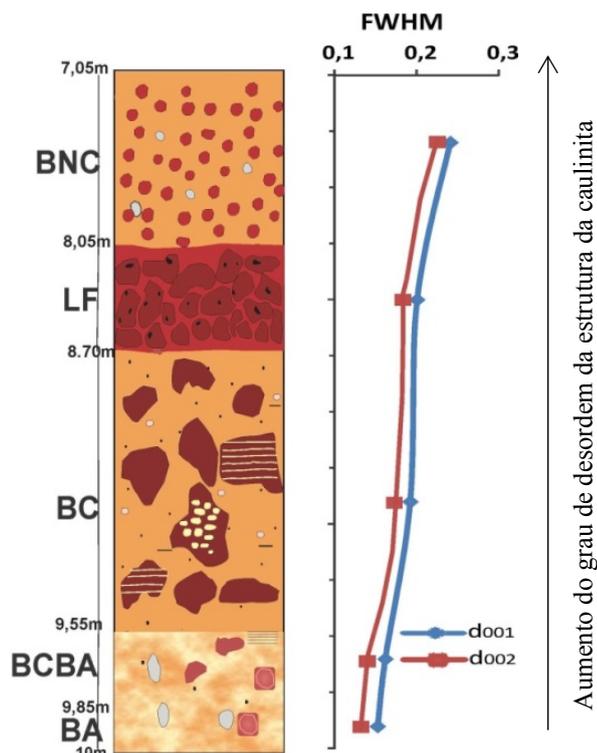


Figura 4.44 - Desenho esquemático exibindo o aumento dos valores de FWHM da base para o topo ao longo do perfil 2, observa-se o comportamento semelhante ao perfil 1.

4.7 CORRELAÇÃO ENTRE OS PERFIS LATERÍTICOS

Os perfis lateríticos amazônicos tem sido alvo de intenso estudos em diferentes âmbitos (Costa, 1984; Horbe, 1991; Fernandes Filho, 1996; Kotschoubey *et al.* 1997; Lucas, 1997 e; Costa, 2014).

Neste contexto, Kotschoubey *et al.* (2005) e Costa (1991) realizaram estudos sistemáticos acerca do entendimento da estruturação dos perfis bauxíticos.

Costa (1991) denominou os perfis mais desenvolvidos da Amazônia, de acordo com características textuais, estruturas singenéticas e a variedade mineral, em lateritos maduros autóctones. Dividindo-o da base para o topo de: horizonte pálido-transicional, horizonte argiloso, horizonte bauxítico e crosta ferruginosa (Figura 4.45). A seguir será feita uma breve descrição de cada horizonte:

- 1) Horizonte pálido-transicional: este horizonte está sotoposto ao horizonte argiloso e sobreposto à rocha primária. Contem grande quantidade de fragmentos da rocha-mãe, e estão envoltos por uma fina camada originada por meio de intemperismo.
- 2) Horizonte argiloso: de acordo com o autor este horizonte esta subdividido em zona saprolítica, mosqueada e amarela. Estruturas reliquiare, raramente, estão presentes neste nível.

3) Horizonte bauxítico: apresenta coloração creme avermelhado, constituído por blocos centimétricos e milimétricos de nódulos e esferólitos imersos em uma matriz argilo-arenosa. Pode-se observar estruturas colunares e laminações sub-horizontais. Estruturas primárias encontram-se preservadas.

4) Crosta ferruginosa: localizada na porção superior do perfil, exibe coloração marrom avermelhada, composta por agregados de nódulos, concreções e esferólitos de oxi-hidróxido de ferro cimentados por hidróxido de alumínio. Raramente apresenta estruturas primárias reliquiárias.

Kotschoubey *et al.* (2005) estudou minuciosamente os perfis bauxíticos da região de Paragominas. Estes autores dividiram o perfil (Figuras 4.45 e 4.46) em base das peculiaridades química, textural e estrutural, e feições diagnósticas de cada horizonte. Portanto, foi nomeado da base para o topo como: Horizonte saprolítico, horizonte bauxítico inferior, horizonte ferruginoso, horizonte bauxítico superior, cascalho superior, capeamento argiloso.

Os horizontes descritos por este autor apresentam estreita relação com os níveis definidos pela empresa Mineração Paragominas S.A (MPSA), os quais usaram diferentes nomenclaturas denominadas e descritas:

1) Horizonte saprolítico – composto por material argiloso com grande quantidade de quartzo, aspecto friável e variegado, estrutura acamadada, coloração avermelhada devido à grande concentração de oxi-hidróxido de Fe. Podendo apresentar textura colunar, por vezes o horizonte encontra-se laminado.

2) Horizonte bauxítico inferior – este horizonte apresenta coloração castanho avermelhado, textura sacaroidal, cristalizado. É bastante expressivo o aspecto cavernoso e poroso neste pacote sedimentar. Observar-se a presença de pisólitos ferruginosos e gibbsítico.

3) Horizonte ferruginoso – exibe coloração marrom escuro a amarelada, apresenta formas maciças, feições colunares e cavernosas. Presença abundante de blocos pisolíticos cimentados por material hematítico-goethítico.

4) Horizonte bauxítico superior – Exibe coloração creme amarronzado, constituído por concreções bauxíticas e pisólitos ferruginosos imersos em uma matriz argilosa.

5) Cascalho superior – apresenta coloração creme amarelada, formado predominantemente por pisólitos ferruginosos e bauxíticos de coloração avermelhada possuem formas subangulosos e alongadas imersos em uma matriz fina bauxítica\argilosa.

6) Capeamento argiloso ou argila de Belterra– este horizonte é o mais recente entre os demais níveis, possui coloração creme-amarelado, de acordo com Sombroek (1966) este

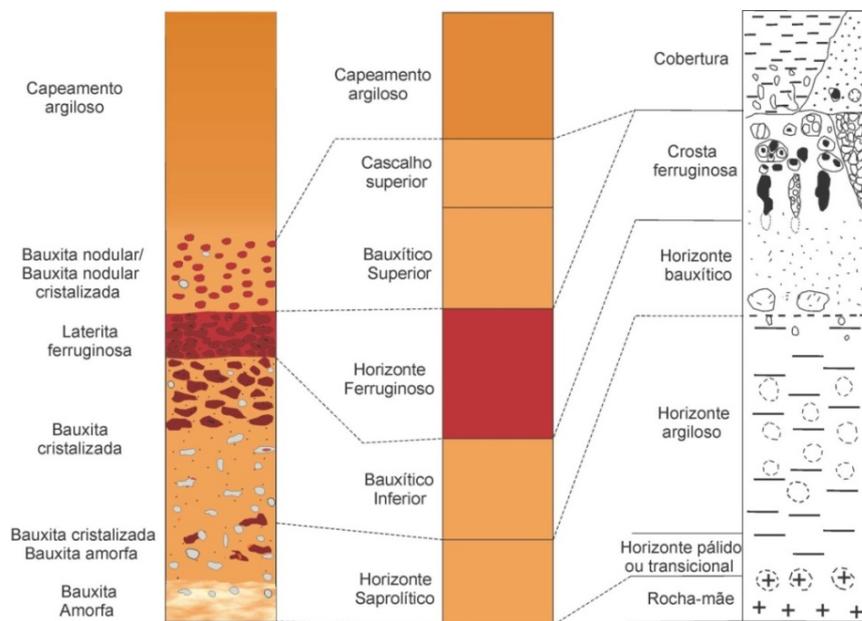
horizonte exibe um aspecto bastante homogêneo sem estratificação visível. Mineralogicamente é formado por caulinita e subordinadamente por gibbsita, goethita, hematita e quartzo.

Ambas as propostas apresentam similaridade e distinção entre si. Costa (1991) define a base do perfil como pálido-transicional e o horizonte sotoposto de argiloso e este é subdividido em zona saprolítica, mosqueada e amarela, enquanto que Kotschoubey *et al.* (2005) denomina todo esse conjunto apenas de horizonte saprolítico.

De acordo com Kotschoubey *et al.* (2005) as estruturas colunares estão presente somente na base do perfil, todavia Costa, (1991) encontra essas estruturas e laminações também no horizonte bauxítico.

Kotschoubey *et al.* (2005) descreve em seu perfil os horizontes bauxítico superior e cascalho superior, por outro lado, esses horizontes não são partes integrantes da estruturação definida por Costa, (1991).

Tanto o perfil descrito por Kotschoubey *et al.* (2005) e Costa, (1991) são recobertos por capeamento argilosa também conhecido por Argila de Belterra.



Fonte: Modificado de Kotschoubey *et. al* (2005) Fonte: Modificado de Costa (1991)

Figura 4.45 - Correlação entre os perfis definido pela empresa Mineração Paragominas S.A (MPSA) Kotschoubey *et al.* (2005) e Costa (1991)

	Costa (1991)	Kotschoubey <i>et al.</i> (2005)	Mineração Paragominas S.A (MPSA)
Horizonte	Cobertura	Cobertura	Cobertura
	_____	Cascalho superior	Bauxita nodular
	_____	Bauxita superior	Bauxita nodular cristalizada
	Crosta ferruginosa	Horizonte Ferruginoso	Laterita ferruginosa
	Bauxítico	Bauxítico inferior	Bauxita cristalizada
	Argiloso	Saprolítico	Bauxita argilosa bauxita cristalizada
	Pálido ou transicional		Bauxita argilosa
	Rocha-mãe	_____	_____

Figura 4.46 - Correlação entre as nomenclaturas definidas para cada horizonte segundo os referidos autores.

Fonte: Costa (1991), Kotschoubey *et al.* (2005) e Mineração Paragominas S.A (MPSA).

5. CONCLUSÃO

Em virtude de intensos estudos realizados no âmbito mineralógico, petrográfico, micromorfológico e geoquímico nos perfis lateríticos da mina Miltônia 3, região de Paragominas levantou-se informações relevantes para satisfazer os objetivos propostos na presente dissertação, com isto foi possível concluir:

Os dois perfis lateríticos derivados de intenso intemperismo sobre rochas siliciclásticas de idade cretácea (Grupo Itapecuru), estão estruturados em horizontes de acordo com as suas particularidades ao longo do manto laterítico, que são denominados da base para o topo: Amorfa; Bauxita Cristalizada-Bauxita Amorfa; Bauxita Cristalizada; Laterita Ferruginosa; A partir desse ponto há distinção entre o horizonte sobreposto, quando se trata do perfil 1, a camada superior adjacente denomina de Bauxita Nodular, em relação ao perfil 2 esta camada classifica-se por horizonte Bauxita Nodular Cristalizada. E ambos são cobertos por camada argilosa denominada, por muitos autores, de Argila de Belterra.

A paragênese dos perfis estudados obedece à mineralogia clássica predominante: caulinita, gibbsita, hematita, goethita, goethita aluminosa, anatásio, por vezes em quantidades discretas por rutilo, estes variam de acordo com cada horizonte.

As variações texturais em ambos os perfis são perceptíveis macroscopicamente, nota-se pela diferenciação estrutural ocorrente no embasamento do perfil 1, a parte inferior do horizonte argiloso é constituído predominantemente por material mais argiloso, por outro lado, no topo deste mesmo horizonte os nódulos gibbsíticos são frequentes. O mesmo caso ocorre na porção intermediária do perfil, que inclui o horizonte bauxita cristalizada, a base deste também se caracteriza por abundância de material argiloso, entretanto a porção superior é formada majoritariamente por concreções ferruginosas. Estas subdivisões não são vistas ao longo do perfil 2 apresentando-se “homogêneo” em toda sua extensão.

Aspecto micromorfológico do horizonte bauxita argilosa, visualizado via MEV, revelou a presença de caulinita em forma de “*booklets*”, sinalizando textura reliquiar, consequentemente origem *in situ*.

Após avaliação de estudo petrográfico foi possível constatar 3 gerações distintas de gibbsita que foram correlacionadas com o relatório técnico de Vieira *et al.* (2006). A fase mais precoce corresponde aos cristais de gibbsita criptocristalino pertencente à matriz. A segunda geração compreende aos cristais microcristalinos, de aproximadamente 10 µm, este de maior

dimensão em relação aos três, alojados em cavidades e poros. A geração mais tardia esta alojada em *cutans*, também de caráter criptocristalino.

Dados geoquímicos mostraram que os elementos Zr, Hf, Y, Yb, Zr, Sn, Ta, U e W apresentam certa afinidade com os horizontes aluminosos, por outro lado, são empobrecidos em horizontes ferruginosos. Os elementos V, Cu e Zn possuem comportamento antagônico a estes elementos, ou seja, possuem relação com Fe e pouco afinidade com Al.

A avaliação do grau de ordem e desordem da caulinita ao longo do perfil foi feita por meio da medida dos valores da largura a meia altura (FWHM) dos planos basais d_{001} e d_{002} deste mineral. Verificou-se um aumento dos resultados de FWHM (aumento do alargamento dos picos) da base em direção ao topo, mostrando a possibilidade de: 1) degradação das caulinitas com o processo de desenvolvimento do perfil laterítico; e/ou neoformação de novas gerações de caulinita de baixa cristalinidade.

Os dados levantados durante as análises deram suporte para entendimento dos processos que favoreceram as diferenças e semelhanças mineralógicas, químicas e texturais existentes entre os horizontes bauxíticos, assim como a retomada do processo de bauxitização (Duas fases de bauxitização) que resultou na formação do horizonte Bauxita Nodular e Bauxita Nodular Cristalizada, levantando a hipótese da evolução complexa e polifásica dos perfis estudados, culminando na origem dos depósitos bauxíticos/lateríticos.

Autores como Costa (1991) e Kotschoubey *et al.* (2005) propuseram alguns modelos para o entendimento estrutural/mineralógico dos perfis bauxíticos da região amazônica, resultando em diferentes terminologias em relação a denominação dos horizontes, destacando as possíveis diferenças entre os perfis estudados.

A partir dos métodos utilizados por Peixoto & Horbe (2006) foi possível inferir quantitativamente a proporção de minerais que formam o perfil geológico em questão, as principais fases minerais são constituídas pelo gibbsita e caulinita, e suas concentrações variam de acordo com cada horizonte. O teor mais elevado de gibbsita se concentra nos horizontes Bauxita Cristalizada (em torno de 70%) e horizonte Bauxita Cristalizada-Bauxita Amorfa (60%), quando se trata da caulinita o teor mais expressivo corresponde ao horizonte Bauxita Amorfa (80%), horizonte Bauxita Cristalizada-Bauxita Amorfa e Bauxita Nodular, ambos apresentam valores em torno de 27%.

REFERÊNCIAS

- Aleva G.J.J. 1981. Essential differences between the bauxites deposits along the Southern and Northern edges of the Guiana shield, South America. *Econ. Geol.*, **76**: 1142-1152.
- Anaisse Jr J. 1999. *Fácies costeiras dos depósitos Itapecuru (Cretáceo), região de Açailândia, bacia do Grajaú*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade Federal do Pará, Belém. 86 p.
- Anaisse Jr J., Truckenbrodt W., Rossetti D.F. 2001. Fácies de um sistema estuarino-lagunar no Grupo Itapecuru, área de Açailândia/MA, Bacia do Grajaú. In: Rossetti D.F., Góes A.M. & Truckenbrodt W. (eds.) *O Cretáceo na Bacia de São Luis – Grajaú*. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém. p. 119-150.
- Bardossy G. & Aleva G.J.J. 1989. The Amazon basin. A discussions review. *Travaux. ICSOBA*, **19**: 445-458.
- Boulangé B. & Carvalho A. 1989. The genesis and evolution of Porto Trombetas bauxite deposits in the Amazon Basin, Pará, Brazil. *Travaux. ICSOBA*, **19**: 71-80.
- Boulangé B. & Carvalho A. 1997. The bauxite of Porto Trombetas. In: Carvalho A., Boulangé B., Melfi A. J. & Lucas Y. (eds.) *Brazilian Bauxites*. USP. FADESP. ORSTOM, p.75-106.
- Calaf J.M.C. 2000. *Evolução geológica no Cenozóico da região entre Açailândia (MA) e Ligação (PA)*. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, UFPA, 112 p.
- Campbell D.F. 1949. *Revised report on the reconnaissance geology of the Maranhão Basin*. Belém: Petrobras, (Rept. 7).
- Costa M.L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Rev.Bras.Geoc.* **21** (12): 146-160.
- Costa J.B.S. & Hasui Y. 1997. Evolução geológica da Amazônia. In: Costa M.L. & Angélica R.S. (eds.) *Contribuições à geologia da Amazônia*. FINEP, SBG/Norte, p. 15-90.
- Delvigne, J.E. 1998. Atlas of Micromorphology of Mineral Alteration and Weathering. *Canadian Mineralogist Special Publication, Ottawa*, 509p.
- Dennen W.D. & Norton H. A. 1977. Geology and geochemistry of bauxite deposits in the lower Amazon basin. *Econ. Geol.*, v. 72, p. 82-89.
- Ferreira C.S. 1982. Notas estratigráficas sobre o Cenozóico marinho do estado do Pará. In: SBG/NO, Simpósio Geologia da Amazônia. 1, *Anais*, v. 1: 84 – 88.
- Ferreira C.S, Vicalvi M.A. & Macedo A.C.M. 1984. Os limites meridionais da Bacia de Pirabas, Estado do Pará. In: SBG, Congr. Bras. Geol., 33, *Anais*, **1**: 326-329.
- Ferreira Penna, D.S. 1876. Breve notícia sobre os sambaquis do Pará. *Archivos do Museu Nacional* (1): 85-89.

Góes A.M. 1981. Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru, no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. Dissertação de Mestrado, Centro de Geociências, UFPa, 55 p.

Góes A.M. 1995. A Formação Poti (Carbonífero inferior) da bacia do Parnaíba. Tese de doutorado, Inst. Geoc., USP, 171 p.

Goés, A.M. & Coimbra A.M. 1996. As bacias sedimentares da Província Sedimentar do Meio-Norte. In: Simpósio DE Geologia da Amazônia, 5. *Boletim de Resumos Expandidos*, Belém, SBG, p. 186-187.

Goés A.M. & Rossetti D.F. 2001. Gênese da bacia de São Luís-Grajaú, meio norte do Brasil. In: D.F. Rossetti; A.M. Góes & W. Truckenbrodt (eds.) *O Cretáceo da bacia de São Luís-Grajaú*. Belém, Coleção Friedrich Katzer, Museu Paraense Emílio Goeldi, p. 15-3.

Greig E. W. 1977. Trombetas and other Amazon Bauxites, Brazil. *Soc. Mining Enginner, AIME. Preprint 77H98*. 34 p.

Grubb P.L.C. 1979. Genesis of bauxite deposits in the lower Amazon Basin and Guianas coastal plain. *Economic Geology*, July, v.74: 735-750.

Horbe A.M.C. 1995. *Evolução mineralógica e geoquímica multi-elementar de perfis de solos sobre lateritos e Gossans na Amazônia*. Tese de Doutorado em Geoquímica. Curso de Pós-graduação em Geociências. Centro de Geociências. Universidade Federal do Pará. Belém-Pa. 245 p.

Horbe A.M.C. & Costa M.L 1999. Genetic relationship between lateritic duricrusts and soils in the Amazonian region - Brazil. In: Intern. Geochem. Expl. Symp. Vancouver, *Abstracts Volume*, p. 123-124.

Kotschoubey B. & Truckenbrodt W. 1981. Evolução poligenética das bauxitas do distrito de Paragominas – Açailândia (estados do Pará e Maranhão). *Rev. Bras. Geoc.*, 11:193-202.

Kotschoubey B., Menezes L.A.Q., Truckenbrodt W. 1984. Nature et évolutions des bauxites du secteur Jabuti-Ipixuna (district de Paragominas, Etat du Pará, Brésil. In: Cong. Nat. Soc. Sav., 109, *Annales*. Fasc. 1, p. 335-345.

Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1987. Phases and zonality of the bauxitic alteration in the northeast of the State of Pará (Brazil). *Travaux ICSOBA*, 16-17:115-127.

Kotschoubey B. & Truckenbrodt W. 1994. Evidências de bauxitização tardia no nordeste do estado do Pará. In: SBG/Norte, Simp. Geol. Amaz., 4, *Anais*, p. 269-271.

Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1996. Depósitos de caolim e argila semi-flint no nordeste do Pará. *Rev. Bras. Geoc.*, 26:71-80.

Kotschoubey B., Truckenbrodt W., Hieronymus B. 1997. Bauxite deposits of Paragominas. In: A. Carvalho, B. Boulangé, A.J. Melfi & Y. Lucas (eds.) *Brazilian Bauxites*. USP/FAPESP/ORSTOM, São Paulo, p. 75-106.

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, noroeste da bacia do Grajaú, nordeste do Pará/ oeste do Maranhão. *In: MARINI, O. (Org.). 2005. Caracterização em depósitos minerais em distritos mineiros da Amazônia*. Brasília, DF: DNPM-CT/MINERAL-ADIMB. p. 687–782.

Krook L. 1979. Sediment petrographical studies in northern Suriname. *Academisch Proefschrift, Vrije Universiteit te Amsterdam, the Nertherland*, 154 p.

Leite J.F., Aboarrage, A.M., Daemon, R.F. 1975. Projeto carvão da Bacia do Parnaíba. Relatório final das etapas II e III. Recife: DNPM/CPRM. **5**

Lima E. de A.M. & Leite J.F. 1978. *Projeto estudo global dos recursos minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba; integração geológica-metalogenética*. Relatório Final da Etapa – Recife: DNPM/CPRM. **16**.

Lovato O.G., Caye B.R., Araújo, C.C. 1995. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. *Itapecuru-Mirim. Folha SA.23-Z-C. Estado do Maranhão*. Escala 1:250.000. Brasília: CPRM, 100 p.

Mabesoone J.M., Campos Silva A., Buerlen K. 1972. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geologia*, 2:173-188.

Mabesoone J. M. 1984. Cenozóico nordestino: sistemas e sequências deposicionais. *In: Simpósio de Geologia do Nordeste. Atas, Natal*. 11: 142-150.

Miranda M.C.C. 2005. *Fácies, petrografia e paleontologia de depósitos albianos do Grupo Itapecuru, área de Coroatá (MA), bacia do Grajaú*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará, Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Belém, 139 p.

MME. Setembro de 2009. Perfil da Mineração em bauxita. Brasília, Secretaria de Geologia Minas, Mineração e Transformação Mineral (SGM) do Ministério de Minas e Energia-MME.

Nascimento S. N; Goés A. M. 2007. Petrografia de arenitos e minerais pesados de depósitos cretáceos (Grupo Itapecuru), Bacia de São Luís-Grajaú, norte do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*. **37**(1): 50-63.

Petri S. & Fúlfaro V.J. 1983. *Geologia do Brasil (Fanerozóico)*. São Paulo, USP, 631 p.

Peixoto, S. F. & Horbe, A. M. C. 2008. Bauxitas do nordeste do Amazonas. *Brazilian Journal of Geology*, **38**(2): 406-422.

Reynolds Jr R.C.& Bish D.L. 2002. The effects of grinding on the structure of a low-defect kaolinite. *American Mineralogist*, **87**:1626–1630.

Rossetti D.F., Truckenbrodt W., Góes A. M. 1989. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. *Bol. Mus. Par. Emilio Goeldi*, Série Ciências da Terra,(1):5-74.

Rossetti D.F. & Truckenbrodt, W. 1997. Revisão estratigráfica para os depósitos do Albiano-Terciário Inferior (?) na bacia de São Luís, Maranhão. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, Série Ciências da Terra, (9): 29-41.

Rossetti D.F. & Truckenbrodt W. 1999. Nomenclatura estratigráfica de depósitos cretáceos expostos na bacia de São Luís (MA). In: Simp. Cretáceo do Brasil, 5, *Boletim UNESP*, p. 485-490.

Rossetti D.F. 2001. Late Cenozoic sedimentary evolution in northeastern Pará, Brazil, within the context of sea level changes. *J. South Am. Earth Sci.*, **14**:77-89.

Rossetti D.F. 2006. Evolução Sedimentar Miocênica nos Estados do Pará e Maranhão. *Revista do Instituto de Geociências – USP. Geol. USP Sér. Cient.*, São Paulo, **6** (2): 7-18, outubro.

Rossetti F.D., Rocca R.R., Tatumi S.T. 2013. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na zona costeira da Bacia São Luís, Maranhão, Brasil. *Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.*, Belém, **8** (1): 11-25, jan.-abr.

Sombroek W.G. 1966. Amazon soils, a reconnaissance of the soils of the brazilian Amazon region. Wageningen, *Centre for Agric. Publ. Document*. 292 p.

Sá J.H.S. 1969. Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região Bragantina, Estado do Pará. *Bol. Geol. Inst. Geoc.*, UFRJ, Rio de Janeiro, 3: 21-36.

Santos Jr. A.E. & Rossetti D.F. 2002. Influência estuarina na Formação Ipixuna, porção média do rio Capim, Sub-bacia de Cametá. In: Simp. Cretáceo do Brasil, 6, *Boletim*, p. 1-5.

Santos Jr. A.E. & Rossetti D.F. 2003. Paleoambiente e estratigrafia da Formação Ipixuna, área do rio Capim, leste da sub-bacia de Cametá. *Rev. Bras. Geoc.* 33: 313-324.

Taylor S R. & McLennan S.M. 1985. The Continental Crust: Its Composition and Evolution. Oxford, London, Edinburgh, Boston, Palo Alto, Melbourne: Blackwell Scientific. 312 p.

Towse D. & Vinson P.E. 1956. Lateritas aluminosas do Baixo Amazonas. *Eng. Miner. Metal.* **30** (177): 133-135.

Truckenbrodt W. & Kotschoubey B. 1981. Argila de Belterra – cobertura terciária das bauxitas amazônicas. *Rev. Bras. Geoc.* 11: 203-208.

Truckenbrodt W. Alves R.J. 1982. Sobre a petrologia do arenito do Guamá, região de São Miguel do Guamá, NE do Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, Nova Série: Geologia, Belém, (27): 1-19, março.

Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Góes A.M. 1982. Considerações a respeito da idade das bauxitas na parte leste da região amazônica. In: SBG/Norte, Simpósio Geologia Ama, 1, *Anais*, p. 201-209.

Truckenbrodt W., Kotschoubey B., Schellmann W. 1991. Composition and origin of the clay cover on north-brazilian laterites. *Geologische Rundschau*, 80:591-610.

Truckenbrodt W., Nascimento M.S., Goés A.M. 2005. Distribuição de minerais pesados em arenitos de formações fanerozóicas no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão. *In: Horbe A. M. C. & Souza V. da S. Contribuições à geologia da Amazônia.* Manaus, SBG. Núcleo Norte. p.180-189.

Valeton, I. 1972. Developments in soil science 1. *In: Bauxites.* Elsevier, Amsterdam.

Vieira M. B., Miranda L., Gomes A. 2006. *Projeto Bauxita.* CVRD.

Wolf F.A.M. 1972 *Bauxita na Amazônia.* Belém, MME/DNPM. 46 p.

Wolf F.A.M. & Silva J. M. R. 1973. *Província bauxitífera da Amazônia.* Belém, MME/DNPM. 35 p.