



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

**AVALIAÇÃO GEOLÓGICA E
TECNOLÓGICA DE ARGILAS
POZOLÂNICAS DO DISTRITO FEDERAL
E ENTORNO**

MAX LÂNIO LACERDA

Tese de Doutorado N° 100

**BRASÍLIA - DF
2010**



UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - UnB

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - IG

Avaliação geológica e tecnológica de Argilas pozolânicas do Distrito Federal e entorno

MAX LÂNIO LACERDA

Tese de Doutorado N° 100

ORIENTADOR: Dr. Carlos José Souza de Alvarenga (UnB)

CO-ORIENTADORA: Dra. Edi Mendes Guimarães (UnB)

EXAMINADORES: Dr. Jorge Kazuo Yamamoto (USP)

Dr. Reiner Neumann (CETEM)

Dr. Claudinei Gouveia de Oliveira (UnB)

Dr. Marcel Auguste Dardenne (UnB)

Brasília, 2010

Em homenagem à
memória do amado e
inolvidável filho Alex
Sales Lacerda.

RESUMO

Esta tese apresenta o estudo geológico, mineralógico, geoquímico, de coloração do cimento e de atividade pozolânica de argilas em cinco áreas do Distrito Federal e entorno. O objetivo principal é de contribuir para o conhecimento científico de argilas pozolânicas utilizadas industrialmente na produção de cimento pozolânico. A compreensão da gênese e da evolução dos mantos intempéricos formadores de argilas pozolânicas, a correlação entre áreas, o estudo da atividade pozolânica das argilas, a prospecção e utilização industrial de argilas pozolânicas, completam o escopo do trabalho.

Os perfis das áreas estudadas são interpretados como produto de intemperização de rochas pelíticas dos Grupos Paranoá e Canastra e são formados por rocha matriz e saprolito na parte inferior e por *solum* na parte superior dos mantos intempéricos. A caulinita é o mineral responsável pela atividade pozolânica das argilas. É produzida inicialmente no saprolito a partir de illita ou muscovita e está presente por todo o manto intempérico como dois diferentes politipos. O politipo 1Md é bem definido no saprolito da porção inferior e o politipo 1A é o mineral dominante no *solum* da porção superior do manto intempérico. A intemperização das áreas ocorreu por meio de reações de hidrólise e o processo de lixiviação solubilizou Na, K, Ca, Mg e Fe e concentrou caulinita na porção médio-superior dos mantos intempéricos. A desferrificação provocou a mudança da cor dos mantos intempéricos de vermelho-amarelo no saprolito para bege claro no *solum*. O processo de caulinitização possivelmente continua ocorrendo no presente.

A calcinação a 800°C por 30 minutos provocou o colapso estrutural da caulinita, transformando-a em fase amorfa - metacaulinita. As argilas das áreas de Brazlândia (BRA), Santo Antônio do Descoberto (SAD), Sobradinho e Bonsucesso (BON), tornaram-se pozolânicas após a calcinação. As argilas pozolânicas de BRA, de SAD e da parte superior de BON não apresentaram mudanças de cor após calcinação. As argilas pozolânicas do perfil SA de Sobradinho e as argilas pozolânicas da parte basal de BON tiveram alteração de cor após a calcinação, podendo ser destinadas a mercados de cimento específicos. O “índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle” (IAP) mostrou-se incongruente com os resultados obtidos com as argilas pozolânicas. Recomenda-se a substituição do IAP pelo ICR “índice de crescimento de resistência mecânica à compressão”, dado pela relação $RMC2-RMC1/RMC1 \times 100$. O RMC1 indica a atividade pozolânica da argila com $Ca(OH)_2$ e o RMC2 a atividade pozolânica da argila com cimento. Considerar-se-á pozolânica a argila, quando o ICR for maior ou igual a zero, mantidos os demais requisitos estabelecidos pela NBR 12653/92.

Para adequada compreensão da formação de argila pozolânica e de sua preservação aos processos erosivos, são necessários estudos complementares em âmbito regional - aspectos geomorfológicos, estruturais e litológicos. Na prospecção de argilas pozolânicas os métodos mineralógicos fornecem bons indicativos de atividade pozolânica. Na fase final de pesquisa é imprescindível a utilização de métodos de medição de atividade pozolânica. A fim de se obter o melhor resultado técnico-econômico na aplicação industrial de argilas pozolânicas, é recomendável estudar a compatibilidade entre o clínquer produzido pela fábrica de cimento e a argila pozolânica.

ABSTRACT

In this thesis, we report the study of geological, mineralogical, geochemical, color of cement and clay pozzolanic activity in five areas of the Distrito Federal, Brazil. The main purpose of this work is for contributing to scientific knowledge of pozzolanic clays used industrially in the production of pozzolanic cement. Understanding the genesis and the evolution of weathered mantles of pozzolanic clays, the correlation between areas, the study of pozzolanic activity of clays, the prospection and the industrial use of pozzolanic clays, complete the scope of the thesis.

The profiles of the areas are interpreted as a weathering product evolved from pelitic rocks of the Paranoá and the Canasta Groups. The weathering mantles consist of parent rock and saprolite in the bottom of the mantle and of *solum* in the upper part of the weathering mantle. Kaolinite is the mineral responsible for the pozzolanic activity of the pozzolanic clays. The kaolinite is generated from illite and muscovite particles and is present throughout the weathering mantle as two different polytypes. The 1Md polytype is well defined within the saprolite of the bottom portion and the 1A polytype is the major mineral in the upper *solum* weathering mantle. The weathering process involves hydrolysis reactions. The leaching process caused the loss of Na, K, Ca, Mg and Fe and the kaolinite concentration in the medium-upper part of weathering mantle. The loss of Fe is responsible to change the mantle color from red-yellow on saprolite to beige-white on *solum*. Probably, this process is still occurring at present.

Burning the clays at 800°C for 30 minutes destroyed the mineralogical structure of kaolinite, transforming it into an amorphous phase – metakaolinite. The clays from Brazlândia (BRA), Santo Antônio do Descoberto (SAD), Sobradinho and Bonsucesso (BON) areas, became pozzolanic after burning. The pozzolanic clays from BRA, SAD and BON mines do not change the color after calcination. The pozzolanic clays from SA profile (Sobradinho) and from the bottom portion of BON mine changed the color after burning. These pozzolanic clays should be used in the special cements. The "pozzolanic activity index with cement after 28 days, compared to control" (IAP) was inconsistent with the results obtained with the pozzolanic clays. This thesis recommends the replacement of IAP by the ICR (growth index of compressive strength). The ICR is calculated by the ratio $RMC2-RMC1/RMC1 \times 100$. The RMC1 indicates the pozzolanic activity of clay with $Ca(OH)_2$ and RMC2 the activity of clay with cement. The pozzolanic clay would be considered if the ICR is greater than or equal to zero. The others requirements of NBR 12653/92 are kept the same.

For proper understanding of pozzolanic clay formation and its preservation to erosion, additional studies are necessary at the regional level - geomorphological, structural and lithological aspects. During the prospect phase the mineralogical methods provides good indications of pozzolanic activity. During the research final phase is essential to use methods of pozzolanic activity evaluation. In order to get the best technical and economic results in the industrial application of pozzolanic clays, it is recommended to study the compatibility of clinker produced by the cement plant and the pozzolan clay.

Agradecimentos

Sobretudo, agradecemos ao Senhor da Vida por nos facultar e permitir a produção desta modesta contribuição ao conhecimento de argilas pozolânicas do Distrito Federal e entorno. Aos amados papai (*in memoriam*) e mamãe, por nos acolher no seio familiar, por nos educar sempre à luz de uma sã moral, por nos estimular na superação das vicissitudes necessárias ao progresso e, especialmente, por sempre nos estear nos períodos difíceis da Vida. À esposa e aos filhos, por nos apoiar e por exercerem a santificante paciência em todos os percalços que enfrentamos juntos. Ao filho Álex (*in memoriam*), pelas inspirações que nos trouxeram de volta à Vida. Às irmãs, irmãos e familiares, amigos e colegas, pela convivência estimulante ao progresso. Enfim, agradecemos a todos, indistintamente, que, direta ou indiretamente, contribuíram para a consecução do presente trabalho.

À Universidade de Brasília, em particular, ao Instituto de Geociências, representado por todos os docentes, servidores e os colegas discentes, nosso franco reconhecimento pela convivência e suporte que nos forneceram durante esta jornada.

Aos docentes Dr. Carlos José Souza de Alvarenga e Dra. Edi Mendes Guimarães, em especial, que, a despeito da pesada agenda de compromissos, não hesitaram em ofertar, irrestritamente, seu conhecimento e seu tempo em favor do nosso aprendizado, nossa sincera gratidão.

Ao Professor Dr. Geraldo Resende Boaventura, ao Myller de Sousa Carvalho e ao Fernando Souza Cavalcante, que gentilmente ofereceram seu apoio e ajuda no Laboratório de Geoquímica do IG-UnB, nosso muito obrigado.

Aos professores, examinadores e colaboradores pela disposição firme e sincera em auxiliar-nos na produção do trabalho.

À secretaria do Instituto de Geociências, nas pessoas de Valdeci da Silva Reis, Francisca Rodrigues Freitas, Maristela Menezes Araújo, Rômulo Franco de Melo, Lusilene de Oliveira Leal Ramos, Dione Moreira de Souza, os nossos sinceros agradecimentos por seu apoio em todos os momentos de que nos fizemos necessitados.

Ao Rogério Lourenço Balbino e Abel Nunes de Oliveira por sua prontidão e disponibilidade para nos ajudar no CPD do IG-UnB, ao Marcos Macilo Sobral e ao Sr. Ricardo Ribeiro da Silva por seu importante apoio na área de fotocópias, aos colegas Zilberto da Silva e Gilberto Correa de Oliveira responsáveis pela agradável companhia quando de nossos deslocamentos às áreas, nossos agradecimentos.

Aos colegas da pós-graduação gostaríamos de registrar nossa gratidão por seu apoio e por seu sincero companheirismo, em especial, aos colegas de convivência mais próxima.

Ao colega e companheiro Geólogo Wagner Martins dos Santos por sua integral ajuda em trabalhos no laboratório de difratometria de Raios-X do IG-UnB e, especialmente,

pela sua simpática, atenciosa, pronta e agradável ajuda nesta tese, nosso sincero muito obrigado.

Ao colega Geólogo Henrique Zimmermann Tomassi pela paciência em nos ajudar, pelas sugestões e pelos agradáveis colóquios sobre o ensino de geologia, entre outros, nosso muito obrigado.

À Votorantim - Cimentos, motivação inicial de nosso interesse por pozolanas, particularmente, Dr. Fábio Ermírio de Moraes, por todo apoio que sempre nos foi gentilmente oferecido, pelo rico aprendizado nas experiências operacionais com pozolanas, enfim por todas as oportunidades que nos foram oferecidas ao longo da profícua experiência nesta respeitável e incomparável Companhia, nossa mais sincera gratidão.

Ao amigo Engenheiro Rômulo Fabri Miranda por sua sempre branda, suave e gentil recepção, por seu apoio ao projeto e pelas considerações dispensadas a nossa pessoa, nosso sincero reconhecimento.

Ao colega Engenheiro José Eustáquio Machado, que desde o início do projeto pozolana tem sido um incansável companheiro ao nos fornecer abertamente sua experiência na lida com cimentos derivados de pozolana, por nos amparar na organização das normas e suas interpretações, por fim, por todo apoio que nos têm provido, nossos sinceros agradecimentos.

Ao Geólogo Wiliam Marcelino Coelho, o incansável e fiel amigo, nossa especial homenagem pela persistência na continuidade da “missão geologia”, apesar das procelas que às vezes nos tomam de súbito pelos mares da Vida que singramos. Muito obrigado amigo, por mesmo assim, permanecer sempre disponível aos encontros nas áreas, pelas sugestões apresentadas e pelos proficientes debates que tanto enriqueceram esta despreziosa tese, nossos mais sinceros júbilos de gratidão.

Aos colegas da fábrica de Sobradinho-DF, particularmente ao laboratório de ensaios físicos, Hélio Ricardo do Nascimento Silva, João Mudesto da Silva, Rafael da Silva Albuquerque, Rosangela da Silva Maia, Arnaldo Milan de Souza, Zeily Teles de Carvalho e demais colaboradores, nosso muito obrigado por sua importante contribuição.

Aos demais colegas e ex-colegas da Votorantim – Cimentos, representados pelas fábricas, escritórios centrais e centros de tecnologia, nosso muito obrigado pela convivência nestes anos de labor comum, no relevante papel de prover à sociedade tão significativa *commodity* para o progresso humano.

Ao Laboratório de FURNAS, Centrais Elétricas S.A. em Aparecida de Goiânia, pelo suporte na realização das análises da área Bonsucesso, externamos nosso agradecimento.

Ao CNPq pelo apoio financeiro provido ao projeto, sem o qual sua viabilização teria sido de difícil consecução, nosso agradecimento.

Aos autores de todos os cantos do planeta, com quem interagimos através da rede bibliográfica disponível, por nos proporcionar incomparável aprendizado, sem o qual não poderíamos produzir este trabalho, agradecemos sinceramente.

Finalmente, dedicamos esta tese à Alcy José Lacerda, um pai naqueles longínquos, difíceis e profícuos dias, que, ao lado de nossa terna mamãe, foi o porto seguro que nos proporcionou a certeza de que não peregrinávamos desamparados. As singelas, não obstante gratificantes realizações, dedicamos a você, pois não olvidamos, eram também uma parte dos seus recônditos anseios, que a Vida, na presente existência, não lhe permitiu realizar. A você, querido tio, nossa mais sincera gratidão. Que o Senhor da Vida seja sempre em seu favor.

Índice

Resumo	I
Abstract.....	II
Agradecimentos.....	III
Índice Geral.....	VI
Índice de Figuras.....	IX
Índice de Tabelas.....	XI
Índice de Anexos.....	XII

Índice Geral

I - Introdução	1
II – Cimento Portland.....	5
II.1 – Fabricação do Cimento Portland.....	5
II.2 – Cimento Portland: conceitos, tipos principais e resistências mecânicas.....	7
II.3 – Processos de Hidratação e Endurecimento do Cimento Portland.....	9
II.4 – Cimento Portland Pozolânico.....	9
III – Argilas pozolânicas.....	11
III.1 – Definições e Conceitos Básicos de Argilas e Argilominerais.....	11
III.2 – Argilominerais: gênese da caulinita.....	14
III.3 – Pozolana: origem e conceito.....	15
III.4 - Mecanismo Químico da Atividade Pozolânica.....	16
III.5 - Classificação das Pozolanas.....	16
III.5.1 – Quanto a Atividade Pozolânica.....	17
III.5.2 - Baseada na natureza da Matéria-Prima.....	17
III.6 – Calcinação de Argilas.....	19
III.6.1 – Técnicas de Calcinação.....	20
III.6.2 – Reações Termiais.....	21
III.6.3 – Transformações Topotáticas de Argilominerais.....	22
III.6.4 – Argilas Pozolânicas Cauliníticas.....	23
III.6.5 – Argilas Pozolânicas Ilíticas.....	27
III.6.6 – Outras Argilas Pozolânicas: comparação de resultados.....	31
III.7 – Vantagens do Uso de Pozolana no Cimento.....	32
IV – Contexto Geológico.....	34

IV.1 – Faixa Brasília.....	34
IV.2 – Grupo Canastra.....	36
III.2.1 – Litofácies no Grupo Canastra no Distrito Federal.....	36
IV.3 – Grupo Paranoá	37
III.3.1 – Sistemas Depositionais da Sequência Paranoá.....	39
IV.4 – Geologia Estrutural.....	40
V – Materiais e Métodos.....	42
V.1 – Materiais.....	42
V.1.1 – Amostragem.....	42
V.1.1 – Preparação de Amostras.....	47
V.2 – Métodos.....	48
V.2.1 – Difração de Raios-X.....	49
V.2.2 – Análises Químicas.....	51
V.2.3 – Calcinação de Argila.....	51
V.2.4 – Resistência Mecânica à Compressão (RMC).....	52
V.2.4.1 – Determinação de Atividade Pozolânica com Ca(OH) ₂	53
V.2.4.2 – Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento.....	53
VI. – Geologia Local.....	55
VI.1 - Brazlândia.....	57
VI.2 – Santo Antônio do Descoberto.....	65
VI.3 – Santa Maria.....	73
VI.4 – Sobradinho.....	79
VI.5 – Bonsucesso.....	84
VII – Resultados Analíticos.....	89
VII.1 – Composição Mineralógica de Argilas e de Materiais Calcinados.....	89
VII.1.1 – Composição Mineralógica de Argila <i>In Natura</i>	90
VII.1.1.1 – Relações entre Mineralogia e Materiais Intempéricos....	93
VII.1.2 – Composição Mineralógica de Materiais Calcinados.....	98
VII.2 – Composição Química.....	105
VII.2.1 – Relações entre Geoquímica e Materiais Intempéricos.....	112
VII.3 – Coloração do Cimento.....	115
VII.4 – Atividade Pozolânica.....	121
VII.4.1 – Atividade Pozolânica: Ca(OH) ₂ com argila <i>in natura</i>	121
VII.4.2 – Atividade Pozolânica: Ca(OH) ₂ com argila calcinada.....	123
VII.4.3 – Atividade Pozolânica: cimento com argila calcinada.....	124
VIII – Discussões.	129
IX – Conclusões.....	140
X – Referências Bibliográficas.....	144

Anexos

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua.....	A2
Anexo 2 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem pontual.....	A67
Anexo 3 – Composição Química: amostragem contínua.....	A90
Anexo 4 – Composição Química: amostragem pontual.....	A95
Anexo 5 – Coloração do Cimento: amostragem continua.....	A98
Anexo 6 – Atividade Pozolânica: amostragem continua.....	A103
Anexo 7 – Artigo: “Kaolinite polytype as a conditioner of the pozzolanic activity: Bonsucesso mine, Central Brazil”	A108
Anexo 8 – Artigo: “Kaolinitic pozzolan originated from weathering of muscovite-quartz-schist: Santo Antônio do Descoberto mine, Central Brazil”	A128

Índice de Figuras

Figura I – Mapa de Localização.....	4
Figura II.1 – Desenho esquemático do processo de fabricação do cimento portland.....	6
Figura II.2 – Clinquer portland.....	6
Figura II.3 - Curva esquemática da evolução das reações de hidratação.....	10
Figura III.1 - Difratoograma da amostra (TbII).....	24
Figura III.2 - Imagens de MEV: cristais de caulinita.....	26
Figura III.3 - Difratoograma da ilita <i>in natura</i> e calcinada.....	28
Figura III.4 - Efeitos da calcinação de ilita.....	29
Figura III.5 - Densidade e Área de superfície específica (BET).....	30
Figura III.6 - Resistência à compressão: cimento e ilita <i>in natura</i> e calcinada.....	31
Figura III.7 – Resistência à compressão: cimento e argila <i>in natura</i>	32
Figura IV.1 – Mapa Geológico da Faixa Brasília.....	35
Figura IV.2 - Coluna litoestratigráfica da Sequência deposicional Paranoá.....	38
Figura V.1 – Processo de amostragem com coleta contínua.....	42
Figura V.2 - Preparação de amostras passo a passo.....	48
Figura V.3 – Difratoograma da área Brazlândia.....	50
Figura V.4 – Modelo de mufla utilizada para calcinação.....	52
Figura V.5 – Prensa utilizada nos ensaios.....	53
Figura VI.1 – Mapa geológico das áreas de estudo.....	56
Figura VI.2 – Mapa geológico da região de Brazlândia.....	59
Figura VI.3 – Localização da área de Brazlândia.....	60
Figura VI.4 – Detalhe da mina Brazlândia.....	60
Figura VI.5 – Porção central da mina Brazlândia.....	61
Figura VI.6 – Afloramento de metargilite: Brazlândia.....	61
Figura VI.7 – Perfil intempérico: Brazlândia.....	62
Figura VI.8 – Secção esquemática e perfis intempéricos hipotéticos: Brazlândia.....	63
Figura VI.9 – Argila mosqueada: Brazlândia.....	64
Figura VI.10 – Mapa geológico da região de Santo Antônio do Descoberto.....	67
Figura VI.11 – Localização da área de Santo Antônio do Descoberto.....	68
Figura VI.12 – Esboço geológico da área de Santo Antônio do Descoberto.....	69
Figura VI.13 – Elevação de muscovita-quartzo-xisto em Santo Antônio do Descoberto.....	70
Figura VI.14 – Frente de lavra da mina Santo Antônio do Descoberto.....	70
Figura VI.15 – Argilas mosqueadas na área de Santo Antônio do Descoberto.....	71
Figura VI.16 – Perfil intempérico: SAD/SADS.....	71
Figura VI.17 – Perfil intempérico: SAD.....	72
Figura VI.18 – Secção esquemática: Santo Antônio do Descoberto.....	72

Figura VI.19 – Mapa geológico da região de Santa Maria.....	75
Figura VI.20 – Localização da área de Santa Maria.....	76
Figura VI.21 – Detalhe da área de Santa Maria.....	76
Figura VI.22 – Perfis de intemperismo: STA e STA1.....	77
Figura VI.23 – Recuperação de testemunho de sondagem.....	77
Figura VI.24 – Secção longitudinal: Santa Maria.....	78
Figura VI.25 – Mapa geológico da região de Sobradinho.....	80
Figura VI.26 – Localização da de área Sobradinho.....	81
Figura VI.27 – Detalhe da área de Sobradinho.....	81
Figura VI.28 – Área de Sobradinho a partir da BR-020.....	82
Figura VI.29 – Perfis de intemperismo: S e SA.....	83
Figura VI.30 – Secção longitudinal: Sobradinho.....	83
Figura VI.31 – Mapa geológico da região de Bonsucesso.....	85
Figura VI.32 – Localização da área de Bonsucesso.....	86
Figura VI.33 – Detalhe da mina Bonsucesso.....	86
Figura VI.34 – Frente de lavra da mina Bonsucesso.....	87
Figura VI.35 – Perfil intempérico: mina Bonsucesso.....	88
Figura VII.1 – Difractogramas da área de Bonsucesso: politipos da caulinita.....	91
Figura VII.2 – Detalhe de Argilas mosqueadas: BRA.....	93
Figura VII.3 – Difractogramas de argilas mosqueadas: BRA.....	95
Figura VII.4 – Difractogramas de argilo-laterito: BRA.....	96
Figura VII.5 – Difractogramas de laterito: BRA.....	97
Figura VII.6 – Difractogramas de muscovita-quartzo-xisto intemperizado: SAD.....	98
Figura VII.7 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo BRAC/BRAT.....	109
Figura VII.8 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo SAD/SADS.....	109
Figura VII.9 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo SAD1.....	110
Figura VII.10 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo STA/STA1.....	110
Figura VII.11 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo S/SA.....	111
Figura VII.12 – Distribuição geoquímica no perfil de alteração BONC/BONT.....	111
Figura VII.13 – Distribuição geoquímica de argilas mosqueadas: BRA.....	113
Figura VII.14 – Comparação de cor: <i>in natura</i> , calcinada e corpo-de-prova: BRA.....	117
Figura VII.15 – Comparação de cor: <i>in natura</i> , calcinada e corpo-de-prova: SAD.....	118
Figura VII.16 – Comparação de cor: <i>in natura</i> , calcinada e corpo-de-prova: S e SA.....	119
Figura VII.17 – Comparação de cor: <i>in natura</i> , calcinada e corpo-de-prova: BOM.....	120
Figura VII.18 – Distribuição da atividade pozolânica de cal + <i>in natura</i>	122
Figura VII.19 – Distribuição da atividade pozolânica de cal + calcinada.....	124
Figura VII.20 – Distribuição da atividade pozolânica de cimento + calcinada.....	125
Figura VII.21 – Distribuição da atividade pozolânica ao longo dos perfis.....	128

Figura VIII.1 – Detalhe da região da área de Brazlândia.....	131
Figura VIII.2 - Detalhe da região da área de Santo Antônio do Descoberto.....	132
Figura VIII.3 – Detalhe da mina Santo Antônio do Descoberto.....	133
Figura VIII.4 – Modelo de evolução intempérica do Distrito Federal e entorno.....	136

Índice de Tabelas

Tabela II.1 - Cimentos Portland brasileiros.....	8
Tabela II.2 - Classe de resistências dos cimentos portland brasileiros.....	8
Tabela III.1 – Classificação dos principais filossilicatos.....	13
Tabela III.2 – Classificação básica de materiais pozolânicos.....	17
Tabela III.3 – Classificação dos materiais geológicos quanto a atividade pozolânica.....	17
Tabela III.4 – Classificação das pozolanas artificiais quanto à natureza da matéria-prima..	18
Tabela III.5 – Classificação das pozolanas por exigências químicas e físicas.....	19
Tabela III.6 – Sumário das reações termais.....	22
Tabela V.1 – Distribuição das amostras coletadas por área de estudo e técnica de coleta...	43
Tabela V.2 – Amostragem contínua e pontual: Brazlândia.....	43
Tabela V.3 – Amostragem contínua: SAD/SADS e SAD1.....	44
Tabela V.4 – Amostragem pontual: Santo Antônio do Descoberto.....	45
Tabela V.5 – Amostragem contínua: STA e STA1.....	46
Tabela V.6 – Amostragem contínua: S e SA.....	46
Tabela V.7 – Amostragem contínua: Bonsucesso.....	47
Tabela V.8 – Amostragem contínua quanto à condição e utilização.....	49
Tabela VI.1 – Amostragem de superfície: Brazlândia.....	65
Tabela VI.2 – Amostragem de Superfície: Santo Antônio do Descoberto.....	73
Tabela VII.1 – Composição mineralógica das argilas das áreas estudadas.....	89
Tabela VII.2 – Minerais e materiais identificadas por DRX.....	90
Tabela VII.3 – Composição mineralógica BRAC/BRAT: argila <i>in natura</i> e calcinada.....	100
Tabela VII.4 – Composição mineralógica do caminamento W-E: argila <i>in natura</i>	101
Tabela VII.5 – Composição mineralógica SAD/SADS e SAD1: <i>in natura</i> e calcinada.....	102
Tabela VII.6 – Composição mineralógica caminamento N-S e W-E: argila <i>in natura</i> ...	103
Tabela VII.7 - Composição mineralógica STA e STA1: argila <i>in natura</i>	103
Tabela VII.8 - Composição mineralógica dos perfis S e SA: argila <i>in natura</i> e calcinada.	104
Tabela VII.9 - Composição mineralógica BONC/BONT: argila <i>in natura</i> e calcinada.....	104
Tabela VII.10 – Composição química média e desvio padrão dos perfis estudados.....	106
Tabela VII.11 – Geoquímica de argilo-laterito: BRA.....	114
Tabela VII.12 – Geoquímica de laterito: BRA.....	114
Tabela VII.13 – Geoquímica de muscovita-quartzo-xisto intemperizado: SAD.....	115
Tabela VII.14 – Atividade pozolânica média dos perfis das quatro áreas estudadas.....	121
Tabela VII.15 – Comparação da atividade pozolânica.....	127

Índice de Anexos

Anexo 1 – Difrátogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Figura A1.1 – Difrátogramas BRA-C11 a BRA-C15: Brazlândia.....	A3
Figura A1.2 – Difrátogramas BRA-C6 a BRA-C10: Brazlândia.....	A3
Figura A1.3 – Difrátogramas BRA-C1 a BRA-C5: Brazlândia.....	A4
Figura A1.4 – Difrátogramas BRA-T5 a BRA-T1: Brazlândia.....	A4
Figura A1.5 – Difrátogramas BRA-C14 e BRA-C15: Brazlândia.....	A6
Figura A1.6 – Difrátogramas BRA-C12 e BRA-C13: Brazlândia.....	A7
Figura A1.7 – Difrátogramas BRA-C10 e BRA-C11: Brazlândia.....	A8
Figura A1.8 – Difrátogramas BRA-C8 e BRA-C9: Brazlândia.....	A9
Figura A1.9 – Difrátogramas BRA-C6 e BRA-C7: Brazlândia.....	A10
Figura A1.10 – Difrátogramas BRA-C4 e BRA-C5: Brazlândia.....	A11
Figura A1.11 – Difrátogramas BRA-C2 e BRA-C3: Brazlândia.....	A12
Figura A1.12 – Difrátogramas BRA-T1 e BRA-C1: Brazlândia.....	A13
Figura A1.13 – Difrátogramas BRA-T3 e BRA-T2: Brazlândia.....	A14
Figura A1.14 – Difrátogramas BRA-T5 e BRA-T4: Brazlândia.....	A15
Figura A1.15 – Difrátogramas SAD-1 a SAD-5: Santo Antônio do Descoberto.....	A17
Figura A1.16 – Difrátogramas SADS-8 a SADS-1: Santo Antônio do Descoberto.....	A17
Figura A1.17 – Difrátogramas SAD1-8 a SAD1-1: Santo Antônio do Descoberto.....	A18
Figura A1.18 – Difrátogramas SAD-4 e SAD-5: Santo Antônio do Descoberto.....	A20
Figura A1.19 – Difrátogramas SAD-2 e SAD-3: Santo Antônio do Descoberto.....	A21
Figura A1.20 – Difrátogramas SADS-1 e SAD-1: Santo Antônio do Descoberto.....	A22
Figura A1.21 – Difrátogramas SADS-3 e SADS-2: Santo Antônio do Descoberto.....	A23
Figura A1.22 – Difrátogramas SADS-5 e SADS-4: Santo Antônio do Descoberto.....	A24
Figura A1.23 – Difrátogramas SADS-7 e SADS-6: Santo Antônio do Descoberto.....	A25
Figura A1.24 – Difrátograma SADS-8: Santo Antônio do Descoberto.....	A26
Figura A1.25 – Difrátogramas SAD1-2 e SAD1-1: Santo Antônio do Descoberto.....	A28
Figura A1.26 – Difrátogramas SAD1-4 e SAD1-3: Santo Antônio do Descoberto.....	A29
Figura A1.27 – Difrátogramas SAD1-6 e SAD1-5: Santo Antônio do Descoberto.....	A30
Figura A1.28 – Difrátogramas SAD1-8 e SAD1-7: Santo Antônio do Descoberto.....	A31
Figura A1.29 – Difrátogramas STA-8 a STA-1: Santa Maria.....	A33
Figura A1.30 – Difrátogramas STA1-6 a STA1-1: Santa Maria.....	A33
Figura A1.31 – Difrátogramas STA-2 e STA-1: Santa Maria.....	A35
Figura A1.32 – Difrátogramas STA-4 e STA-3: Santa Maria.....	A36
Figura A1.33 – Difrátogramas STA-6 e STA-5: Santa Maria.....	A37
Figura A1.34 – Difrátogramas STA-8 e STA-7: Santa Maria.....	A38
Figura A1.35 – Difrátogramas STA1-2 e STA1-1: Santa Maria.....	A40
Figura A1.36 – Difrátogramas STA1-4 e STA1-3: Santa Maria.....	A41
Figura A1.37 – Difrátogramas STA1-6 e STA1-5: Santa Maria.....	A42
Figura A1.38 – Difrátogramas S-3 a S-1: Sobradinho.....	A44
Figura A1.39 – Difrátogramas SA-5 a SA-1: Sobradinho.....	A44

Figura A1.40 – Difratoformas S-2 e S-1: Sobradinho.....	A46
Figura A1.41 – Difratoforma S-3: Sobradinho.....	A47
Figura A1.42 – Difratoformas SA-2 e SA-1: Sobradinho.....	A49
Figura A1.43 – Difratoformas SA-4 e SA-3: Sobradinho.....	A50
Figura A1.44 – Difratoforma SA-5: Sobradinho.....	A51

Figura A1.45 – Difratoformas BON-C12 a BON-C16: Bonsucesso.....	A53
Figura A1.46 – Difratoformas BON-C7 a BON-C11: Bonsucesso.....	A53
Figura A1.47 – Difratoformas BON-C1 a BON-C6: Bonsucesso.....	A54
Figura A1.48 – Difratoformas BON-A1 a BON-A6: Bonsucesso.....	A54
Figura A1.49 – Difratoformas BON-C15 e BON-C16: Bonsucesso.....	A56
Figura A1.50 – Difratoformas BON-C13 e BON-C14: Bonsucesso.....	A57
Figura A1.51 – Difratoformas BON-C11 e BON-C12: Bonsucesso.....	A58
Figura A1.52 – Difratoformas BON-C9 e BON-C10: Bonsucesso.....	A59
Figura A1.53 – Difratoformas BON-C7 e BON-C8: Bonsucesso.....	A60
Figura A1.54 – Difratoformas BON-C5 e BON-C6: Bonsucesso.....	A61
Figura A1.55 – Difratoformas BON-C3 e BON-C4: Bonsucesso.....	A62
Figura A1.56 – Difratoformas BON-C1 e BON-C2: Bonsucesso.....	A63
Figura A1.57 – Difratoformas BON-A5 e BON-A6: Bonsucesso.....	A64
Figura A1.58 – Difratoformas BON-A3 e BON-A4: Bonsucesso.....	A65
Figura A1.59 – Difratoformas BON-A1 e BON-A2: Bonsucesso.....	A66

Anexo 2 – Difratoformas de Amostra Total: amostragem pontual (caminhamento de superfície) de argila *in natura*

Figura A2.1 – Difratoformas BRA-CS1A e BRA-CS1: Brazlândia.....	A68
Figura A2.2 – Difratoformas BRA-CS2 e BRA-CS1B: Brazlândia.....	A69
Figura A2.3 – Difratoformas BRA-CS2B e BRA-CS2A: Brazlândia.....	A70
Figura A2.4 – Difratoformas BRA-CS4 e BRA-CS3: Brazlândia.....	A71
Figura A2.5 – Difratoformas BRA-CS6 e BRA-CS5: Brazlândia.....	A72
Figura A2.6 – Difratoformas BRA-CS8 e BRA-CS7: Brazlândia.....	A73
Figura A2.7 – Difratoformas BRA-CS10 e BRA-CS9: Brazlândia.....	A74
Figura A2.8 – Difratoformas BRA-CS12 e BRA-CS11: Brazlândia.....	A75
Figura A2.9 – Difratoformas BRA-CS14 e BRA-CS13: Brazlândia.....	A76
Figura A2.10 – Difratoformas BRA-CS16 e BRA-CS15: Brazlândia.....	A77
Figura A2.11 – Difratoformas BRA-CS18 e BRA-CS17: Brazlândia.....	A78
Figura A2.12 – Difratoformas BRA-CS20 e BRA-CS19: Brazlândia.....	A79

Figura A2.13 – Difratoformas SADPWE-127argila e SADPWE-127: SAD.....	A81
Figura A2.14 – Difratoformas SADPWE-124 e SADPWE-127rocha: SAD.....	A82
Figura A2.15 – Difratoformas SADPWE-119 e SADPWE-126aux: SAD.....	A83
Figura A2.16 – Difratoformas SADH-9 e SADH-1: SAD.....	A85
Figura A2.17 – Difratoformas SADPSN-65 e SADH-10: SAD.....	A86
Figura A2.18 – Difratoformas SADPSN-69 e SADPSN-67: SAD.....	A87
Figura A2.19 – Difratoformas SADPSN-70aux e SADPSN-70: SAD.....	A88
Figura A2.20 – Difratoformas SADPSN-70aux2: SAD.....	A89

Anexo 3 – Composição Química: amostragem contínua (perfil vertical)

Tabela A3.1 – Composição química do perfil de alteração BRAC/BRAT: BRA.....	A91
Tabela A3.2 - Composição química dos perfis de alteração SAD/SADS: SAD.....	A91
Tabela A3.3 – Composição química do perfil de alteração SAD1: SAD.....	A92
Tabela A3.4 – Composição química dos perfis de alteração STA e STA1: STA.....	A92
Tabela A3.5 – Composição química dos perfis de alteração S e SA: S.....	A93
Tabela A3.6 – Composição química do perfil de alteração BONA/BONC: BON.....	A94

Anexo 4 – Composição Química: amostragem pontual (caminhamento de superfície)

Tabela A4.1 – Composição química caminhamento W-E: BRA.....	A96
Tabela A4.2 – Composição química caminhamento N-S: SAD.....	A96
Tabela A4.3 – Composição química caminhamento W-E: SAD.....	A97

Anexo 5 – Coloração do Cimento: amostragem contínua (perfil vertical)

Figura A5.1 – Variação de cor de corpos-de-prova moldados com cimento: BRA.....	A99
Figura A5.2 – Variação de cor de corpos-de-prova moldados com cimento: SAD.....	A100
Figura A5.3 – Variação de cor de corpos-de-prova moldados com cimento: S.....	A101
Figura A5.4 – Variação de cor de corpos-de-prova moldados com cimento: BON.....	A102

Anexo 6 – Atividade Pozolânica: amostragem contínua (perfil vertical)

Tabela A6.1 – Atividade pozolânica no perfil BRAC/BRAT: BRA.....	A104
Tabela A6.2 – Atividade pozolânica no perfil SAD/SADS: SAD.....	A105
Tabela A6.3 – Atividade pozolânica no perfil SAD1: SAD.....	A105
Tabela A6.4 – Atividade pozolânica nos perfis S e SA: S.....	A106
Tabela A6.5 – Atividade pozolânica no perfil BONC/BONA: BON.....	A107

I – Introdução

Originalmente o termo pozolana era associado às cinzas vulcânicas formadas naturalmente e às argilas calcinadas que reagem com o hidróxido de cálcio em temperatura ambiente. Atualmente o termo foi ampliado e se considera pozolânico todo material natural ou artificial, silicoso ou silico-aluminoso, que por si só não reage, isoladamente, na presença de água. Se esse material é finamente moído, exibe a capacidade de se combinar com hidróxido de cálcio na presença de água e a temperatura ambiente, proporcionando a formação de novos compostos com propriedades cimentícias e insolúveis em água (Zampieri, 1989).

Dentre os diversos tipos de argilas pozolânicas, as caulínicas, por sua abundância e qualidade superior relativa às demais, são as principais pozolanas utilizadas como matérias-primas na fabricação de cimento e concretos pozolânicos. Estas argilas são formadas como produto de intemperismo ou pela alteração hidrotermal ou como mineral autigênico a partir da alteração de silicatos (Millot, 1964; Chamley, 1989; Espejo, *et al.*, 1992), sendo mais comuns e abundantes as argilas pozolânicas caulínicas provenientes da intemperização de feldspatos.

Na região do Distrito Federal foi descrita a jazida de argila pozolânica Bonsucesso de natureza caulínica oriunda do intemperismo em metassedimentos da unidade Pelito-carbonatada do Grupo Paranoá (Lacerda, 2005). A origem de pozolana a partir da alteração intempérica de fonte sedimentar é pouco frequente e não havia sido registrada na região do Distrito Federal e entorno. Foi empreendido um estudo detalhado na jazida Bonsucesso, descrevendo um perfil geológico, cujo processo de intemperização evolui desde o metassedimento – pelitos - a partir de illita na base até caulinita no topo, mostrando transições importantes que marcam a gênese e a evolução da pozolana naquela jazida. A partir do referido estudo foram reunidas uma série de conclusões que permitiram estabelecer um padrão na área de Bonsucesso, destacando-se a gênese da pozolana.

Algumas questões podem ser levantadas a partir das conclusões do referido trabalho: O padrão Bonsucesso se repetiria nas demais áreas conhecidas na região? A gênese dos minerais pozolânicos seria equivalente? A mineralogia dessas áreas seria equivalente? A unidade litológica portadora de argila pozolânica se repetiria? Outras áreas poderiam ser correlacionadas à de Bonsucesso? Se sim, seria uma correlação total ou parcial? Seria possível a elaboração de um modelo de evolução intempérica para o Distrito Federal e entorno? Poder-se-ia estabelecer um padrão prospectivo? Que relação poderia se esperar entre as pozolanas e o cimento? As combinações entre as pozolanas e o cimento obedeceriam algum padrão? Enfim, a qualificação de atividade pozolânica das argilas estudadas, segundo a norma vigente no país, seria compatível com sua aplicação industrial nas fábricas do Distrito Federal?

Além disso, a utilização de pozolana no cimento proporciona uma série de vantagens como: redução da emissão CO₂ para a atmosfera, qualidade superior do cimento, custo de produção inferior, menor calor de hidratação, melhora da resistência ao ataque de águas sulfatadas, retardo ou eliminação das reações álcali-agregado, melhor plasticidade do

concreto, menor permeabilidade do concreto, entre outros (Lacerda, 2005). Finalmente, uma vez que o concreto é provavelmente o material de construção mais extensivamente usado no mundo (Sabir, *et al.*, 2001), a utilização de materiais pozolânicos na composição dos cimentos pode representar expressivos volumes.

Neste projeto de doutorado, também o aspecto econômico apresenta grande importância. No Distrito Federal a utilização de pozolanas na fabricação de cimento vem sendo realizada desde 2002, com produções sucessivamente crescentes ano a ano, em decorrência tanto das vantagens que seu uso proporciona como da ampliação do consumo do cimento. A reativação, em 2008, do parque fabril localizado em Cocalzinho de Goiás, especificamente para a produção cimento pozolânico, evidencia o valor que as pozolanas passaram a ter nesta região.

Considerando os aspectos acima, estudos e conhecimentos aprofundados através de pesquisas dirigidas, se tornam fator relevante para a melhor compreensão e aplicação deste importante material geológico. Desse modo, a presente tese de doutorado visa colaborar para uma melhor compreensão das pozolanas do Distrito Federal e entorno a fim de buscar respostas satisfatórias às dúvidas acima suscitadas. Para tanto, contempla o estudo de cinco áreas selecionadas segundo o critério de interesse na aplicação à fabricação de cimento, sendo: Brazlândia, Santo Antônio do Descoberto, Santa Maria, Sobradinho e Bonsucesso, as quais distam de Brasília, respectivamente, 50, 45, 40, 24 e 47 km, com acesso comum pela DF-003 (Figura I, VI.1).

A área de Brazlândia localiza-se no município de Águas Lindas de Goiás a 7 km da divisa oeste do Distrito Federal, segundo as coordenadas 15°40'S e 48°16'W. Distante 50 km a NW de Brasília, pode ser acessada seguindo-se pela DF-003, até a altura do viaduto Aírton Sena, tomando-se entrada a oeste para Cocalzinho de Goiás pela DF-095 (BR-070) até o viaduto de Taguatinga com entrada para Brazlândia a norte pela BR-080. De Brazlândia até a área de trabalho, percorre-se 7 km, tomando-se estrada não pavimentada a oeste passando pelo povoado Padre Lúcio, no sentido de mineração de calcário localizada nas proximidades (Figura VI.2, VI.3).

A área de Santo Antônio do Descoberto, no oeste do Distrito Federal, Região Administrativa XII, Samambaia, região limítrofe com o município goiano homônimo, situa-se conforme as coordenadas 15°56'22"S e 48°13'8"W. Distante 45 km a SW de Brasília, seu acesso pode ser realizado seguindo-se a sul pela DF-003 na saída para Goiânia, tomando-se a DF-075 (BR-040) até o viaduto na altura da subestação de rebaixamento de Furnas, acessando entrada a SW pela DF-280. Neste último trecho percorre-se 8,5 km até o início de habitações. A área localiza-se a 500 m na entrada a sul por estrada secundária não pavimentada, acesso para comunidades locais (Figura VI.10 e VI.11).

A área de Santa Maria na parte sul do Distrito Federal, Região Administrativa XIII, Santa Maria, região limítrofe ao município de Novo Gama (GO), localiza-se segundo as coordenadas 16°2'20"S e 48°0'50"W. Afastada 40 km ao sul de Brasília, tem seu acesso seguindo-se no sentido Belo Horizonte, pela DF-003 e, na continuidade, BR-040, até a altura do viaduto de acesso a Santa Maria e Novo Gama, entrando-se a oeste. Percorre-se

4,7 km pela DF-290, tomando-se entrada a norte em estrada secundária não pavimentada de acesso a extração de “saibro”, desativada (Figura VI.19 e VI.20).

A área de Sobradinho, na porção centro-nordeste do Distrito Federal, Região Administrativa V, Sobradinho, é identificada segundo as coordenadas 15°40'16"S e 47°48'16"W. A 24 km a NE de Brasília, seu o acesso pode ser realizado seguindo-se a norte pela DF-003 até a altura do posto colorado de onde se toma a BR-020 até o viaduto de acesso a cidade homônima, passando pelo mesmo e tomando-se o primeiro acesso a leste em via urbana que aflui na DF-249, perfazendo este percurso 2 km (Figura VI.25 e VI.26).

A área de Bonsucesso está localizada na parte norte do Distrito Federal, Região Administrativa VI, Planaltina, região Bonsucesso, ao longo da margem esquerda do rio Maranhão, região limítrofe com o município de Planaltina de Goiás, segundo as coordenadas 15°31'S e 47°35'16"W. Afastada 47 km a NE de Brasília, seu acesso pode ser realizado seguindo-se a norte pela DF-003 até a altura do posto colorado de onde se toma a BR-020 até entrada para Planaltina. Toma-se a DF-128, sentido Planaltina (GO), até o cruzamento com a DF-205, não pavimentada, percorrendo-se 10 km a leste nesta, até a área do estudo (Figura VI.31 e VI.32).

Esta tese foi dividida em duas partes principais. A primeira expõe os estudos bibliográficos e teóricos, sendo representada pelos capítulos II, III e IV. A segunda apresenta os dados, as interpretações e as conclusões consequentes, sendo formada pelos capítulos V, VI, VII, VIII, IX e X.

O capítulo II apresenta uma exposição básica sobre cimento portland, o III trata de argilas, pozolanas e calcinação de argilas e o IV aborda o contexto geológico das regiões nas quais as áreas do estudo estão inseridas.

No capítulo V são tratados os materiais e métodos utilizados, contendo as indicações da coleta e descrição de amostras e os procedimentos analíticos para: difração de raios-X, análises químicas e análises físicas de calcinação e de medição de atividade pozolânica. Nos capítulos VI e VII são apresentados os resultados geológicos e os analíticos. No capítulo IX são discutidos os questionamentos propostos em função dos resultados obtidos. Finalmente, no capítulo X, são oferecidas as conclusões da tese.

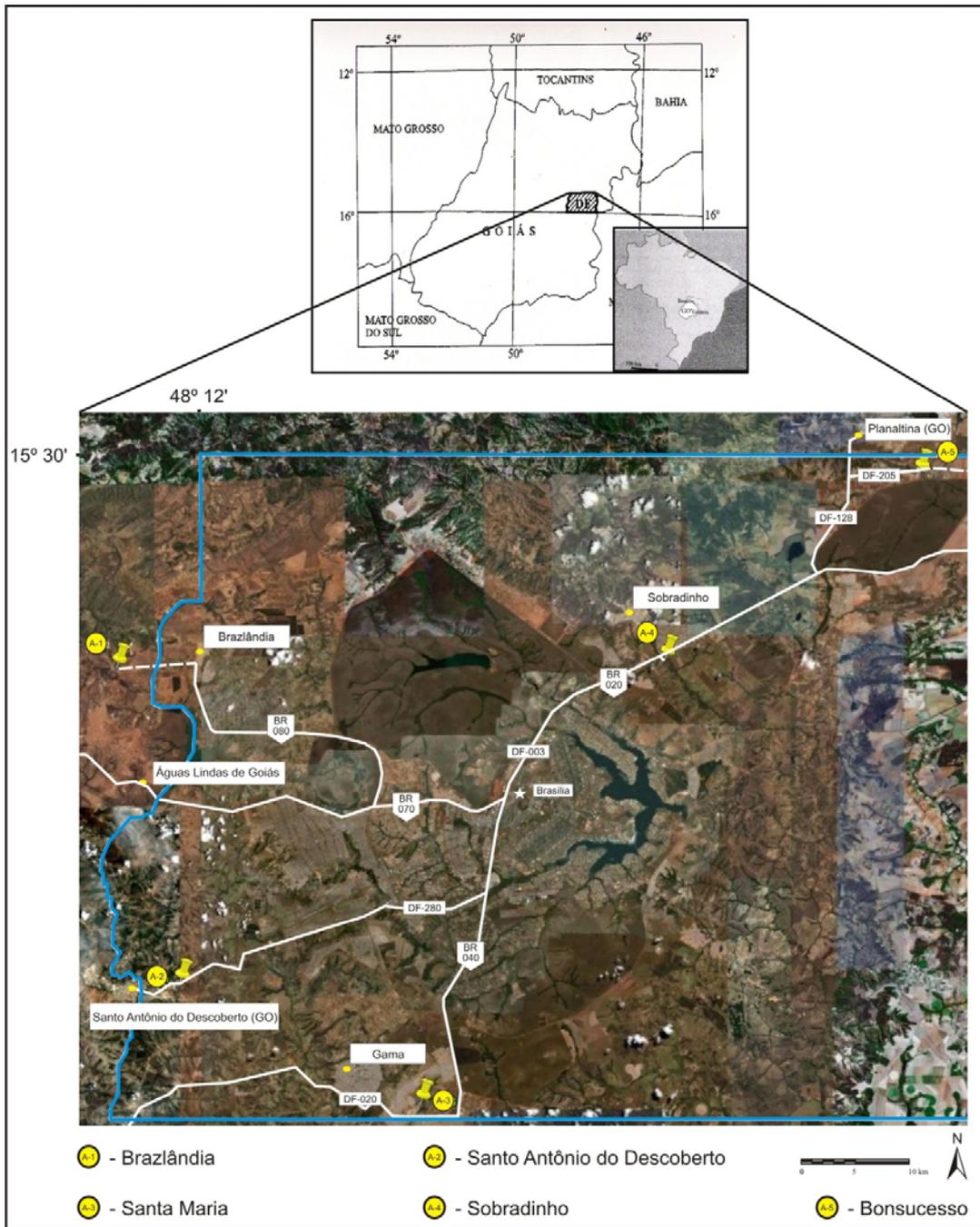


Figura I – Localização e acesso das áreas de estudo (Fonte: Google Earth).

II – Cimento Portland

A invenção do cimento portland é creditada a Joseph Aspdin, um construtor de Leeds, Inglaterra, que aos 21 de outubro de 1824 patenteou o “Cimento Portland”. Portland se refere à cidade inglesa de onde as rochas calcárias, utilizadas para a fabricação de cimento, foram extraídas (Lea 1970).

Em 1838, o Engenheiro Brunél registrou o uso do cimento portland na obra do túnel sob o rio Tamisa, marcando a partir de então, o surgimento definitivo da indústria de cimento portland (Goma 1979).

No Brasil, as primeiras tentativas de produção de cimento portland ocorreram em 1888, quando se iniciou a implantação de uma fábrica de cimento no Estado de São Paulo. Entretanto, essa e outras tentativas foram experiências descontínuas e, somente em 1924, em Perus, São Paulo, foi implantada, pela Companhia Brasileira de Cimento Portland, a primeira fábrica de cimento com produção contínua e distribuição ao mercado consumidor.

Atualmente o Brasil satisfaz suas necessidades internas de cimento e uma pequena parcela é exportada, sendo esse cimento produzido através de um complexo processo, mecanizado, com controles automatizados e com linhas de produção de elevada capacidade.

II.1 – Fabricação do Cimento Portland

A fabricação de cimento compreende quatro etapas maiores (Figura II.1). As principais matérias-primas para a fabricação de cimento portland são o calcário e argilas silicosas, aluminosas e ferruginosas. A lavra dessas matérias-primas constitui a primeira etapa do processo. Posteriormente, os materiais extraídos são britados, dosados, moídos, homogeneizados e armazenados em silos. Como resultado se produz uma mistura química e fisicamente adequada denominada farinha crua, constituindo a etapa preparação da farinha crua. Essa mistura é retomada dos silos e é submetida à queima em fornos rotativos de grandes dimensões a temperaturas elevadas (por volta de 1450°C) e que tem um resfriamento brusco (por volta de 150 a 90°C). Essa etapa produz um material químico e fisicamente modificado de tamanho centimétrico a subcentimétrico em forma de pelotas de cor cinza escura, denominado clínquer portland (Figura II.2).

A moagem do clínquer portland com aditivos constitui a última fase do processo de fabricação do cimento portland. Os aditivos utilizados dependem do tipo de cimento produzido, mas em todos os cimentos se utiliza o sulfato de cálcio (gipso ou gesso sintético) o qual é a substância reguladora do tempo de “pega” ou endurecimento inicial durante o processo de hidratação do cimento portland. Os demais aditivos mais comuns são calcário, escórias de alto forno e os materiais pozolânicos. Estes basicamente podem ser de duas naturezas principais: natural e artificial. As pozolanas naturais são provenientes dos materiais geológicos e as artificiais são produtos de processos industriais tais como argilas calcinadas, cinzas volantes geradas na queima do carvão mineral em usinas termoelétricas, microssilica, entre outros.

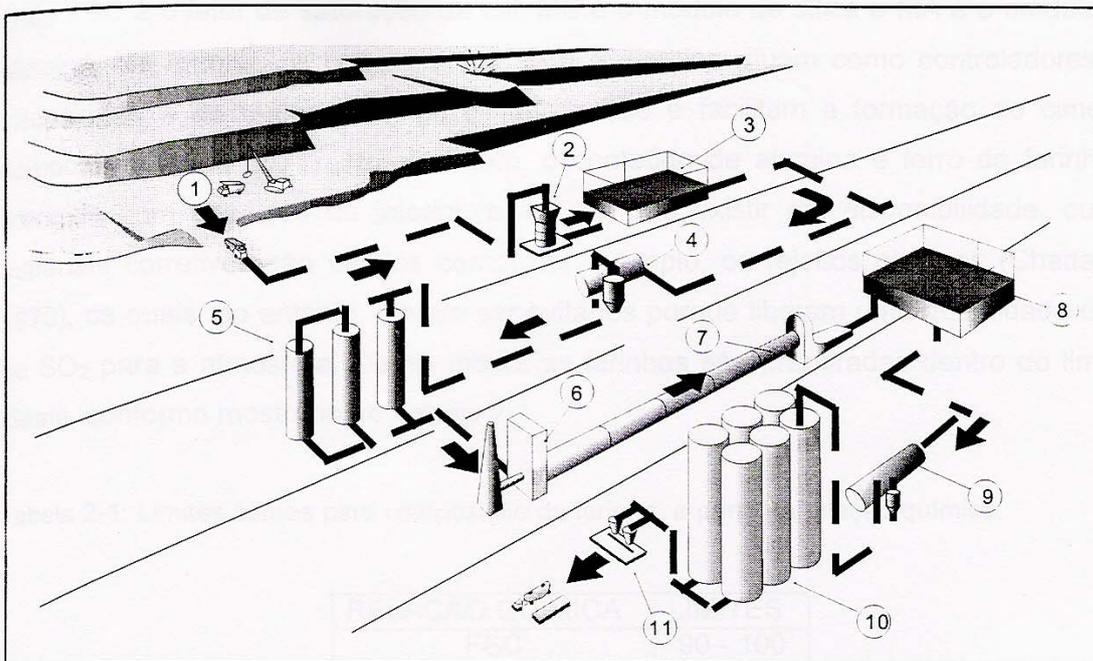


Figura II.1 – Desenho esquemático do processo de fabricação do cimento portland. 1) jazidas; 2) britador; 3) depósito de matéria-prima; 4) moinho de farinha; 5) silos de farinha; 6) preaquecedor; 7) forno rotativo; 8) depósito de clínquer e gesso; 9) moinho de cimento; 10) silos de estocagem de cimento; 11) despacho (Kihara *et al.*, 1990).



Figura II.2 – Clínquer portland obtido através da queima da farinha crua em forno rotativo a temperaturas por volta de 1450°C

II.2 – Cimento Portland: conceitos, tipos principais e resistências mecânicas

Pode-se conceituar cimento de modo geral como “um material particulado que, em contato com água dá origem a misturas plásticas, as quais, após algum tempo, se solidificam e, gradativamente, adquirem resistência mecânica”. “Cimento portland” é o “aglomerante hidráulico obtido pela queima a temperaturas elevadas de uma mistura adequada de calcário e argila a qual, após o processo de queima, transforma-se em um material sinterizado e peletizado denominado clínquer portland”. O cimento portland básico constitui-se unicamente de uma mistura de clínquer finamente moído e sulfato de cálcio, caracterizando o que se convencionou denominar cimento portland comum (Zampieri 1993).

“Aglomerantes” ou “materiais cimentícios” são entendidos como compostos de uma ou mais substâncias capazes de endurecer de forma rápida ou lenta e, em consequência, unir materiais heterogêneos de distintas naturezas. (Centurione, 1999). Os aglomerantes hidráulicos só endurecem através de reações com a água e formam um produto resistente à água.

Por sinterização entende-se o processo em que duas ou mais partículas sólidas se aglutinam pelo efeito do aquecimento a uma temperatura inferior à de fusão, mas suficientemente alta para possibilitar a difusão dos átomos das redes cristalinas.

O clínquer portland (Figura II.2) é constituído dos seguintes materiais: silicato tricálcico – alita ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), silicato bicálcico - belita ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$), aluminato tricálcico ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$) e ferroaluminato tetracálcico ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Na indústria cimenteira estas fases são abreviadas, respectivamente, pelas siglas C_3S , C_2S , C_3A e C_4AF , em que C é CaO; S é SiO_2 ; A é Al_2O_3 ; e F é Fe_2O_3 .

O cimento portland pode ser “comum”, como acima denominado, ou pode ser do tipo composto. Os “cimentos compostos” têm sido a área de maior desenvolvimento nas indústrias cimenteiras nas últimas 2 décadas, principalmente em função dos seus melhores desempenhos e também por ter um menor custo de produção. Os dois principais materiais utilizados nas adições do cimento portland são as escórias granuladas de alto-forno de indústrias siderúrgicas e os materiais pozolânicos.

No Brasil os requisitos químicos, físicos e de desempenho para produção de cimentos portland é controlada por um conjunto de normas de cimento da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Atualmente são produzidos e comercializados cerca de dez tipos de cimento portland, dos quais dois deles utilizam materiais pozolânicos: CP II – Z e CP IV (Tabela II.1).

Tabela II.1 - Cimentos Portland brasileiros normalizados pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)

Cimento Portland	Sigla	Materiais Constituintes (%)				Norma ABNT (NBR)
		Clinker + Gesso	Calcário	Pozolana	Escória	
Comum	CP I	100	0			5732/91
	CP I - S	95 - 99	1 - 5			
Composto	CP II - E	56 - 94	0 - 10	0	6 - 34	11578/91
	CP II - Z	76 - 94	0 - 10	6 - 14	0	
	CP II - F	90 - 94	0 - 10	0	0	
Alto-Forno	CP III	25 - 65	0 - 5		35 - 70	5735/91
Pozolânico	CP IV	45 - 85	0 - 5	15 - 50	0	5736/91
Alta Resistência Inicial (ARI)	CP V - ARI	95 - 100	0 - 5	0	0	5733/91
Resistentes a Sulfatos	RS	Equivalente aos cimentos dos quais deriva				5737/92
Destinados à cimentação de poços petrolíferos	CPP classe G	100	0			9831/91

Um dos principais requisitos físicos para o controle dos cimentos Portland é a medição da resistência à compressão. Os cimentos brasileiros são subdivididos em três “classes de resistência”, definidas em função da resistência mínima apresentada por corpos-de-prova padronizados após 28 dias de hidratação. Assim, um cimento classe 32 deve apresentar uma resistência à compressão superior ou igual a 32 MPa. A tabela II.2 exhibe estas 3 “classes de resistência” com seus respectivos limites inferiores e superiores de acordo com a norma NBR 7215/91 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Tabela II.2 - Classe de resistências dos cimentos portland brasileiros

* 1 MPa (MegaPascal) = 10,1977 kgf/cm²

Cimento Portland	Classe	Resistência à Compressão aos 28 dias (MPa)*	
		Limite Inferior	Limite Superior
Comum (CP I, CP I-S), Composto (CP II-F, CP II-Z , CP II-E) e Alto-Forno (CP III)	25	25,0	42,0
	32	32,0	49,0
	40	40,0	-
Pozolânico (CP IV)	25	25,0	42,0
	32	32,0	49,0
Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)	-	Resistência à Compressão aos 7 dias (MPa)*	
		Limite Inferior	Limite Superior
		34,0	-

II.3 – Processos de Hidratação e Endurecimento do Cimento Portland

De uma maneira geral, a hidratação do cimento portland pode ser entendida como a transformação das fases anidras e metaestáveis do clínquer portland (alita, belita, aluminato tricálcico e ferroaluminato tetracálcico), cujos campos de estabilidade envolvem temperaturas superiores a 1000°C, em novas fases hidratadas estáveis sob condições ambientes. Dessa forma, ao se adicionar água ao cimento portland tem-se, quase que instantaneamente, o início de uma série de reações de dissolução e de formação de novas fases, responsáveis, após algum tempo, pelo endurecimento do cimento do produto (Zampieri 1993).

O processo de hidratação do cimento portland pode ser dividido em quatro períodos distintos. O primeiro período caracteriza-se por reações quase instantâneas e intensas. Posteriormente, por cerca de 2 a 3 horas, ocorre uma fase de baixa atividade, denominada período de indução ou dormente. Em seguida inicia-se o período de aceleração (duração de 3 a 12 horas) com uma nova intensificação das reações de hidratação e a mistura deixa o estado plástico e adquire coesão e resistência mecânica. É nesse período que ocorre o fenômeno da “pega” do cimento. O declínio da intensidade das reações de hidratação caracteriza o período de desaceleração. As reações de hidratação são tipicamente exotérmicas sendo possível acompanhar o desenvolvimento dessas reações baseado em medições calorimétricas - quantidade de calor liberado pelas reações de hidratação, em função do tempo (Figura II.3).

As reações pozolânicas envolvendo argilas termicamente ativadas e o hidróxido de cálcio liberado pelo clínquer no processo de hidratação são similares àquelas observadas durante a hidratação isolada do cimento portland. Em essência são reações de dissolução e formação de novas fases, estáveis nas novas condições impostas ao material (Zampieri 1989).

II.4 – Cimento Portland Pozolânico

Esses cimentos têm sua base nas propriedades das pozolanas, em que o material pozolânico é definido como aquele que não apresenta propriedades cimentícias na presença de água, mas que, se finamente moído e na presença de umidade reage, à temperatura ambiente, com hidróxido de cálcio liberado pelo clínquer portland no processo de hidratação e produz compostos com propriedades cimentícias. Assim, o cimento portland cuja adição de material pozolânico varie de 6 a 14% é denominado de CP II – Z, enquanto que aquele com os limites de adição de material pozolânico entre 15 a 50% são denominados CP IV (NBR 11.578/91 e 5736/91, respectivamente).

Embora a norma brasileira permita a adição de até 50% de material pozolânico, a adição máxima seria inferior a esse valor, pois o teor de Ca(OH)_2 liberado a partir do clínquer anidro, após 28 dias, é limitada e equivaleria a uma massa menor do que a proporção de pozolana adicionada. Zampieri (1993) pondera que essa adição máxima seria de 30%. Entretanto, o valor ótimo de pozolana que se pode adicionar ao cimento deverá ser obtido a partir de experimentos laboratoriais próprios e irá depender tanto da pozolana

considerada como do clínquer. O primeiro varia entre as jazidas e o último varia em função do processo de fabricação.

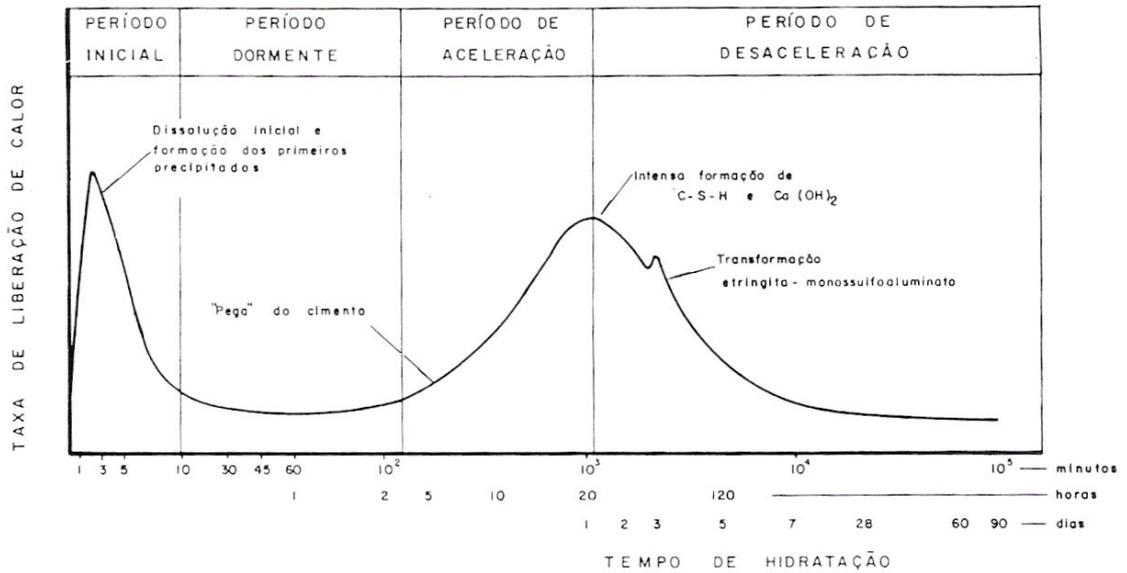


Figura II.3 - Curva esquemática da evolução das reações de hidratação exibindo a taxa de liberação de calor em cada uma de suas etapas (Zampieri, 1993)

III – Argilas Pozolânicas

III.1 – Definições e Conceitos Básicos de Argilas e Argilominerais

A palavra “argila” é oriunda do latim *argilla* e esta do grego *argos* ou *argilos*. Ela é usada para designar um depósito natural, inconsolidado, de aspecto terroso e de baixa granulometria, que geralmente apresenta certa plasticidade quando em contato com a água. Outra designação refere-se somente à granulometria sem considerar sua composição e é utilizada para caracterizar os materiais que ocorrem na “fração argila”, ou seja, na fração inferior a 2 µm (Bailey, 1980; Gomes, 1986; Chamley, 1989; Moore & Reynolds, 1989; Weaver, 1989; Zampieri, 1989). No presente trabalho será adotado o termo argila, quando empregado de forma isolada e será especificado como fração argila quando se referir ao aspecto granulométrico.

O conceito de argilomineral refere-se especificamente a um grupo de minerais que ocorrem preferencialmente na fração argila. Pertencem ao grupo dos filossilicatos e composicionalmente são classificados como aluminossilicatos em folhas hidratadas. A estrutura cristalina dos argilominerais é definida por folhas contínuas de tetraedros de SiO₄, que se ligam e se alternam com outras folhas octaédricas de composição essencialmente aluminosa e magnésiana, em que a unidade elementar possui uma coordenação octaédrica. A combinação dessas duas folhas elementares – tetraédrica e octaédrica – forma as camadas em diversos arranjos e que podem ocorrer separadas entre si por moléculas de água, cátions e moléculas orgânicas. A morfologia em camadas e uma perfeita clivagem no plano (001) é uma característica comum desses minerais. Essas camadas podem ser do tipo 1:1, constituídas por uma folha de cada tipo, ou 2:1, quando 2 folhas tetraédricas englobam a folha octaédrica (Souza Santos, 1975; Gomes, 1986; Chamley, 1989; Moore & Reynolds, 1989; Weaver, 1989).

Weaver (1989) sugeriu o termo “*physil*” para caracterizar os silicatos em folhas hidratados estáveis a temperatura inferiores a 400°C, sendo este termo independente de tamanho.

Os argilominerais são produto de alteração de uma grande variedade de rochas contendo minerais silicáticos, notadamente de silicatos de alumínio e ocorrem nas argilas conjuntamente com outros materiais e minerais associados como quartzo, feldspatos, micas, óxido e hidróxidos de ferro e alumínio, matéria orgânica, entre outros.

A Association Internationale pour l’Etude des Argiles, AIPEA, classifica os argilominerais em 8 grupos em função da constituição da camada (1:1 ou 2:1), a carga da camada (x) e a ocupação do espaço intercamada. Cada grupo é caracterizado por um valor “d” correspondente à distância interplanar ao longo do parâmetro 001 (Tabela III.1). Os grupos são divididos em subgrupos baseado no tipo de folha octaédrica: dioctaédrica (Di) ou trioctaédrica (Tr), conforme o cátion seja R⁺³ (Al³⁺, Fe³⁺) ou R⁺² (Fe²⁺, Mg²⁺), respectivamente. A definição das espécies considera ainda, além da composição química, a geometria de superposição de camadas individuais e intercamadas. (Bailey, 1980; Chamley, 1989).

Dentro de um mesmo cristal, a superposição de espécies de camadas distintas constitui os argilominerais interestratificados. Para estes, a AIPEA atribui nome aos de seqüência regular, com proporção de 50% para cada um dos componentes (Bailey, 1980, 1982).

O comportamento dos argilominerais decorre tanto da constituição e carga da camada (x) como do tipo de folha octaédrica (Di ou Tr). Estes fatores definem a distância interplanar e a capacidade de expansão dos argilominerais, permitindo a distinção de grupos de argilominerais simples e dos interestratificados. Estudos por DRX baseiam-se nas distâncias “d”, cujo valor é característico para cada grupo de argilominerais simples, sendo variável em minerais expansivos.

Tabela III.1 – Classificação dos principais filossilicatos, argilominerais e minerais interstratificados regulares; “x” carga da camada; “Di” e “Tr” folha dioctaédrica e trioctaédrica. (Adaptado de Bailey, 1980, 1982; Brindley, 1980; Hower & Mowatt, 1966; Środoń & Ebel, 1984).

CLASSIFICAÇÃO DOS PRINCIPAIS FILOSSILICATOS, ARGILOMINERAIS E MINERAIS INTERSTRATIFICADOS REGULARES			
AIPEA: Association Internationale pour l'Etude des Argiles (criada em 1952). IMA: International Mineralogical Association - Commission on New Minerals and Mineral Names.			
Filossilicatos e Argilominerais			
Tipo de camada	Grupo	Subgrupo	Espécies
1:1	Serpentina-caulinita x=0	Serpentinas (Tr) Caulinita (Di)	Crisotila, antigorita, lizardita, amesita, bertierina. Caulinita, diquita, nacrita, haloisita.
2:1	Talco-pirofilita x=0	Talco (Tr) Pirofilita (Di)	Talco, Willenseita. Pirofilita.
	Esmectita x~0,2 -0,6	Esmectita (Tr) Esmectita (Di)	Saponita, hectorita. Montmorilonita, beidelita, nontronita.
	Vermiculita x~0,6 -0,9	Vermiculita (Tr) Vermiculita (Di)	Vermiculita trioctaédrica. Vermiculita dioctaédrica.
	Ilita 0,6 < x < 0,9	Ilita (Tr) ? Ilita (Di)	Ilita, glauconita.
	Mica x~ 1,0	Micas (Tr) Micas (Di)	Biotita, anita, flogopita, lepidolita. Muscovita, paragonita, celadonita, fengita.
	Mica frágil x~ 2,0	Micas frágeis (Tr) Micas frágeis (Di)	Clintonita, anadita. Margarita.
2:1 Faixas invertidas	Clorita x variável	Cloritas (Tr), (Tr)	Charmosita, clinocloro, nimita.
		Cloritas (Di), (Di)	Donbassita.
		Cloritas (Di), (Tr)	Sudoíta, coqueíta (Li).
		Cloritas (Tr), (Di)	??
Minerais interstratificados regulares			
1:1 ou 2:1	Alietita Corrensita Hydrobiotita Kulkeita Rectorita Tosudita	Talco/esmectita (Tr) Esmectita (Tr) de carga baixa/clorita (Tr) Vermiculita (Tr) de carga alta/clorita (Tr) Biotita/vermiculita Talco/clorita Mica (Di)/esmectita (Di) Clorita (Di)/esmectita	

III.2 – Argilominerais: gênese da caulinita

Os argilominerais derivam de minerais primários ou de argilominerais preexistentes ou de suspensões coloidais ou de íons em solução aquosa e podem ser detríticos ou neoformados ou transformados de argilominerais preexistentes.

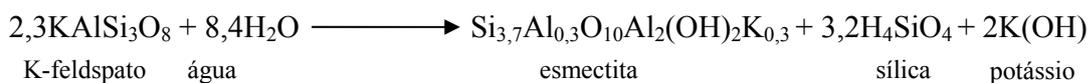
Os argilominerais do grupo da caulinita - caulinita, haloisita, diquita e nacrita - são essencialmente de mesma composição química, mas diferem no arranjo de suas estruturas. A caulinita é a mais comum e é formada ou como produto de intemperismo ou pela alteração hidrotermal ou como mineral sedimentar autigênico. A caulinita primária se forma *in situ* pela alteração de silicatos e essa alteração é resultado do intemperismo de superfície ou dos movimentos de água sob a superfície ou por ação hidrotermal. As caulinitas secundárias são sedimentares e são depositadas em camadas ou lentes associadas com outras rochas sedimentares. (Millot, 1963; Chamley, 1989; Espejo, *et al.*, 1992; Kotschoubey *et al.*, 1996; Kotschoubey *et al.*, 1999; Oliveira *et al.*, 2000; Biondi *et al.*, 2004).

A haloisita ocorre em saprolitos como produto de intemperismo e como um mineral hidrotermal. A diquita e a nacrita são dois polimorfos da caulinita. A primeira ocorre como mineral hidrotermal e ocasionalmente como mineral sedimentar autigênico. A nacrita é um mineral raro e ocorre somente em ambientes hidrotermais. Haloisita, diquita e nacrita são relativamente raras (Gomes, 1986; Murray, 1988; Chamley, 1989; Gomes & Massa, 1992).

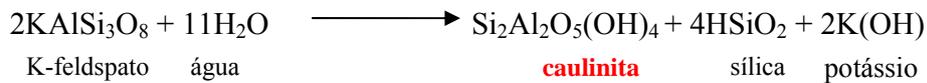
A caulinita perfaz a maioria dos depósitos econômicos conhecidos. Ocorre em depósitos hidrotermais, residuais e sedimentares. Os depósitos hidrotermais e os residuais são classificados como primários e os depósitos sedimentares como secundários. A haloisita é incomum em depósitos sedimentares.

A hidrólise, reação de alteração que ocorre na transformação dos silicatos em argilominerais, pode se processar em etapas como função das condições físico-químicas da solução de alteração no processo de intemperismo, com pH reinante na faixa de 5 a 9. Tomando-se o feldspato potássico como referência há três reações de hidrólise típicas, em que uma delas irá produzir caulinita. Em função do grau de eliminação do potássio podem ocorrer duas reações de hidrólise parcial. Se 87% do potássio e 46% da sílica forem lixiviados o produto será a esmectita e tem-se o processo de bissialitização. Se 100% do potássio e 66% da sílica forem eliminados, então será produzida a caulinita no processo da monossialitização. Caso a lixiviação do potássio e da sílica seja completa, a reação será de hidrólise total e se produzirá a gibbsita, insolúvel para essa faixa de pH e o processo será o da alitização, conforme abaixo (Teixeira *et al.*, 2009).

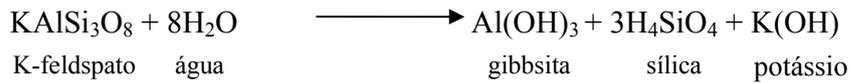
Bissialitização (eliminação de 87% do potássio e 46% da sílica)



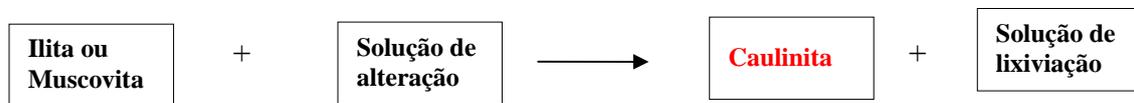
Monossilatização (eliminação de 100% do potássio e 66% da sílica)



Alitização (eliminação de 100% do potássio e da sílica)



Com a Ilita ou a muscovita a reação de hidrólise produz a caulinita conforme a equação geral abaixo.



As condições físico-químicas reinantes nessas reações irão depender do clima, e os fatores que controlam a intensidade do intemperismo podem ser relacionados com a temperatura, pluviosidade e vegetação. Assim, a formação dos argilominerais é favorecida em regiões tropicais, caracterizadas por elevadas temperatura e pluviometria. Os argilominerais encontrados normalmente em sedimentos são esmectitas, Ilitas e caulinitas. As esmectitas e Ilitas resultam de intemperização moderada, indicando curto período de exposição, ou clima moderado, ou baixa drenagem, enquanto a caulinita resulta de elevado grau de alteração, provocado por condições de intemperismo químico intenso, ou prolongado. As Ilitas são provenientes de erosão de rochas sedimentares ou metassedimentares e, embora possam ser autógenas, a maioria desses argilominerais em sedimentos é de origem detrítica (Guimarães, 1997).

III.3 - Pozolana: origem e conceito

As argilas pozolânicas são utilizadas em argamassas e concretos há cerca de vinte séculos, notadamente pelos romanos e o termo pozolana advém do Monte “Puzzioli” nas proximidades do Vesúvio na Itália. Como as argilas dessa região eram consideradas as de melhor qualidade, se atribuiu a esses materiais a designação de pozolanas, termo que mais recentemente foi também estendido a outros materiais, naturais ou artificiais, que exibem igual comportamento (Zampieri, 1989).

Nos dias atuais se considera pozolânico todo material natural ou artificial, silicoso ou sílico-aluminoso, que por si só não possua nenhuma atividade hidráulica - não reage isoladamente na presença de água. Entretanto, se finamente moído exhibe a capacidade de se combinar com hidróxido de cálcio em presença de água e a temperatura ambiente, proporcionando a formação de novos compostos com propriedades cimentícias e insolúveis em água (Zampieri, 1989).

III.4 - Mecanismo Químico da Atividade Pozolânica

A propriedade fundamental de uma pozolana é sua capacidade de reagir e combinar com o hidróxido de cálcio na presença de umidade e à temperatura ambiente para prover características cimentícias, conforme as reações pozolânicas abaixo (Montanheiro 1999):



As reações pozolânicas acima dependem da composição do material pozolânico. Para materiais silicosos, a primeira reação é que se desenvolve. Se for silico-aluminoso, como caulinitas, por exemplo, a terceira se processará.

Considera-se que a atividade pozolânica é tanto maior quanto maior o teor de sílica amorfa, isto é, não-cristalina no material em questão. Não há, contudo, uma linha de separação quanto ao teor de sílica para que um material possa ser considerado como pozolana. Conteúdos de SiO_2 e Al_2O_3 maiores que 70% são considerados como indicadores preliminares de uma pozolana caulinitica potencial (Souza Santos, 1975; Chakchouk *et al.*, 2006). Entretanto, após estudos de diversos autores, concluiu-se que a composição química de uma pozolana, tomada isoladamente, não é bom índice de sua capacidade de combinação com o hidróxido de cálcio (Souza Santos, 1975).

Para as argilas o mecanismo químico da atividade pozolânica está correlacionado com as alterações estruturais que ocorrem em função das variações de temperatura. No caso específico das argilas cauliniticas ocorrem transformações no argilomineral caulinita entre 500 a 900°C, em que se forma a fase metacaulinita contendo alumina e sílica em elevado grau de desordem cristalino e, portanto, de elevada área específica e grande atividade química (Souza Santos, 1975).

III.5 - Classificação das Pozolanas

A base para denominação pozolana a um material é função da sua capacidade de combinar com o hidróxido de cálcio na presença de umidade a temperatura ambiente. A maior ou menor proporção dessa combinação definirá a maior ou menor atividade pozolânica de um dado material e as classificações existentes seguem basicamente essa linha de mensuração. Apesar de não haver uma unanimidade mundial em classificação de pozolanas há o consenso de que as pozolanas se dividem em duas categorias básicas: as naturais e as artificiais. Entretanto, há divergências quanto à classificação das argilas calcinadas: ora são consideradas naturais ora artificiais.

Trabalhos de Kitsopoulos & Dunkan (1996) e da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) classificam como pozolanas naturais todos os produtos geológicos

encontrados na natureza, mas estabelecem os produtos calcinados, como por exemplo, argilas, como pozolanas artificiais. Mielenz *et al.* (1951) e Metha (1987) concordam com os autores anteriores, diferenciando deles por classificarem como naturais os produtos geológicos submetidos à calcinação (Tabela III.2).

Tabela III.2 – Classificação básica de materiais pozolânicos (adaptado de Montanheiro, 1999).

Pozolanas Naturais	Pozolanas Artificiais
Rochas vulcânicas ácidas	Escórias de alto forno
Tufos vulcânicos	Cinzas volantes (fly ash)
Terra diatomácea	Folhelho betuminoso – após extração
Arenitos e folhelhos opalinos	Microssílica
Argilas calcinadas (Mielenz <i>et al.</i> , 1951; Metha, 1987)	Argilas calcinadas (Kitsopoulos & Dunkan, 1996)

III.5.1 - Classificação das Pozolanas Quanto à Atividade Pozolânica

Mielenz *et al.* (1951) propõem a classificação das pozolanas naturais em função da atividade pozolânica dos materiais geológicos. Conforme tabela III.3, os autores identificaram as substâncias que são pozolânicas, ou que possam ser induzidas por calcinação.

Tabela III.3 – Classificação dos materiais geológicos quanto à atividade pozolânica; a atividade pozolânica decresce no sentido da seta (adaptado de Mielenz *et al.*, 1951).

Atividade	Substância
1	Vidro vulcânico. Tufos e pumicitos riolíticos: tufos e pumicitos dacíticos; alguns tufos e cinzas andesíticos podem ser reativos; tufos e cinzas basálticos e andesíticos são inferiores ou totalmente insatisfatórios em qualidade
2	Opala. Terra diatomácea e cherts opalinos
3	Argilas (obtidas através de calcinação)
3 a	Argila tipo caulínica
3 b	Argila tipo montmorilonita
3 c	Argila tipo Ilita
3 d	Argila misturada com vermiculita alterada
3 e	Paligorsquita
4	Zeólitas (clinoptilolita, ptilolita e analcima)
5	Óxidos de alumínio hidratados. Bauxitas
6	Não pozolânico. Minerais estáveis não reativos com a cal hidratada. Quartzo, feldspato, carbonatos, anfibólios, piroxênios, micas e a maioria dos minerais formadores de rochas.

III.5.2 - Classificação das Pozolanas Baseada na Natureza da Matéria-Prima

No Brasil, de acordo com a norma NBR 5736/91, as pozolanas artificiais são subdivididas em três grupos. 1 - Pozolanas calcinadas, cujos materiais são provenientes da

calcinação de determinadas argilas que, quando tratadas a temperatura entre 500°C e 900°C, adquirem a propriedade de reagir com o hidróxido de cálcio. 2 - Cinzas volantes compostas por resíduos finamente divididos, provenientes da combustão de carvão pulverizado ou granulado. 3 - E outros materiais como pozolanas artificiais, materiais não tradicionais como escórias siderúrgicas ácidas, microssílica, rejeito silicoaluminoso de craqueamento de petróleo, cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral (Tabela III.4).

Tabela III.4 – Classificação das pozolanas artificiais quanto à natureza da matéria-prima (adaptado NBR 5736/91)

Pozolanas Artificiais		
Pozolanas calcinadas	Cinzas volantes	Outros materiais
Argilas calcinadas que adquirem propriedade para reagir com o hidróxido de cálcio	Resíduos da combustão de carvão pulverizado ou granulado	Escórias siderúrgicas ácidas
		Microssílica
		Rejeito silicoaluminoso de craqueamento de petróleo
		Cinzas de resíduos vegetais e de rejeito de carvão mineral

A norma NBR 12653/92 estabelece três classes de pozolanas: classe N formada por pozolanas naturais e artificiais, como certos materiais vulcânicos de caráter petrográfico ácido, “cherts” silicosos, terras diatomáceas e argilas calcinadas; classe C formada por cinza volante produzida pela queima de carvão mineral em usinas termoelétricas; classe E composta por qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes N e C. Os materiais destas três classes, para serem considerados pozolanas, necessitam atender especificações físicas e químicas, conforme tabela III.5.

A norma fixa o índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias em no mínimo 75% (Tabela III.5). Este indicador foi questionado por não retratar adequadamente a atividade pozolânica nas misturas com cimento (Lacerda, 2005). Conforme se tratará nas seções V.2.4.2 e VII.4.3 e nos capítulos VIII e IX, esse valor é dependente da compatibilidade entre pozolana e cimento, podendo variar, para uma mesma pozolana, se utilizados cimentos, quimicamente diferentes, mesmo sendo de tipo e classe equivalentes. Nesse caso, o critério mais adequado, no entendimento do trabalho, deveria ser a utilização do índice de atividade pozolânica com a cal hidratada aos sete dias como critério de restrição, enquanto o índice de atividade pozolânica com cimento deveria ser utilizado como referência, apenas (Lacerda, 2005). Por essa razão, nesse trabalho, foi adotado, como controle de atividade pozolânica, somente o índice de atividade pozolânica com o hidróxido de cálcio, servindo o índice de atividade com cimento como referência no controle e como objeto de estudo e comparação entre os métodos.

Tabela III.5 – Classificação das pozolanas por exigências químicas e físicas, segundo classes (adaptado NBR 12653/92). * Para detalhar o significado destes parâmetros, consultar as seções V.2.4.2 e V.2.4.1.

Requisitos Químicos e Físicos por Classe de Pozolana	N	C	E
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ (% mínimo)	70	70	50
SO ₃ (% máximo)	4,0	5,0	5,0
Teor de umidade (% máximo)	3,0	3,0	3,0
Perda ao fogo (% máximo)	10,0	6,0	6,0
Na ₂ O (% máximo)	1,5	1,5	1,5
Material retido na peneira 45 micra (% máximo)	34	34	34
Índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle (% mínimo) – referido por IAP neste trabalho. *	75	75	75
Índice de atividade pozolânica com a cal hidratada aos 7 dias (MPa) – referido por RMC neste trabalho. *	6,0	6,0	6,0
Água requerida em relação à água inicial da mistura só com cimento – seção V.2.4 - (% máximo) *	115	110	110

III.6 – Calcinação de Argilas

A calcinação de argilas para produção de pozolanas é um tema antigo. Na verdade surgiu primeiro mesmo do que o cimento portland com os romanos no preparo de argamassas de pozolana e cal. Entretanto, a literatura disponível sobre ativação de argilas é escassa.

No século XX já se sabia que a reatividade das argilas calcinadas era devida à desordem provocada no retículo cristalino dos argilominerais em função da ação térmica e que as condições de calcinação e o tipo mineralógico dos argilominerais eram fatores importantes na obtenção de pozolanas de qualidade adequada (Mielenz *et al.*, 1951). Foi na Índia, através de norma interna aquele país, que se estabeleceram critérios e diretrizes para a calcinação de argilas (IS 1344, 1968).

De acordo com a experiência acumulada pelos indianos e sintetizada na norma referida, a temperatura de queima ideal é aquela necessária para provocar a desestruturação do argilomineral e essa deve ser obtida por experimentos próprios. Derivado das diversas experiências foram propostas faixas de temperatura consideradas como adequadas para ativação de certos grupos de argilominerais que deveriam ser tomadas como referência, apenas: esmectitas de 600 a 800°C; caulinitas de 700 a 800°C; Ilitas de 900 a 1000°C.

Além da natureza do argilomineral, a calcinação é facilitada pela moagem que contribui para a desagregação das partículas aglomeradas, ampliando a superfície específica para a reação (Sabir *et al.*, 2001).

A calcinação de argilas se presta ainda à verificação de alteração de cor da pozolana. Para a fabricação de cimento é importante que o material pozolânico, depois de calcinado, não exiba mudança significativa de cor que possa estar muito discrepante daquela do cimento ao qual será misturada (Seção VII.3). Por outro lado, a verificação da alteração da cor, após a calcinação, pode ser útil para o lançamento de cimentos diferenciados em aplicações específicas (Lacerda, 2005).

Para a utilização como produto industrial, normalmente são realizadas diversas baterias de testes laboratoriais para materiais coletados dos vários níveis da área a ser minerada. Sendo aprovados, lotes de massas maiores são extraídos e submetidos à “queima industrial” através de fornos rotativos. Após algumas seqüências de testes, determinam-se as faixas ótimas de trabalho e o processo de queima industrial em caráter de produção industrial é então aprovado (Lacerda, 2005).

III.6.1 – Técnicas de Calcinação

A transformação de fase, cristalinas e não-cristalinas, que os argilominerais sofrem com a elevação da temperatura tem sido objeto permanente de pesquisas, que visam caracterizar mais precisamente a natureza das fases formadas, bem como mecanismos pelos quais essas fases estão se transformando (Souza Santos, 1975).

As técnicas mais utilizadas nos estudos térmicos incluem difração de raios-X (XRD), por meio do qual a identificação das fases minerais antes e após o tratamento térmico é obtida, análise térmica diferencial (DTA), que permite o tratamento térmico de pequenas porções de argila, calcinação em mufla, que permite o tratamento térmico de alíquotas de maiores porções de argila, e microscopia eletrônica de varredura (MEV) que faculta as comparações dos diversos aspectos das fases minerais em cada estágio do processo de aquecimento, ou, mais comumente, a combinação destes. Na mina Bonsucesso, utilizou-se diversas técnicas a fim de se compará-las quanto ao propósito do estudo de argilas pozolânicas destinadas à fabricação de cimento, definindo as mais apropriadas (Lacerda, 2005). Desse modo, baseando-se no estudo referido, esta tese utilizou as técnicas XRD e calcinação em mufla.

Nos estudos do tratamento térmico de pozolanas destinadas à fabricação de cimento, além dos anteriores, são utilizados, entre outros, métodos para medição de densidade, área de superfície específica (BET) e medições de resistência mecânica à compressão de corpos-de-prova moldados e rompidos para várias idades de cura – 1, 3, 7, 28 e 90 dias (Seção V.2.4). Este último é internacionalmente aceito como o método definitivo de medição da atividade pozolânica efetiva de uma argila e é realizado moldando-se corpos-de-prova contendo cimento (Seção V.2.4.2) ou cal hidratada (Seção V.2.4.1) com argilas em proporções pré-especificadas. Após o tempo de cura definido os corpos-de-prova são submetidos à prensa vertical. A resistência mecânica é obtida quando há o rompimento do corpo-de-prova, indicando o limite de sua resistência mecânica.

Nos tratamentos térmicos em argilas pozolânicas voltados para a aplicação industrial normalmente se utiliza procedimentos de calcinação em muflas próprias para as cargas térmicas requeridas (Figura V.4). Também são realizados experimentos comparando

os resultados de laboratórios feitos com muflas com aqueles obtidos através da calcinação em fornos rotativos industriais (Al-Rawas & Hago, 2005).

III.6.2 – Reações Termiais

Brindley e Lemaitre (1987) estudaram caulinita e minerais do grupo da caulinita, clorita, serpentinita, pirofilita, talco, muscovita, Illita, montmorilonita e vermiculita e demonstraram que as reações químicas de transformação dos argilominerais podem ser subdivididas em reações de baixa, intermediária e alta temperatura (Tabela III.6).

As reações de baixa temperatura ocorrem abaixo de 400°C e envolvem a perda de água molecular presente entre as camadas dos minerais expansivos e dos canais na sepiolita e paligorskita. Boa parte desta água está relacionada à hidratação de cátions, embora, em alguns minerais como a haloisita, existam folhas de água molecular. De modo geral estas reações predominam em temperaturas da ordem de 200°C (Tabela III.6).

As reações de temperatura intermediária se dão, principalmente, na faixa entre 400°C a 750°C e envolvem a desidroxilação e a formação das fases desidroxilizadas quase estáveis (Tabela III.6). Anterior à desidroxilação propriamente dita, em alguns minerais há o deslocamento de prótons e por ser este um processo precursor da reação de desidroxilação foi considerado como pertencente a este estágio de temperatura. A reação química mais importante em temperaturas intermediárias é a desidroxilação que ocorre no intervalo de temperatura de 500°C a 700°C e que depende da composição química e da estrutura cristalina dos argilominerais considerados (Souza Santos, 1975).

Reações de alta temperatura ocorrem acima de 750°C, predominantemente entre 900°C a 1000°C, e são reações de recristalização envolvendo a formação de novas fases minerais (Tabela III.6). Comumente as reações de temperatura intermediária ocorrem concorrentemente com as reações de alta temperatura.

Os autores também se referem às reações de oxidação e redução com sendo particularmente importante aos minerais com variação de valência dos cátions, chamando a atenção ao papel especial do ferro na estrutura do mineral, ressaltando, porém, que não se restringe a este elemento.

Tabela III.6 – Sumário das reações termais, identificando as três fases: reações de baixa, intermediária e alta temperatura (adaptado de Brindley & Lemaitre, 1987).

Sumário de reações termais – minerais dioctaédricos				
Caulinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ tipo 1:1	Estágio predesidroxilação	→ 450-550°C Metacaolim $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$	→ 900°C fase tipo espinélio	→ 1000-1100°C ¹ Mulita $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$
Pirofilita $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ tipo 2:1		→ 650°C pirofilita desidroxilada $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{11}$	→ 950-1000°C	→ ¹ Mulita $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$
² Montimorilonita tipo 2:1	→ 150-250°C	→ Montimorilonita anidra	→ 700°C Montimorilonita desidroxilada	1000°C → fase tipo espinélio 1150°C ¹ Mulita
Muscovita tipo 2:1		→ 750°C	→ Muscovita Desidroxilada	→ 1050°C fase tipo espinélio Sanidina → 1250°C Corundum $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ¹ Mulita Outras fases
Sumário de reações termais – minerais trioctaédricos				
Serpentinita $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ tipo 1:1	→ 550°C Serpentinita desidroxilada	→ 600°C ¹ Fosterita (olivina) Mg_2SiO_4	→ 1100°C Forsterita + enstatita MgSiO_3	
Talco $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ tipo 2:1			→ 900-1000°C ¹ Enstatita	
³ Saponita tipo 2:1	→ 550°C Saponita desidroxilada		→ 750°C ¹ Enstatita	
⁴ Vermiculita tipo 2:1	→ 500-800°C Vermiculita desidroxilada		→ 850°C ¹ Enstatita	
Clorita tipo 2:1	→ 450-550°C Desidroxilação completa ou parcial		→ 800°C ¹ Olivina	
¹ Com separação de sílica e/ou outras fases. ² Fórmula ideal: $\text{M}^{+}_{0,33n}\text{H}_2\text{O} \cdot (\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,37})\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. ³ Fórmula ideal: $\text{M}^{+}_{0,33n}\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Mg}_3(\text{Si}_{3,67}\text{Al}_{0,33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. ⁴ Fórmula típica: $\text{Mg}^{2+}_{0,38n}\text{H}_2\text{O} \cdot (\text{Mg}_{2,00}\text{Fe}_{0,46}\text{Al}_{0,22}\text{Ti}_{0,11})(\text{Si}_{2,72}\text{Al}_{1,28})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Temperaturas variáveis de acordo com a composição química, tamanho do cristal, condições de aquecimento.				

III.6.3 – Transformações Topotáticas de Argilominerais

Em muitas reações químicas em cristais, as estruturas cristalinas são parcialmente preservadas, e dessa forma, a estrutura e a orientação cristalográfica do material inicial pode controlar a orientação e mesmo a natureza dos produtos de transformação. Dois diferentes graus de controle estrutural podem ser distinguidos: epitaxia, que é um efeito bidimensional e topotaxia, que é tridimensional. Neste último, um monocristal de um material inicial é convertido em um pseudomorfo, contendo um ou mais produtos em uma

orientação cristalográfica bem definida; a conversão se passa através de todo o volume do cristal (Souza Santos, 1975).

Muitos, senão todos os argilominerais, se desidroxilam topotaticamente, isto é, cada monocristal do material dá início a algo que se aproxima do monocristal do produto, que é formado em uma orientação definida e reprodutível (Brindley, 1963; 1976).

III.6.4 – Argilas Pozolânicas Cauliníticas

Nas argilas, o mecanismo químico da atividade pozolânica está correlacionado com as alterações estruturais que ocorrem em função das variações de temperatura. No caso das argilas cauliníticas ocorrem transformações no argilomineral caulinita entre 500 a 900°C, em que se forma a fase metacaulinita contendo alumina e sílica em elevado grau de desordem cristalino e, portanto, de elevada área específica e grande atividade química (Souza Santos, 1975). Entretanto, as faixas de temperatura para que uma argila caulinítica se torne ativamente pozolânica não são constantes, dependendo sobremaneira do processo utilizado. Assim, por exemplo, valores entre 600°C a 800°C e 700°C a 800°C têm sido registrados na literatura (IS 1344, 1968 e Ambroise *et al.*, 1986).

Para se determinar a temperatura ótima de queima - aquela necessária à desestruturação da caulinita - são requeridos experimentos específicos - análise térmica diferencial (DTA), experimentos industriais, entre outros -, analisando-se as resistências e demais propriedades dos corpos-de-prova de pozolana com cal hidratada ou cimento (Seção VI.3, VI.4). Os valores obtidos geralmente variam significativamente entre argilas cauliníticas similares de áreas distintas, e mesmo de argilas cauliníticas semelhantes de uma área única. Ambroise *et al.* (1992) estudaram o efeito da temperatura de calcinação da caulinita no desenvolvimento dos valores de resistência à compressão. Trabalharam na faixa entre 600°C a 800°C e determinaram que a temperatura ótima de calcinação para os valores máximos de resistências a 3, 7 e 28 dias foi de 700°C.

Marwan & Ambroise (1992) demonstraram que sob calcinação a 800°C, a caulinita e a gibbsita de solos lateríticos, se transformam em fases de transição de metacaulinita e alumina amorfa. Se a argila for aquecida acima da temperatura de calcinação forma-se uma fase líquida da qual o resfriamento produz uma fase vítrea. Ambroise *et al.* (1985), por outro lado, demonstraram que a calcinação em temperaturas inferiores a 700°C resulta em menos metacaulinita reativa com mais caulinita residual, ao passo que acima de 850°C inicia a cristalização com a conseqüente diminuição da reatividade.

Chakchouk & Mnif (2006) estudaram a área de Tabarka, na Tunísia, contendo argila caulinítica, utilizando difração de raios-X (XRD) e análise térmica diferencial (DTA). A amostra foi avaliada na forma *in natura* e tratada termicamente em três estágios diferentes, 600°C, 700°C e 800°C por 5 horas de duração em cada etapa. Ensaio laboratoriais combinando a argila com hidróxido de cálcio foram realizados para verificação da atividade pozolânica efetiva, através de medições de resistência à compressão de corpos-de-prova moldados e rompidos para as idades de 7 e 28 dias. A análise de difratograma evidenciou que a partir de 600°C não há alteração nos padrões da caulinita, concluindo-se que esta

temperatura é suficiente para sua desidroxilação. Verificou-se também que a Ilita permaneceu intacta mesmo a temperaturas em 800°C (Figura III.7).

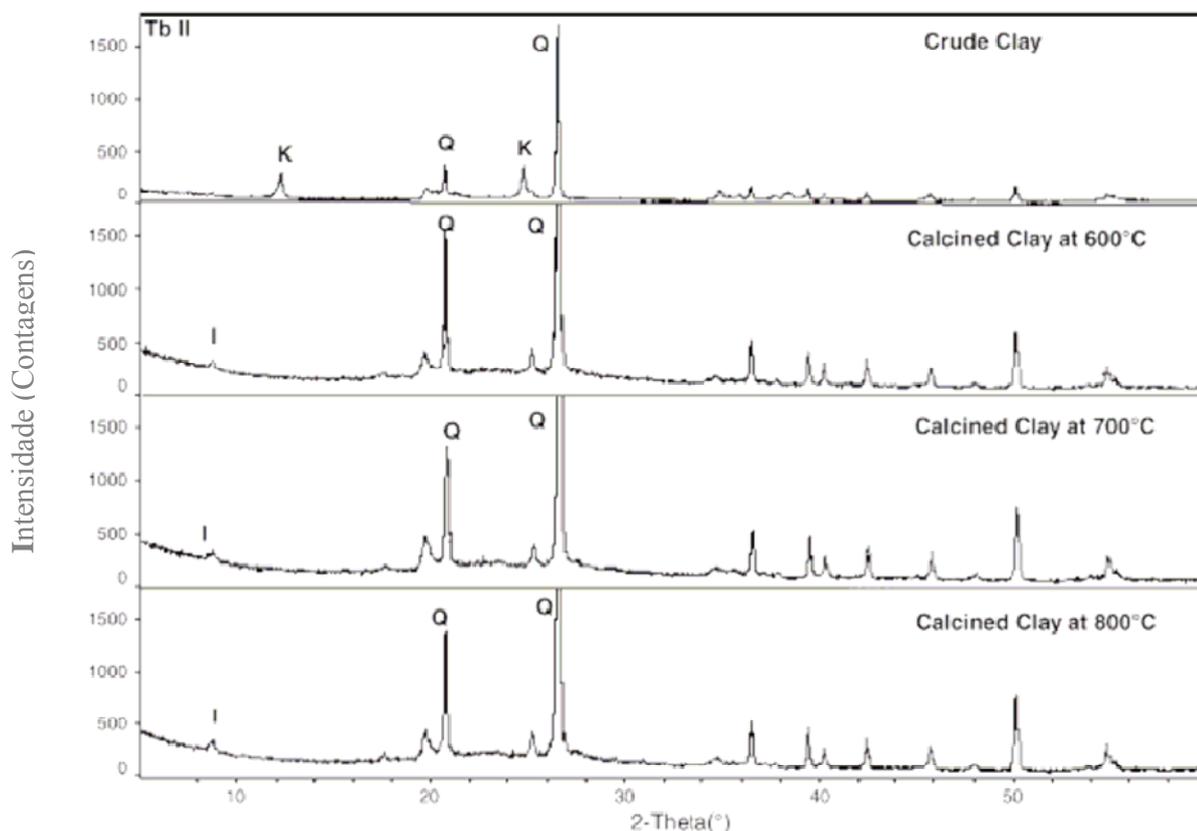
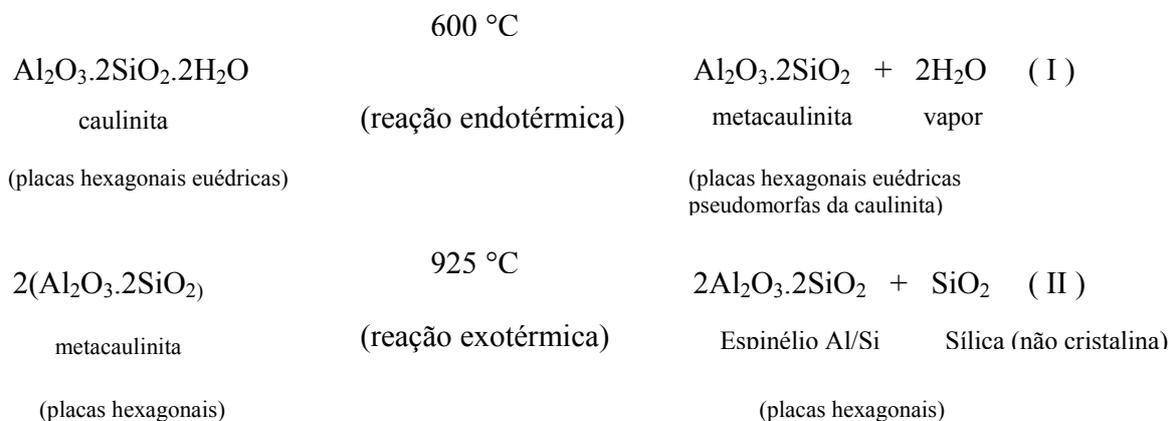
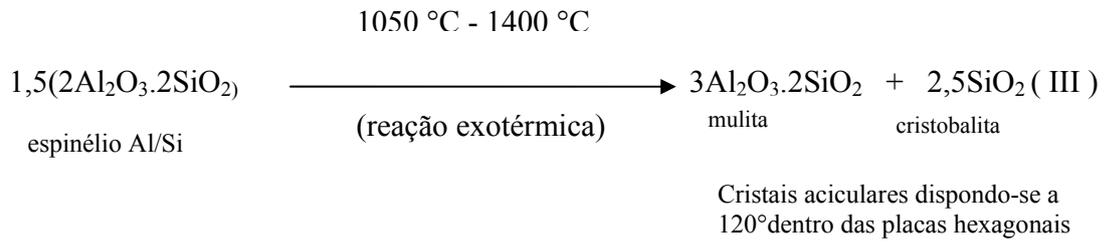


Figura III.1 – Difractogramas da amostra (Tb II) *in natura*, a 600°C, 700°C e 800°C, evidenciando que a partir de 600°C não há alteração nos padrões da caulinita – temperatura de desidroxilação. A Ilita permaneceu intacta em todas as temperaturas. K: caulinita, I: Ilita, Q: quartzo (Chakchout *et al.*, 2006).

Pode-se estabelecer uma seqüência de transformações, partindo-se da caulinita até a formação da mulita, conforme as equações abaixo (Campos & Souza Santos, 1978):





Zampieri (1989) estudou argila caulínica no intervalo entre 650°C a 1100°C e observou através de difratograma que a caulinita colapsa completamente entre 650°C a 700°C. Através do uso de microscópio eletrônico de varredura (MEV), verificou que este processo não é acompanhado de mudanças morfológicas significativas, reforçando a proposição de Brindley & Lemaitre (1987) de que a metacaulinita seria um pseudomorfo da caulinita (Figura III.2).

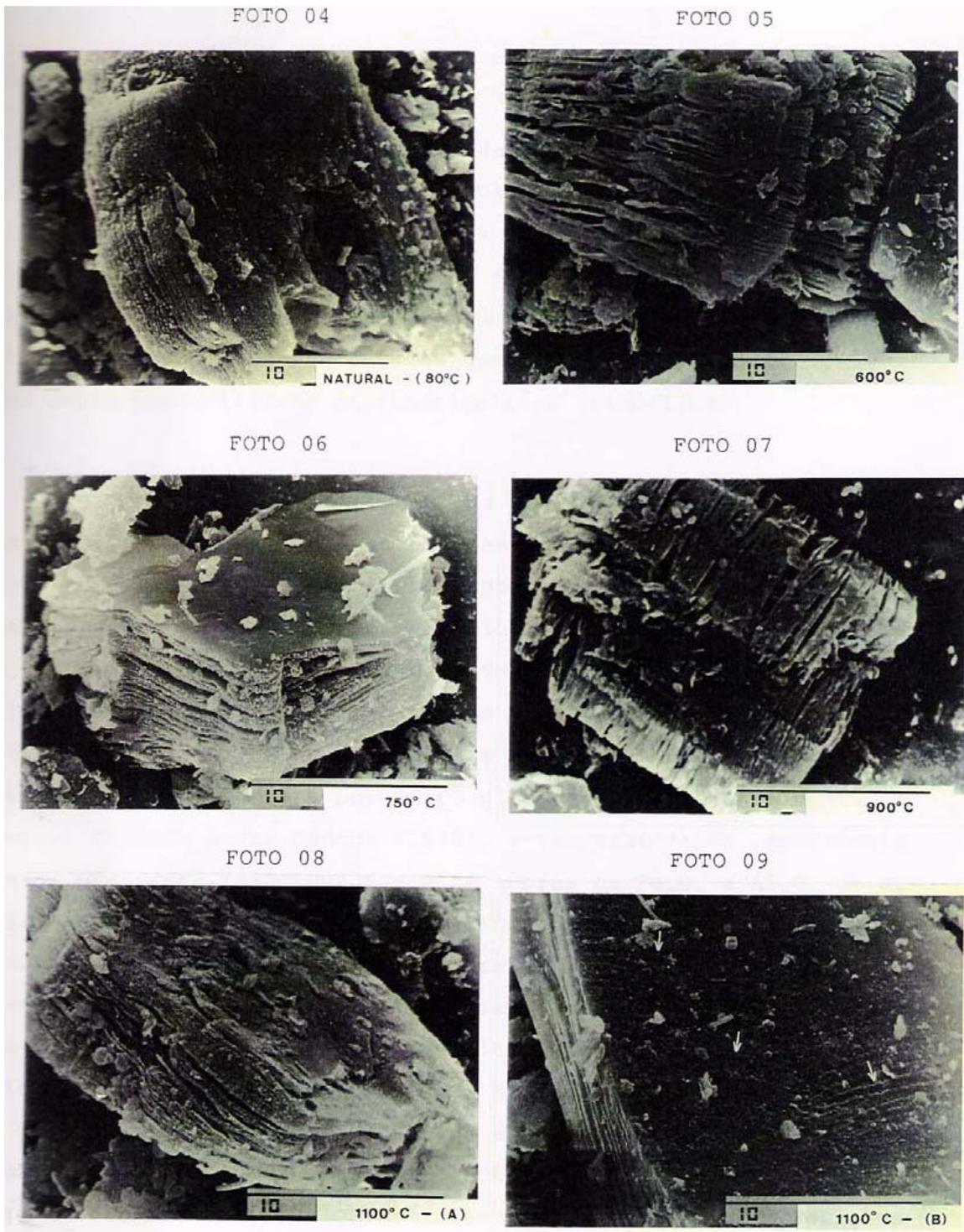


Figura III.2 – Imagens de MEV, destacando o empilhamento de cristais de caulinita natural e aquecida a diferentes temperatura. Nota-se que o processo de ativação térmica não é acompanhado de mudanças morfológicas, caracterizando a metacaulinita como um pseudomorfo da caulinita (Zampieri, 1989).

Carvalho *et al.* (2002) estudaram diversas amostras de profundidades variadas dos perfis de argilas pozolânicas do Distrito Federal. As amostras foram tratadas termicamente através de mufla por 4 horas a 60°C, 100°C, 300°C e 490°C. Os autores descreveram que os minerais presentes permaneceram estáveis no intervalo de temperatura de 60°C a 100°C. A 300°C ocorreu a diminuição ou o desaparecimento dos picos de goethita e gibbsita, enquanto a 490°C a caulinita sofreu colapso em todas as profundidades, exceto na altura de 10 m. Sugeriram que as variações no comportamento da caulinita resistentes ao aquecimento até 490°C estariam relacionadas com as propriedades físicas das argilas.

Lacerda (2005) observou comportamento similar ao acima no estudo do depósito de Bonsucesso e concluiu que a resistência ao aquecimento está associada à presença de polítipos diferentes nos diversos níveis do perfil. O politipo 1Md da parte inferior apresenta resistência maior para o colapso da estrutura cristalina do que o politipo 1A da parte superior, às mesmas condições de aquecimento.

Nas utilizações industriais de fabricação de cimento a calcinação de argilas caulínicas normalmente tem sido realizada em fornos rotativos ou usando processos de camadas fluidizadas (inferior a 150 micra) que permitem diminuição do tempo de calcinação em escala de horas para escala de minutos (Sabir *et al.*, 2001).

A calcinação *flash* também tem sido utilizada para reduzir o tempo do tratamento térmico para ordem de segundos. Este processo consiste em rápido aquecimento, calcinação e resfriamento. As diferenças nas quantidades de metacaulinita obtidas dependem da temperatura (500°C a 1000°C) e do tempo da calcinação *flash* (0,5s a 12s) e normalmente se produz metacaulinita mais ativa por este método do que pelos outros dois (Salvador & Davies, 1994; Salvador, 1995).

Neste processo há uma significativa simplificação das instalações industriais, com conseqüente redução dos valores de investimentos, redução dos custos de energia térmica e de moagem. No aspecto moagem há uma inversão; enquanto no sistema de fornos rotativos a moagem é posterior à calcinação, pelo método *flash*, é anterior, sendo que ocorre a redução de custo porque a desagregação da argila pela moagem é mais eficaz para caulinita do que para a metacaulinita (Salvador, 1995).

III.6.5 – Argilas Pozolânicas Ilíticas

A Ilita, como a caulinita, após a calcinação exibe atividade pozolânica. Porém não são muitos os estudos científicos quanto ao tratamento térmico de argilas ilíticas aplicadas industrialmente (Mielenz *et al.*, 1950; Forrester, 1974; Ambroise *et al.*, 1985; He *et al.*, 1994).

He *et al.* (1994) trabalharam com uma amostra de Ilita da região de *Silver Hill* em Montana, Estados Unidos por meio de difração de raios-X (XRD) e de análise térmica diferencial (DTA). Os autores experimentaram a amostra na sua forma *in natura* e tratada termicamente em três estágios diferentes, 650°C, 790°C e 930°C por 100 minutos de duração em cada etapa. Foram discutidos resultados quanto ao colapso estrutural da Ilita, a variação de densidade e de superfície específica da Ilita, entre outros. Ensaios laboratoriais

combinando a argila com cimento portland comum também foram realizados para verificação da atividade pozolânica efetiva, através de medições de resistência à compressão de corpos-de-prova moldados e rompidos para as idades de 2, 7, 28 e 90 dias.

Baseado nos resultados de DTA observou-se que: em 650°C há o fim das reações de desidroxilação; em 930°C ocorre o pico de temperatura de colapso da Ilita; e que, 790°C é uma temperatura intermediária entre os dois processos anteriores. O processo de desidroxilação não resulta no colapso da estrutura da Ilita. Os picos principais deste argilomineral persistem mesmo após a amostra ter sido aquecida a 930°C, ainda que diminuídos (Figura III.3).

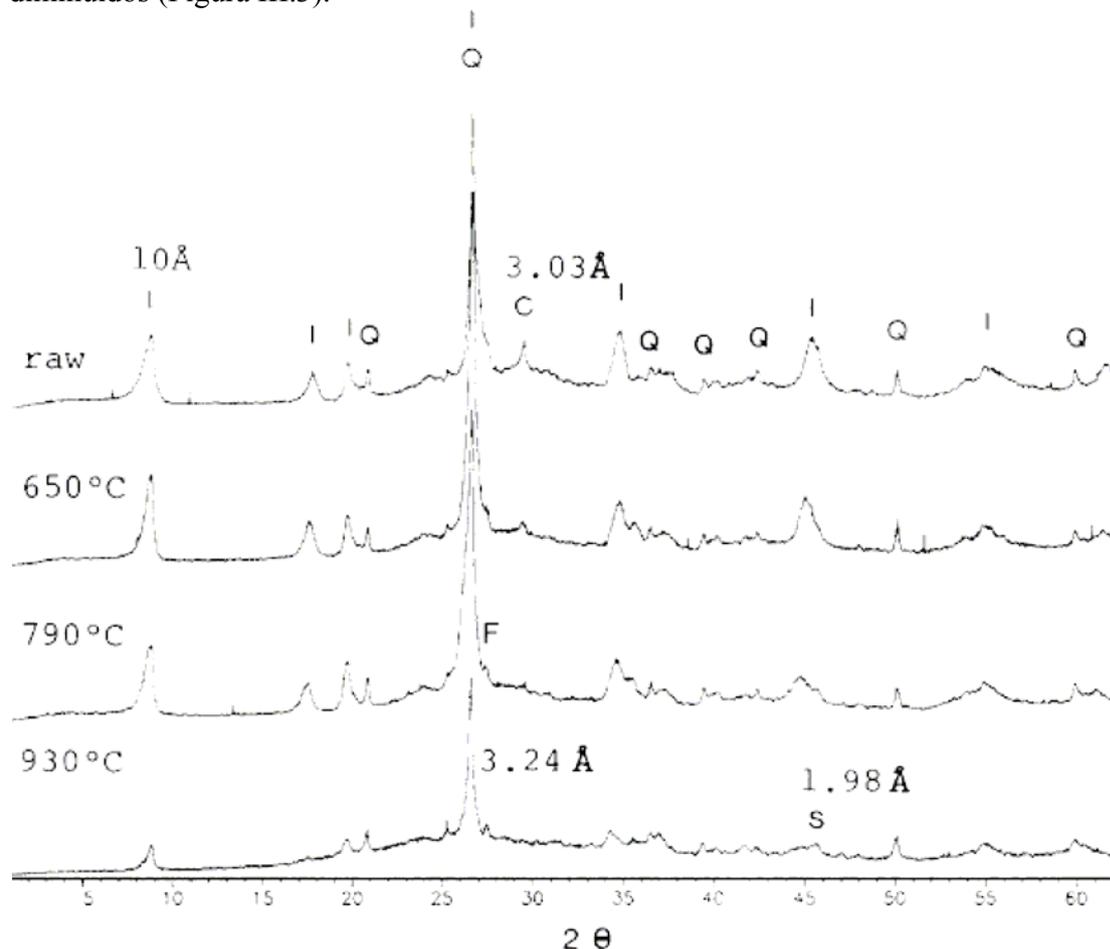


Figura III.3 – Difrátogramas da Ilita *in natura* e calcinada. O fim das reações de desidroxilação ocorre em 650°C (observado por DTA); no pico de temperatura de colapso da Ilita em 930°C observa-se a manutenção do pico da Ilita, ainda que reduzido; estes dados indicam que a desidroxilação da Ilita não resulta no colapso de sua estrutura. I: Ilita, Q: quartzo, C: calcita, F: K-feldspato e S: γ - Al_2O_3 (He *et al.*, 1994).

De acordo com as medidas do pico em (001) a 10Å revelou-se que por volta de 17% de Ilita continuou existindo a 930°C. Um diagnóstico mais amplo do pico γ - Al_2O_3 a 1.98 Å a 790°C e 930°C indica a formação desta fase topotática (Brindley & Lemaitre, 1987). O colapso da fase cristalina pela calcinação resulta na formação de substância amorfa que

causa um aumento do *background* na curva do XRD, mas não tão bem pronunciado como ocorre com o colapso da caulinita (Figura III.4).

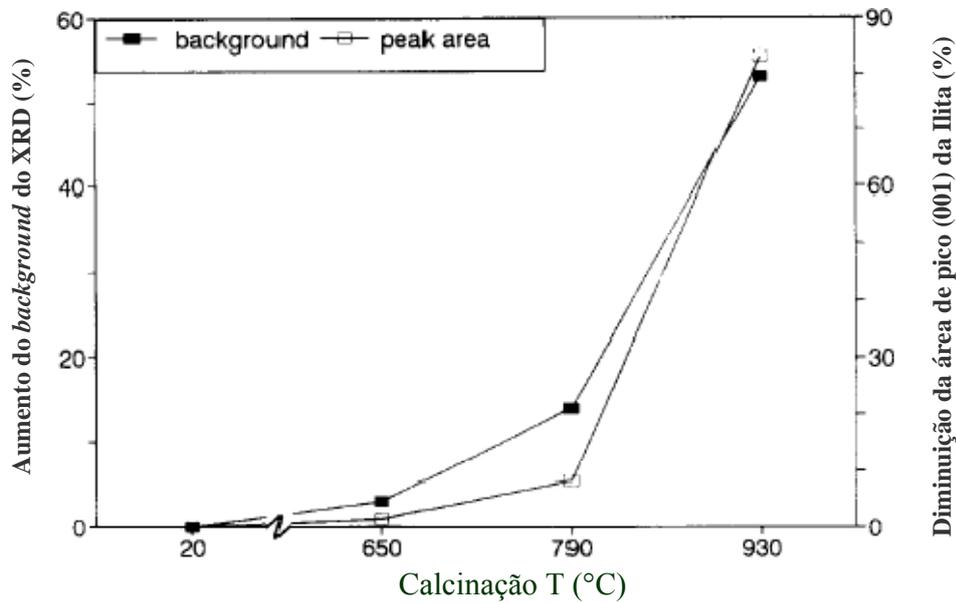


Figura III.4 – Efeitos da calcinação de Ilita expressados pelas características de XRD. Há aumento do *background* na curva, indicando que o colapso da fase cristalina resulta na formação de substância amorfa (He *et al.*, 1994).

Os experimentos de He *et al.* (1994) revelaram ainda uma variação sistemática nos valores de densidade e de superfície específica da Ilita calcinada. A densidade praticamente não se alterou a 650°C, apesar da desidratação e da desidroxilação que provocam uma perda de 7,9% em peso. A 930°C a calcinação reduz a densidade de 2,78 para 2,64 g/cm³. A área de superfície específica (BET) diminui drasticamente sob a calcinação de 650°C a 930°C devido ao aumento da aglomeração de partículas de Ilita e ao fechamento dos poros sob sinterização a altas temperaturas (Figura III.5).

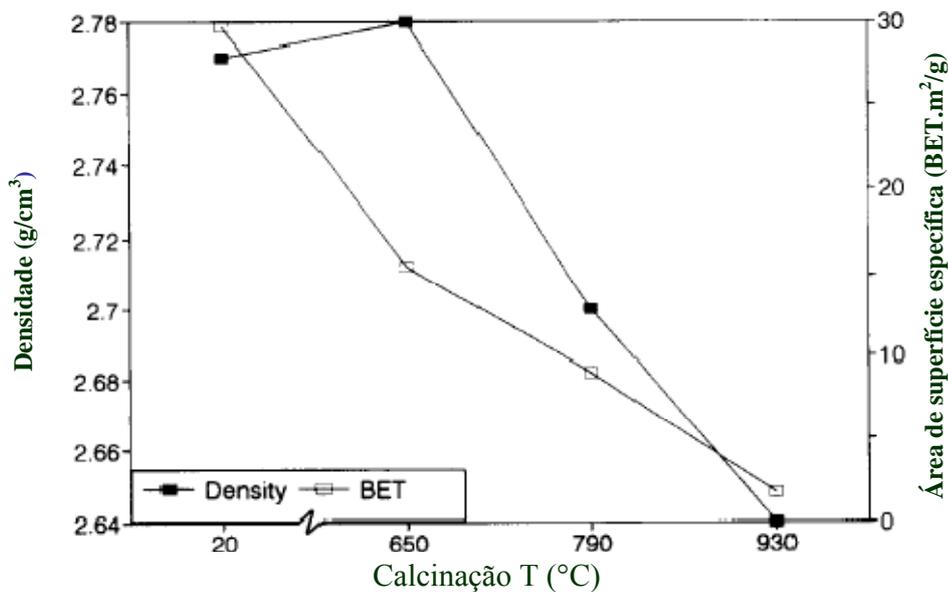


Figura III.5 – Densidade e Área de superfície específica (BET) da Ilita *in natura* e calcinada. Observar-se que a BET diminui drasticamente sob calcinação de 650°C a 930°C, devido ao aumento da aglomeração de partículas de Ilita e ao fechamento dos poros sob sinterização a altas temperaturas (He *et al.*, 1994).

Os experimentos de He *et al.* (1994) de combinação de pozolana com cimento através de corpos-de-prova com rompimentos para as idades de 2, 7, 28 e 91 dias, mostram que a desidroxilação da Ilita calcinada a 650°C praticamente não contribui para ganho de resistência à compressão, mas que há uma considerável melhoria nesses valores quando a amostra é calcinada a 790°C e um drástico aumento a 930°C, principalmente percebido na idade de 28 dias (Figura III.6), exibindo um ganho de 79% de atividade pozolânica quando comparado com o cimento portland comum de referência. Com bases nestes valores a pozolana obtida por calcinação de Ilita foi considerada como uma pozolana de baixa a moderada atividade.

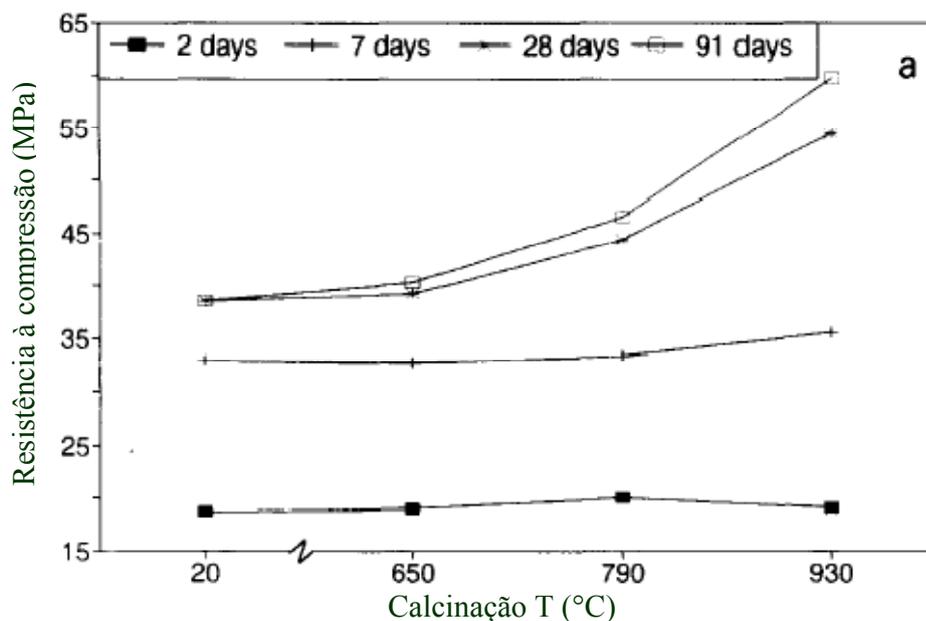


Figura III.6 – Resistência à compressão: cimento e Ilita *in natura* e calcinada. A desidroxilação da Ilita a 650°C praticamente não contribuiu para o ganho de resistência; há uma considerável melhoria quando a amostra é calcinada a 790°C; nota-se o drástico aumento de resistência a 930°C, principalmente aos 28 dias (He *et al.*, 1994).

Lacerda (2005) observou que durante a calcinação da argila pozolânica do perfil Bonsucesso a 800°C por 30 minutos, houve modificação na intensidade dos picos da Ilita sugerindo haver mudança de polítipo, passando do polítipo 2M#1 na amostra total *in natura* para o polítipo 2M#2 na amostra total calcinada.

III.6.6 – Outras Argilas Pozolânicas: comparação de resultados

He *et al.* (1995) obtiveram seis argilas minerais padrões da *American Clay Minerals Society* (Estados Unidos) e da *Royal Porcelain Factory* (Dinamarca). Os minerais selecionados para ensaios de calcinação foram: Ilita, Ca-montmorilonita, Na-montmorilonita, argila mista de mica/esmectita, sepiolita e caulinita. O tratamento térmico foi conduzido através de análise térmica diferencial (DTA), trabalhando com 3 a 4 faixas de temperatura. As avaliações mineralógicas antes e após a calcinação foram realizadas por meio de difração de raios-X (XRD) e a atividade pozolânica foi avaliada através de medições de resistência à compressão de corpos-de-prova moldados com hidróxido de cálcio e cimento padrão.

Em função dos resultados de resistência à compressão dos corpos-de-prova moldados com cimento e com argila *in natura*, observou-se a seqüência Ca-montmorilonita > Ilita ≥ caulinita > Na-montmorilonita > argila mista de mica/esmectita > sepiolita, tendo sido atribuído o melhor resultado da argila Ca-montmorilonita em função da presença de sílica amorfa na amostra (Figura III.7).

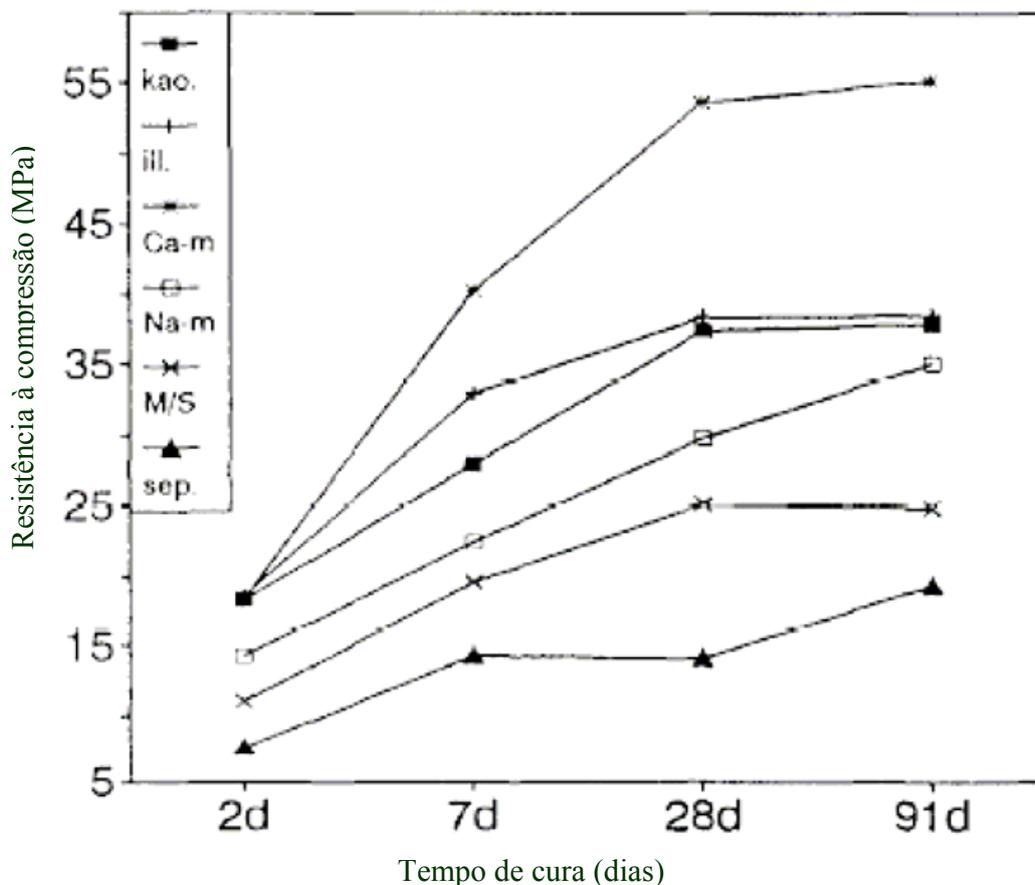


Figura III.7 – Resistência à compressão: cimento e argila *in natura*. Baseado nos resultados verifica-se a seqüência de atividade pozolânica (da maior para a menor): Ca-montmorilonita > Ilita \geq caulinita > Na-montmorilonita > argila mista de mica/esmectita > sepiolita. kao: caulinita; iil: Ilita; Ca-m: Ca-montmorilonita; Na-m: Na-montmorilonita; M/S: argila mista de mica/esmectita; sep: sepiolita (He *et al.*, 1995).

As temperaturas finais da reação de desidroxilação obtidas foram: caulinita, 650°C; Ilita, 650°C; Ca-montmorilonita, 730°C; Na-montmorilonita, 740°C; argila mista de mica/esmectita, 560°C; e sepiolita, 730°C. As temperaturas de calcinação ótimas encontradas para os maiores valores de resistência à compressão foram: 650°C para a caulinita; 930°C para Ilita; 830°C para Ca-montmorilonita e Na-montmorilonita; 960°C para argila mista de mica/esmectita; e 830°C para sepiolita.

III.7 – Vantagens do Uso de Pozolana no Cimento

O uso de pozolana é especialmente vantajoso em grandes estruturas maciças de concreto estrutural, como barragens (Souza Santos, 1975). Mas, além dessa aplicação específica de pozolana através do cimento CP IV, seu uso tem, ainda, outras significativas vantagens que a tornam atrativa aos fabricantes de cimento, aos consumidores e ao meio-ambiente, sendo as mais relevantes: menor custo de produção, menor emissão de CO₂ para atmosfera, redução do calor de hidratação, melhora da resistência ao ataque de águas

sulfatadas, retardo ou eliminação das reações álcali-agregado, melhor plasticidade do concreto, diminuição da permeabilidade do concreto, armazenagem de longa duração e a céu aberto.

Dentre essas vantagens, o custo é uma das mais importantes. O custo de produção do cimento portland composto com pozolana (CP II – Z; adição de 6 a 14%) é cerca de 30% mais baixo do que o cimento portland sem essa adição que ele substitui (CP II – F). A redução de custo do cimento portland pozolânico (CP IV; adição de 15 a 50%) é da ordem de 60% menor do que seu equivalente, o cimento portland de alto-forno (CP III com adição de escória siderúrgica de 35 a 70%). Nesse último caso, a redução é bem mais expressiva porque a pozolana substitui a escória de valor bem mais elevado, principalmente em função da distância da sua origem de produção até a fábrica de cimento consumidora e também, obviamente, porque os valores substituídos são expressivamente superiores ao cimento CP II -Z. Esses valores foram calculados considerando a distância da jazida Bonsucesso e as duas plantas industriais instaladas na região Fercal no Distrito Federal, cerca de 35 km (Lacerda, 2001).

A expressiva redução do custo de produção se deve à energia térmica, um dos componentes de custos de maior peso no processo de fabricação de cimento. Para o tratamento térmico das pozolanas se utiliza cerca de 450 kcal para cada tonelada de pozolana produzida, enquanto que se consome cerca de 780 kcal para produzir uma tonelada de clínquer. Também os custos de energia elétrica, extração, britagem e moagem são significativamente menores do que os equivalentes para produção de clínquer. Como a relação de substituição de clínquer por pozolana é direta, os ganhos são imediatos.

As desvantagens do uso de pozolana são menores. As jazidas supridoras de pozolana normalmente estão mais distantes da unidade fabril do que a mina de calcário que usualmente está adjacente; a extração da pozolana no Distrito Federal é restritiva por razões ambientais; e os cimentos produzidos com pozolana requerem mais água na mistura da pasta em função da maior superfície específica da pozolana.

IV – Contexto Geológico

A presente revisão bibliográfica apresenta informações básicas da geologia do Distrito Federal e entorno, tendo como propósito principal situar as áreas de trabalho no contexto regional. O texto, então, versa sobre os Grupos Canastra e Paranoá, situados na Faixa de Dobramento Brasília, nos quais as áreas estudadas se encontram contidas (Figura VI.1). Todavia, em decorrência dos objetivos fundamentais, a presente tese restringir-se-á em âmbito da geologia local das áreas de estudo, com enfoque nas caracterizações geológicas, mineralógicas e geoquímicas do manto intempérico e de sua interface com a rocha matriz da qual deriva. Em face disso, nesta tese não são estudados os aspectos geológicos regionais (geomorfológicos, estruturais e litológicos) das áreas selecionadas.

IV.1 - Faixa de Dobramentos Brasília (FDB)

A FDB é constituída por um extenso sistema de dobramentos Neoproterozóicos de mais de 1000 km de extensão que está situada na borda ocidental do Cráton do São Francisco (Figura IV.1). Originalmente foi denominada Geossinclíneo Brasília (Almeida, 1967) e posteriormente caracterizada como sendo um miogeossinclíneo do Proterozóico Superior tectonicamente sotoposto ao Grupo Araxá, cujos sedimentos foram deformados e metamorfizados no evento tectono-orogênico Uruaçuano (Almeida, 1968, 1977; Almeida *et al.*, 1976, 1977). Ao modelo acima é contraposto o modelo de um ciclo tectônico único cujas rochas metassedimentares e metavulcânicas de mais alto grau, pertencentes ao Grupo Araxá e Canastra compõem a zona interna da FDB (Dardenne 1978 a, b; Strieder 1990; Fuck 1990, 1994; Fuck *et al.*, 1993, 1994; Dardenne, 2000; Pimentel *et al.*, 2004; Valeriano *et al.*, 2004). A FDB divide-se em porção Setentrional de orientação NE e outra Meridional de orientação NW. Essas duas porções da FDB se encontram na altura do paralelo de Brasília formando a Megainflexão dos Pirineus com orientação geral WNW-ESE (Araújo Filho 1978, 1981; Valeriano *et al.*, 2004).

As unidades de seqüências de rochas sedimentares e metassedimentares de baixo grau metamórfico pertencentes aos grupos Araí e Serra da Mesa, aos grupos Paranoá e Canastra, aos grupos Araxá, Ibiá e Vazante, e ao Grupo Bambuí, fazem parte de unidades da FDB. Incluem também os complexos Máfico-ultramáfico de Niquelândia, Cana Brava e Barro Alto, granitos anorogênicos da subprovíncia dos rios Paranã e Tocantins, as seqüências vulcano-sedimentares de Juscelândia, Palmeirópolis e Indaianópolis, o magmatismo granítico e máfico-ultramáfico e o Arco Magmático de Goiás formado pela seqüência vulcano-sedimentar de Mara Rosa e Chapada e pelas rochas tonalíticas/granodioríticas que ocorrem em extensas áreas na porção oeste da FDB.

Além das unidades descritas, a FDB envolve o Maciço de Goiás, a unidade mais antiga - terrenos arqueanos granito-greenstone de Goiás Velho, Crixás, Guarinos e Pilar de Goiás -, o embasamento granito-gneisse de Calvacante, as seqüências vulcano-sedimentares de Santa Terezinha, Almas, Dianópolis e São Domingos e a seqüência meta-sedimentar de Ticunzal (Dardenne, 2000).

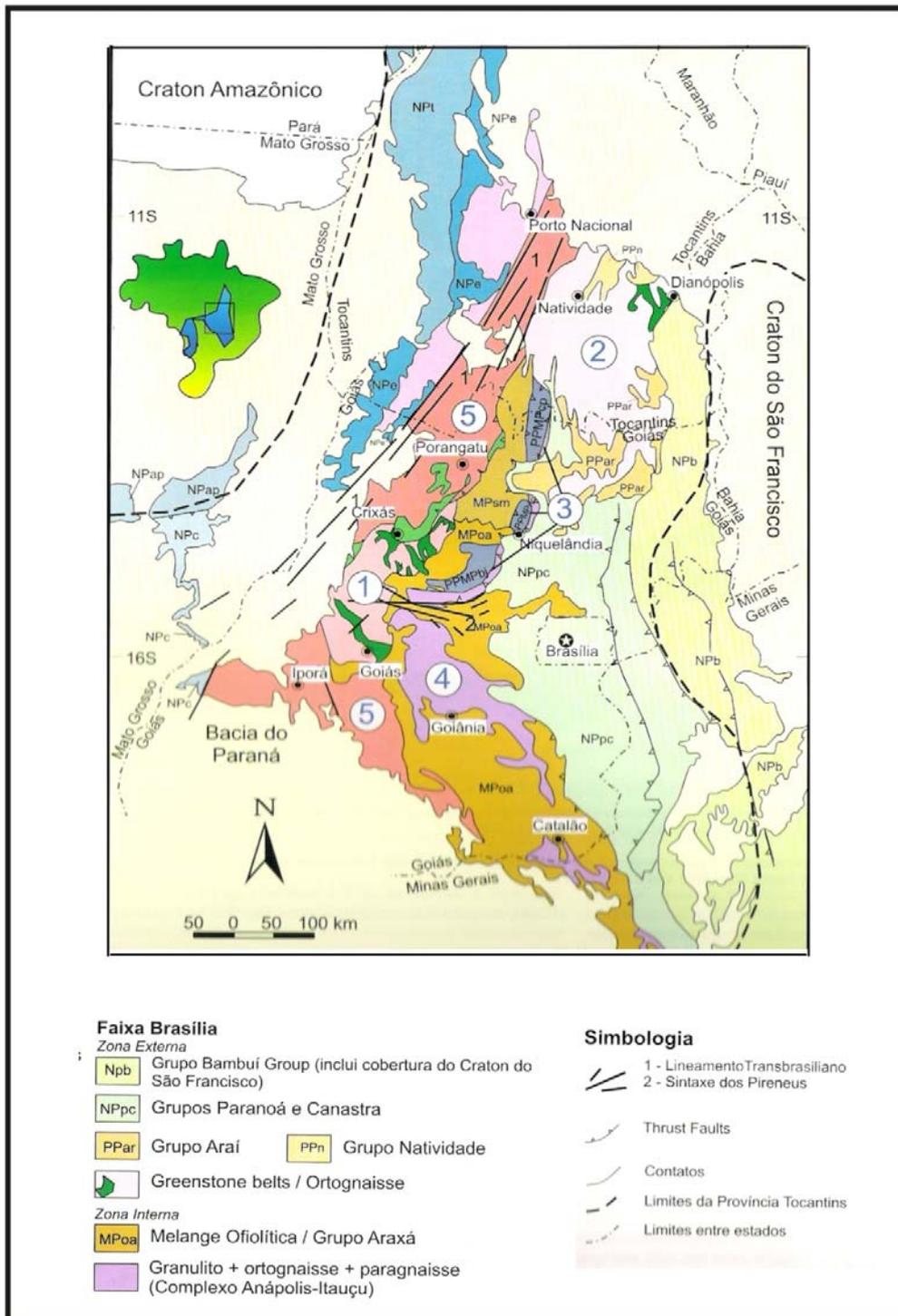


Figura IV.1 – Mapa geológico da Faixa Brasília (Adaptado de Pimentel *et al.*, 2004).
 1 Bloco Arqueano Crixás-Goiás; 2 Terrenos Paleoproterozóicos de Almas-Natividade;
 3 Complexos Máfico-ultramáfico; 4 Complexo Anápolis-Itauçu; 5 Arco Magmático
 Goiás.

IV.2 - Grupo Canastra

Bordeja o Distrito Federal nas partes norte, oeste e centro-sul, adentrando o sudeste de Goiás e noroeste de Minas Gerais. Seu posicionamento estratigráfico é ainda controverso. Barbosa (1955) & Barbosa *et al.* (1970), consideram-no como topo do Grupo Araxá. Braun & Baptista (1978) admitem uma posição basal do Grupo Canastra, com relação aos micaxistos Araxá. Teixeira & Danni (1978), Fuck & Marini (1980) & Campos Neto (1984) posicionam o Grupo Canastra como correspondente lateral externo do Grupo Araxá. Ferrari (1989) considera a Formação Canastra como unidade independente do Grupo Araxá.

O contato do Grupo Canastra com as unidades mais internas, a oeste, e com o Grupo Paranoá a leste, faz-se através de falhas de empurrão e *nappes* de *charriage* que ocorreram no final do Neoproterozóico, o que evidencia uma aloctonia do Grupo Canastra. A sudoeste do Distrito Federal foram reconhecidas três unidades litoestratigráficas (Valente, 1985):

- Unidade inferior – constituída por metapsefitos e metapsamitos, representados por quartzitos, metagrauvacas e clorita-muscovita-quartzo-xistos, sem controle de espessura.
- Unidade intermediária – composta de muscovitaxisto com bolsões carbonáticos, muscovita-calci-quartzo-xisto, granada-micaxisto e quartzitos laminados, localmente ferruginosos, com espessura de 40 m.
- Unidade superior – representada por filitos, filitos muscovíticos, com fácies carbonáticas e, localmente, formações ferríferas, com espessura de 100 a 150 m.

Quanto ao metamorfismo, os metassedimentos ostentam paragênese compatíveis com fácies xisto-verde, baixo grau. Estudos de Pimentel *et al.* (1992), pelos métodos U-Pb, Rb-Sr e Sm-Nd em metarriólito do Grupo Araxá (Canastra), na região de Pires do Rio (GO), concluíram que o referido grupo foi depositado no Neoproterozóico 794 (Ma) sendo, portanto, contemporâneo à evolução dos grupos Paranoá-Bambuí da FDB.

IV.2.1 – Litofácies no Grupo Canastra no Distrito Federal (Faria *et al.*, 1997)

Faria *et al.* (1997) reconheceram três litofácies no Grupo Araxá/Canastra no Distrito Federal, tendo a caracterização das mesmas, baseada na litologia, textura, estruturas sedimentares e geometria de modo a poder associar a litofácies distinguida a determinadas condições de sedimentação que refletissem um tipo particular de processo ou ambiente.

Litofácies Micaxisto – Constitui a parte basal do Grupo Araxá/Canastra que aflora na faixa sudoeste do Distrito Federal, numa espessura estimada de 500m constituída por muscovita-quartzo-xisto, clorita xisto, normalmente crenulados, delgadas intercalações de quartzito milonítico branco, bem foliado e com espessura de até 20 m.

Litofácies Calcixisto – ocorre na parte norte-noroeste do Distrito Federal, mais especificamente nas depressões da serra do Catingueiro e no vale do ribeirão Catingueiro. Constituída por rocha de coloração cinza-esverdeada que quando alterada adquire a cor marrom-clara, composta por carbonato de cálcio e quartzo, dispostos em lentículas estiradas ao longo dos planos metamórficos, alternados por foliações constituídas por sericita. Estes minerais constituem uma xistosidade principal de plano axial de dobras

apertadas a isoclinais (Sn+1), de aspecto anastomosado. Esta xistosidade principal é cortada ou crenulada por uma clivagem posterior (Sn+2), de orientação submeridiana, espaçada, bastante nítida em toda a área de afloramento. Esta litofácies passa pra a litofácies superior através de intercalações métricas de filitos.

Litofácies Filito – A principal área de domínio desta litofácies é a região do vale do rio São Bartolomeu e as partes mais elevadas da serra do Catingueiro, composta por filitos com sericita e com clorita, geralmente piritosos, filitos carbonosos; lentes de quartzito fino a médio, localmente grosso; e cataclastos além de ocasionais lentes de calcário que gradam para calcifilito. Os filitos da região do Distrito Federal são de aspecto ardosiano, ao passo que na região do São Bartolomeu, são bastante crenulados, portanto de estilo tectônico semelhante aos calcixistos e micaxistos. Mostram certa ritmicidade destacando-se leitões diferenciados na proporção de quartzo e minerais filitosos. A espessura desta litofácies é da ordem de 100 m.

IV.3 - Grupo Paranoá

As rochas do Grupo Paranoá afloram predominantemente na direção norte-sul ao longo da zona externa da FDB, ocorrendo desde o Distrito Federal até o norte da cidade de Minaçu (GO). Às rochas do Grupo Paranoá é atribuída idade Mesoproterozóica a Neoproterozóica (Cloud & Dardenne 1973; Dardenne & Campos Neto 1976; Dardenne 1978a; Cassedane & Cassedane 1978).

O Grupo Paranoá primeiramente foi denominado por Formação Paranoá (Andrade Ramos 1958) é considerada como formação inferior e lateral ao Grupo Bambuí (Braun 1968). Posteriormente, no final da década de 60 e na década de setenta, foi proposta a ordem estratigráfica da Formação Paranoá (Barbosa *et al.*, 1969 & Baeta Jr *et al.*, 1978). Dardenne (1974) separou a Formação Paranoá do Grupo Bambuí, atribuindo-lhe o *status* de Grupo. Essa divisão para o Grupo Paranoá foi formalizada com Dardenne (1978), limitando-a na base pelo Conglomerado São Miguel e no topo pelo recobrimento da Formação Jequitaiá.

Dardenne & Faria (1985) propuseram nova estratigrafia para o Grupo Paranoá, definindo nove unidades litoestratigráficas na região de Alto Paraíso de Goiás e São João D'Aliança. Faria (1995) & Faria & Dardenne (1995) forneceram dados sobre a estratigrafia, ambiente sedimentar e geotectônica do Grupo Paranoá obtidos do estudo das regiões de Cristalina, Distrito Federal e Alto Paraíso – São João D'Aliança.

A estratigrafia considerada nesta dissertação (Faria, 1995), compõe-se de 12 unidades litoestratigráficas para o Grupo Paranoá. Na Região do Distrito Federal estão ausentes as unidades basais aflorantes em São João D'Aliança – Alto Paraíso de Goiás. (figura IV.2). Este trabalho limitou-se na descrição da estratigrafia do Grupo Paranoá na região do Distrito Federal.

No Distrito Federal, os afloramentos expõem a litofácies ardósia (A) como unidade inferior. É composta por ardósias vermelhas a roxas, com bandamento amarelos esbranquiçados que destacam o acamamento (So). Próximo ao topo, contém ocasionais

bancos de quartzito fino, lenticular de base erosiva e espessura centimétrica até 1,5 m e ocasionais leitos de metassiltito e quartzito fino que localmente mostra estratificação cruzada *hummocky*.

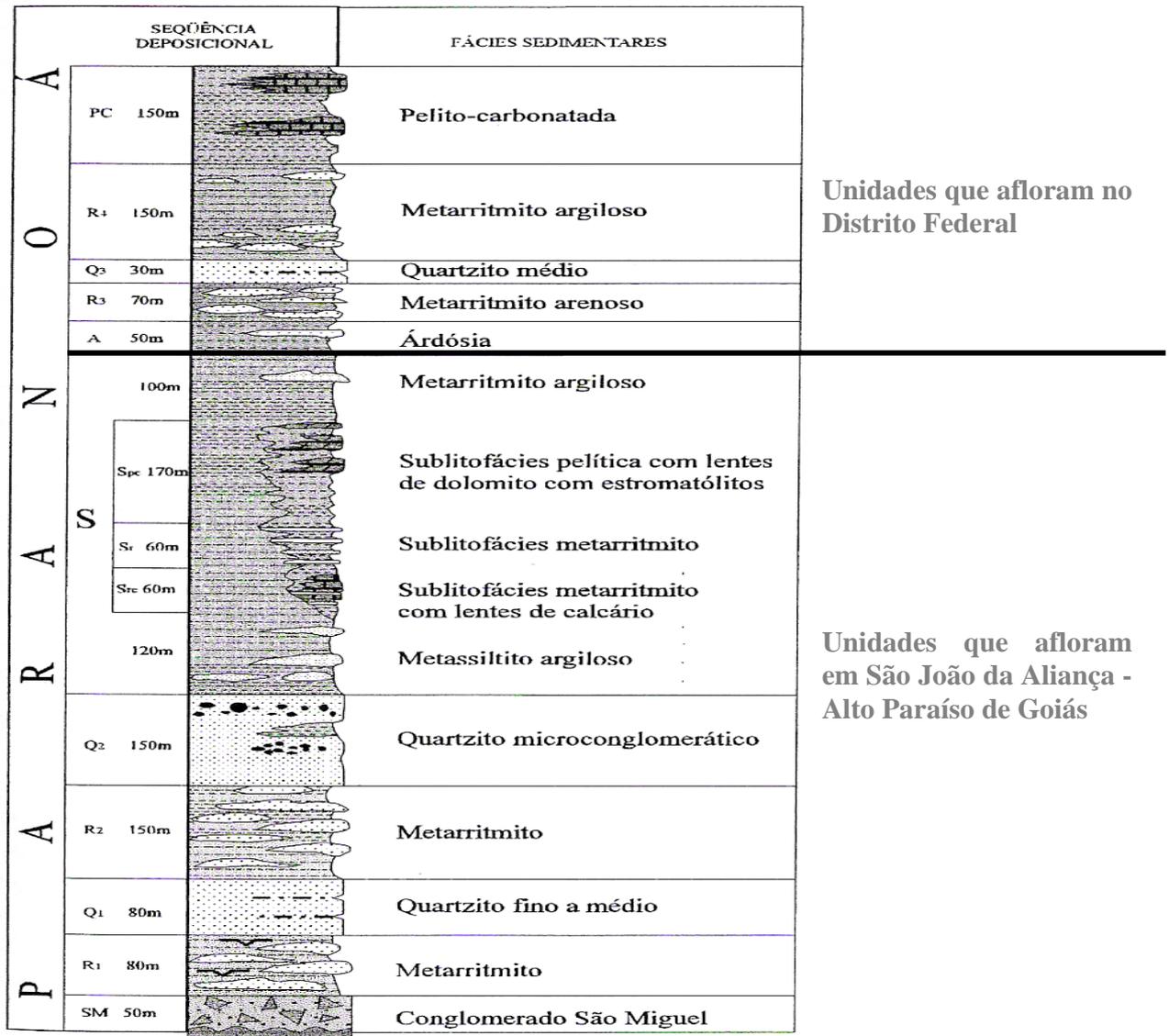


Figura IV.2 - Coluna litoestratigráfica da Seqüência deposicional Paranoá: Região de Alto Paraíso – São João D’Aliança - GO (adaptado de Faria, 1995)

Os metarritmitos arenosos (R3) na região do Distrito Federal são subdivididos em duas sublitofácies. A inferior (R3a) é constituída por quartzitos finos a muito finos, em banco centimétricos até 1 m de espessura, vermelhos a amarelos, feldspáticos, laminados, sericíticos, com ocasionais laminações síltico-argilosas, têm geometria lenticular-ondulada, de base plana, as vezes erosiva, topo ondulado. As estruturas são laminações plano-paralelas, estratificações cruzadas *hummocky*, marcas onduladas e evidências de fluidização. A sublitofécie superior (Ra3) é caracterizada por metarritmitos laminados e de

cores variadas, com alternância de quartzitos, metassiltitos e metargilitos e as estruturas de contração são marcantes, além de marcas onduladas e laminações cruzadas por ondas.

A unidade quartzítica (Q3) na região do Distrito Federal, está em contato concordante e gradacional sobre a litofácies (R3a). Ela é composta por quartzitos de granulação média a fina, com raros leitos de granulação grossa, constituídos essencialmente de grãos bem arredondados de quartzo, de cor rosa ou branca e cinza claro, silicificados e bem selecionados. Domina o acamamento plano-paralelo e ocorrem ainda estratificações cruzadas tabular cruzada acanalada, cruzada tipo espinha de peixe e marcas onduladas.

As rochas da unidade metarritmito argiloso (R4), na região do Distrito Federal, repousam em contato concordante e gradacional sobre a litofácies (Q3) e são compostas pela alternância de metassiltitos, metargilitos e quartzitos finos. Os metapelitos são de cor vermelha, verde clara e branca, de aspecto laminado e localmente maciço. Os quartzitos laminados são, às vezes, feldspáticos e contêm estruturas do tipo *hummocky* próximo à base e na porção superior. Possui também marcas onduladas e estruturas de contração.

A unidade Pelito-carbonatada sobrepõe à unidade R4, constitui o topo do Grupo Paranoá e contém a área em estudo. Na região do Distrito Federal essa unidade exhibe espessura da ordem de 150 a 180 m. Inicia-se com metargilitos e ocasionais intercalações de metassiltitos, na cor amarela e rosa, bastante sericíticos, maciços e laminados. Ocorre também quartzito de granulação média com leitos conglomeráticos finos, que em fratura fresca, emite odor fétido; é argiloso de cor amarela, localmente preta, com grãos bem selecionados e bem arredondados.

No topo da unidade os metapelitos incluem calcário dolomítico microcristalino cinza, com bandas síltico-argilosas e laminações biogênicas, contendo também estromatólitos colunares, cônicos (*Conophyton*) e laminações convexas. Apresentam geometria lenticular, com espessura aflorante da ordem de 10 m.

IV.3.1 – Sistemas Depositionais da Sequência Paranoá

O Grupo Paranoá é considerado uma megassequência deposicional marinha rasa, predominantemente transgressiva. É limitado na base e no topo por superfícies de discordância. Na parte inferior assenta-se o paraconglomerado São Miguel (SM) sobre o Grupo Araí. Na superior, os diamictitos Jequitaiá sublinham a discordância que marca o início da sedimentação relacionada ao Supergrupo São Francisco (Faria, 1995).

A sucessão deposicional Paranoá é constituída basicamente por alternâncias de quartzitos e metassiltitos, com lentes de carbonatos. As unidades quartzíticas representam litofácies geradas sob condições de alta energia, os metarritmitos e pelitos sugerem ambiente de baixa energia, com participação de tempestades ocasionais que geraram intercalações de tempestitos. As interpretações paleoambientais para o Grupo Paranoá consideradas nesta dissertação estão de acordo com Faria (1995) & Faria e Dardenne (1995).

Os metarritmitos R3b são interpretados como sistema deposicional intermaré, com ação de ondas e eventos periódicos de tempestades. Os quartzitos Q3 tinham um ambiente de deposição plataforma arenosa dominada por ondas e eventos periódicos de tempestades. Nos metarritmitos R3a (fácies proximal) era o sistema deposicional de plataforma de terrígenos dominada por ação de tempestades.

Os depósitos das ardósias (A) e dos pelitos da litofácies pelito-carbonatada (PC) representam sistema deposicional de plataforma terrígena, em ambiente profundo e de baixa energia, com participação episódica de processos por ação de ondas de tempestade. As ardósias e os pelitos da litofácies PC caracterizam uma plataforma de lama, com mais baixa energia (suspensão), representando o ambiente mais profundo da seqüência deposicional Paranoá, porém numa profundidade nunca superior a 80-100 m. Os calcários, dolomitos e margas representam um sistema deposicional de plataforma carbonática. Os calcários de cor cinza têm características de ambiente dominado por correntes de maré e ondas. O calcário preto é de águas mais profundas e estagnadas, num ambiente de submaré, protegido da ação das correntes. As margas representam ambiente de submaré, com baixa energia, numa transição do domínio siliciclástico para carbonático.

IV.4 – Geologia Estrutural

As rochas do Grupo Paranoá foram afetadas por dois eventos deformacionais D1 e D2 (Faria, 1995). A intersecção entre os dois eventos gera estruturas dômicas de amplitude regional. A compressão W-E (D1) gera dobras que indicam transporte tectônico em direção ao Cráton do São Francisco. Esse evento provoca empurrões e a formação de *nappes* que jogam os metassedimentos Canastra sobre o Grupo Paranoá e este sobre o Grupo Bambuí.

Considerando o grau de intensidade e estilo das deformações geradas pela 1ª e 2ª fases deformacionais, foram classificados 4 domínios lito-estruturais da FDB (Faria 1995). O domínio 3 refere-se ao Distrito Federal e ocupa superfície pouco maior do que seu quadrilátero. Esse domínio é marcado pela ocorrência dos dois eventos deformacionais, dominados por dobramentos de *trends* N-S e E-W, apertados, que geram padrões de domos e bacias assimétricas, e falhamentos de empurrão em nível crustal raso, que forma *klippen* e janelas onde afloram os Grupos Canastra e Paranoá. A foliação de plano axial de dobras é bastante penetrativa nos filitos e ardósias.

As rochas do Grupo Canastra foram submetidas aos mesmos eventos deformacionais que atingiram as rochas do Grupo Paranoá. Como se trata de rochas predominantemente pelíticas e alóctones, as foliações são mais conspícuas e têm caráter progressivo (Faria *et al.*, 1997).

A deformação D₁, a mais proeminente no Grupo Canastra, é responsável pelo desenvolvimento da foliação S₁ que em geral é marcada pela superfície axial de microdobras a mesodobras. Localmente adquire caráter de foliação milonítica (S_{m1}) de atitude aproximada N30°W/15°-60°SW. D₁ é ainda representada por microdobramentos assimétricos, com plano axial subvertical, eixo N-S/subhorizontal a 5°-10°N, em geral associados a uma foliação de crenulação S₂ mais espaçada e anastomosada, de orientação submeridiana. Ainda há uma fase tardia marcada por *kinks* conjugados ou não, de

orientação N80°E/SE. Essa deformação registra os efeitos de uma compressão associada a transporte tectônico de W para E, com desenvolvimento de milonitos (Faria *et al.*, 1997).

Uma megaestrutura relacionada ao evento D₁, que se destaca na área do Distrito Federal é a sinforma do vale do rio São Bartolomeu, que preserva metassedimentos Canastra como uma *klippe* alongada na direção N-S, onde rochas do Paranoá afloram em janelas estruturais (Faria *et al.*, 1997).

V - Materiais e Métodos

V.1 – Materiais

As áreas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto, de Santa Maria, de Sobradinho e de Bonsucesso foram identificadas a partir de contatos com as fábricas de cimento. Todas se constituem predominantemente de argilas, que têm sido a fonte de matéria-prima para a indústria de cimento e também para a construção civil. Em todas as áreas de estudo, a argila possui coloração predominantemente bege clara e subordinadamente amarela e vermelha. Em termos granulométricos (Capítulo VI), estão contidas na fração argila e silte e, de modo geral, apresentam predominantemente textura argilosa, sendo a argila bege, untuosa ao tato. Há ocorrências de lateritos amarelos e vermelhos nas porções topograficamente mais elevadas das áreas, exceto nas de Santa Maria e de Bonsucesso.

V.1.1 - Amostragem

A coleta de amostras nas áreas de estudo foi realizada de forma sistemática. As tomadas de materiais para as preparações e ensaios laboratoriais obedeceram a métodos de amostragem pertinentes à situação de cada área, sendo: amostragem contínua vertical por coleta de canal em taludes expostos (Figura V.1AB), amostragem contínua vertical por sondagem com trado motorizado (Figura V.1CD) e coletas de amostras pontuais em locais de interesse ao longo de caminhamentos de superfície nas direções N-S e W-E (Figura VI.4, VI.8A, VI.12, VI.18), tendo totalizado 124 amostras (Tabela V.1).

As amostragens por sondagem foram realizadas em todas as áreas de estudo, as de canal ocorreram em Brazlândia, Santo Antônio do Descoberto e Bonsucesso, e as amostragens por caminhamento de superfície em Brazlândia e Santo Antônio do Descoberto. Os furos a trado motorizado tiveram a profundidade limitada por dificuldades de avanço de cada situação específica.



Figura V.1 – Processo de amostragem com coleta contínua. A: Amostragem de canal; B: Marca do canal amostrado ao longo dos taludes; C: Sondagem a trado motorizado na base da mina na continuidade ao canal; D: Coleta da amostra da perfuração pelo trado; sequência obtida em Santo Antônio do Descoberto.

As amostragens por canal realizadas com auxílio do martelo de geólogo produziram por volta de 18 kg/amostra; as coletas por trado representaram cerca de 4 kg/amostra (Figura V.1D, VI.23); as pontuais, valores menores do que 0,5 kg/amostra.

Tabela V.1 – Distribuição das amostras coletadas por área de estudo e técnica de coleta.

Área de Estudo	Amostragem Contínua (Perfil Vertical)			Amostragem Pontual (Caminhamento de Superfície)	Amostras (Total)
	Canal	Sondagem	Total		
<i>Brazlândia</i>	15	5	20	24	44
<i>Santo Antônio do Descoberto</i>	5	16	21	15	36
<i>Santa Maria</i>	-	14	14	-	14
<i>Sobradinho</i>	-	8	8	-	8
<i>Bonsucesso</i>	6	16	22	-	22
<i>Total</i>	26	59	85	39	124

Na área de Brazlândia, as coletas por amostragem contínua foram realizadas em perfil vertical de 21,75 m, sendo 17,15 m em canal nos taludes – BRAC - (Figura VI.5) e 4,6 m por sondagem a trado motorizado na base da mina – BRAT. A coleta gerou 20 amostras: 15 por canal e 5 por sondagem. O espaçamento predominante entre as amostras foi de um metro; no entanto, em função das peculiaridades do local de coleta, algumas amostras tiveram variação no espaçamento (Tabela V.2A). As coletas pontuais, realizadas ao longo do caminhamento de superfície W-E, totalizaram 24 amostras (Figura VI.4, VI.8A e Tabela V.2B, VI.1).

Tabela V.2 – A: Amostragem contínua vertical na frente de lavra (Canal BRAC e Furo BRAT); B: Amostragem pontual ao longo do caminhamento W-E.

A Amostragem Contínua - Canal BRAC e Furo BRAT Área Brazlândia			B Amostragem Pontual - Perfil W-E Área Brazlândia		
Amostra	Altura	Localização	Amostra	Nível	Localização na Mina
BRA - C15	1,70 m	Talude do Nível 1 (superior)	BRA - CS1	Topo	Extremidade Leste
BRA - C14	1,75 m	Talude do Nível 2	BRA - CS1A - vermelha		
BRA - C13	1,00 m		BRA - CS1B - amarela		
BRA - C12	1,00 m		BRA - CS2		
BRA - C11	1,00 m		BRA - CS2A - amarelo-vermelho		
BRA - C10	1,00 m	Talude do Nível 3	BRA - CS2B - preto ferruginoso		
BRA - C9	1,00 m		BRA - CS3		
BRA - C8	1,00 m		BRA - CS4		
BRA - C7	1,60 m	Talude do Nível 4	BRA - CS5		
BRA - C6	1,00 m		BRA - CS6	N1	Porção Centro-Leste
BRA - C5	1,00 m		BRA - CS7	N2	
BRA - C4	1,00 m	Talude do Nível 5 (inferior)	BRA - CS11 - (8+9+10+12)	N3	
BRA - C3	1,00 m		BRA - CS8		
BRA - C2	1,00 m		BRA - CS9		
BRA - C1	1,10 m		BRA - CS10		
BRA - T1	1,00 m	Piso da Mina (base)	BRA - CS13	N4	
BRA - T2	1,00 m		BRA - CS14	Base	Porção Centro-Oeste
BRA - T3	1,00 m		BRA - CS15		
BRA - T4	1,00 m		BRA - CS16	Base	Extremidade Oeste
BRA - T5	0,60 m		BRA - CS17		
			BRA - CS18		
			BRA - CS19		
			BRA - CS20		

Na área de Santo Antônio do Descoberto, as coletas por amostragem contínua foram executadas em dois perfis verticais. O primeiro, de comprimento 13,5 m, compõe-se da tomada de amostras em canal nos taludes - Canal SAD - (Figura V.1AB, VI.14) e por furo a trado motorizado na base da cava da mina - Furo SADS – (Figura V.1CD), perfazendo 6 m e 7,5 m, respectivamente. A coleta gerou 13 amostras, sendo 5 por canal e 8 por sondagem (Tabela V.3A). O segundo perfil vertical - SAD1 - foi feito por furo a trado motorizado 180 m a NE do perfil anterior (Figura VI.12), totalizando 7,6 m de profundidade com 8 amostras coletadas (Tabela V.3B). O espaçamento predominante entre as amostras de ambos os perfis foi de um metro; contudo, em função das peculiaridades do local de coleta, algumas amostras tiveram variação no espaçamento (Tabela V.3).

Tabela V.3 – A: Amostragem contínua vertical na frente de lavra (Canal SAD e Furo SADS); B: Amostragem contínua vertical a 180 m a NE do furo anterior (Furo SAD1);

A				B			
Amostragem Contínua - Canal SAD e Furo SADS				Amostragem Contínua - Furo SAD1			
Área Santo Antônio do Descoberto				Área Santo Antônio do Descoberto			
	Amostra	Altura	Localização	Amostra	Altura	Localização	
6,0 m	SAD - 5	1,0 m	Talude do Nível 1 (superior)	SAD1 - 1	1,0 m	180 m a NE do Furo SADS	
	SAD - 4	1,4 m	Talude do Nível 2	SAD1 - 2	1,0 m		
	SAD - 3	1,6 m	Talude do Nível 3 (Inferior)	SAD1 - 3	1,0 m		
	SAD - 2	1,0 m					
	SAD - 1	1,0 m					
7,5 m	SADS - 1	1,0 m	Piso da Mina (base)	SAD1 - 4	1,0 m		
	SADS - 2	1,0 m		SAD1 - 5	1,0 m		
	SADS - 3	1,0 m		SAD1 - 6	1,0 m		
	SADS - 4	1,0 m		SAD1 - 7	1,0 m		
	SADS - 5	1,0 m		SAD1 - 8	0,6 m		
	SADS - 6	1,0 m					
	SADS - 7	1,0 m					
	SADS - 8	0,5 m					

As coletas pontuais foram realizadas ao longo dos perfis horizontais N-S e W-E e por caminhamentos secundários perfazendo 16 amostras por coleta pontual (Figura VI.12, VI.18 e Tabela V.4, VI.2).

Tabela V.4 - A: Amostragem pontual em caminhamento N-S e secundários; B: Amostragem pontual em caminhamentos W-E e secundários.

A		B	
Amostragem Pontual - Perfil N-S/Caminhamento Secundário Área Santo Antônio do Descoberto		Amostragem Pontual - Perfil W-E/Caminhamento Secundário Área Santo Antônio do Descoberto	
Amostra	Localização na Área	Amostra	Localização na Área
SADPSN - 70aux SADPSN - 70aux2	Extremidade Norte (Caminhamento Secundário)	SADPWE - 119	Extremidade Oeste
SADPSN - 70 SADPSN - 69 SADPSN - 67 SADPSN - 65	Extremidade Norte	SADPWE - 124	Extremidade Leste
SADH - 10 SADH - 9 SADH - 1	Extremidade Sul	SADPWE - 126aux SADPWE - 127 SADPWE - 127rocha SADPWE - 127argila	Extremidade Leste (Caminhamento Secundário)

Na área de Santa Maria, as coletas foram realizadas através de dois perfis verticais executados a trado motorizado. Os furos STA e STA1 estão locados em região lavrada parcialmente, sendo o primeiro posicionado em sua porção topograficamente mais elevada e o segundo 170 m a sudeste daquele, em desnível de cerca de 13 m (Figura VI.21, VI.24). O STA, de 8 m de profundidade, produziu 8 amostras, enquanto o STA1, de 6 m, gerou 6, totalizando 14 amostras, sendo o espaçamento entre as amostras de um metro (Tabela V.5).

Tabela V.5 – A: Amostragem contínua vertical na parte superior da área (Furo STA); B: Amostragem contínua vertical a 170 m a SE do furo anterior (Furo STA1).

A			B		
Amostragem Contínua - Furo STA Área Santa Maria			Amostragem Contínua - Furo STA1 Área Santa Maria		
Amostra	Altura	Localização	Amostra	Altura	Localização
STA - 1	1,0 m	Parte Superior da Área	STA1 - 1	1,0 m	Parte Inferior da Área 170 m a SE do furo STA
STA - 2	1,0 m		STA1 - 2	1,0 m	
STA - 3	1,0 m		STA1 - 3	1,0 m	
STA - 4	1,0 m		STA1 - 4	1,0 m	
STA - 5	1,0 m		STA1 - 5	1,0 m	
STA - 6	1,0 m		STA1 - 6	1,0 m	
STA - 7	1,0 m				
STA - 8	1,0 m				

Na área de Sobradinho, as coletas foram realizadas por dois perfis verticais, feitos a trado motorizado. O furo S está posicionado na porção topograficamente mais elevada da área e o SA 150 m a norte daquele, em desnível de cerca de 5 m (Figura VI.27, VI.30). O primeiro, de 2,5 m de profundidade, proporcionou 3 amostras, enquanto o SA, de 4,3 m, gerou 5, totalizando 8 amostras com espaçamento predominante entre as elas de um metro, exceto duas amostras que tiveram espaçamento menor do que 1 m em função de particularidades dos trechos amostrados (Tabela V.6).

Tabela V.6 – A: Amostragem contínua vertical na parte superior da área (Furo S); B: Amostragem contínua vertical a 150 m a N do furo anterior (Furo SA).

A			B		
Amostragem Contínua - Furo S Área Sobradinho			Amostragem Contínua - Furo SA Área Sobradinho		
Amostra	Altura	Localização	Amostra	Altura	Localização
S - 1	1,0 m	Parte Superior da Área	SA - 1	1,0 m	Parte Inferior da Área 150 m a N do furo S
S - 2	1,0 m		SA - 2	1,0 m	
S - 3	0,5 m		SA - 3	1,0 m	
		SA - 4	1,0 m		
		SA - 5	0,7 m		

Na área de Bonsucesso, as coletas foram realizadas por amostragem contínua em perfil vertical de 22 m, sendo 16 m em canal nos taludes – BONC - e 6 m por sondagem a trado motorizado na base da mina - BONA -, produzindo 22 amostras: 16 por canal (Figura VI.34, VI.33) e 6 por sondagem, sendo o espaçamento entre elas de um metro (Tabela V.7).

Tabela V.7 – Amostragem contínua vertical na frente de lavra da mina Bonsucesso (Canal BONC e Furo BONA).

Amostragem Contínua - Canal BONC e Furo BONA			
Área Bonsucesso			
Amostra	Altura	Localização	
16 m	BON - C16	1,0 m	Talude do Nível 1 (superior)
	BON - C15	1,0 m	
	BON - C14	1,0 m	
	BON - C13	1,0 m	
	BON - C12	1,0 m	
	BON - C11	1,0 m	Talude do Nível 2
	BON - C10	1,0 m	
	BON - C9	1,0 m	
	BON - C8	1,0 m	
	BON - C7	1,0 m	
	BON - C6	1,0 m	Talude do Nível 3 (inferior)
	BON - C5	1,0 m	
	BON - C4	1,0 m	
	BON - C3	1,0 m	
	BON - C2	1,0 m	
	BON - C1	1,0 m	
6 m	BON - A1	1,0 m	Piso da Mina (base)
	BON - A2	1,0 m	
	BON - A3	1,0 m	
	BON - A4	1,0 m	
	BON - A5	1,0 m	
	BON - A6	1,0 m	

V.1.2 - Preparação de Amostras

A preparação das amostras foi realizada em laboratório do IG-UnB, atendendo dois princípios fundamentais: homogeneização das amostras e redução da quantidade, sendo o excesso preservado para eventuais necessidades futuras. Tratamentos posteriores, como moagem, secagem, mistura, foram realizadas ou não em função do método ao qual se destinou o material (Figura V.2).

O recebimento da amostra em laboratório está representado pela figura V.2abc. A secagem do material foi realizada em estufa a 140°C por 3 horas (Figura V.2df). A homogeneização foi realizada por meio de saco plástico através de movimentos contínuos e repetidos por 3 minutos (Figura V.2ghij). A separação das alíquotas destinadas aos diversos ensaios foi realizada utilizando-se espátula (Figura V.2klm). A calcinação da argila não moída foi realizada em mufla a 800°C por 30 minutos (Figura V.2nop). A moagem foi executada em prensa Herzog por 3 minutos (Figura V.2qrst).

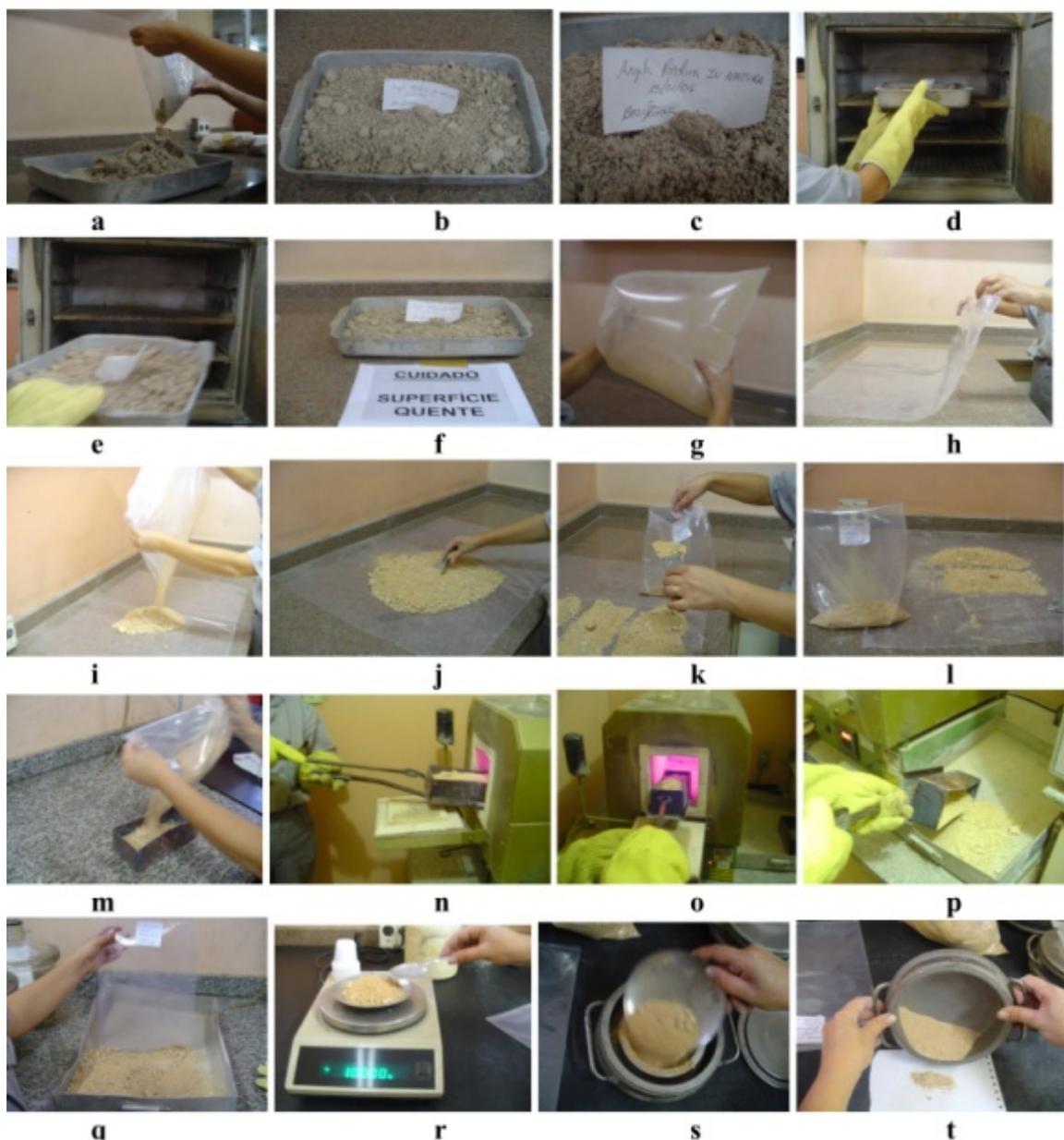


Figura V.2 - Preparação de amostras passo a passo: **a b c** – recebimento; **d e f** - secagem em estufa; **g h i j** – homogeneização; **k l m** - separação das partes; **n o p** – calcinação; **q r s t** - pesagem e moagem.

V.2 - Métodos

As argilas das áreas estudadas foram submetidas a: análises por difração de raios-X, análises químicas, calcinação e determinação de atividade pozolânica com cal hidratada e com cimento (argila *in natura* e calcinada).

V.2.1 - Difração de Raios-X (DRX)

As análises difratométricas e a interpretação dos resultados foram realizados no laboratório de raios-X do IG-UnB.

A difração dos raios-X permite a caracterização das estruturas cristalinas, e a partir delas, a identificação mineral, sendo a técnica mais adequada à definição dos argilominerais, que têm dimensões ínfimas, geralmente menores do que 4 μm . Desse modo, como os constituintes das argilas estudadas encontram-se predominantemente na fração argila e silte, essa técnica se mostrou de grande importância no presente trabalho.

A preparação das amostras seguiu as técnicas convencionais para análise de argilominerais, consistindo na separação, concentração e preparação de lâminas. Para a confecção de lâminas foi utilizada a técnica de *back loading*, que consiste em pressionar o pó da amostra em lâmina vazada de alumínio, sendo submetida a uma varredura de 2θ de 2 a 65°, com aquisição contínua de 2° por minuto. As análises foram feitas em amostra total.

O difratômetro utilizado foi o modelo Rigaku-D/MAX – 2 A/C, equipado com tubo de cobre e filtro de Ni, operando com 40 kv e 20 mA. A partir dos difratogramas, os minerais foram identificados por meio do software JADE 3.0 da MDI e a pesquisa de possíveis minerais no banco de dados mineralógicos do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

As argilas foram analisadas por este método na condição *in natura* e calcinada. As primeiras foram caracterizadas para todas as áreas, tanto as coletadas por amostragem contínua em perfil vertical quanto as de amostragens pontuais nos caminhamentos de superfície, perfazendo 124 análises *in natura*. Em função das necessidades do trabalho apenas amostras de perfis verticais foram calcinadas a 800°C por 30 minutos, das quais 70 foram analisadas por DRX (Tabela V.8).

Tabela V.8 – Amostragem contínua em perfil vertical quanto a: condição *in natura*, calcinada e utilização segundo o método. As amostras da área de Santa Maria não foram destinadas a estudos intrínsecos à fabricação de cimento, não sendo calcinadas e nem avaliadas quanto à atividade pozolânica (Capítulo VI).

Área de Estudo	Amostragem Contínua (Perfil Vertical)			
	<i>In natura</i>	Calcinada	DRX	Atividade Pozolânica
<i>Brazlândia</i>	20	20	20	20
<i>Santo Antônio do Descoberto</i>	21	21	21	21
<i>Santa Maria</i>	14	-	-	-
<i>Sobradinho</i>	8	8	8	8
<i>Bonsucesso</i>	22	22	21	22
<i>Total</i>	85	71	70	71

A execução de análises difratométricas teve como propósito essencial a identificação da abundância relativa das fases minerais, bem como a verificação das alterações mineralógicas ocorridas após o tratamento térmico, simulando condições

industriais – calcinação a 800°C por 30 minutos. Nesta condição térmica, as reflexões características da caulinita, da goethita e da Gibbsita, normalmente, não são observadas, indicando o desaparecimento do mineral. Em outros, como no caso da Ilita, pode haver transformações minerais, como, por exemplo, mudança de politipo (Lacerda, 2005).

Ocorre, ainda, o surgimento de reflexões características nas argilas calcinadas não observadas nos difratogramas destas mesmas argilas quando não calcinadas - *in natura* -, indicando duas situações possíveis (Figura V.3). A primeira deve-se a ocorrência de minerais traços, que se encontravam obliterados pela reflexão característica de um mineral dominante, em função do pico de ambos localizarem-se na mesma região do difratograma. A segunda situação é devida a formação de novos compostos, como é o caso do aparecimento de hematita em decorrência da desidratação de goethita. Contudo, nem sempre é possível determinar se a reflexão nova é decorrente de uma ou de outra situação.

Em conformidade com a conceituação do termo mineral, que estabelece sua origem natural, nesta tese as alterações mineralógicas ocorridas devidas ao tratamento térmico serão denominadas pelo termo genérico “material” e não pelo termo mineral.

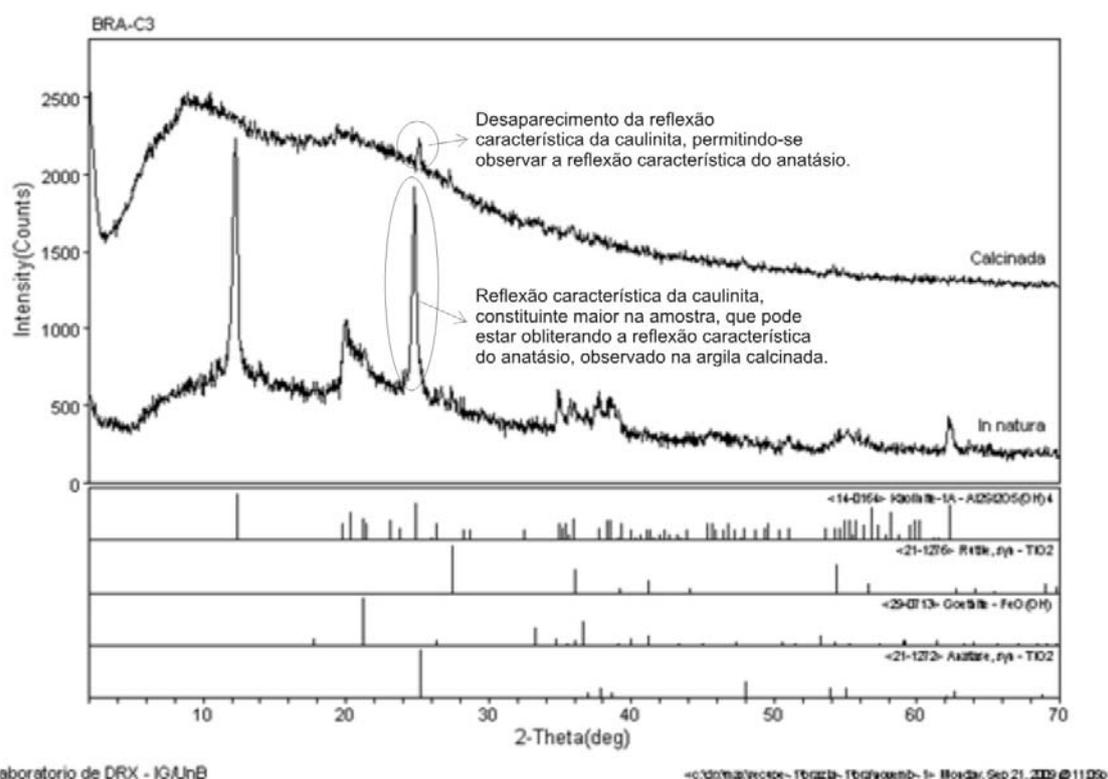


Figura V.3 – Difratogramas de argila *in natura* e de argila calcinada a 800°C por 30 minutos - amostra BRA-3, área Brazlândia -, evidenciando o aparecimento das reflexões características do anatásio após a calcinação.

V.2.2 - Análises Químicas

Foram realizadas análises químicas pelos métodos de Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) e Espectrometria de Emissão Atômica (ICP-AES) para argila *in natura*, totalizando 124 amostras. Os ensaios foram executados no Laboratório de Geoquímica do IG-UnB, obtendo-se resultados para SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂ e PF.

As análises químicas não são utilizadas como método para definição da reatividade pozolânica do material (Souza Santos, 1975). Todavia, destaca-se sua importância como parâmetro de controle de uniformidade e regularidade dos jazimentos, especialmente quanto aos teores de álcalis (Na₂O e K₂O) e Magnésio (MgO) e como referência para correlações entre os diversos métodos, razão de sua importante utilização neste trabalho.

V.2.3 - Calcinação da Argila

Foram calcinadas as argilas de perfis verticais em amostragens contínuas de todas as áreas, exceto Santa Maria (Capítulo VI). A calcinação das argilas de Bonsucesso foi realizada no Laboratório de Concreto de FURNAS – Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia. As de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto e de Sobradinho no Laboratório da empresa Cimento Tocantins S/A, em Sobradinho, DF, totalizando 71 amostras calcinadas (Tabela V.8). Este método teve por função principal, a preparação do material para a determinação de atividade pozolânica. Complementarmente, amostras calcinadas foram submetidas à análise de difração de raios-X no laboratório de raios-X do IG-UnB e à verificação das alterações de cores da argila, comparando argila *in natura* com calcinada.

Cerca de 250 gramas de cada amostra foi calcinada em mufla (Figura V.4) a 800°C por 30 minutos. O procedimento foi repetido para cada uma das amostras em recipiente próprio e individual. Após calcinação, a argila foi moída.

É importante observar que este método busca reproduzir as condições industriais de um forno de cimento. Contudo, industrialmente um forno de cimento é rotativo, movimentando a argila. Além disso, a água retirada da caulinita é drenada para a atmosfera através de exaustores. No caso da mufla não há movimento da argila e também não há drenagem da água durante o período da calcinação. Com base em experimentos empíricos (CETEM/RJ), observou-se que a retenção da água pode vir a dificultar o colapso da caulinita.

A calcinação de argila é uma técnica importante para verificação da mudança de cor da argila após a calcinação e, conseqüentemente, do cimento pozolânico derivado. As indústrias evitam que ocorram mudanças perceptíveis na cor do cimento, uma vez que o consumidor, especialmente o tradicional, vincula a alteração de cor com impurezas, evitando a aquisição do produto.



Figura V.4 – Modelo de mufla utilizada para calcinação das amostras das áreas estudadas.

V.2.4 - Resistência Mecânica à Compressão (RMC)

Na literatura técnica existe um consenso de que os ensaios mecânicos constituem a melhor forma de avaliação da reatividade dos materiais pozolânicos, uma vez que a manifestação da resistência mecânica exige a geração de compostos ou fases mineralógicas de propriedades ligantes que só se formarão se ocorrer uma reação química entre a pozolana e o Ca(OH)_2 disponível no cimento. Há dois grandes grupos para a avaliação da reatividade das pozolanas: os que utilizam hidróxido de cálcio (cal hidratada) e os que utilizam cimento. A norma brasileira estabelece os procedimentos pertinentes a cada um deles, respectivamente através da NBR 5751/92 e 5752/92, adotadas neste trabalho.

Ao se utilizar o cimento para a avaliação da reatividade dos materiais pozolânicos é preciso que se esteja consciente que a significativa influência das características físicas e mineralógicas do cimento sobre a qualidade dos resultados pode tornar difícil a avaliação da qualidade das pozolanas, uma vez que há afinidades físicas e mineralógicas diferentes entre a mesma pozolana e os diferentes cimentos. No caso desse trabalho, as comparações serão feitas entre as amostras para um mesmo cimento e, portanto, os resultados serão comparáveis entre si, ainda que os valores obtidos não possam ser tomados como absolutos.

Então, com o objetivo de compensar essa deficiência, a atividade pozolânica é investigada através da cal hidratada que possui uma uniformidade e pureza de melhor controle, tornando os resultados mais absolutos do que com o cimento. Entretanto, não se pode perder de vista que o hidróxido de cálcio está muito longe de reproduzir a complexidade das pastas de cimento portland.

A determinação de atividade pozolânica com cal hidratada e com cimento das argilas de Bonsucesso foi realizada no Laboratório de Concreto de FURNAS – Centrais Elétricas S.A., em Aparecida de Goiânia. As de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto e de Sobradinho no Laboratório da empresa Cimento Tocantins S/A, em Sobradinho, DF. Todas as amostras oriundas dos perfis verticais, excetuando as da área Santa Maria, foram ensaiadas com argila *in natura* e com argila calcinada, totalizando 71 amostras (Tabela V.8).

V.2.4.1 - Determinação de Atividade Pozolânica com $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Através do procedimento da norma NBR 5751/92, a amostra deve ser seca em estufa a 110°C até que se caracterize constância na massa. A partir da amostra de argila prepara-se uma argamassa, que deve conter uma parte em massa de hidróxido de cálcio, nove partes em massa de areia normal conforme quadro abaixo regido pela NBR 7214/82, e mais uma quantidade de argila correspondente ao dobro do volume do hidróxido de cálcio.

Material retido entre as peneiras de abertura nominal de	Denominação da areia
2,4 mm e 1,2 mm	Grossa
1,2 mm e 0,6 mm	Média grossa
0,6 mm e 0,3 mm	Média fina
0,3 mm e 0,15 mm	Fina

A moldagem de três corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura utiliza os seguintes materiais e quantidades: hidróxido de cálcio – 104 gramas; areia normal – 234 gramas de cada uma das quatro frações; e argila – $2 \times \delta_{\text{poz}}/\delta_{\text{cal}} \times 104\text{g}$, em que δ_{poz} e δ_{cal} são os valores da massa específica da argila e cal hidratada, respectivamente. A quantidade de água adicionada é utilizada para obtenção de uma consistência normal.

O resultado da atividade pozolânica é dado pelo valor da resistência mecânica dos corpos-de-prova rompidos aos 7 dias, sendo expresso em MegaPascal, MPa (Figura V.5).



Figura V.5 – Prensa utilizada nos ensaios e sequência do processo utilizado no rompimento dos corpos-de-prova.

V.2.4.2 - Determinação de Atividade Pozolânica com Cimento

Através do procedimento da norma NBR 5752/92, a amostra de argila é seca em estufa a 110°C . São preparadas duas argamassas: uma só com cimento e outra com cimento e argila. Para a moldagem de três corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura, são utilizados os seguintes materiais e quantidades:

	ARGAMASSA A	ARGAMASSA B
Cimento portland	312,0 g	202,8 g
Areia normal (234 g de cada fração)	936,0 g	936,0 g
Água	X	Y
Argila	$109,2 \times \delta_{\text{poz}}/\delta_{\text{cim}}$	

Onde δ_{poz} e δ_{cim} são os valores da massa específica da argila e do cimento, respectivamente e, X e Y são as quantidades de água necessárias para produzir índices de consistência de 225 ± 5 mm. As proporções acima equivalem a uma adição de 35% de argila em relação ao cimento, em volume.

O índice de atividade pozolânica (IAP) com cimento portland é dado pela relação entre a resistência média aos 28 dias dos corpos-de-prova moldados com cimento e argila (argamassa B) e a resistência média, aos 28 dias, dos corpos-de-prova moldados só com cimento (argamassa A) e são expressos em valores percentuais. De acordo com a NBR 12653/92, o IAP maior ou igual a 75% é condição necessária, juntamente com outros requisitos (Tabela III.5), para que uma argila seja classificada como pozolânica.

Nos estudos da mina Bonsucesso observou-se incongruências quanto à utilização do IAP como parâmetro na classificação de pozolanas, tendo sido proposta sua utilização apenas como parâmetro de referência, mas não de restrição na classificação de pozolanas (Lacerda, 2005). Naquele trabalho o cálculo do IAP seguiu estritamente a NBR 5752/92 em todos os aspectos, inclusive quanto ao rompimento dos corpos-de-prova aos 28 dias. Em vista disso, nesta tese o IAP foi considerado como parâmetro de referência e não como de restrição na classificação de pozolanas (Seção III.5.2).

Para melhor compreender sobre esta problemática, o IAP foi reavaliado nesta tese (Seções VII.4.2, VII.4.3 e Capítulo VIII). Buscou-se comparar os resultados da atividade pozolânica medida com cimento com os resultados da atividade pozolânica medida com $\text{Ca}(\text{OH})_2$, cujos corpos-de-prova são rompidos aos 7 dias (Seção V.2.4.1). Desse modo, foi adotado o rompimento dos corpos-de-prova aos 7 dias também para os ensaios com cimento e não aos 28 dias como prescrito pela NBR 5752/92.

Portanto, o IAP das áreas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto e de Sobradinho foi obtido pela medição da resistência da argila com cimento aos 7 dias, enquanto o IAP da área de Bonsucesso, estudada anteriormente (Lacerda, 2005), foi obtido aos 28 dias, conforme NBR 5752/92.

VI – Geologia Local

A Figura VI.1 apresenta mapa geológico geral, construído a partir das informações contidas nas cartas geológicas do Brasil ao milionésimo (CPRM, 2004), folhas SD-22 (Goiás), SD-23 (Brasília), SE-22 (Goiânia) e SE-23 (Belo Horizonte), em que as áreas da tese estão contidas nos Grupos Paranoá e Canastra/Araxá. Todavia, nos estudos de detalhe de cada área, adota-se, neste trabalho, o mapa geológico do Distrito Federal (Faria *et al.*, 1997), que apresenta escala mais apropriada. Desse modo, as unidades MPpa4 e Mppa4cc da Figura VI.1, correspondem, respectivamente as unidades MPpr4 e MPPac de Faria *et al.* (1997). A área Santo Antônio do Descoberto, segundo a Figura VI.1, está situada na região compreendida pelos Grupos Araxá e Canastra. No mapa geológico do Distrito Federal esta região foi mapeada como Grupo Canastra, litofácies Micaxisto, adotado neste trabalho.

As minas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto e de Bonsucesso têm sido utilizadas como fontes de pozolanas às fábricas de cimento do Distrito Federal. Sobradinho e Santa Maria, por ocasião do projeto da tese, apresentavam-se como áreas potenciais. Esta última, tendo em vista à grande distância do parque fabril, à proximidade de núcleos habitacionais, aos comprometimentos ambientais (explorada sem critérios de lavra para fins de construção civil) e à baixa reserva, posteriormente, foi descartada pela empresa que manifestava interesse na mesma. Contudo, tendo em vista as características pozolânicas e a localização no contexto geológico, que amplia geograficamente o estudo dessas argilas no Distrito Federal e entorno, Santa Maria foi mantida neste trabalho, porém não sendo realizados os estudos intrínsecos à fabricação de cimento (calcinação, coloração do cimento e atividade pozolânica).

Os estudos geológicos normalmente limitaram-se aos contornos da lavra ou potencial jazida e incluem amostragem ao longo dos taludes expostos e/ou em sondagem a trado motorizado. Em Brazlândia (Figura VI.4) e Santo Antônio do Descoberto (Figura VI.12) caminhamentos de superfície (N-S e E-W) nas proximidades da lavra completam a investigação. Apenas Bonsucesso foi objeto de ensaios granulométricos, que exibiram um material contido predominantemente na fração argila e subordinadamente na fração silte (Lacerda, 2005). Nesta tese, por não apresentar-se como fator relevante, não foram empreendidos estudos granulométricos e, baseado nas semelhanças macroscópicas das argilas de todas as áreas com as de Bonsucesso, adotou-se o termo argila na descrição dos perfis verticais com o mesmo significado de Bonsucesso (Seção III.1).

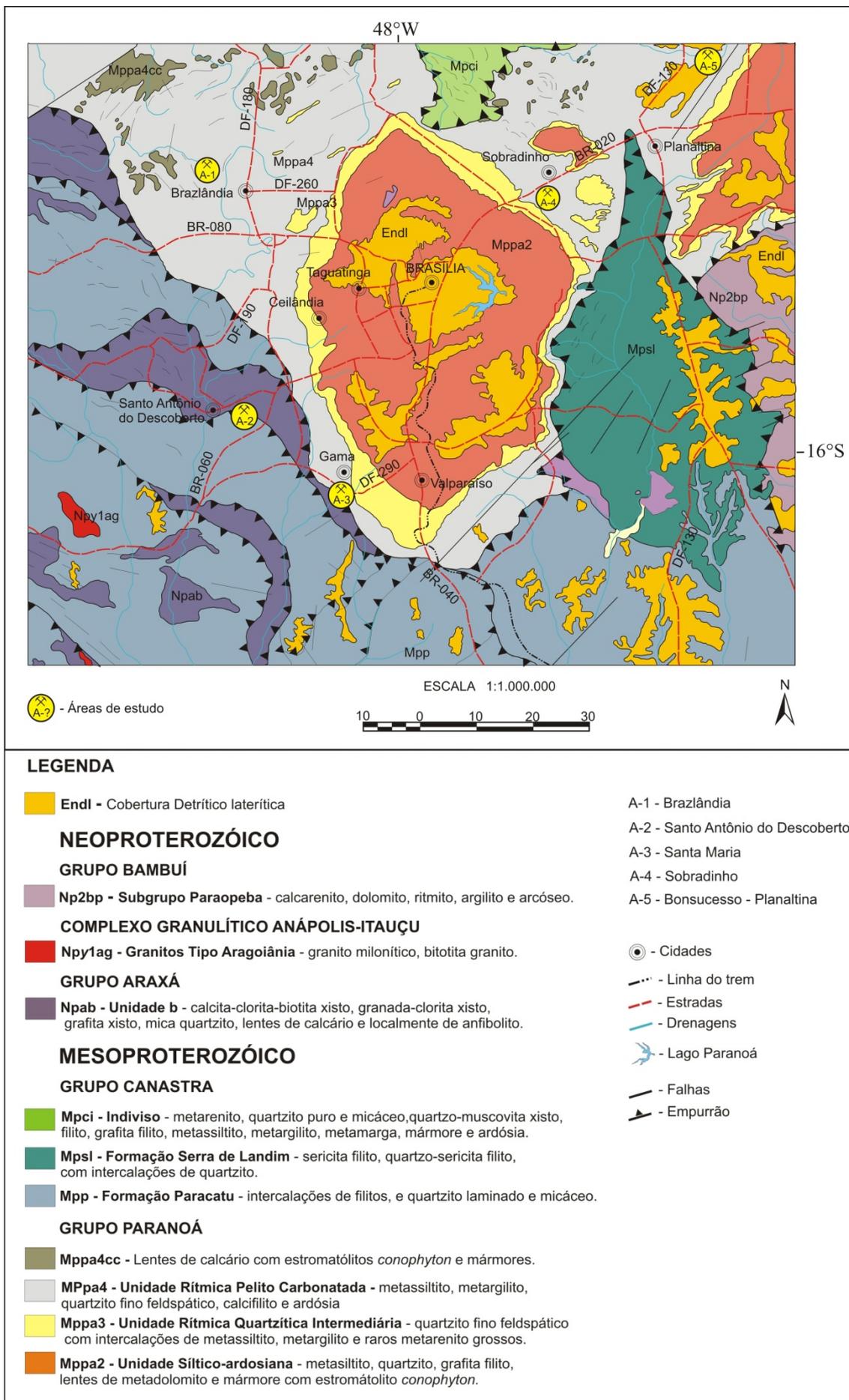


Figura VI.1 – Mapa geológico das áreas de estudo (adaptado de CPRM – carta geológica do Brasil ao milionésimo, 2004, folhas SD-22-Goiás, SD-23-Brasília, SE-22-Goiânia e SE-23-Belo Horizonte).

Na construção dos perfis intempéricos foram utilizados os termos “rocha matriz”, “saprolito” e “*solum*” em concordância com a mineralogia presente (Seção VII.1) e com as observações macroscópicas. Desse modo, neste trabalho, caracteriza-se rocha matriz como a rocha a partir da qual o processo intempérico atua para formar o manto de intemperismo, saprolito como sendo a parte do manto de intemperismo acima da rocha matriz em que seja identificado o politipo 1Md da caulinita, enquanto o *solum* corresponde a porção do manto intempérico acima do saprolito em que seja identificado o politipo 1A da caulinita.

Nesta tese, o termo “maturidade intempérica” foi utilizado para referir-se à evolução intempérica do manto de intemperismo tendo como suporte a evolução mineralógica e geoquímica, não denotando qualquer vínculo com a evolução geomorfológica, não tratada neste trabalho (Capítulo IV).

VI.1 - Brazlândia

A área de Brazlândia, situada a cerca de 7 km a oeste da cidade homônima, está aproximadamente circunscrita aos limites de uma cava de mineração, que em junho de 2002, perfazia aproximadamente 25 mil m² (Figura VI.2, VI.3, VI.4). Delimita-se a norte por afloramentos de metargilitos, a oeste por manto laterítico e afloramento de metargilito, a leste por ocorrência do manto laterítico e a sul pelo avanço da frente de lavra (Figura VI.4). A superfície total aproximada da área abrangida nos estudos está representada pelo polígono da Figura VI.4 de 725 m de comprimento por 330 m de largura, perfazendo cerca de 240 mil m².

A área foi investigada através da exposição de cinco taludes da cava da mina de 17,15 m de altura (Figura VI.5), por meio de sondagem a trado motorizado, BRAT de 4,6 m de profundidade e por observações e coletas de amostras obtidas ao longo de caminhamentos de superfície nas direções W-E e N-S de comprimentos aproximados de 600 m e 330 m, respectivamente (Figura VI.4, Seção V.1.1).

A área de Brazlândia é predominantemente formada por latossolos na parte central, representando a argila do manto intempérico estudado, e por lateritos nas extremidades W-E (Figura VI.4). Os afloramentos que ocorrem na extremidade W da área expõem metargilito alterado cinza claro a branco (Figura VI.6), enquanto que os que ocorrem na parte N mostram metargilito alterado vermelho. Os metargilitos pertencem à unidade Metarritimitos argilosos do Grupo Paranoá, enquanto os latossolos e lateritos representam a unidade do Terciário/Quaternário (Figura VI.2).

Na área de Brazlândia foi construído um perfil de intemperismo por amostragem contínua na parte central da mina (Figura VI.4, VI.7), uma seção esquemática W-E e dois perfis intempéricos, hipotéticos, elaborados a partir composição das informações dos caminhamentos W-E e N-S, representando uma tentativa de visualização do perfil de alteração pacote (Figura VI.8).

O padrão geral do perfil intempérico em Brazlândia é constituído por solo ou laterito, argilo-laterito e argila vermelha na parte superior, seguida na parte média de argila bege homogênea, de argila em padrão mosqueado e de argila vermelha e na base por

metargilito intemperizado, sendo seus contatos de transição (Figura VI.7, VI.8 e Tabela VI.1).

No local onde foi feita a amostragem de canal e furo a trado, a descrição do manto intempérico do topo para a base é de solo orgânico marrom até por volta de 1,5 m e de argila bege homogênea até aproximadamente 14 m, compondo sua maior espessura na área, por volta de 12,5 m (Figura VI.5). A partir deste nível se observa argilas mosqueadas, marcado pela presença de argila bege envolvida por argila amarela, estendendo-se até 21,5 m e daí até o fim do perfil ocorre argila vermelha (Figura VI.7).

Conforme Figura VI.9AB, nota-se que a argila bege parece se formar a partir da argila amarela. Na Figura VI.9CD observa-se argila vermelha envolvendo argila amarela que por sua vez está envolvendo argila bege clara. Análises mineralógicas e geoquímicas destas argilas (Seção VII.1.1.1, VII.2.1) indicam as etapas de maturidade do perfil de intemperismo da área de Brazlândia em função das cores, ocorrendo mudança desde o vermelho no início do processo até o bege claro na culminância do processo de maturação intempérica.

Quando se investiga as extremidades laterais da área, verifica-se que o pacote de argila bege torna-se gradativamente menor para as extremidades leste, oeste e norte. Nos limites leste e oeste, não se observa o solo marrom sobrepondo o pacote de argila como na parte central da mina, mas sim um pacote de argila composto do topo para a base de laterito, argilo-laterito e argila vermelha (Figura VI.8). A parte sul da área, nos limites estudados, é constituída de solo marrom coberto com vegetação, sem exposições do manto de intemperismo.

À medida que se caminha do centro para oeste ou leste da mina o aparecimento das argilas mosqueadas fica bem marcado pela ocorrência de argilas em bege, amarelo e vermelho. Na seqüência do caminhamento a oeste foi possível se verificar a transição da argila para a rocha matriz, metargilito cinza (Figura VI.9).

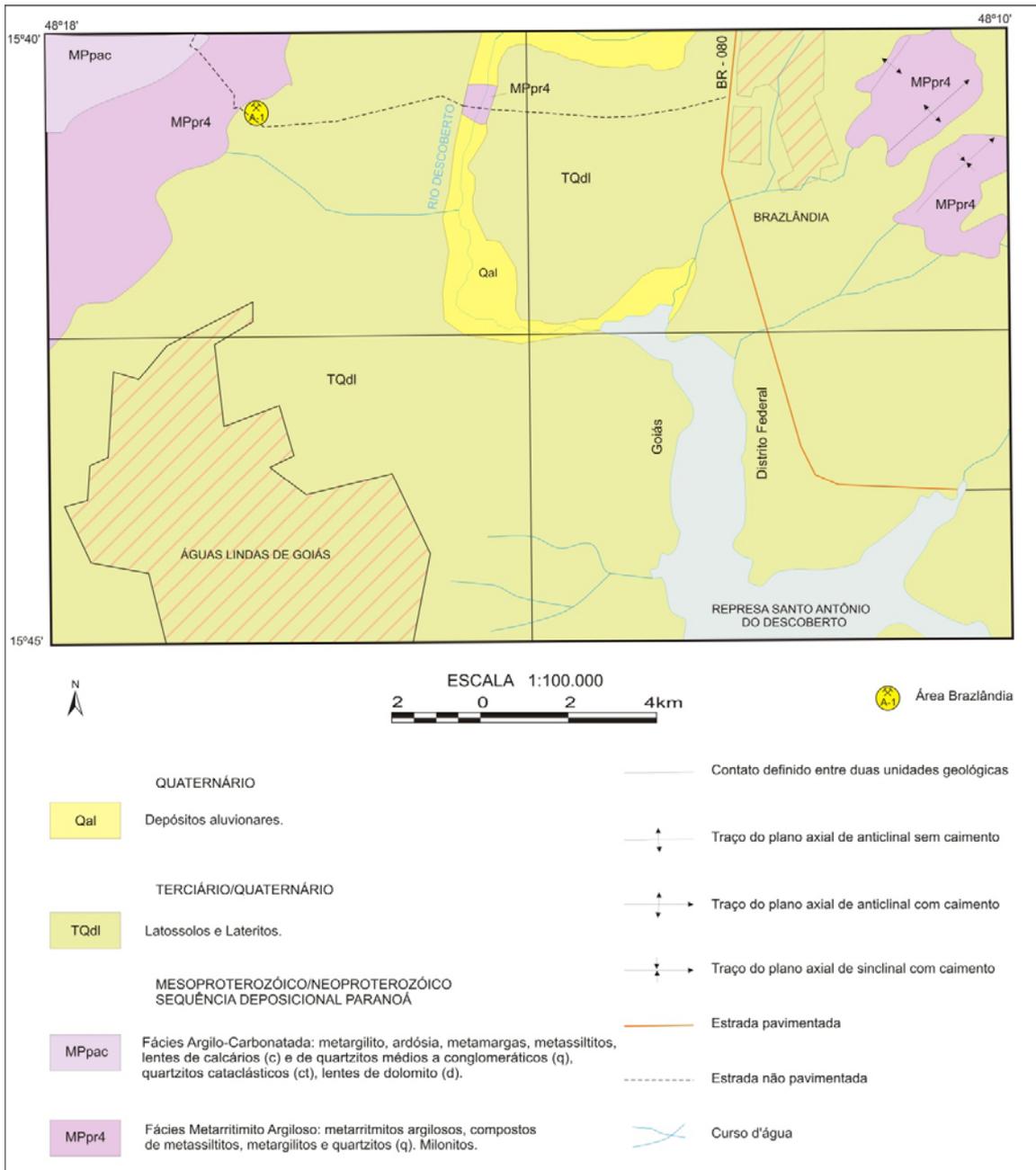


Figura VI.2 – Mapa geológico da região de Brazlândia (DF) e de Águas Lindas de Goiás, indicando a mina Brazlândia (Base: Faria *et al.*, 1997 e Google Earth).



Figura VI.3 – Localiza o da área de Brazlândia partindo-se da cidade homônima (Adaptado de Google Earth: imagens de 26 de junho de 2002 a 4 de setembro de 2003).



Figura VI.4 – Detalhe da mina Brazlândia. A frente de lavra onde a amostragem de canal foi realizada pode ser vista na Figura VI.5 (Adaptado de Google Earth: imagem de 26 de junho de 2002).

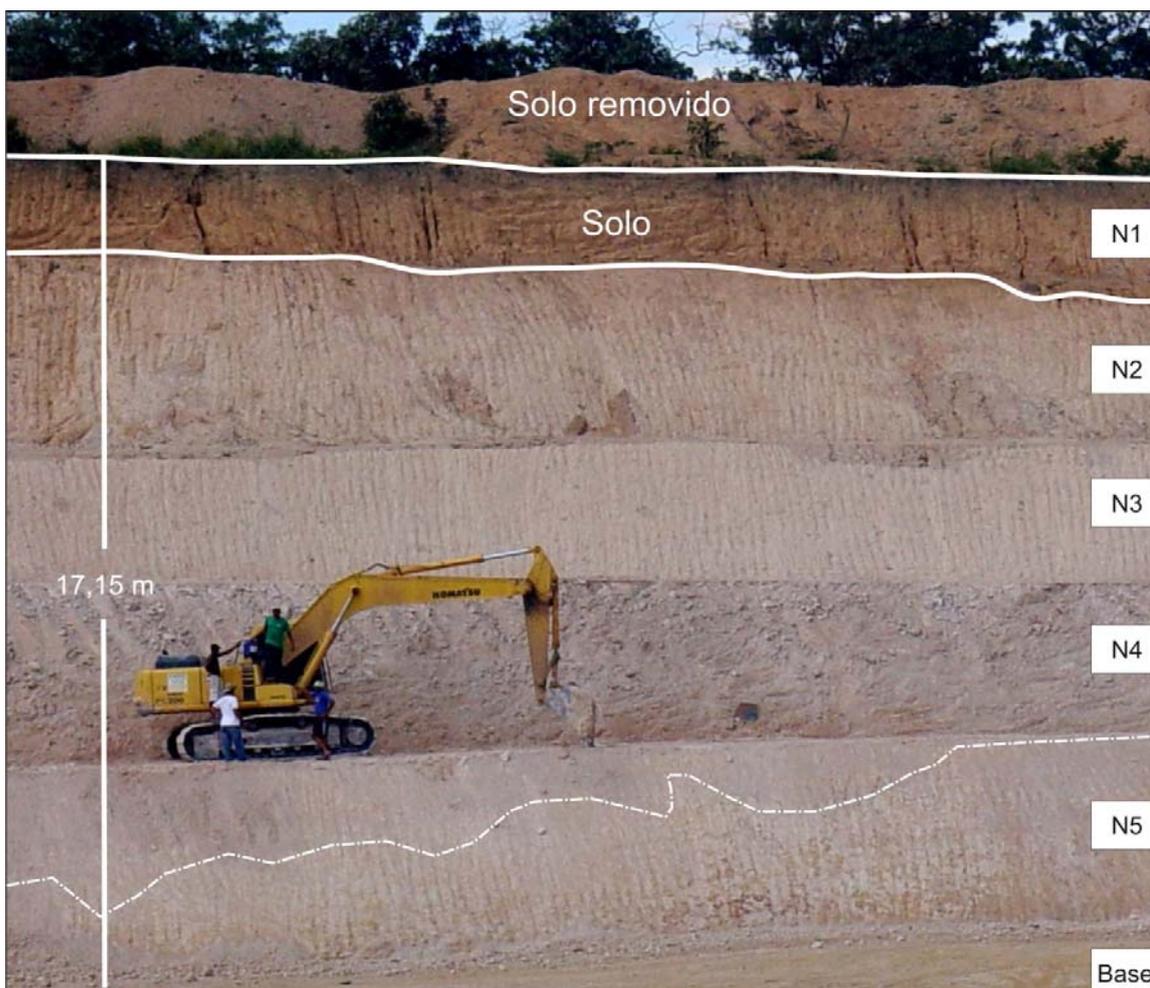


Figura VI.5 – Porção central da mina Brazlândia, representando o pacote de argila utilizado como minério. N1, N2, N3, N4, N5 correspondem aos níveis de lavra, amostrados por coleta de canal (BRAC). A base na sequência do canal foi perfurada em 4,6 m por trado motorizado (BRAT). A linha pontilhada ao longo do N5 é uma tentativa de marcar o aparecimento de argilas mosqueadas.



Figura VI.6 – Afloramento de metargilito cinza claro em corte de estrada no extremo oeste da mina Brazlândia (Amostra BRA-CS20).

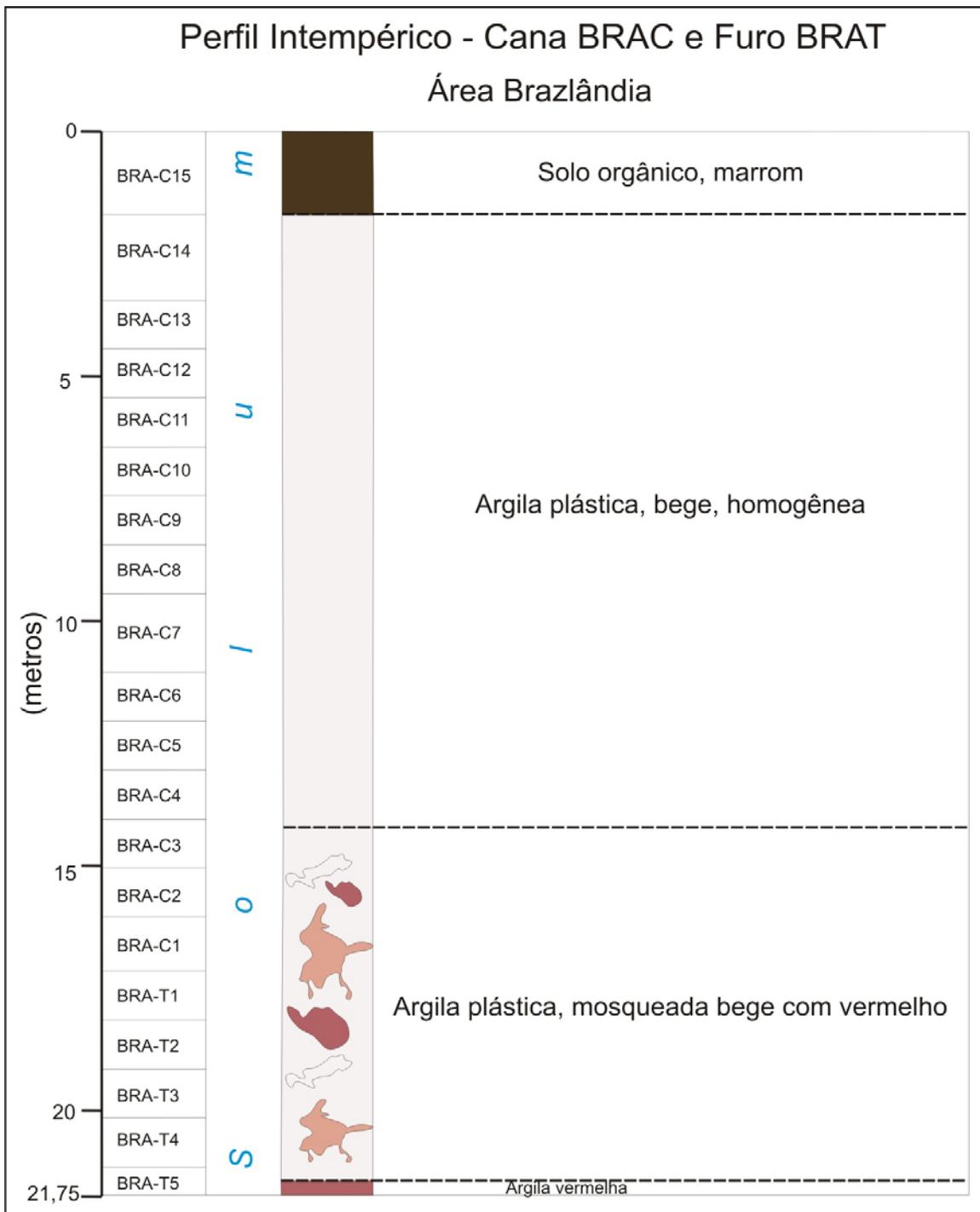


Figura VI.7 – Perfil intempérico na porção central da mina, representando o pacote de argila utilizado como minério, obtido por coleta de amostras contínuas no talude da frente de lavra (BRAC - de 0 m até 17,15 m) e por sondagem a trado (BRAT - de 17,15 m até 21,75 m) na base da área de Brazlândia.

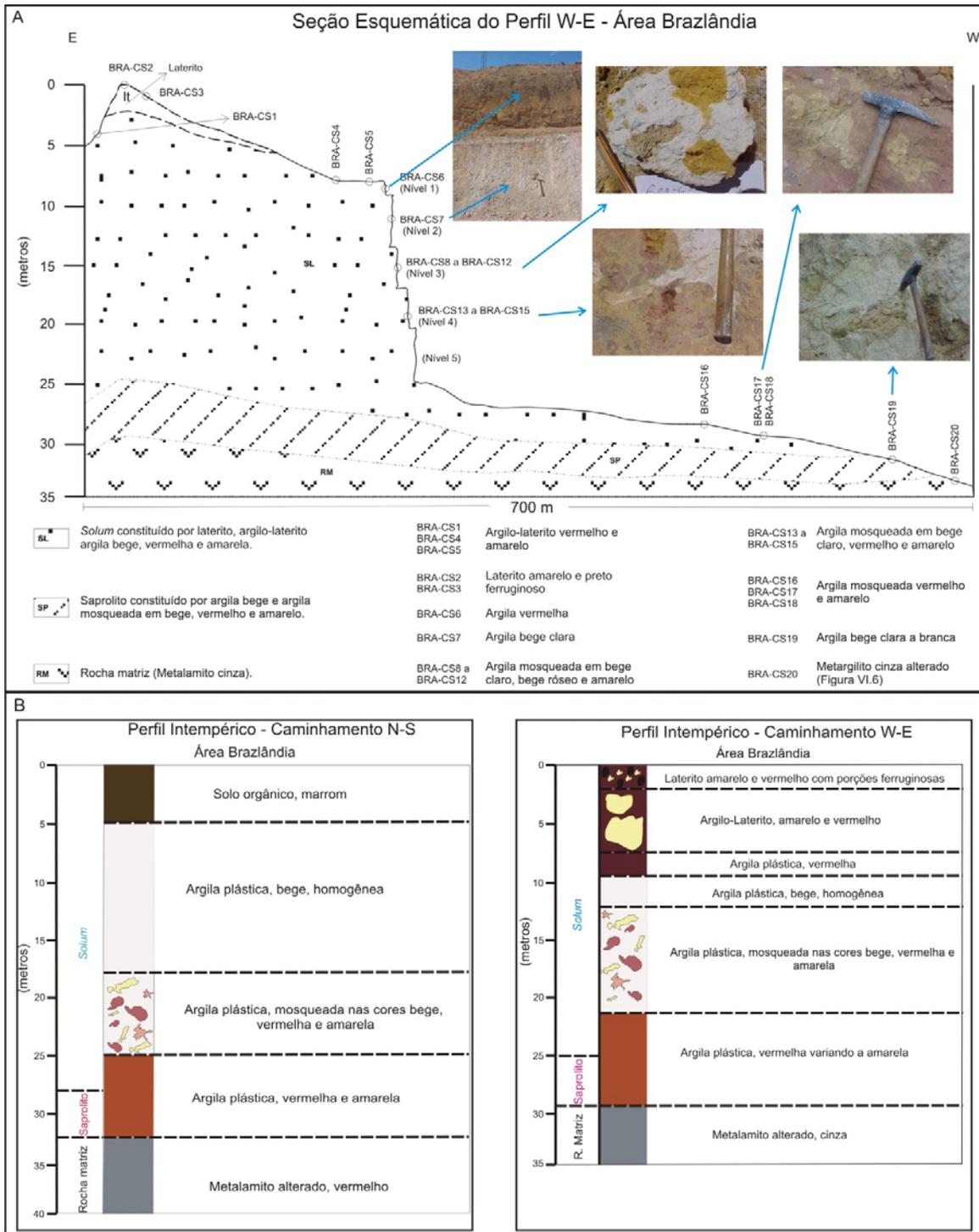


Figura VI.8 – A: Seção esquemática construída a partir do perfil W-E, exibindo o modelo de provável perfil de maturidade intempérica de Brazlândia. B: Perfis intempéricos hipotéticos, construídos através das informações obtidas nos caminhamentos N-S e W-E. Na comparação entre os perfis, nota-se a menor espessura da argila bege nas extremidades da área W-E, além da presença de argila vermelha, de argilo-laterito e laterito sobrepondo argila bege, ao invés de solo.

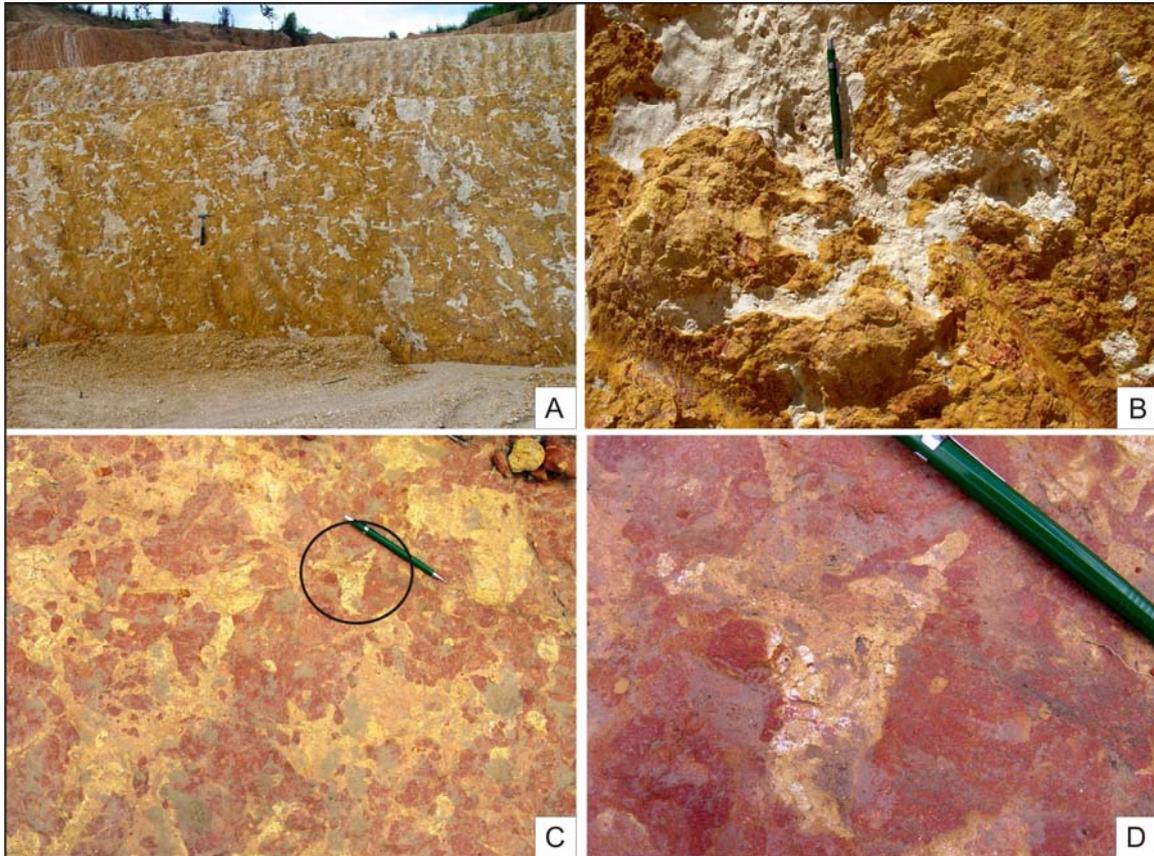


Figura VI.9 – A: Argila mosqueada em bege e amarelo da mina Brazlândia em talude inferior da frente de lavra próximo da extremidade leste. B: Detalhe mostrando a argila bege envolvida pela argila amarela. C: Argilas mosqueadas na extremidade oeste próximo ao contato com metargilito intemperizado. D: Detalhe exibindo no centro argila bege claro envolvida por argila amarela, e esta por argila vermelha. Exposições *in situ*.

Amostragem Pontual - Caminhamento W-E - Área Brazlândia	
<i>BRA-CS1</i>	Argilo-laterito vermelho e amarelo.
<i>BRA-CS1A</i>	Porção vermelha.
<i>BRA-CS1B</i>	Porção amarela.
<i>BRA-CS2</i>	Laterito amarelo-vermelho e preto ferruginoso.
<i>BRA-CS2A</i>	Amarelo-vermelha.
<i>BRA-CS2B</i>	Preta ferruginosa.
<i>BRA-CS3</i>	Laterito amarelo-vermelho e preto ferruginoso.
<i>BRA-CS4</i>	Argilo-laterito vermelho e amarelo.
<i>BRA-CS5</i>	Argilo-laterito vermelho e amarelo.
<i>BRA-CS6</i>	Argila vermelha.
<i>BRA-CS7</i>	Argila bege clara.
<i>BRA-CS11- (8+9+10+12)</i>	Argila mosqueada em bege claro, bege róseo e amarelo.
<i>BRA-CS8</i>	Porção bege róseo.
<i>BRA-CS9</i>	Porção amarela.
<i>BRA-CS10</i>	Porção bege clara.
<i>BRA-CS12</i>	Porções: bege clara e amarela.
<i>BRA-CS13</i>	Argila mosqueada - porção bege clara.
<i>BRA-CS14</i>	Argila mosqueada - porção amarela.
<i>BRA-CS15</i>	Argila mosqueada - porção vermelha.
<i>BRA-CS16</i>	Argila mosqueada vermelho com amarela.
<i>BRA-CS17</i>	Argila amarela.
<i>BRA-CS18</i>	Argila vermelha.
<i>BRA-CS19</i>	Argila bege clara a branca.
<i>BRA-CS20</i>	Metargilite cinza alterado.

Tabela VI.1 – Amostragem de superfície obtidas ao longo do caminhamento W-E, exibindo a diversidade de argilas encontradas na área Brazlândia.

VI.2 - Santo Antônio do Descoberto

A área de estudo, situada a cerca de 4 km a leste da cidade homônima, delimita-se a noroeste pela DF-280, a sudeste pela exposição de Micaxisto (MPcf), a nordeste pela região denominada Piteira e a sudoeste pelo condomínio São Francisco (Figura VI.10, VI.11, VI.12). A superfície total aproximada da área abrangida nos estudos está representada pelo polígono da Figura VI.11 de 1.930 m de comprimento por 1010 m de largura, perfazendo cerca de 1.950 mil m². No entanto, a área principal dos estudos é a cava utilizada pela mineração que está restrita à porção sudoeste e que perfazia aproximadamente 33 mil m² em junho de 2002.

Os estudos de campo foram executados por meio de dois furos a trado motorizado de 7,5 m e 7,6 m de profundidade, SADS e SAD1, respectivamente, pela exposição de três taludes da cava da mina, de 6 m de altura – canal SAD - (Figura VI.13) e por caminhamentos de superfície nas direções W-E e N-S de comprimentos aproximados de 910 m e 890 m, respectivamente. Aproveitando-se das estradas internas à área, complementarmente foram visitados outros quatro pontos, com coleta de amostras (Figura VI.12, Seção V.1.1).

A região de Santo Antônio do Descoberto está inserida na parte basal do Grupo Canastra, Litofácies Micaxisto e no Terciário/Quaternário (Figura VI.10). A área estudada é formada predominantemente por latossolo – bege, amarelo e localmente vermelho - ao longo de sua direção maior, por elevação constituída de laterito na parte superior-oeste do polígono, por muscovita-quartzo-xisto crenulado com lentes de quartzito na parte sul e por nove elevações de dimensões variadas constituídas de muscovita-quartzo-xisto em processo de intemperização, envolvidos por latossolo (Figura VI.12).

A rocha matriz do processo intempérico é constituída por muscovita-quartzo-xisto, da qual vêm sendo gerados os latossolos da área. As elevações dessa rocha em meio ao manto intempérico e suas alterações na borda sul do polígono, são testemunhos do avanço deste processo, tendo sido investigadas por meio de análises mineralógicas e geoquímicas (Seção VII.1 e VII.2). O afloramento SADPWE-127, representando a borda de uma elevação na porção leste da área, expõe o processo de intemperização, sendo possível observar as estruturas da rocha matriz, constituindo a fase saprolito do processo de intemperismo. O sopé de elevação na porção sul, igualmente, exhibe muscovita-quartzo-xisto em processo de intemperização, sendo observada, ao longo do caminhamento N-S (SADH-1), argila bege clara de alteração dessa rocha, recoberta por leito centimétrico de laterito (Figura VI.13).

No piso da mina e nos afloramentos SADPSN-70aux e SADPSN-70aux2 foram observadas argilas mosqueadas marcadas pela presença de argila bege e vermelha (Figura VI.15).

Na área de Santo Antônio do Descoberto foi possível a construção de dois perfis de intemperismo por amostragem contínua - no piso da mina e 180 m a NE deste (Figura VI.16, VI.17) e uma seção esquemática partir de exposições de afloramentos naturais no caminhamento N-S, em uma tentativa de visualização do perfil de alteração do pacote desta parte da área de Santo Antônio do Descoberto (Figura VI.18). O caminhamento W-E realizado na parte mais plana da área (Figura VI.12) evidenciou a ocorrência de argila bege, sem outras exposições.

O padrão geral do perfil intempérico na área de Santo Antônio do Descoberto é constituído por solo ou laterito, argilo-laterito e argila vermelha na parte superior, seguida na parte média de argila bege homogênea, de argila mosqueada e de argila amarela, sendo seus contatos de transição (Figura VI.14, VI.16, VI.17 e Tabela VI.2). Através do perfil N-S, foi possível observar a sequência completa do perfil intempérico desde a rocha matriz até o *solum* (Figura VI.18).

A porção SAD do perfil SAD/SADS compõe-se do topo para base de solo orgânico escuro com leitos centimétricos de laterito até a profundidade de 1 m (Figura VI.14). A partir deste limite o pacote que aflora nos taludes da frente de lavra é composto por argila plástica bege com esparsos leitos centimétricos de quartzo assentados horizontalmente ao longo do pacote. A porção SADS do perfil exhibe argila bege muito homogênea até 7 m de profundidade com tons róseos nas profundidades de 7 m, de 9 a 10 m e 13 m, denotando a presença de nível de argila mosqueada, como observado em superfície (Figura VI.15, VI.16). O perfil SAD1 é formado por solo orgânico marrom no primeiro metro e de argila

plástica predominante bege, muito homogênea. Ocorre variações de cor para tons avermelhados a róseos nas profundidades de 2 a 4 m, 5,6 m e 7,3 m e para amarela de 4 a 5,6 m, igualmente denotando a presença de nível mosqueado (Figura VI.17).

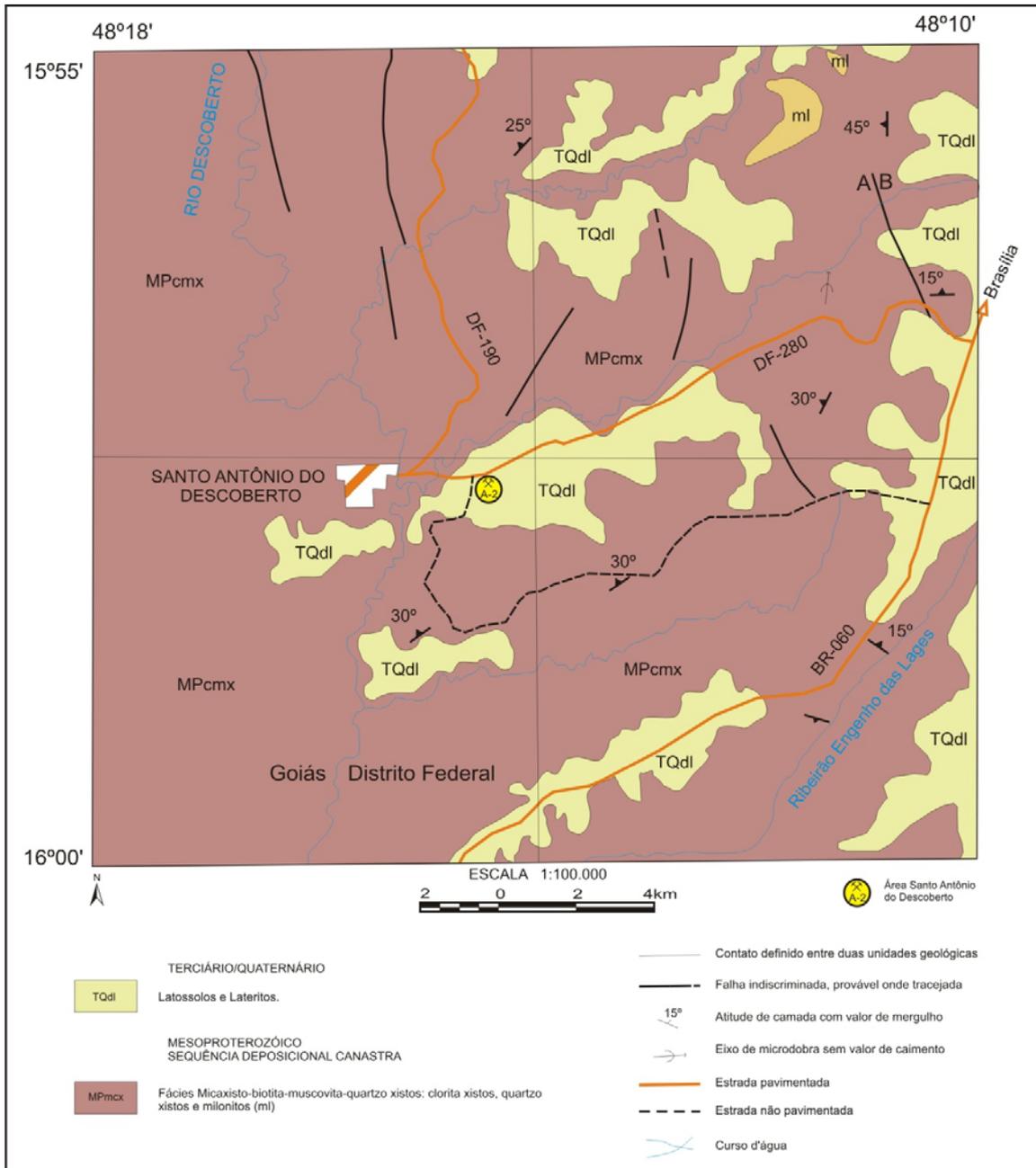


Figura VI.10 – Mapa geológico da região de Santo Antônio do Descoberto, indicando a mina homônima (adaptado de Faria *et al.*, 1997).

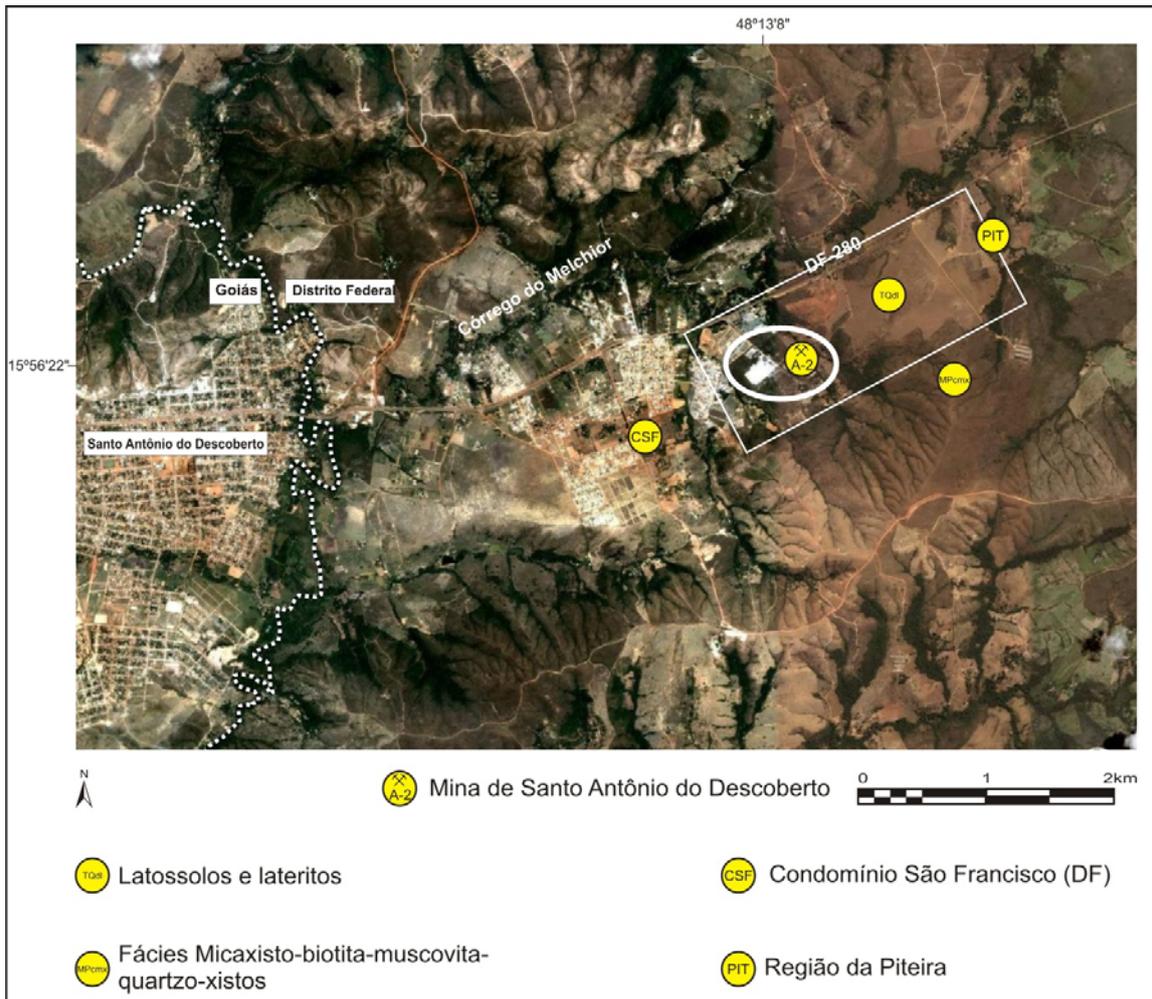


Figura VI.11 – Localização da área de Santo Antônio do Descoberto (Adaptado de Google Earth: imagens de 13 de novembro de 2003 a 14 de junho de 2007).

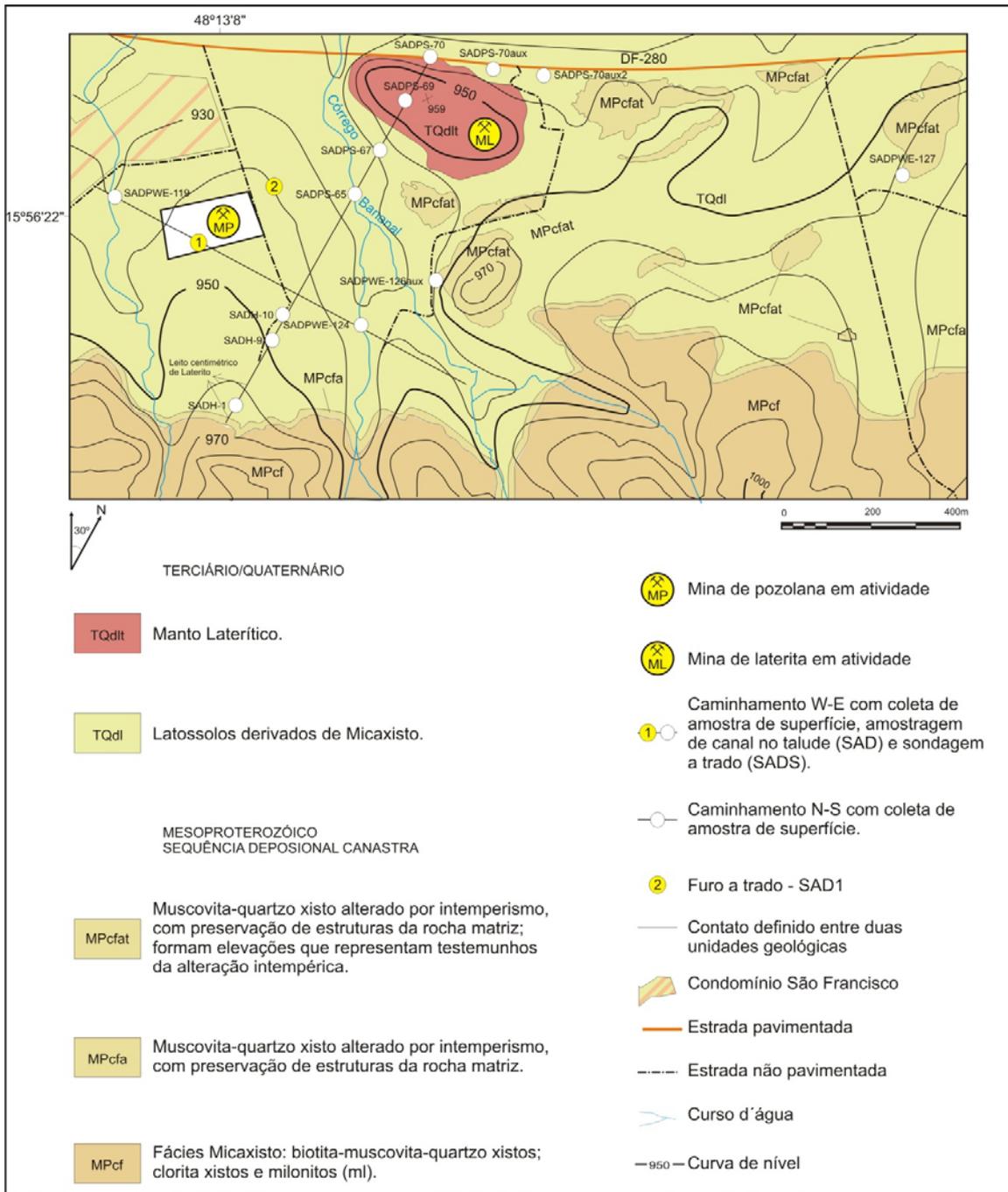


Figura VI.12 – Esboço geológico da área de Santo Antônio do Descoberto. As elevações de muscovita-quartzo-xisto em meio ao latossolo e a borda ao sul da área permitem evidenciar o avanço do processo de intemperização dessa rocha para o latossolo (Base: IBGE 1:25.000, folha Córrego Samambaia e Google Earth).



Figura VI.13 – A: Vista geral de elevação constituída por muscovita-quartzo-xisto crenulado no extremo sudoeste da área. B: Detalhe da rocha. C: Princípio de voçoroca expondo argila de intemperização de xisto, sobreposta por leito centimétrico de laterito.

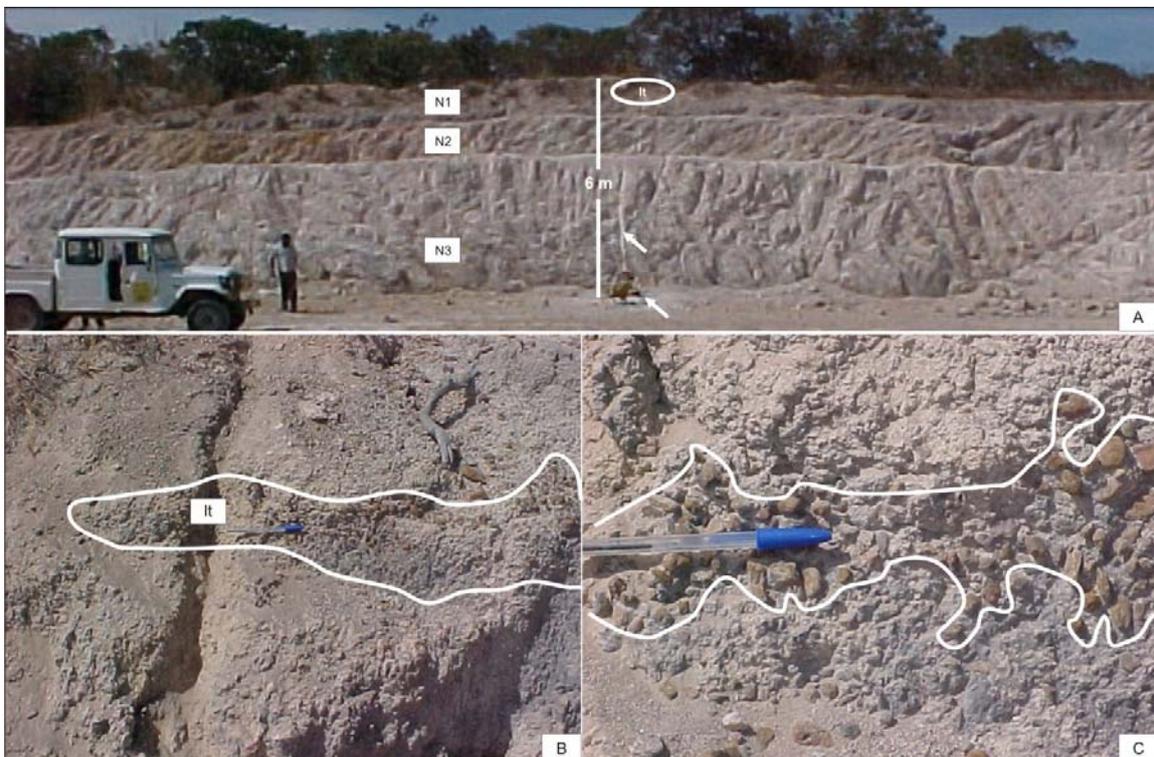


Figura VI.14 – A: Frente de lavra da mina Santo Antônio do Descoberto, representando o pacote de argila utilizado como minério. N1, N2, N3 correspondem aos níveis de lavra, amostrados por coleta de canal indicado pela seta superior (canal SAD). O piso da mina foi perfurado verticalmente em 7,5 m por trado motorizado, indicado pela seta inferior (furo SADS). B e C: Detalhe no nível 1 em região amostrada por canal, exibindo leito centimétrico de laterito assentado horizontalmente.



Figura VI.15 - Argilas mosqueadas bege e vermelha na área de Santo Antônio do Descoberto. A: Piso da cava da mina. B: Afloramento SADPSN-70aux2.

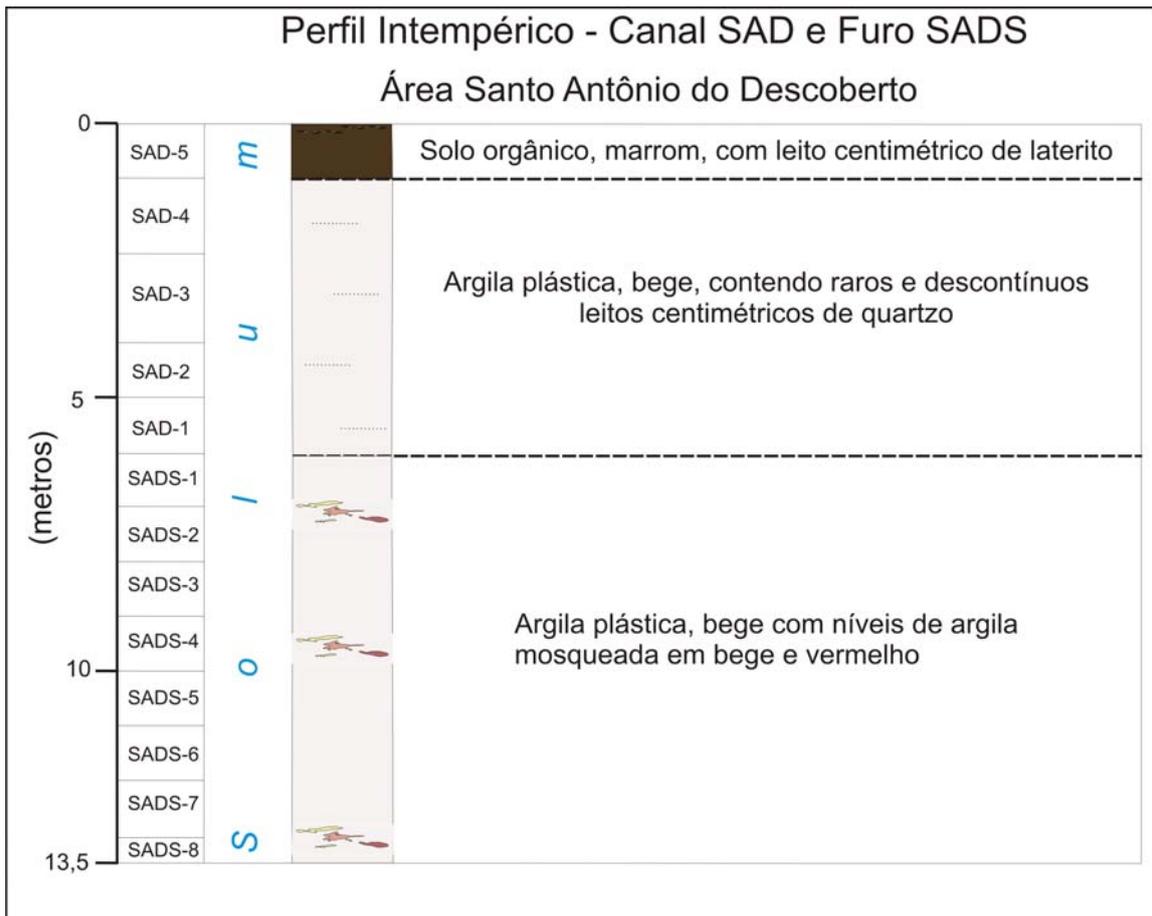


Figura VI.16 – Perfil intempérico, representando o pacote de argila utilizado como minério, obtido por coleta de amostras no talude da frente de lavra (SAD – de 0 m até 6 m) e por furo a trado (SADS – de 6 m até 13,5 m) na base da área de Santo Antônio do Descoberto.



Figura VI.17 – Perfil intempérico, representando o pacote de argila utilizado como minério, obtido por furo a trado na base da área de Santo Antônio do Descoberto.

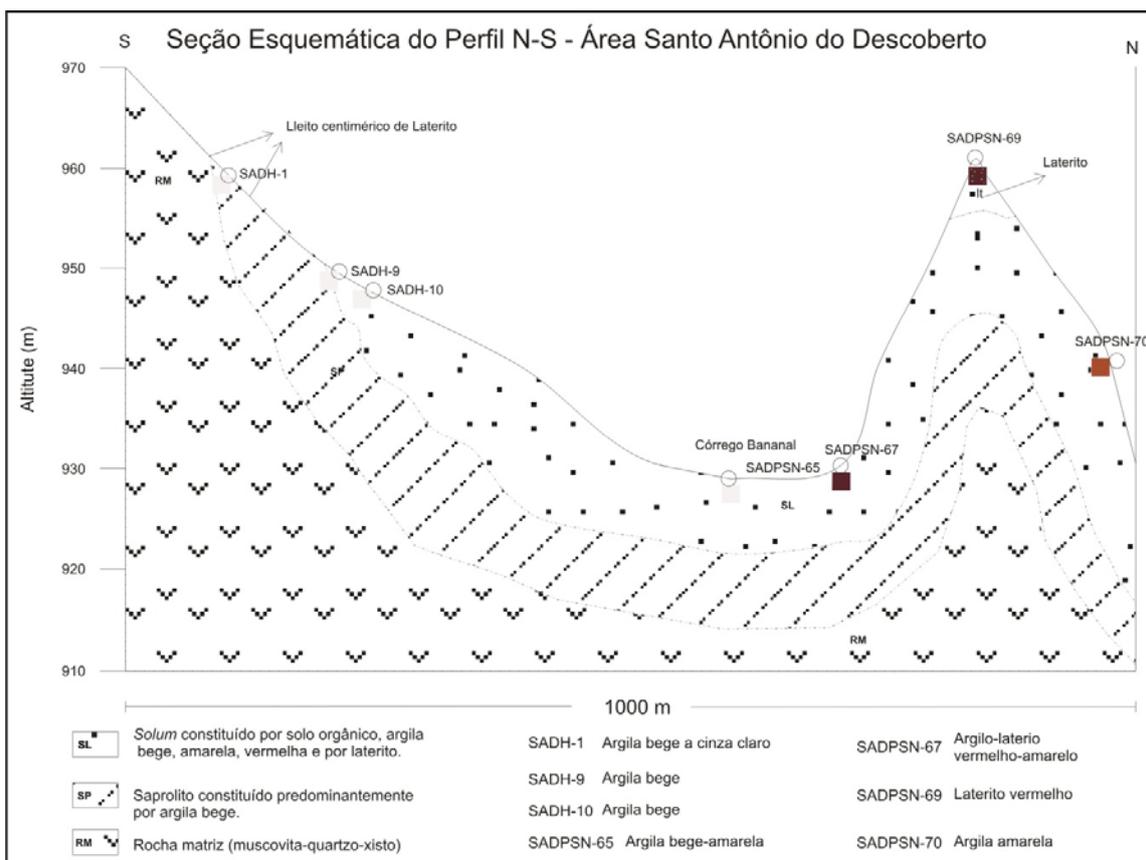


Figura VI.18 – Seção esquemática construída a partir do perfil N-S, locado na Figura VI.12, exibindo o modelo de provável perfil de maturidade intempérica da área de Santo Antônio do Descoberto. O *solum* representa o pacote de argila utilizado como minério.

Amostragem Pontual - Área Santo Antônio do Descoberto		
Caminhamento N-S		
<i>Sul</i>	<i>SADH-1</i>	Argila bege a cinza claro.
	<i>SADH-9</i>	Argila bege claro.
	<i>SADH-10</i>	Argila bege claro.
	<i>SADPSN-65</i>	Argila bege-amarela.
	<i>SADPSN-67</i>	Argilo-Laterito vermelho-amarelo.
	<i>SADPSN-69</i>	Laterito vermelho.
	<i>SADPSN-70</i>	Argila amarela.
	<i>SADPSN-70aux</i>	Argila mosqueada bege com vermelho claro a amarelo.
<i>Norte</i>	<i>SADPSN-70aux2</i>	Argila mosqueada bege com vermelho claro.

Amostragem Pontual - Área Santo Antônio do Descoberto		
Caminhamento W-E		
<i>Oeste</i>	<i>SADPWE-119</i>	Argila bege.
	<i>SADPWE-124</i>	Argila bege escura a preta, com matéria orgânica.
	<i>SADPWE-126aux</i>	Argila amarela.
	<i>SADPWE-127</i>	Argila amarela a marrom com fragmentos de xisto alterado.
	<i>SADPWE-127rocha</i>	Argila marrom com fragmentos de xisto alterado.
<i>Leste</i>	<i>SADPWE-127argila</i>	Argila amarela clara a marrom claro.

Tabela VI.2 - Amostragem de superfície obtidas ao longo dos caminhamentos N-S e W-E, exibindo a diversidade de argilas encontradas na área de Santo Antônio do Descoberto.

VI.3 - Santa Maria

A área situa-se a leste da localidade homônima e localiza-se em terrenos minerados sem controle de lavra, cujas argilas serviram como material de construção. A porção estudada delimita-se a noroeste, oeste e sudoeste pela região urbanizada de Santa Maria, a leste e sudeste pelo Ribeirão Santa Maria e a norte por terrenos não explorados (Figura VI.19, VI.20, VI.21). A superfície total aproximada da área abrangida nos estudos está representado pelo polígono da Figura VI.19 de 485 m de comprimento por 325 m de largura, perfazendo aproximadamente 157 mil m².

Nos domínios pesquisados não há nenhum afloramento de rocha, sendo a área de Santa Maria constituída por latossolos de coloração bege e amarelo do Terciário/Quaternário (Figura VI.19). Ao sul e a sudeste da área do trabalho até os limites da DF-290 são encontrados afloramentos de quartzitos da unidade Quartzito médio (Q3) do Grupo Paranoá (Faria *et al.*, 1997), expostos pela extração da argila sobreposta (Figura VI.20, VI.21). Conforme se pode verificar pela evolução da mineração, o latossolo está recobrendo a unidade Q3, confirmado pela execução de furo STA1 de 6 m de profundidade. Verifica-se ainda, que nas proximidades da área ocorrem afloramentos da unidade Metarritimito (R4) sobrepondo a unidade Q3 (Figura VI.19). Desse modo, o trabalho considera o pacote de argila estudado como sendo o resultado do processo de intemperismo em Metarritimitos da unidade R4 e em Quartzitos da unidade (Q3).

Os estudos de campo foram executados por meio de dois furos a trado motorizado: STA e STA1 de 6 m e 8 m, respectivamente. O STA está posicionado na porção topograficamente mais elevada da área e o STA1 é o rebatimento aproximado a 170 m do

anterior em desnível de cerca de 13 m (Figura VI.21, Seção VI.1.1). Complementarmente foram realizados caminhamentos expedidos de reconhecimento ao longo do perímetro da pesquisa.

A partir das sondagens foi possível a construção de dois perfis de intemperismo. O perfil STA, de 8 m de profundidade, exhibe solo marrom, orgânico no topo, tornando-se bege claro com intercalações de argila amarela até 2 m. A partir deste horizonte as intercalações gradativamente vão tomando um amarelo mais intenso até 3 m. Deste limite em diante passa definitivamente a amarela até a profundidade de 7 m. A partir deste ponto ocorre argila de coloração avermelhada até o final do furo (Figura VI.22).

O perfil intempérico STA1 exhibe argila bege claro até 2 m de profundidade. A partir deste limite há intercalações de argila amarela até 3 m, tornando-se vermelha até 4 m de profundidade. Do quinto metro até o final do furo ocorre argila vermelha, contendo areia de granulometria fina de vermelho intenso e fragmentos de quartzito vermelho (Figura VI.22).

Não foi observada nenhuma exposição de argilas mosqueadas na área de Santa Maria. No entanto, como no caso de Santo Antônio do Descoberto, não se descarta que as alterações de cores observadas ao longo dos perfis obtidos por perfuração sejam, na verdade, zonas mosqueadas e não apenas contatos de transição como descritos a partir da leitura feita dos testemunhos retirados do furo, uma vez que este método de sondagem dificulta a identificação das estruturas do perfil perfurado (Figura VI.23).

A partir das informações obtidas, foi elaborada uma seção longitudinal entre os dois perfis intempéricos que permitiu estabelecer a provável disposição do perfil de maturidade intempérica da área estudada (Figura VI.24).

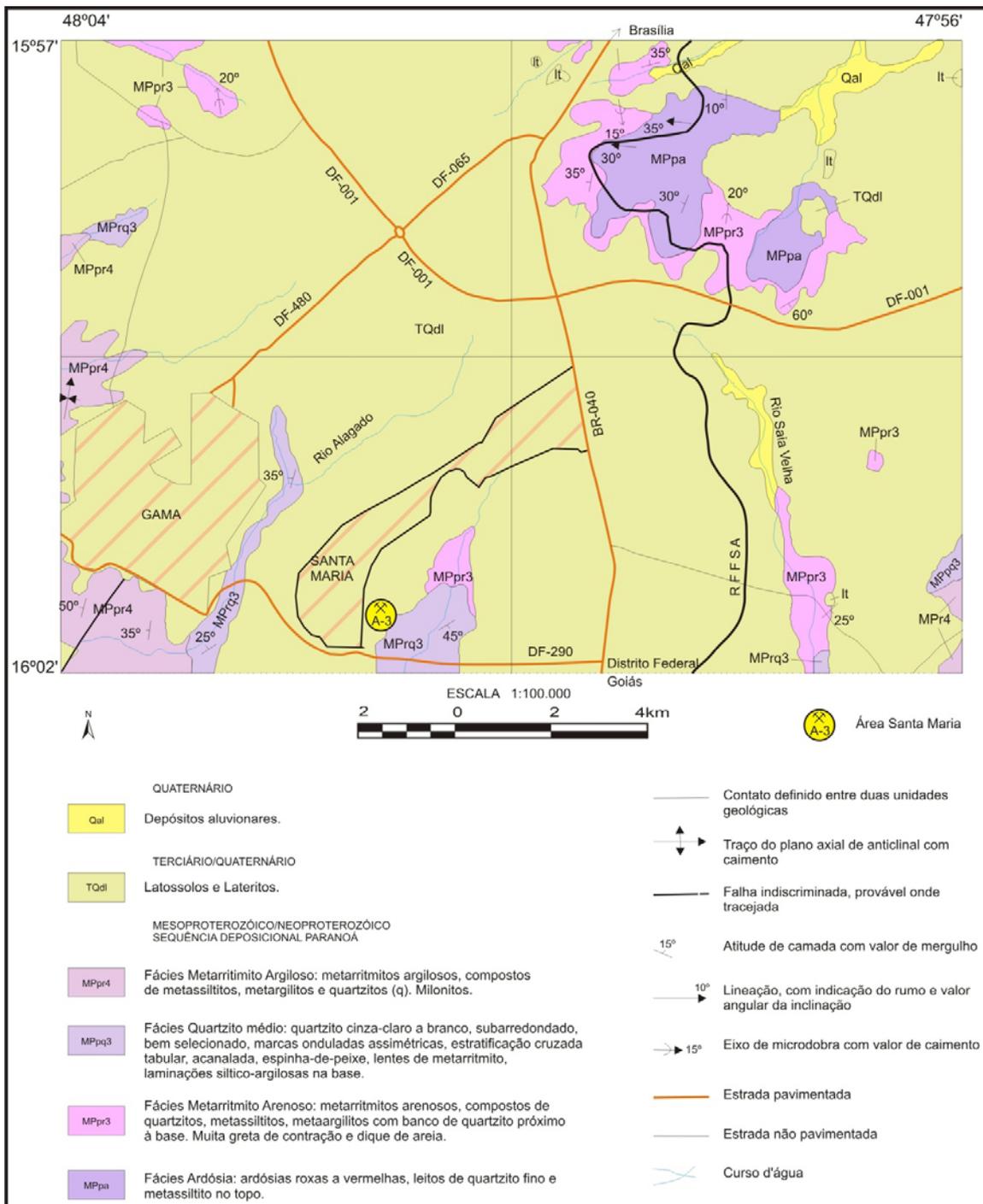


Figura VI.19 – Mapa geológico da região de Santa Maria e Gama, indicando a área de Santa Maria (adaptado de Faria *et al.*, 1997).

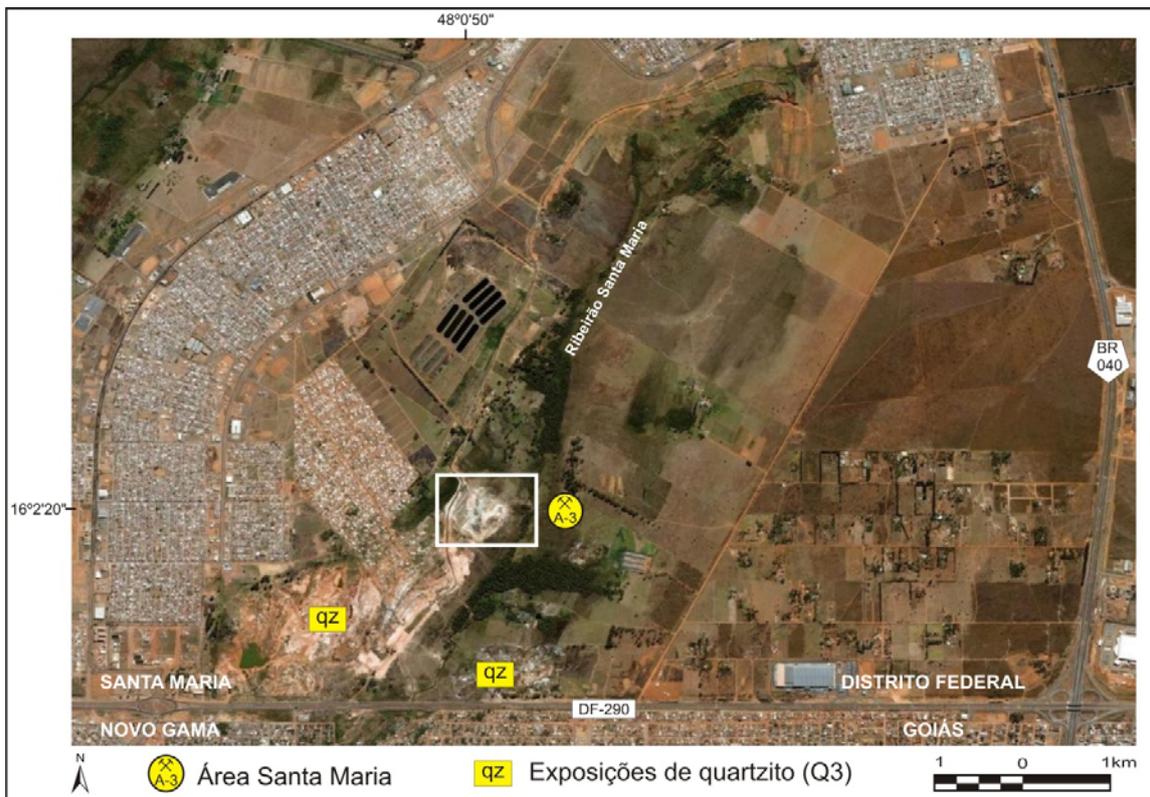


Figura VI.20 – Localização da área de Santa Maria contígua à cidade homônima (Adaptado de Google Earth: imagens de 14 junho de 2007).

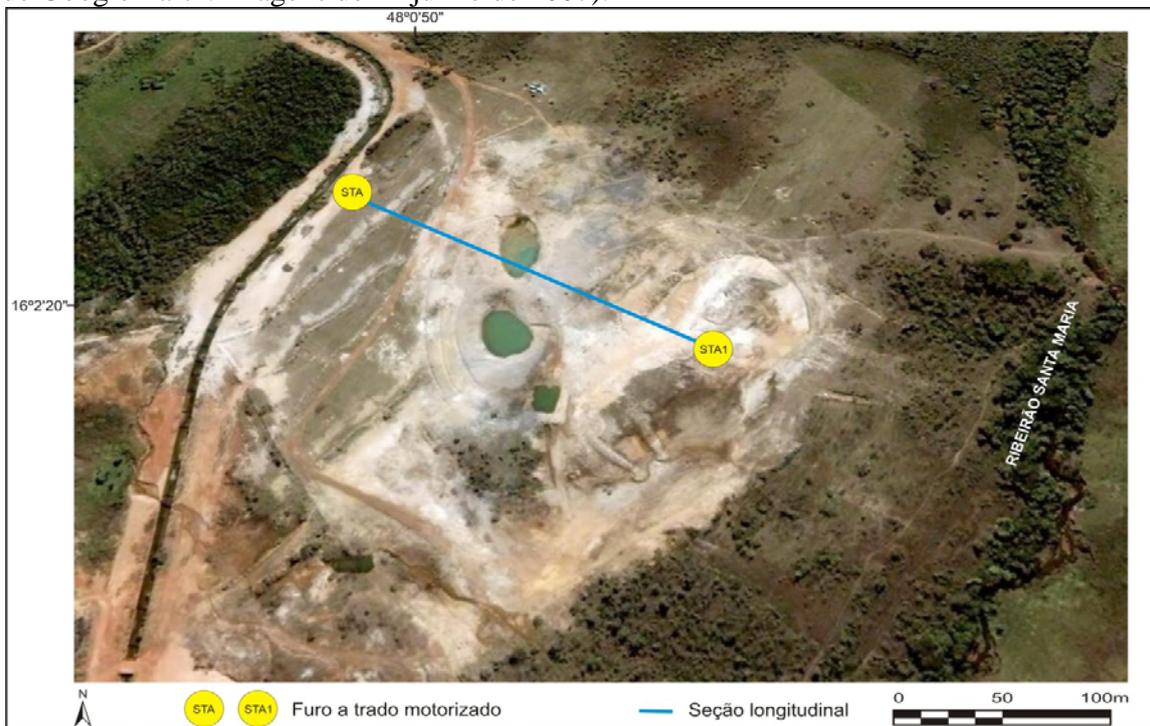


Figura VI.21 – Detalhe da área de Santa Maria com locação dos furos a trado STA e STA1 (Adaptado de Google Earth: imagem de 14 junho de 2007).

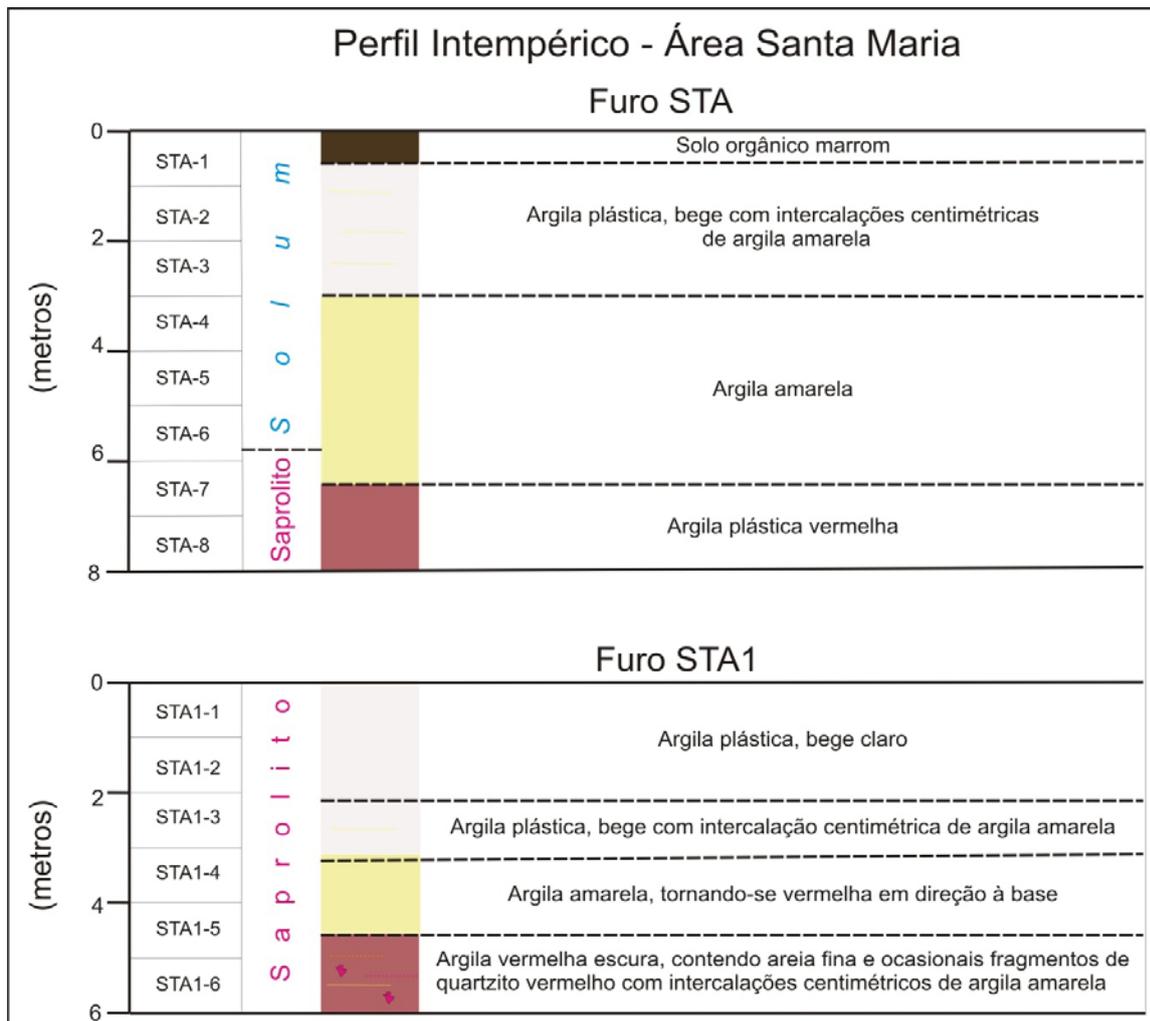


Figura VI.22 – Perfis de intemperismo obtidos a partir dos furos STA e STA1 da área de Santa Maria. O intervalo bege representa o pacote utilizado como material de construção civil.



Figura VI.23 – A: Recuperação do testemunho pelo método de sondagem a trado, exibindo a mistura de cores, podendo representar argila mosqueada que eventualmente pudesse existir no perfil. B: Resultado da argila descrita a cada 20 cm de avanço.

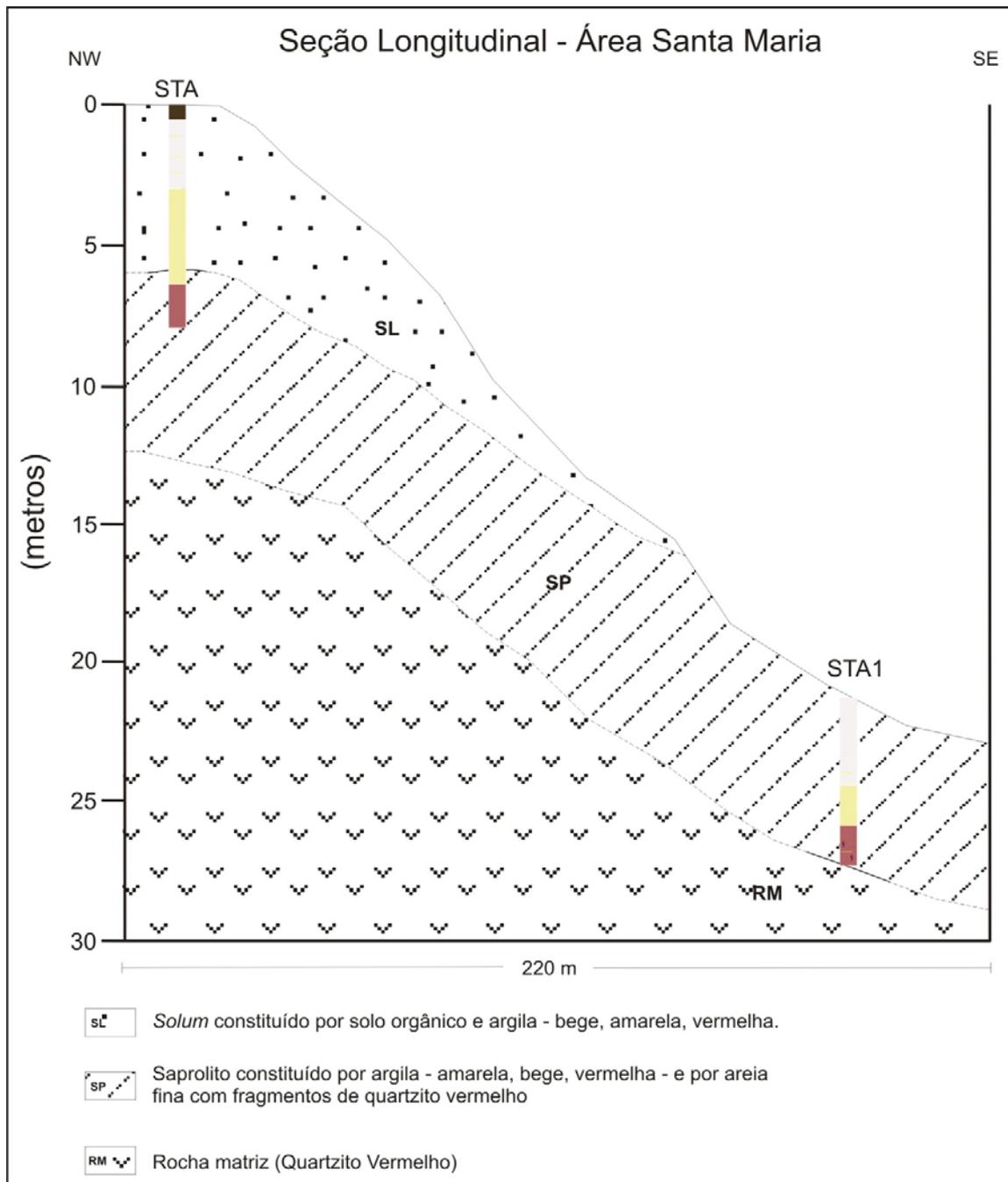


Figura VI.24 – Seção longitudinal aos furos STA e STA1, locado na Figura VI.21, exibindo o provável perfil de maturidade intempérica da área de Santa Maria. A rocha matriz original para formação do manto de intemperismo na região do furo STA e na parte superior do furo STA1 foi constituída por Metarritimitos da unidade R4 do grupo Paranoá, já intemperizado e atualmente representado pelo *solum* e parte do saprolito. No presente, a rocha matriz sobre a qual o processo intempérico está atuando é constituída por Quartzitos da unidade Q3, representada pela base do furo STA1. As porções constituídas por argila bege do *solum* e do saprolito representam o pacote utilizado como material de construção civil.

VI.4 - Sobradinho

A área situa-se à margem direita da BR-020 na região administrativa de Sobradinho e delimita-se ao norte, a nordeste, a leste pelo Ribeirão Sobradinho e a oeste pela DF-249 (Figura VI.25). Os limites ao sul foram estabelecidos pela presença de laterito que ocorre esporadicamente nos terrenos topograficamente acima do furo S (Figura VI.25, VI.26, VI.27). A superfície total aproximada da área abrangida nos estudos está representada pelo polígono da Figura VI.27 de 395 m de comprimento por 245 m de largura, perfazendo por volta de 97 mil m².

Os estudos de campo foram viabilizados por meio de dois furos a trado motorizado: S e SA de 2,5 m e 4,7 m, respectivamente. O S está posicionado na porção topograficamente mais elevada ao sul da área e o SA é o rebatimento aproximado a 150 m ao norte, em desnível de cerca de 5 m (Figura VI.27, Seção V.1.1). Complementarmente foram realizados caminhamentos de reconhecimento ao longo do perímetro da pesquisa.

A área está inserida na unidade Metarritimitos argilosos (R4) do Grupo Paranoá, sendo o domínio do perímetro pesquisado mapeado como depósitos aluvionares do Quaternário (Figura VI.25). Nos limites investigados não há afloramento de rocha e a área é constituída de latossolos e de lateritos. Não foram identificados alúvios que permitissem caracterizar a superfície estudada como depósitos aluvionares. Desse modo, assume-se as argilas e lateritos do perímetro estudado como sendo os latossolos e lateritos do Terciário/Quaternário de Faria *et al.* (1997).

A superfície da área de Sobradinho exhibe argilas de coloração amarela a vermelha ao sul e bege ao norte. As exposições de argila presentes podem ser observadas ao redor da escavação de 110 m² preenchida por água e por uma canaleta de 115 m lineares com cerca de 20 cm de profundidade ao lado da DF-249. Também é comum na área a presença de estruturas elaboradas por cupins que permitem uma avaliação visual da argila existente em subsuperfície (Figura VI.27, VI.28).

A partir das sondagens foi possível a construção de dois perfis de intemperismo e de seção longitudinal entre ambos (Figura VI.29, VI.30). O perfil S, de 2,5 m de profundidade expõe argila amarela até a profundidade de 1,5 m. A partir deste limite apresenta-se vermelha com poucos fragmentos de laterito próximo ao contato superior, tornando-se gradativamente laterítica até o final. No perfil intempérico SA a argila é bege até 2,5 m, amarela até 3,5 m, vermelha até 4,3 m, voltando a ocorrer argila bege até 4,6 m e argila vermelha até o final do furo em 4,7 m.

Em função da ausência de exposições e da pequena profundidade que se conseguiu atingir com os furos, não foi possível verificar o perfil de alteração completo da área Sobradinho, mas apenas o *solum*. Como em Santa Maria, também não foi observada argila mosqueada e, do mesmo modo, não se descarta que as alterações de cores observadas na descrição do perfil SA sejam zonas mosqueadas e não apenas contatos de transição.

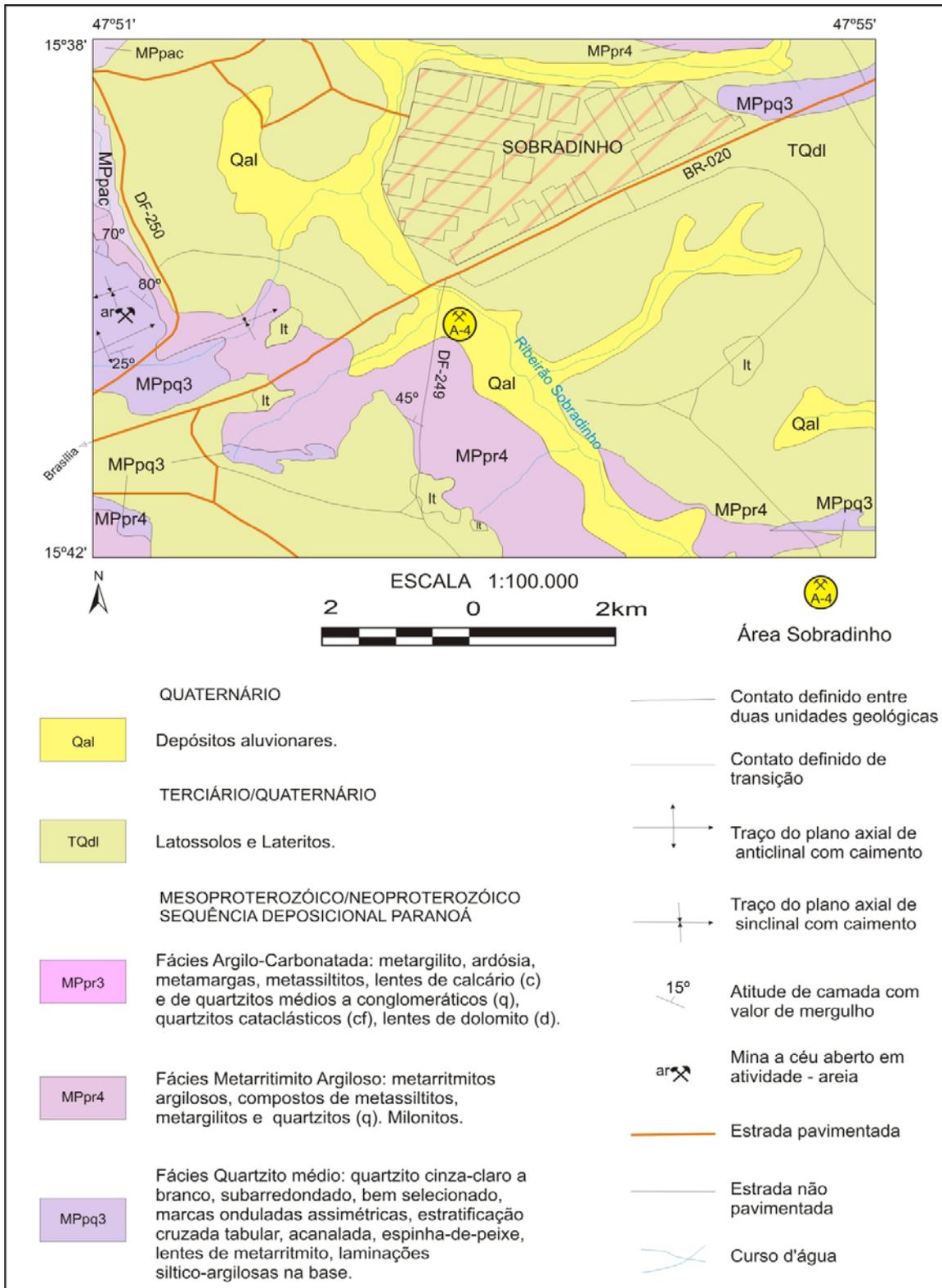


Figura VI.25 – Mapa geológico da região de Sobradinho, indicando a área homônima (adaptado de Faria *et al.*, 1997).



Figura VI.26 – Localização da área de Sobradinho (Adaptado de Google Earth: imagens de 14 junho de 2007).

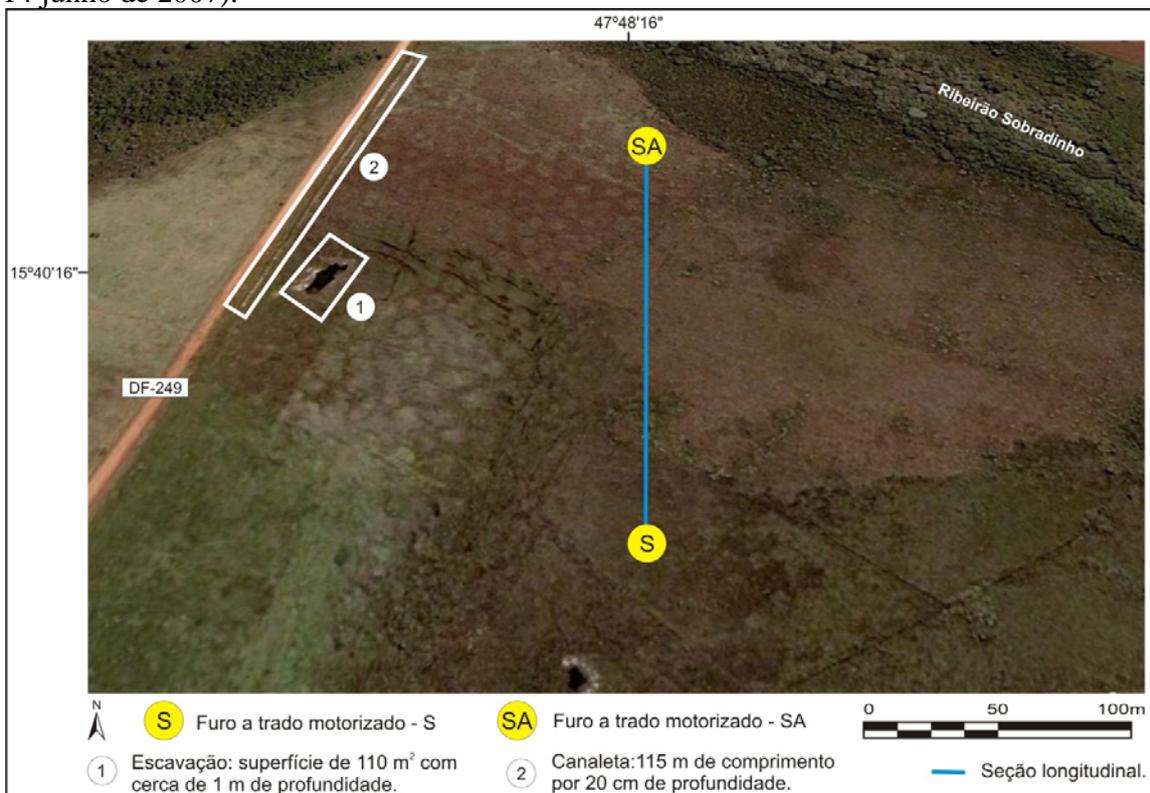


Figura VI.27 - Detalhe da área de Sobradinho com locação dos furos S e SA e de exposições de argila (Adaptado de Google Earth: imagem de 14 junho de 2007).



Figura VI.28 – A: Área de Sobradinho a partir da rodovia BR020; pode-se observar as oportunidades de exposições da argila bege pela escavação de 110 m² que aparece na área retangular e pelas estruturas elaboradas por cupins na área circulada. B: Detalhe da área escavada preenchida por água com exposição de argila bege clara ao lado. C: Estrutura elaborada por cupim, evidenciando a argila em subsuperfície.

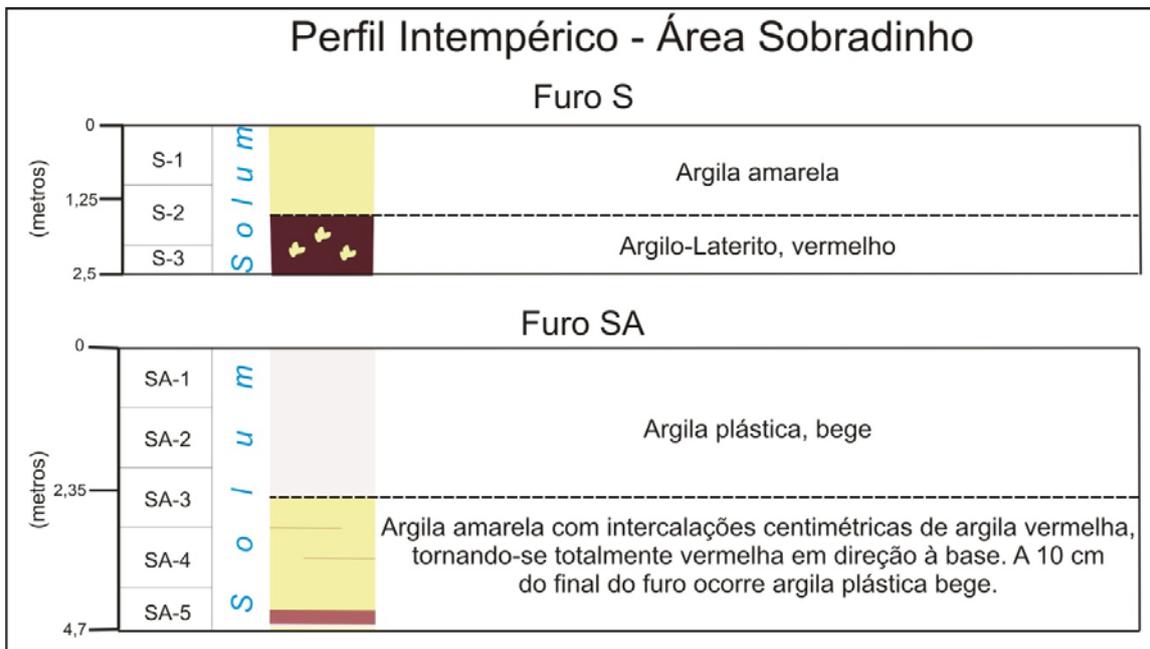


Figura VI.29 – Perfis de intemperismo da área de Sobradinho obtidos a partir dos furos S e SA.

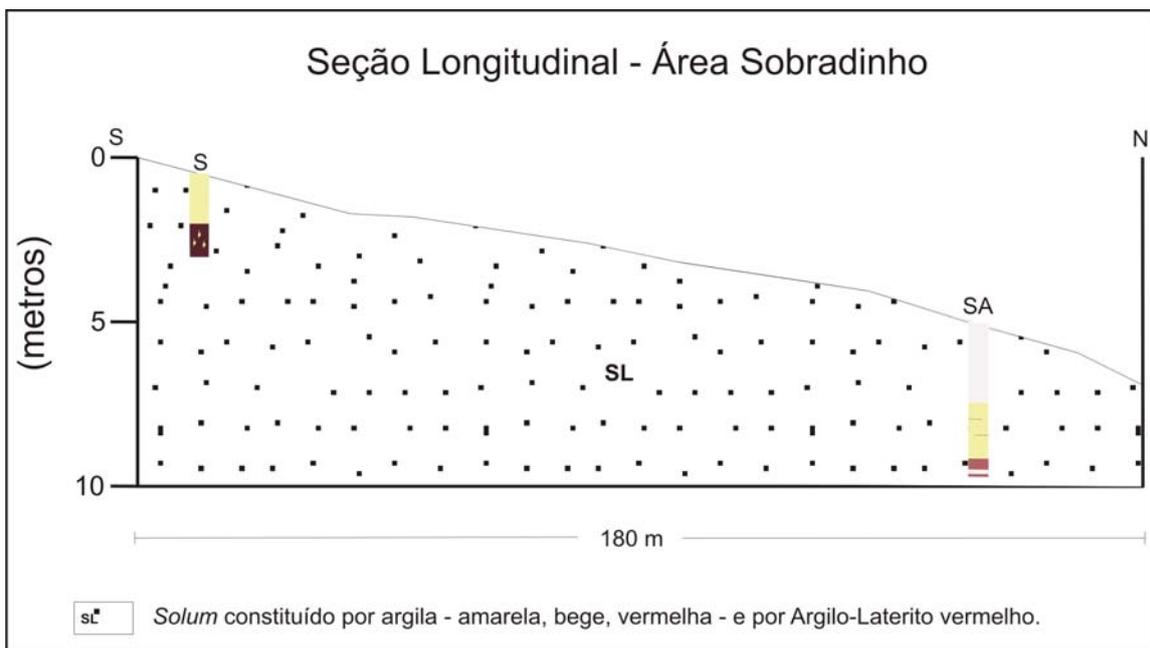


Figura VI.30 - Seção longitudinal aos furos S e SA, locado na Figura VI.27, exibindo a porção *solum* do provável perfil de maturidade intempérica da área de Sobradinho.

VI.5 - Bonsucesso

A área de Bonsucesso situa-se no Distrito Federal próximo a divisa com o estado de Goiás na região conhecida por Bonsucesso, paralela a margem esquerda da cabeceira do rio Maranhão (Figura VI.31). Está restrita aos limites de uma cava de mineração, que em outubro de 2005, perfazia aproximadamente 16 mil m², sendo a superfície total da área abrangida nos estudos representada pelo polígono da Figura VI.33 de 416 m de comprimento por 287 m de largura, perfazendo cerca de 120 mil m² (Figura VI.31, VI.32).

Os estudos de campo foram conduzidos a partir da exposição de três taludes da cava da mina de 16 metros de altura – amostragem de canal BONC - (Figura VI.34), por meio de sondagem a trado motorizado – furo BONA - de 6 m de profundidade e por caminhamentos de reconhecimento ao longo do perímetro da pesquisa (Seção V.1.1).

A área de Bonsucesso está inserida na unidade Pelito-carbonatada (PC) do Grupo Paranoá, sendo o perímetro pesquisado predominantemente constituído por latossolo bege claro recoberto por metargilitos em processo final de intemperização (Figura VI.31).

A partir da amostragem nos taludes e da sondagem, foi possível a construção do perfil de intemperismo de Bonsucesso, cujo padrão geral exibe *solum* formado por argila bege e saprolito constituído por argila amarela a vermelha. Do topo para a base constitui-se de argila bege clara homogênea até 10 m de profundidade, tornando-se bege com pigmentação em vermelho até 15 m, representando o *solum*. Gradativamente a argila vai tomando a coloração amarela até 18 m, vermelha até 20 m e novamente amarela até a base. Nesse intervalo ocorrem esparsos fragmentos de metargilitos com raras laminações plano-paralela de granulometria argilo-siltosa bastante alterados, constituindo saprolito (Figura VI.34).

Na área de Bonsucesso não foi identificada argila mosqueada na parte exposta do pacote e, do mesmo modo que em Santa Maria e Sobradinho, não se descarta que as alterações de cores observadas na descrição do perfil intempérico sejam zonas mosqueadas e não apenas contatos de transição. Reforçando a hipótese, o talude do nível 3 expõe padrão muito similar ao observado em Brazlândia (N5 da Figura VI.5), que constitui a parte incipiente da região mosqueada daquela mina.

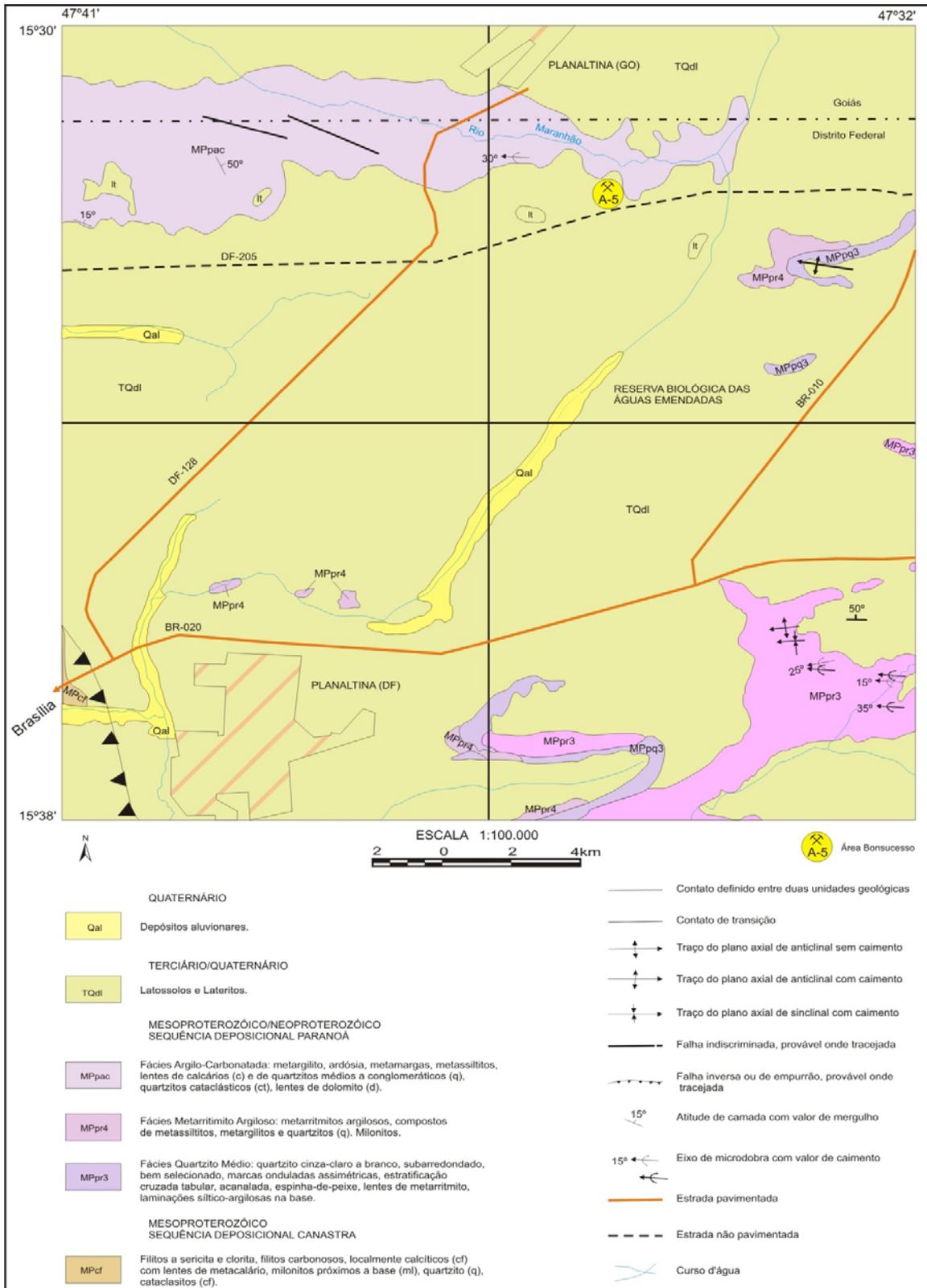


Figura VI.31 – Mapa geológico da região de Planaltina (GO) e de Planaltina (DF), indicando a mina Bonsucesso (adaptado de Faria *et al.*, 1997).

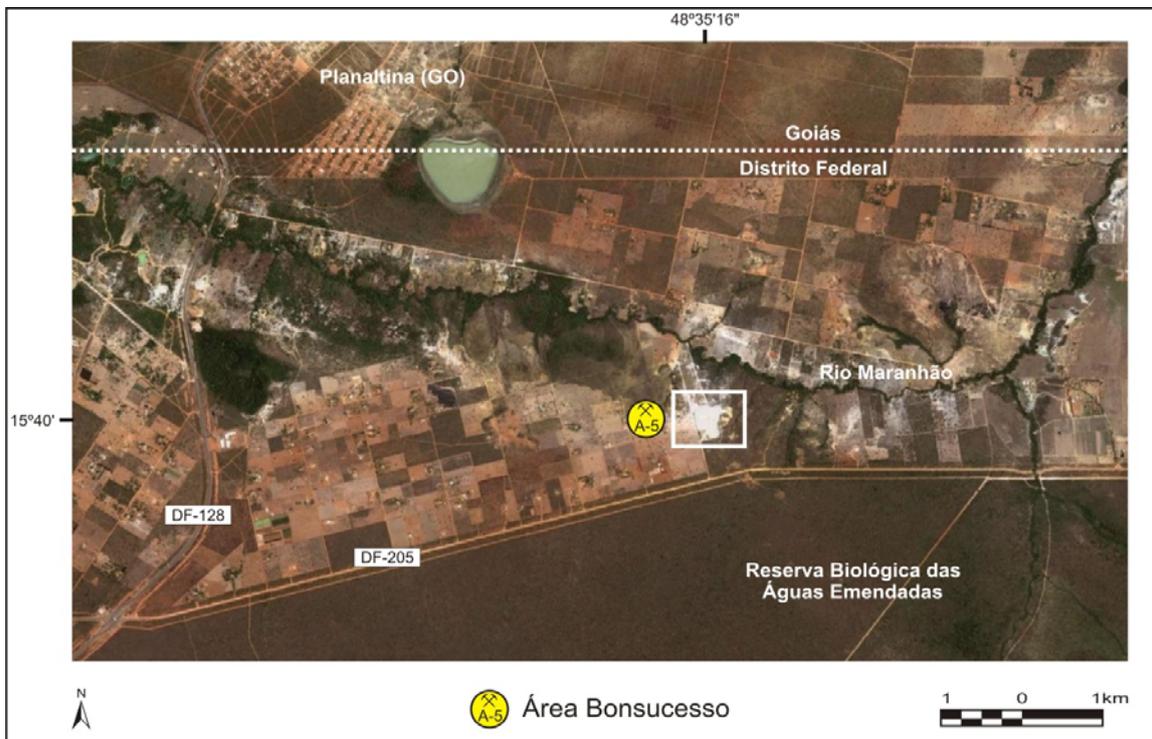


Figura VI.32 – Localização da área de Bonsucesso (Adaptado de Google Earth: imagens de 7 de outubro de 2005).

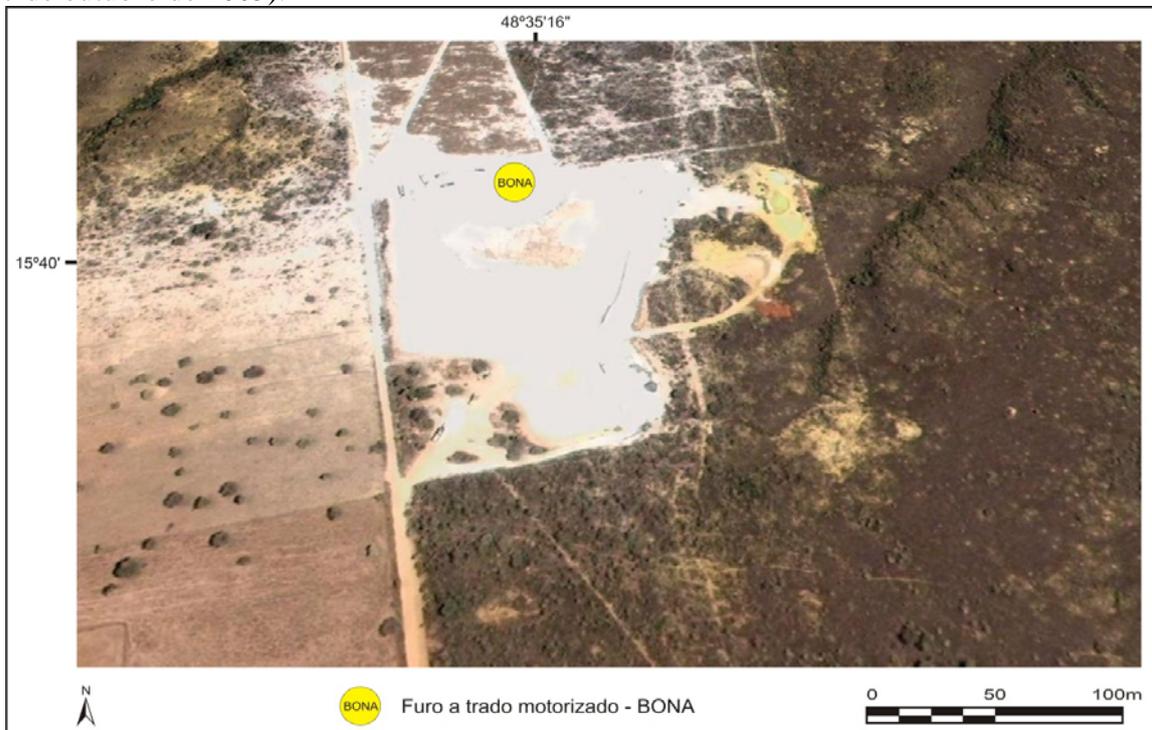


Figura VI.33 – Detalhe da área de Bonsucesso, exibindo a área da cava da mina ao centro com locação do perfil Bonsucesso composto pelo canal BONC e furo BONA.

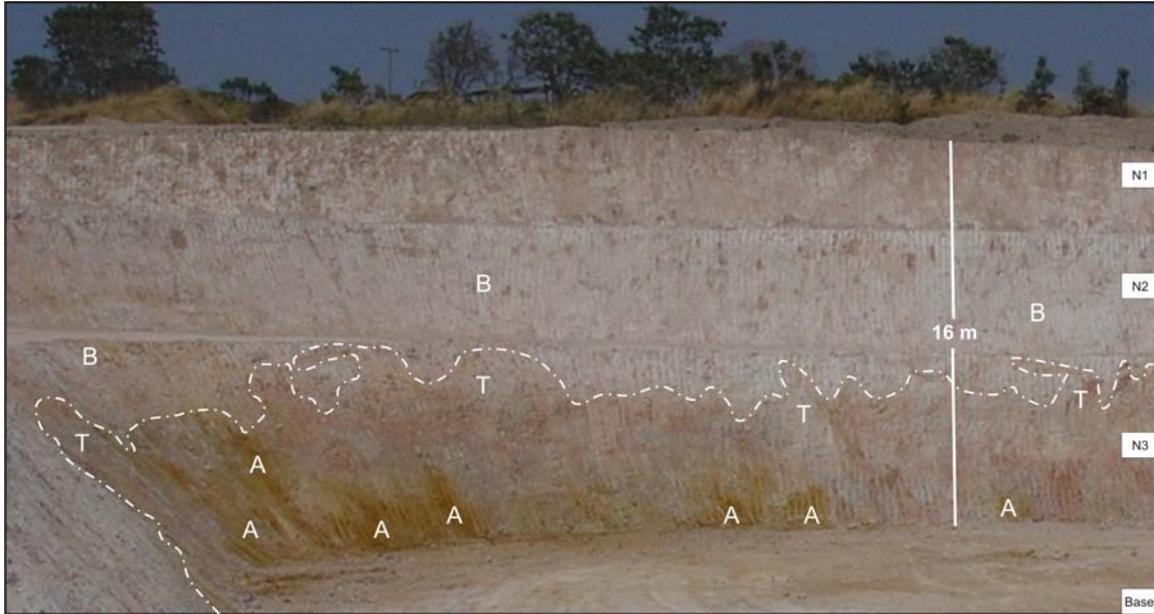


Figura VI.34 – Frente de lavra da mina Bonsucesso, representando o pacote de argila utilizado como minério. N1, N2, N3 correspondem aos níveis de lavra amostrados por coleta de canal (canal BONC). A base na sequência do canal foi perfurada em 6 m por trado motorizado (furo BONT). A linha pontilhada ao longo do N3 é uma tentativa de marcar a região de transição (T) de argila amarela (A) para bege (B) e sua parte inferior representa, aproximadamente, o saprolito.

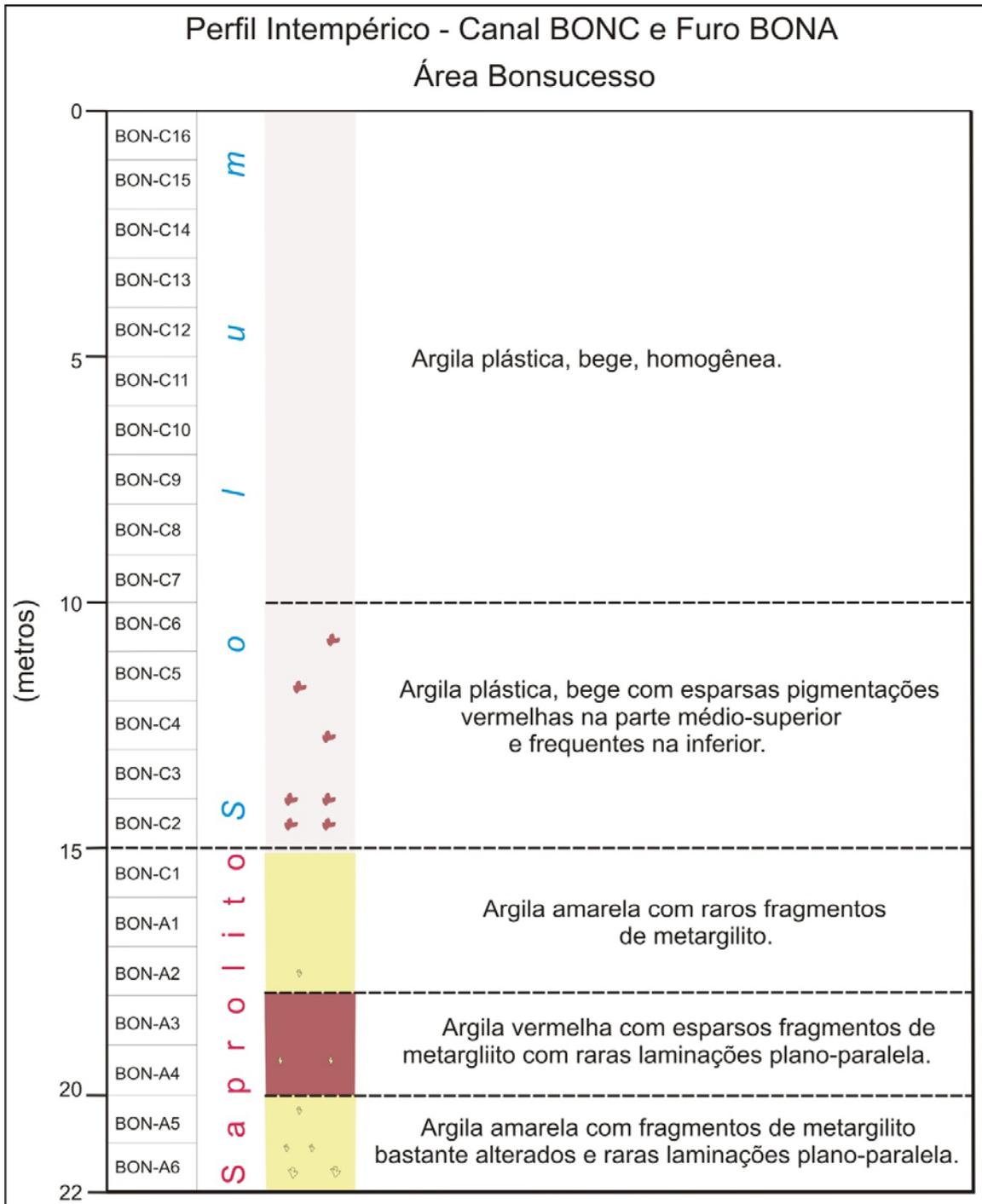


Figura VI.35 - Perfil intempérico obtido por coleta de amostras contínuas no talude da frente de lavra (BONC – de 0 m até 16 m) e por sondagem a trado (BONA – de 16 m até 22 m) na base da área de Bonsucesso.

VII – Resultados Analíticos

Neste trabalho, a apresentação dos resultados obedece a sequência dos métodos adotados, sendo: composição mineralógica, composição química, coloração do cimento e atividade pozolânica. A discussão de resultados, tanto entre métodos como entre áreas, bem como as interpretações consequentes, são apresentadas nos capítulos seguintes.

VII.1 – Composição Mineralógica de Argilas e de Materiais Calcinaados

Para a caracterização das fases minerais dos materiais das áreas estudadas e das alterações mineralógicas impostas pela calcinação de suas argilas (800°C por 30 minutos), foi utilizado difração de Raios-X (DRX) em duas baterias distintas de ensaios. Na primeira etapa os difratogramas foram obtidos a partir da amostra total *in natura* de todas as 124 amostras (Tabela V.1) e na segunda para amostra total calcinada de perfis verticais, totalizando 70 amostras (Tabela V.8).

A distribuição das fases minerais na amostra total *in natura* e dos materiais na amostra total calcinada (Seção V.2.1) foi realizada pela comparação das intensidades das suas reflexões características. Para a caulinita e a Ilita foram utilizadas as reflexões do pico em d(001) de 7,1Å e 10Å, respectivamente e para o quartzo, o anatásio, a goethita, o rutilo, a hematita, a Gibbsita, a muscovita e o diásporo, utilizou-se as reflexões “d” de 4,26Å, 3,52Å, 4,18Å, 3,25Å e 2,69Å, 4,85Å, 10Å, e 4Å, respectivamente (Tabela VII.1). A partir da comparação das reflexões, foram atribuídos os códigos M, m e tr para os constituintes maiores, menores e traços, respectivamente. As reflexões dos constituintes traços são de baixa intensidade, e em geral não estão todos os presentes, tornando incerta a identificação dos minerais mais escassos das amostras como, por exemplo, o rutilo.

Tabela VII.1 – Composição mineralógica, fórmulas químicas e valores de intensidade das reflexões características utilizadas para identificação dos minerais de 124 amostras *in natura* e dos materiais de 70 amostras calcinadas.

Mineral	Fórmula química	d característico (Å)
<i>Caulinita</i>	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	7,1 e 3,56
<i>Ilita</i>	$(\text{K}, \text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$	3,33 e 10,0
<i>Quartzo</i>	SiO_2	3,34 e 4,26
<i>Anatásio</i>	TiO_2	3,52
<i>Goethita</i>	$\text{FeO}(\text{OH})$	4,18 e 2,69
<i>Rutilo</i>	TiO_2	3,25
<i>Hematita</i>	Fe_2O_3	2,51 e 2,69
<i>Gibbsita</i>	$\text{Al}(\text{OH})_3$	4,85
<i>Muscovita</i>	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH},\text{F})_2$	10,0
<i>Diásporo</i>	$\text{AlO}(\text{OH})$	4,0

A tabela VII.2 apresenta uma síntese dos minerais identificados em todas as 124 amostras de argilas na condição *in natura* (Tabela V.1) e dos minerais e materiais identificados em 70 amostras de argila calcinada de perfis verticais de 4 áreas (Tabela V.8). As tabelas VII.3 a VII.9 apresentam os minerais identificados em cada área.

A seguir são apresentados dois grupos de análises para os resultados mineralógicos. No primeiro trata-se das argilas *in natura* dos perfis verticais e dos caminhamentos superficiais e no segundo dos materiais calcinados.

Tabela VII.2 – Minerais e materiais identificadas por DRX de 124 amostras *in natura* – 86 dos perfis verticais e 39 dos caminhamentos superficiais -, e 70 amostras calcinadas de 4 perfis verticais. Os símbolos **x** e **P** indicam mineral identificado e mineral identificado predominante, respectivamente. Os resultados por área podem ser vistos nas tabelas VII.3 a VII.9.

Mineralogia Identificada por Difração de Raios-X									
Fase Mineral Presente	Brazlândia		Santo Antônio do Descoberto		Santa Maria	Sobradinho		Bonsucesso	
	<i>In natura</i> (44 amostras)	Calcinada (20 amostras)	<i>In natura</i> (36 amostras)	Calcinada (21 amostras)	<i>In natura</i> (14 amostras)	<i>In natura</i> (8 amostras)	Calcinada (8 amostras)	<i>In natura</i> (22 amostras)	Calcinada (21 amostras)
<i>Gibbsita</i>	x		x		x	x			
<i>Caulinita 1A</i>	P	x	P	x	P	P		P	x
<i>Caulinita 1Md</i>	x		x		P			P	
<i>Ilita</i>	x	x	x	x			x	x	x
<i>Muscovita</i>			x		x				
<i>Quartzo</i>	x	x	x	P	P	P	P	x	x
<i>Anatásio</i>		x		x	x	x	x	x	x
<i>Rutilo</i>	x	x	x		x	x			x
<i>Goethita</i>	x		x		x	x		x	
<i>Hematita</i>	x	x	x			x	x		x
<i>Díásporo</i>				x					

VII.1.1 - Composição Mineralógica de Argila *In Natura*

De um modo geral, em todas as áreas a caulinita é o constituinte predominante, sendo identificada nos politipos de caulinita 1A e de caulinita 1Md. Considerando-se o manto de intemperismo, o politipo de caulinita 1A ocorre na porção médio-superior da seção de todas as áreas, enquanto o politipo de caulinita 1Md está presente na porção inferior (Figura VII.1, Tabela VII.2, VII.3 a VII.9), exceto em Sobradinho, cujo perfil de pequena espessura não alcançou o saprolito, onde este politipo provavelmente poderia ser identificado (Figura VI.30).

No perfil de intemperismo das áreas de Bonsucesso e de Santa Maria, observa-se que o politipo de caulinita 1Md dá lugar ao politipo de caulinita 1A da porção inferior para a porção médio-superior do perfil de intemperismo (Tabela VII.9, VII.7). A área de Bonsucesso exibe a transição entre politipos e, neste intervalo, o politipo não é bem definido (Tabela VII.1). No perfil S da área de Sobradinho, observa-se que a caulinita 1A passa de constituinte maior na base do perfil de intemperismo para mineral menor em direção ao topo do perfil (Tabela VII.8).

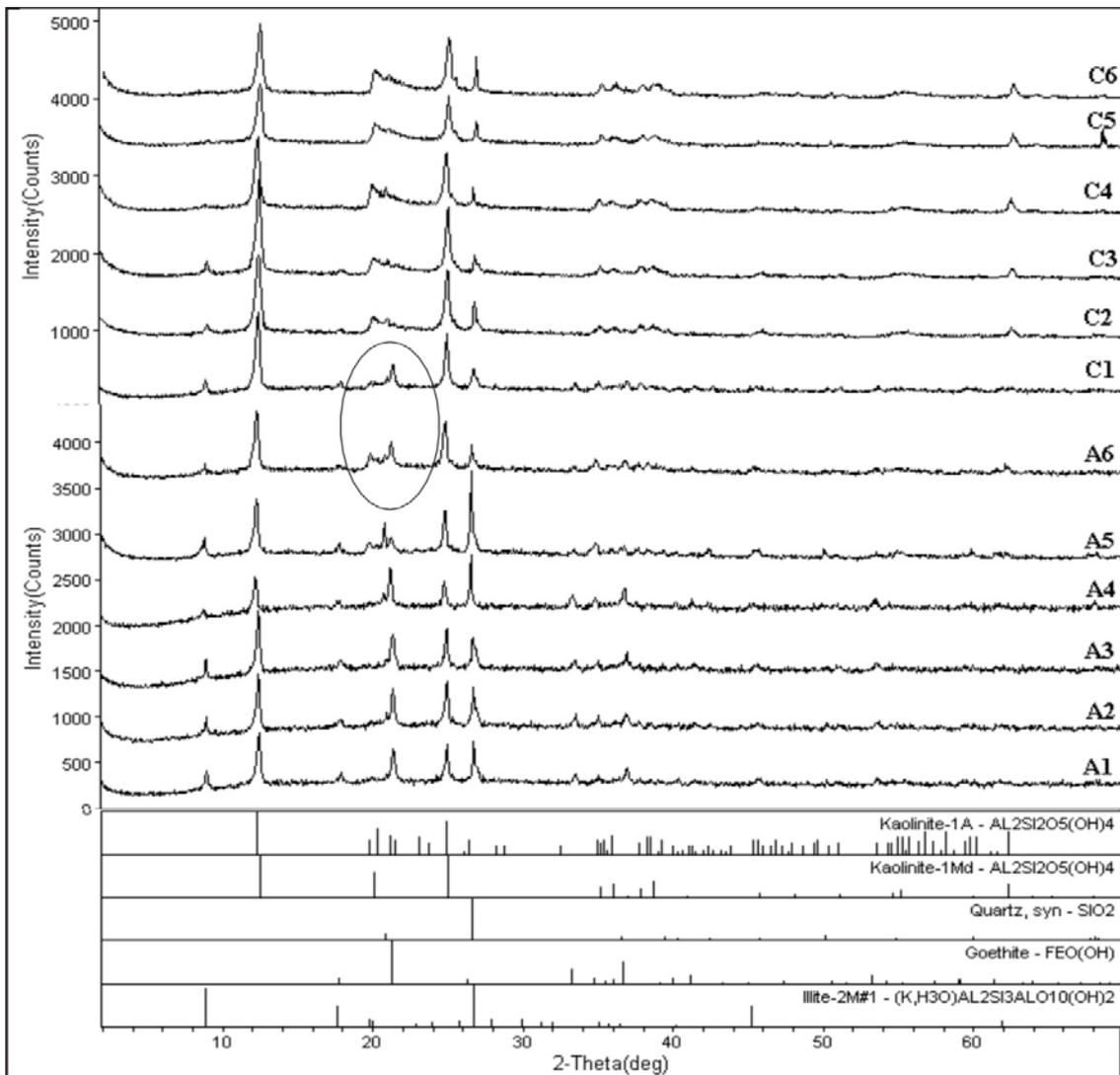


Figura VII.1 – Difratomogramas da área de Bonsucesso, exibindo os politipos da caulinita identificados em 4 áreas. O politipo 1Md ocorre na porção basal do manto de intemperismo, amostras A1-A5. Politipo 1A foi identificado na parte médio-superior do manto de intemperismo, amostras C2-C6. O politipo não é bem definido nas amostras A6-C1, caracterizando transição. Os demais difratogramas da área de Bonsucesso podem ser encontrados no anexo 1, figuras A1.45 a A1.48.

Nas áreas de Brazlândia e de Santo Antônio do descoberto a caulinita 1Md foi identificada nas regiões que configuram a base do manto de intemperismo, representado pela intemperização de metargilito e de muscovita-quartzo-xisto, respectivamente. Na primeira área, a caulinita 1Md, constituinte menor, ocorre associada à Ilita e ao quartzo, constituintes maiores, e se localiza na extremidade oeste do caminhamento W-E (Tabela VII.4, VI.1, Figura VI.4, VI.8). Na área de Santo Antônio do Descoberto a caulinita 1Md, constituinte traço ou menor, está associada à muscovita e ao quartzo, constituintes

dominantes, e se localiza na parte sul do caminhamento de superfície N-S e no extremo leste do caminhamento de superfície W-E (Tabela VII.6, VI.2, Figura VI.12, VI.18).

A Ilita foi identificada nas áreas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto e de Bonsucesso (Tabela VII.3, VII.8 a VII.10, VII.13), enquanto a muscovita foi observada na áreas de Santo Antônio do Descoberto e de Santa Maria (Tabela VII.5, VII.10, VII.11). A distribuição de ambos minerais se dá na base do manto de intemperismo, sendo observado, na área de Bonsucesso, um decréscimo gradativo na distribuição de Ilita da base para o topo do perfil intempérico (Tabela VII.9). No entanto, o perfil SAD/SADS da área de Santo Antônio do Descoberto difere do padrão observado nas demais áreas. Nota-se que a Ilita ocorre tanto na base como no topo do perfil intempérico. Observando-se com mais detalhe o contato entre o perfil SAD e o SADS, verifica-se que no topo do perfil SADS há caulinita 1A, sem a presença de Ilita. Sobrepondo-se ao perfil SADS, na base do perfil SAD, encontra-se muscovita como constituinte maior, seguida de Ilita como constituinte menor e traço em direção ao topo do perfil. Este arranjo mineralógico no perfil SAD/SADS indica um processo de maturidade intempérica da base para o topo incomum, considerando-se a maturidade de um perfil de intemperismo autóctone (Tabela VII.5).

A Gibbsita foi identificada em todas as áreas, exceto Bonsucesso. Sua distribuição se dá no topo do manto intempérico e nas regiões formadas por argilo-lateritos (Tabela VII.2, VII.3 a VII.9). Na área de Sobradinho, a Gibbsita distribui-se gradativamente ao longo dos perfis S e SA, ocorrendo como constituinte traço e menor na base, tornando-se mineral maior no topo destes perfis (Figura VII.12). O perfil STA da área de Santa Maria e os perfis da área de Sobradinho chamam atenção por serem aqueles em que a Gibbsita é mais preponderante. Mas, o perfil STA destaca-se, pois a Gibbsita foi identificada como constituinte maior nas 4 amostras do topo do perfil intempérico (Figura VII.1).

O quartzo ocorre em amostras de todas as áreas, apresentando-se como constituinte principal para as áreas de Santa Maria e de Sobradinho. Distribui-se ao longo de todo o perfil de intemperismo nas áreas de Santo Antônio do Descoberto, de Santa Maria, de Sobradinho e de Bonsucesso (Tabela VII.5, VII.11 a VII.13). Na área de Brazlândia o quartzo foi observado apenas em uma amostra ao longo de todo o perfil, sendo identificado como constituinte traço (Tabela VII.3).

A goethita foi identificada como mineral comum a todas as áreas, principalmente como constituinte traço, sendo que na área de Santo Antônio do Descoberto foi observada apenas nos caminhamentos de superfície (Tabela VII.5, VII.10). A hematita não ocorre nos perfis intempéricos das áreas de Santa Maria e de Bonsucesso. Ambos minerais distribuem-se, predominantemente, na base dos perfis de intemperismo (Tabela VII.3, VII.11 a VII.13). No perfil S da área de Sobradinho, observa-se que a goethita e a hematita passam de constituinte maior na base do perfil de intemperismo para mineral menor, traço ou ausente em direção ao topo do perfil (Tabela VII.8).

O rutilo foi identificado como mineral traço em todas as áreas, exceto no perfil da área de Bonsucesso (Tabela VII.2, VII.3 a VII.9). Distribui-se, predominantemente: na parte médio-superior dos perfis de intemperismo das áreas de Brazlândia e de Santa Maria; na porção médio-inferior do perfil SAD da área de Santo Antônio do Descoberto; e na base

do perfil SA da área de Sobradinho (Tabela VII.3, VII.7, VII.5, VII.8). Observa-se, ainda, que o rutilo não foi identificado nos perfis SADS e SAD1 da área de Santo Antônio do Descoberto (Tabela VII.5). O polimorfo do rutilo, o anatásio, foi identificado em apenas duas áreas: nos perfis SA da área de Sobradinho e STA1 da área de Santa Maria. No primeiro, sua distribuição praticamente ocorre ao longo de todo o perfil (Tabela VII.8), enquanto que no segundo o anatásio foi identificado na parte superior do perfil, destacando-se como constituinte maior na amostra STA-2 (Tabela VII.7).

VII.1.1.1 – Relações entre Mineralogia e Materiais Intempéricos (*In Natura*)

As áreas de Brazlândia e de Santo Antônio do Descoberto apresentaram melhores exposições do que as demais áreas, com afloramentos de argilas mosqueadas, de lateritos, de argilo-lateritos e com exposições de transição da rocha matriz para o saprolito. A fim de se melhor compreender o processo de evolução do manto de intemperismo, foram realizados estudos direcionados a estes materiais.

Na área de Brazlândia, verificou-se a relação entre a cor de argilas mosqueadas, a cor de lateritos e a cor de argilo-lateritos com a mineralogia encontrada nas amostras representantes destes materiais. Por sua vez, na área de Santo Antônio do Descoberto examinou-se a relação entre a transição rocha matriz/saprolito, representada por amostras de argilas com e sem remanescentes de rocha matriz, e a mineralogia presente nas mesmas.

Relação entre Mineralogia e Cor de Argilas Mosqueadas (*In Natura*)

Na área Brazlândia, principalmente nas extremidades leste e oeste, foi observada ocorrência de argilas mosqueadas em bege claro, bege róseo de natureza friável, amarelo e vermelho (Figura VI.4, VI.8A, VI.9, VII.2). Estas porções estão representadas pelas amostras: bege claro - BRA-CS10 e BRA-CS13; bege róseo - BRA-CS8; amarela - BRA-CS9 e BRA-CS14; vermelha - BRA-CS15 (Tabela VI.1, Figura VII.3).

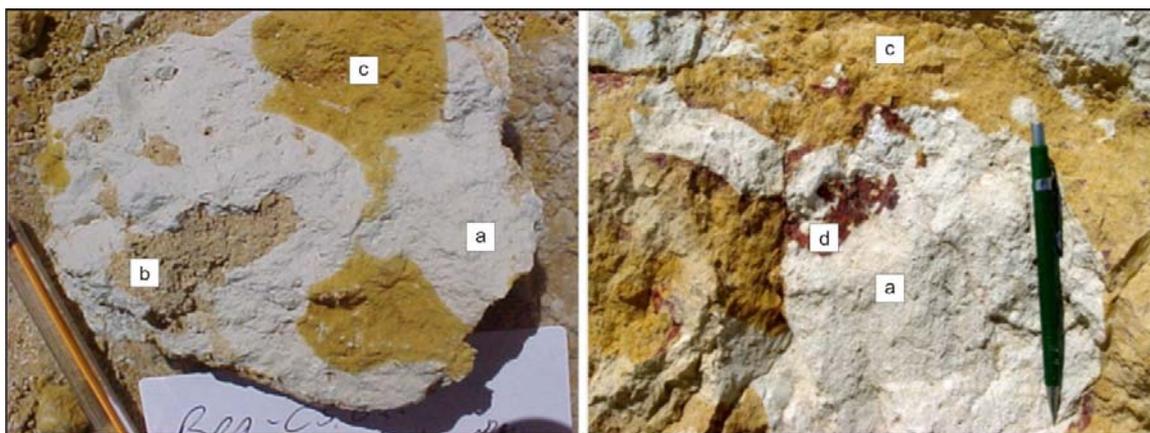


Figura VII.2 – Detalhe de argilas mosqueadas na área de Brazlândia; cores: a - bege clara; b - bege rósea; c - amarela; d - vermelho.

A Figura VII.3 agrupa os minerais segundo a cor das argilas. Conforme pode ser observado, todas as amostras são comuns quanto à caulinita 1A, como constituinte maior,

mas apenas a argila bege clara não contém os minerais goethita e hematita. Das que estes minerais de ferro foram identificados, as argilas vermelha e amarela mostram-se mais ricas em goethita, ocorrendo como constituinte menor. O rutilo só não foi identificado na argila amarela.

Das constatações acima, verifica-se que os minerais ricos em ferro são constituintes menores na argila bege rósea e ausentes nas argilas bege clara. Depreende-se disso, que no processo de lixiviação está havendo solubilização de ferro das argilas vermelha e amarela, indicando que elas se tornam argila bege rósea no estágio intermediário e bege clara no final do processo. Esta sequência de solubilização do ferro parece ser reforçada pelas imagens observadas nas exposições da mina Brazlândia, em que a argila bege se formaria a partir de um núcleo envolvido por argila amarela (Figura VI.9B) e esta por argila vermelha (Figura VI.9D).

Observa-se, ainda, que as ocorrências minerais das amostras de mesma cor, tomadas em níveis diferentes na mina (Figura VI.8A), apresentaram resultados mineralógicos semelhantes (Figura VII.3), indicando que o processo de intemperismo está atuando nas bordas laterais do manto de intemperismo, nas proximidades do contato com a rocha matriz.

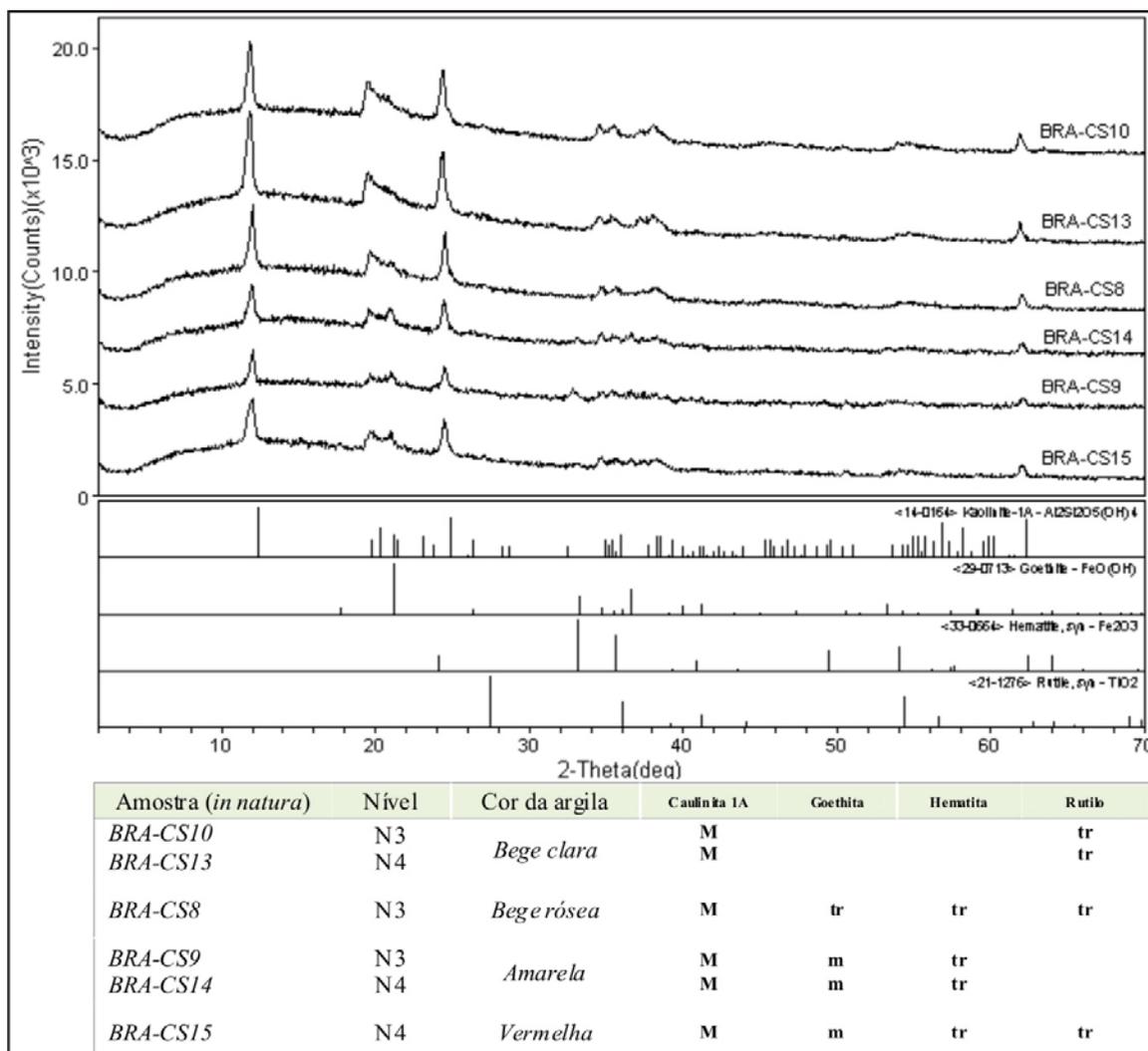


Figura VII.3 – Difratoformas de argilas mosqueadas da área de Brazlândia, perfil W-E. O quadro abaixo apresenta a interpretação da composição mineralógica. **M** maior; **m** menor; **tr** traço. As amostras podem ser localizadas nas figuras VI.4 e VI.8A.

- Argilo-Laterito e Laterito (*In Natura*)

A parte leste da área de Brazlândia, representando a porção topograficamente mais elevada, expõe laterito amarelo-vermelho e preto ferruginoso em seu topo e argilo-laterito vermelho e amarelo abaixo deste (Figura VI.4, VI.8A, Tabela VI.1). A amostra BRA-CS1 de argilo-laterito foi desagregada em duas partes: vermelha - BRA-CS1A; amarela BRA-CS1B (Figura VII.4). Do mesmo modo, a amostra BRA-CS2, representando o laterito, foi separada em duas porções: amarelo-vermelha - BRA-CS2A; preta ferruginosa - BRA-CS2B (Figura VII.5).

Relação entre Mineralogia e Cor de Argilo-Laterito (*In Natura*)

Na Figura VII.4 observa-se que caulinita, goethita e Ilita estão presentes nas três amostras, sendo a Ilita a única fase distribuída igualmente como constituinte menor; a caulinita ocorre como constituinte maior na amostra BRA-CS1 e na porção vermelha e como menor na porção amarela; a goethita apresenta-se como constituinte maior na argila amarela e como constituinte menor na porção vermelha; A hematita ocorre como traço, não sendo identificada na porção amarela. As observações sugerem que a presença de Ilita independe da cor da argila, que a goethita ocorre em maior proporção na argila amarela do que na vermelha, a ponto de ser a fase mineral predominante no lugar da caulinita na argila amarela. Não se identificou a presença de hematita na porção amarela, indicando que a coloração vermelha da argila poderia estar associada à hematita.

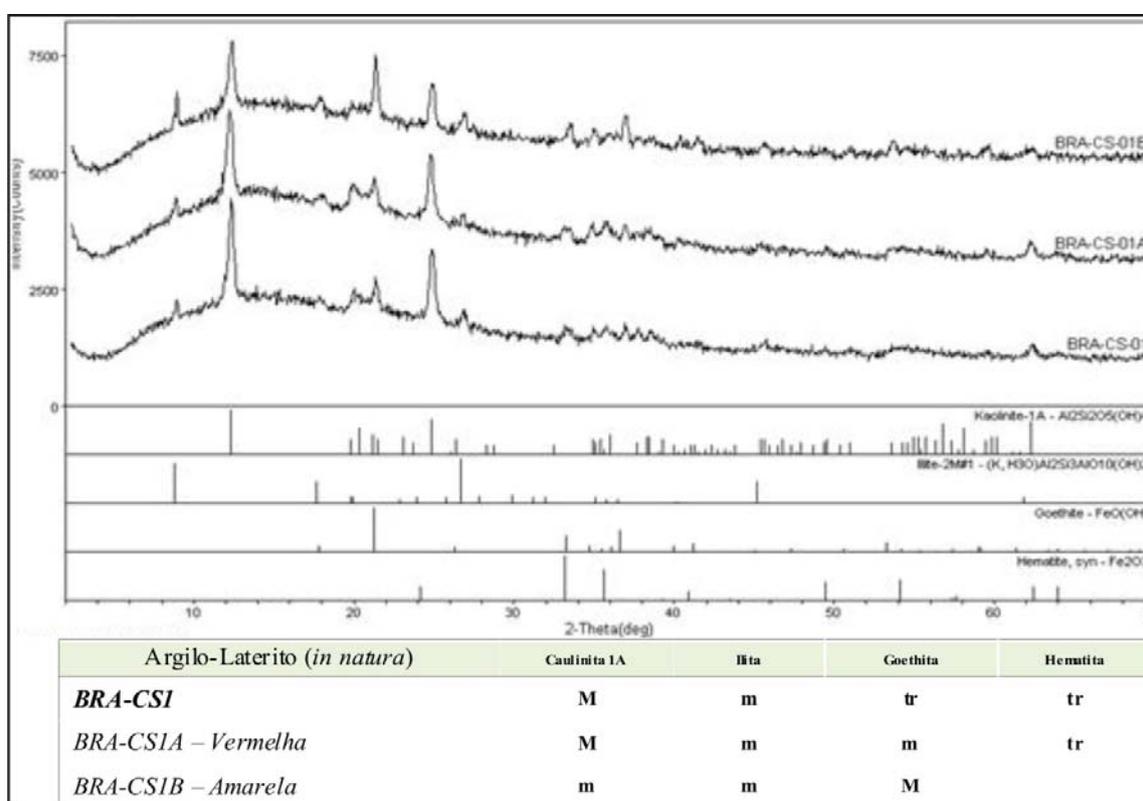


Figura VII.4 – Difractogramas de argilo-laterito localizado abaixo do laterito na porção mais elevada da área de Brazlândia, perfil W-E. O quadro abaixo apresenta a interpretação da composição mineralógica. **M** maior; **m** menor; **tr** traço. As amostras podem ser localizadas nas figuras VI.4 e VI.8A.

Relação entre Mineralogia e Cor de Laterito (*In Natura*)

De acordo com a Figura VII.5, pode-se verificar que a distribuição da goethita e da hematita é a mesma nas duas amostras, independente da cor das amostras. A porção preta ferruginosa difere da amostra BRA-CS2 no conteúdo de caulinita 1A, que está presente

como traço na primeira, e pela ausência de quartzo e Gibbsita, que foram identificados somente na porção amarelo-vermelha da amostra. Depreende-se destas observações que a parte preta ferruginosa concentra os minerais de ferro e que a amarelo-vermelha representaria o processo superior de maturidade intempérica pela presença de traço de Gibbsita formada por dessilicatação de caulinita.

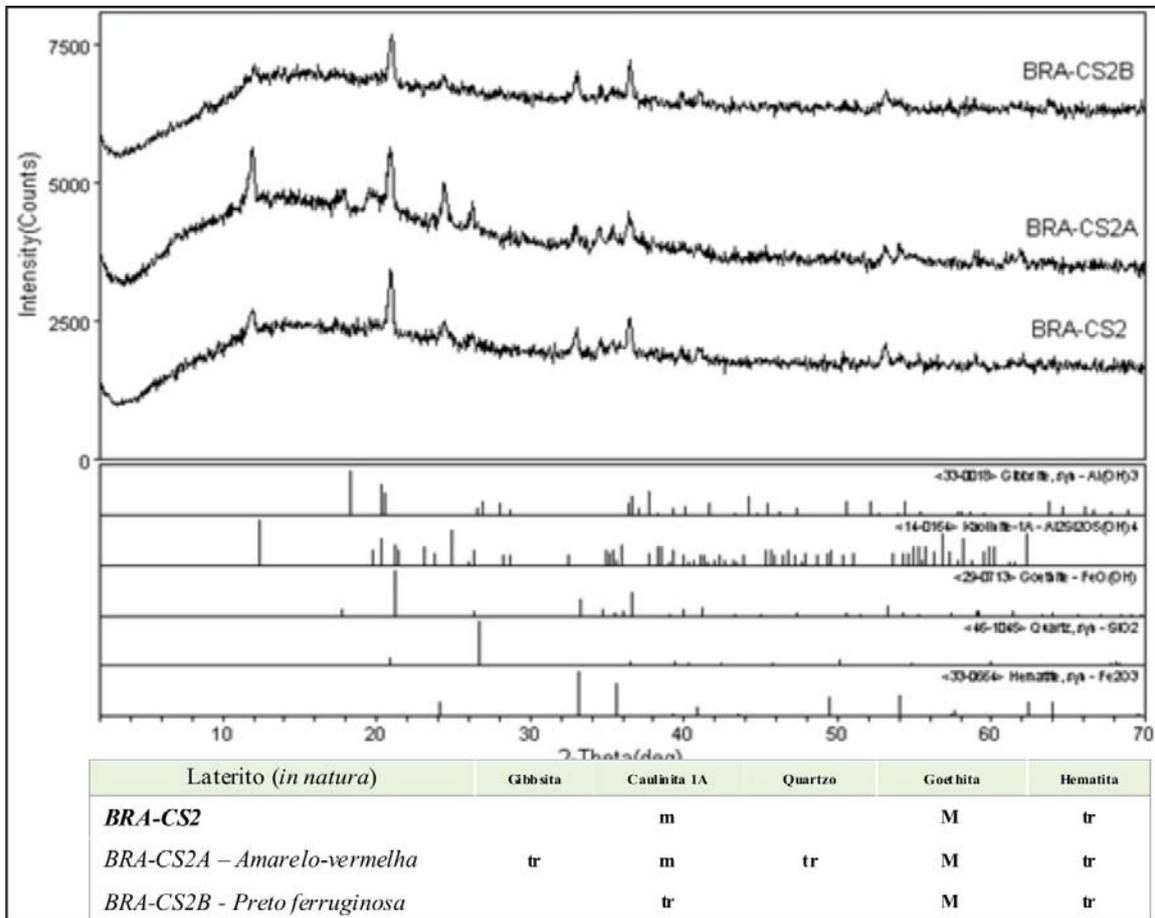


Figura VII.5 – Difratomogramas de laterito localizado na porção mais elevada da área de Brazlândia, perfil W-E. O quadro abaixo apresenta a interpretação da composição mineralógica. **M** maior; **m** menor; **tr** traço. As amostras podem ser localizadas nas figuras VI.4 e VI.8A.

Relação entre Mineralogia e Interface Rocha Matriz/Saprolito (*In Natura*)

A extremidade leste da área Santo Antônio do Descoberto expõe muscovita-quartzo-xisto intemperizado (Figura VI.12). A amostra SAPWE-127rocha representa uma porção do afloramento em que as estruturas originais da rocha estão razoavelmente preservadas. SADPWE-127argila, por sua vez, representa a parcela alterada em que a amostra se apresenta macroscopicamente sem estruturas que identifiquem a rocha matriz (Figura VII.6). Observa-se que o conteúdo mineral identificado em ambas as amostras é

semelhante, diferindo apenas na goethita, que se apresenta como constituinte menor na amostra contendo remanescentes de rocha matriz.

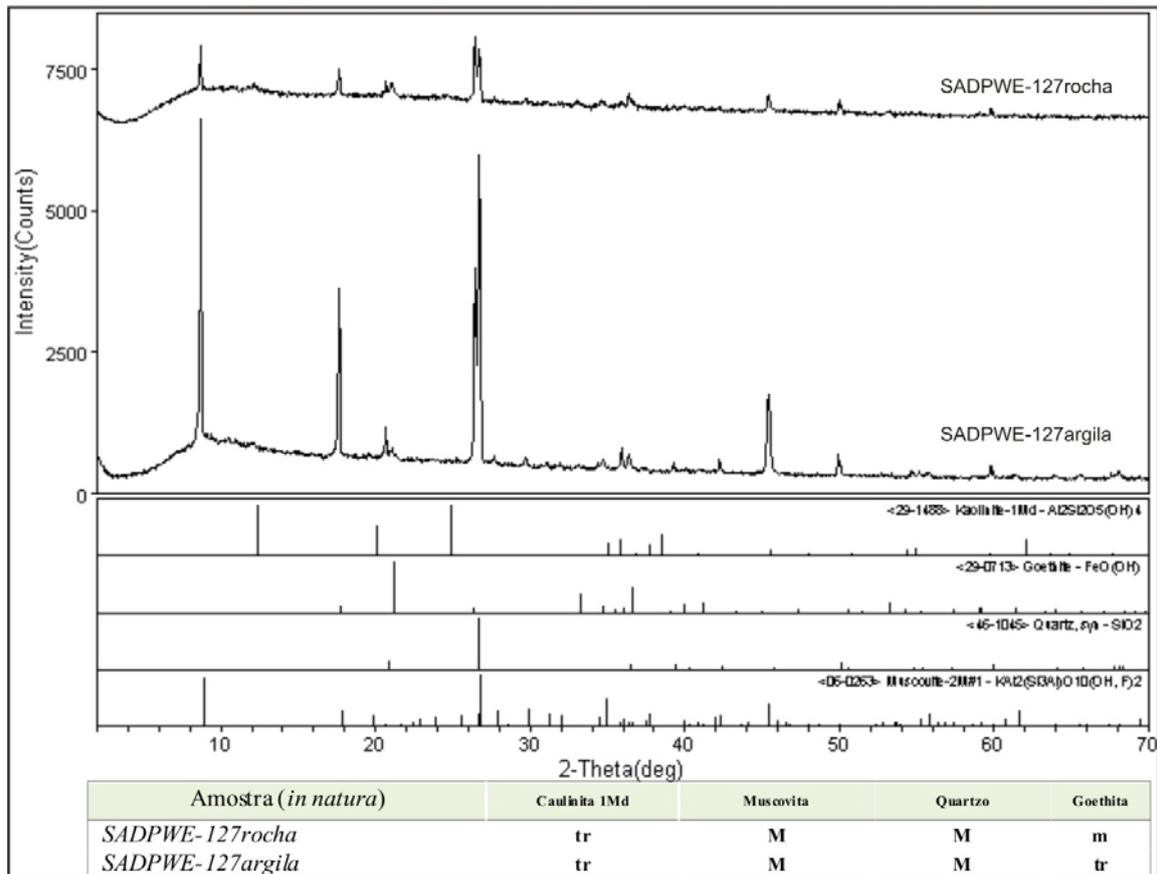


Figura VII.6 – Difratomogramas de amostra total de muscovita-quartzo-xisto intemperizado da área de Santo Antônio do Descoberto, perfil W-E: amostras SAPWE-127rocha e SADPWE-127-argila, com e sem estruturas da rocha matriz, respectivamente. O quadro abaixo apresenta a interpretação da composição mineralógica, mostrando a semelhança entre a mineralogia da amostras. **M** maior; **m** menor; **tr** traço. As amostras podem ser localizadas na Figura VI.12.

VII.1.2 - Composição Mineralógica de Materiais Calcinados

A alteração mineralógica imposta pela calcinação foi significativa em todas as quatro áreas, ocorrendo desaparecimento de caulinita, de Gibbsita, de goethita, de muscovita e aparecimento de hematita (Tabela VII.2, VII.3, VII.5, VII.8, VII.9). Além disso, fases minerais obliteradas por constituintes maiores dominantes nos difratogramas das argilas *in natura*, tornaram-se evidentes nos difratogramas de argila calcinada (Seção V.2.1). O quartzo tornou-se constituinte maior em Santo Antônio do Descoberto e Sobradinho (Tabela VII.2, VII.5, VII.8).

A caulinita, ao ser submetida à calcinação, normalmente apresenta o colapso de sua estrutura cristalina, formando uma fase amorfa – metacaulinita. Esta consumação ocorreu em Sobradinho. Entretanto, nas outras três áreas, o colapso de sua estrutura cristalina não foi completo, tendo sido identificados remanescentes de caulinita em algumas amostras. Esta situação poderia ser explicada por ter sido a calcinação realizada em mufla sem fluxo de ar para retirar a água liberada durante a reação, dificultando a consumação total do colapso da estrutura cristalina da caulinita (Seção V.2.3). Adicionalmente poderia ser ainda interpretada como sendo consequência das variações dos volumes individuais das amostras versus o tempo de calcinação (Lacerda, 2005). Contudo, para um posicionamento conclusivo seria necessário o aprofundamento no estudo e o presente trabalho não teve isso como objetivo fundamental. Em todos os casos, os remanescentes de caulinita restringiram-se ao politipo 1A (Tabela VII.2, VII.3, VII.5, VII.8, VII.9).

Nas áreas de Brazlândia e de Bonsucesso (Tabela VII.3, VII.9) foi notada a formação de hematita a partir da goethita por desidratação dessa última, conforme a equação: 2FeOOH (goethita) \Rightarrow Fe_2O_3 (hematita) + H_2O . A assunção de que houve formação de hematita foi reforçada pela mudança de cor da argila para vermelho após a calcinação, conforme se verifica na seção VII.3.

É importante observar que devido ao desaparecimento de algumas fases minerais, notadamente caulinita, outras que não haviam sido identificadas nos difratogramas de argila *in natura*, passaram a ser evidentes nas amostras calcinadas (Seção V.2.1). A Ilita é um desses minerais e as áreas Sobradinho e Santo Antônio do Descoberto ilustram esta situação (Tabela VII.8, VII.5).

O anatásio tornou-se comum às quatro áreas, sendo identificado também em Brazlândia e Santo Antônio do Descoberto, coexistindo com o rutilo, (Tabela VII.3, VII.5), que por sua vez, passou a coexistir com o anatásio em Bonsucesso (Tabela VII.9). Em uma única amostra do perfil SADS, da área de Santo Antônio do Descoberto, foi identificado diásporo (Tabela VII.5).

Tabela VII.3 – Composição mineralógica do perfil BRAC/BRAT, exibindo fases minerais identificadas por difração de Raios-X em amostra total de argila *in natura* (**In**) e calcinada (**Ca**). **M** maior; **m** menor; **tr** traço. Os difratogramas que deram origem à interpretação acima podem ser encontrados no anexo 1, figuras A1.1 a A1.14.

Amostra	Distribuição Mineralógica (<i>In natura</i> x Calcinada) – Perfil BRAC/BRAT Área Brazlândia												
	Gibbsita <i>In natura</i>	Caulinita 1A		Caulinita 1Md <i>In natura</i>	Ilita		Quartzo		Goethita <i>In natura</i>	Hematita <i>In natura</i>	Rutilo		Anatásio Calcinada
		In	Ca		In	Ca	In	Ca			In	Ca	
<i>0m</i>	BRA-C15	M	M					tr					tr
	BRA-C14	M	M	tr				tr	tr				tr
	BRA-C13		M					M					
	BRA-C12		M								tr	tr	tr
	BRA-C11		M	tr									tr
	BRA-C10		M	tr							tr		tr
	BRA-C9		M								tr	tr	tr
	BRA-C8		M								tr	tr	tr
<i>10m</i>	BRA-C7		M				tr				tr	tr	tr
	BRA-C6		M								tr	tr	tr
	BRA-C5		M						tr		tr	tr	tr
	BRA-C4		M		tr						tr	tr	
	BRA-C3		M						tr		tr	tr	tr
	BRA-C2		M						tr		tr	tr	tr
	BRA-C1		M		tr							tr	tr
	BRA-T1		M			tr			tr			tr	tr
	BRA-T2		M		tr				tr	tr		tr	tr
	BRA-T3		M		tr	tr			tr	tr		tr	tr
	BRA-T4		M		tr	tr		M	m			tr	tr
<i>21,75m</i>	BRA-T5		M			tr		tr	m			tr	tr

Tabela VII.4 – Composição mineralógica do caminhamento W-E de Brazlândia, exibindo fases minerais identificadas por difração de Raios-X em amostra total de argila *in natura*. **M** maior; **m** menor; **tr** traço. Os difratogramas que deram origem à interpretação acima podem ser encontrados no anexo 2, figuras A2.1 a A2.12.

	Amostra (<i>In natura</i>)	Distribuição Mineralógica - Amostragem Pontual Caminhamento W-E: Brazlândia							
		Gibbsita	Caulinita 1A	Caulinita 1Md	Ilita	Quartzo	Goethita	Hematita	Rutilo
<i>Leste</i>	<i>BRA-CS1 (argilo-laterito total)</i>		M		m		tr	tr	
	<i>BRA-CS1A (vermelha)</i>		M		m		m	tr	
	<i>BRA-CS1B (amarela)</i>		m		m		M		
	<i>BRA-CS2 (laterito total)</i>		m				M	tr	
	<i>BRA-CS2A (amarela)</i>	tr	m			tr	M	tr	
	<i>BRA-CS2B (preta ferruginosa)</i>		tr				M	tr	
	<i>BRA-CS3 (laterito)</i>		M				m	tr	
	<i>BRA-CS4 (argilo-laterito)</i>		M				m	tr	
	<i>BRA-CS5 (argilo-laterito)</i>		M				m	tr	tr
	<i>BRA-CS6 (argila vermelha)</i>	tr	M				tr	tr	
	<i>BRA-CS7 (argila bege clara)</i>		M				tr	tr	tr
	<i>BRA-CS11 (argila mosqueada total)</i>		M						tr
	<i>BRA-CS8 (bege rósea)</i>		M				tr	tr	tr
	<i>BRA-CS9 (amarela)</i>		M				m	tr	tr
	<i>BRA-CS10 (bege clara)</i>		M						tr
	<i>BRA-CS12 (bege clara e amarela)</i>		M				tr	tr	tr
	<i>BRA-CS13 (bege clara)</i>		M						tr
	<i>BRA-CS14 (amarela)</i>		M				m	tr	
	<i>BRA-CS15 (vermelha)</i>		M				m	tr	
<i>BRA-CS16 (amarela e vermelha)</i>		M				m	m		
<i>BRA-CS17 (amarela)</i>		M				m	m		
<i>BRA-CS18 (vermelha)</i>		M				m			
<i>BRA-CS19 (bege clara a branca)</i>			m	M	M	tr			
<i>BRA-CS20 (metalamito)</i>			m	m	M				

Oeste

Tabela VII.5 - Composição mineralógica dos perfis SAD/SADS e SAD1, exibindo fases minerais identificadas por difração de Raios-X em amostra total de argila *in natura* (**In**) e calcinada (**Ca**). **M** maior; **m** menor; **tr** traço. Os difratogramas que deram origem à interpretação acima podem ser encontrados no anexo1, figuras A1.15 a A1.28.

Amostra	Distribuição Mineralógica (<i>In natura</i> x Calcinada) – Perfil SAD/SADS												
	Área Santo Antônio do Descoberto												
	Gibbsita <i>In natura</i>	Caulinita 1A		Ilita		Muscovita <i>In natura</i>	Quartzo		Hematita <i>In natura</i>	Rutilo <i>In natura</i>	Anatásio Calcinado	Diásporo Calcinado	
	In	Ca	In	Ca	In	Ca	In	Ca	In	In	Ca	Ca	
0m	SAD-5		M		tr	tr		m	M			tr	
	SAD-4		M	M	m	tr		m	M		tr		
	SAD-3		M		m	tr		m	M			tr	
	SAD-2		M		m	tr		m	M		tr	tr	
	SAD-1		M			tr	M	m	M	tr	tr	m	
	SADS-1		M	tr				m	M			tr	
7m	SADS-2		M	tr				m	M			tr	
	SADS-3		M	tr				m	M			tr	
	SADS-4		M	tr				m	M			tr	
	SADS-5		M	tr				m	M			tr	
	SADS-6		M	tr				m	M			tr	tr
	SADS-7		M	tr				m	M			tr	
13,5m	SADS-8		M	tr	tr			m	M			tr	

Amostra	Distribuição Mineralógica (<i>In natura</i> x Calcinada) – Perfil SAD1												
	Área Santo Antônio do Descoberto												
	Gibbsita <i>In natura</i>	Caulinita 1A		Ilita		Muscovita <i>In natura</i>	Quartzo		Hematita <i>In natura</i>	Rutilo <i>In natura</i>	Anatásio Calcinado	Diásporo Calcinado	
	In	Ca	In	Ca	In	Ca	In	Ca	In	In	Ca	Ca	
0m	SAD1-1	tr	M			tr		tr	M			tr	
	SAD1-2		M			tr		tr	M			tr	
	SAD1-3		M			tr		tr	M			tr	
	SAD1-4		M			tr		tr	M			tr	
	SAD1-5		M			tr		tr	M			tr	
	SAD1-6		M	tr		tr		tr	M			tr	
	SAD1-7		M	tr		tr		tr	M			tr	
7,6m	SAD1-8		M		tr			tr	M			tr	

Tabela VII.6 – Composição mineralógica dos caminhamentos N-S e W-E de Santo Antônio do Descoberto, exibindo fases minerais identificadas por difração de Raios-X em amostra total de argila *in natura*. **M** maior; **m** menor; **tr** traço. Os difratogramas que deram origem à interpretação acima podem ser encontrados no anexo 2, figuras A2.13 a A2.20.

	Amostra (<i>In natura</i>)	Distribuição Mineralógica - Amostragem Pontual Caminhamento N-S: Santo Antônio do Descoberto							
		Gibbsita	Caulinita 1A	Caulinita 1Md	Ilita	Muscovita	Quartzo	Goethita	Hematita
Sul	SADH-1 (bege a cinza claro)			M		M	M		tr
	SADH-9 (bege claro)		M				tr		
	SADH-10 (bege claro)		M				tr		
	SADPSN-65 (bege-amarela)		m		m		M	tr	
	SADPSN-67 (argilo-laterito vermelho-amarelo)	m	M				tr	tr	
	SADPSN-69 (laterito vermelha)		M					M	m
	SADPSN-70 (amarela)		M				tr	M	
	SADPSN-70aux (mosqueada bege, vermelho claro)		M		tr			tr	
Norte	SADPSN-70aux2 (mosqueada bege, vermelho claro)		M				tr	tr	

	Amostra (<i>In natura</i>)	Distribuição Mineralógica - Amostragem Pontual Caminhamento W-E: Santo Antônio do Descoberto						
		Caulinita 1A	Caulinita 1Md	Ilita	Muscovita	Quartzo	Goethita	Rutilo
Oeste	SADPWE-119 (bege)	M		tr		m	tr	
	SADPWE-124 (bege escura)	m		m		M		tr
	SADPWE-126aux (amarela)	M		tr		tr		
	SADPWE-127total (amarela a marrom)				M	M	tr	
	SADPWE-127rocha (marrom claro)			Tr	M	M	tr	
Leste	SADPWE-127argila (amarela clara)			Tr	M	M	tr	

Tabela VII.7 - Composição mineralógica dos perfis STA e STA1, exibindo fases minerais identificadas por difração de Raios-X em amostra total de argila *in natura*. **M** maior; **m** menor; **tr** traço. Os difratogramas que deram origem à interpretação acima podem ser encontrados no anexo 1, figuras A1.29 a A1.37.

	Amostra (<i>In natura</i>)	Distribuição Mineralógica – Perfil STA Área Santa Maria							
		Gibbsita	Caulinita 1A	Caulinita 1Md	Muscovita	Quartzo	Goethita	Rutilo	Anatásio
0m	STA-1	M	M			m	tr		tr
	STA-2	M	M			m		tr	M
	STA-3	M	M			tr		tr	
	STA-4	M	M			tr	tr	tr	
	STA-5		M			tr	tr		
	STA-6		M			m	tr		
	STA-7		M			m	tr	tr	
8m	STA-8			M		m	tr		

	Amostra (<i>In natura</i>)	Distribuição Mineralógica – Perfil STA1 Área Santa Maria							
		Gibbsita	Caulinita 1A	Caulinita 1Md	Muscovita	Quartzo	Goethita	Rutilo	Anatásio
0m	STA1-1			M	M	M			
	STA1-2			M	M	M			
	STA1-3			M	M	M		tr	
	STA1-4			m	M	M		tr	
	STA1-5			m	M	M			
6m	STA1-6			M	m	M	tr		

Tabela VII.8 - Composição mineralógica dos perfis S e SA, exibindo fases minerais identificadas por difração de Raios-X em amostra total de argila *in natura* (**In**) e calcinada (**Ca**). **M** maior; **m** menor; **tr** traço. Os difratogramas que deram origem à interpretação acima podem ser encontrados no anexo 1, figuras A1.38 a A1.44.

Amostra	Distribuição Mineralógica (<i>In natura</i> x Calcinada) – Perfil S										
	Área Sobradinho										
	Gibbsita		Caulinita 1A	Ilita	Quartzo		Goethita	Hematita		Rutilo	Anatásio
	<i>In natura</i>	<i>In natura</i>	Calcinada	In	Ca	<i>In natura</i>	In	Ca	<i>In natura</i>	In	Ca
0m	S-1	M	m		M	M	m				m
	S-2	m	m		M	M	m	tr	M		tr
2,5m	S-3	tr	M		m	m	M	M	M		

Amostra	Distribuição Mineralógica (<i>In natura</i> x Calcinada) – Perfil SA										
	Área Sobradinho										
	Gibbsita		Caulinita 1A	Ilita	Quartzo		Goethita	Hematita	Rutilo	Anatásio	
	<i>In natura</i>	<i>In natura</i>	Calcinada	In	Ca	<i>In natura</i>	<i>In natura</i>	<i>In natura</i>	<i>In natura</i>	In	Ca
0m	SA-1	M	M		m	M				tr	m
	SA-2	m	M		M	M				tr	tr
	SA-3	m	M		m	M	tr				tr
	SA-4		M		M	M	tr		tr	tr	tr
4,3m	SA-5		M	tr	M	M	tr		tr	tr	tr

Tabela VII.9 - Composição mineralógica perfil BONC/BONT, exibindo fases minerais identificadas por difração de Raios-X em amostra total de argila *in natura* (**In**) e calcinada (**Ca**). **M** maior; **m** menor; **tr** traço; (**SD**) sem difratograma. Os difratogramas que deram origem à interpretação acima podem ser encontrados no anexo 1, figuras A1.45 a A1.59.

Amostra	Distribuição Mineralógica (<i>In natura</i> x Calcinada) – Perfil BONC/BONA											
	Área Bonsucesso											
	Caulinita 1A		Caulinita 1Md	Ilita		Quartzo		Goethita	Hematita	Rutilo	Anatásio	
	In	Ca	<i>In natura</i>	In	Ca	In	Ca	<i>In natura</i>	Calcinada	Calcinada	In	Ca
0m	BON-C16	M				m	m				m	m
	BON-C15	M				m	m				m	m
	BON-C14	M				m	m				m	m
	BON-C13	M				m	m				m	m
	BON-C12	M				m	m			tr	m	m
	BON-C11	M				m	m			tr	m	m
	BON-C10	M	tr			m	M			tr	m	m
	BON-C9	M				m	M				m	m
	BON-C8	M				m	M				m	m
	BON-C7	M			tr	m	M			tr	m	m
11m	BON-C6	M			tr	m	M				m	m
	BON-C5	M			tr	m	m			tr	m	m
	BON-C4	M			tr	tr	m			tr	m	m
	BON-C3	M	SD		tr	SD	tr	SD	tr	SD	tr	SD
	BON-C2	M			tr	tr	tr	M	tr		tr	tr
	BON-C1			M	m	m	tr	m	m	m	tr	
	BON-A6			M	m	M	tr	m	m	m	tr	tr
	BON-A5			M	m	M	m	m	m	m	tr	
	BON-A4			M	m	M	tr	tr	M	M		
	BON-A3			M	m	M	tr	tr	M	M		
	BON-A2			M	m	M	tr	m	M	m		tr
22m	BON-A1			M	m	M	tr	m	M	m		tr

VII.2 - Composição Química

Este tópico apresenta a análise dos teores dos óxidos de Si, Al, Fe, Ti, Mg, K, Ca e Na de todas as 124 amostras de argila *in natura* (Tabela V.1, VII.10, Figura VII.7 a VII.12), com ênfase nos seis primeiros elementos químicos. Apresenta-se análise de resultados dos perfis de intemperismo verticais e as relações entre a geoquímica e determinados materiais intempéricos procedentes dos caminhamentos de superfície nas áreas de Brazlândia e de Santo Antônio do Descoberto, similarmente à seção VII.1.1.1.

Faz-se necessário enfatizar que os perfis verticais trabalhados nesta tese incluem, na sua maior parte, a argila que constitui o minério de três áreas de exploração atual pelas empresas cimenteiras: Brazlândia, Santo Antônio do Descoberto e Bonsucesso. As outras duas áreas são formadas por argila potencial para futuro minério de pozolana, ainda não exploradas para fins cimentícios (Capítulo VI). Assim, a tabela VII.10 foi construída de modo a proporcionar uma visão comparativa entre as áreas e verificar o grau de homogeneidade dos pacotes estudados. Nesta tabela, a distribuição dos óxidos de cada perfil é apresentada na forma de média simples com o respectivo desvio padrão. Para consultas detalhadas da distribuição química dos óxidos, o anexo 3 oferece os quadros contendo as informações da composição química de cada área por amostra individual. Finalmente, informa-se que o caso Bonsucesso permitiu a individualização do perfil de intemperismo em duas partes, sendo a superior o minério e a inferior o estéril (Lacerda, 2005).

Na análise de dados químicos de argilas direcionadas à fabricação de cimento é importante considerar os teores de sílica e alumínio, ferro, álcalis e magnésio. A sílica e o alumínio, porque são os reagentes fundamentais da reação pozolana, cal e água (Seção III.4) em que conteúdos maiores do que 70% destes componentes são tomados como indicadores preliminares de uma pozolana caulinítica potencial (Souza Santo, 1975; Chakchouk *et al.*, 2006). O ferro porque pode influenciar na coloração do cimento após a calcinação (Seção VII.3). O magnésio, porque pode trazer problemas ao concreto, normalmente é limitado a 4% de MgO no cimento, representando por volta de 2,5 a 3,5% na argila, dependendo das matérias-primas utilizadas para a produção de clínquer. Os álcalis, porque a norma brasileira (NBR 12653/92) limita o teor de Na₂O em 1,5% nos cimentos brasileiros, representando aproximadamente de 1 a 1,4% na argila, igualmente em função do clínquer (Tabela III.5).

A seguir são apresentadas as análises da composição química, conjugando a leitura da tabela VII.10 com as figuras VII.7 a VII.12, que apresentam gráficos da distribuição dos elementos químicos ao longo dos perfis de intemperismo.

Tabela VII.10 – Composição química média e desvio padrão dos perfis estudados. Os dados bases utilizados para a construção da tabela podem ser encontrados no anexo 3, figuras A3.1 a A3.6.

Composição Química das amostras coletadas nas Áreas do Estudo – Média (%) e Desvio Padrão										
Área de Estudo	Perfil	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	PF
<i>Brazlândia</i>	<i>BRAC/BRAT</i>	41,51	2,07	35,45	1,97	0,23	0,37	0,27	0,41	17,57
		2,51	0,17	2,14	1,15	0,18	0,10	0,05	0,05	3,53
<i>Santo Antônio do Descoberto</i>	<i>SAD</i>	45,34	1,68	34,14	1,31	0,33	0,57	0,30	0,44	15,37
		1,26	0,07	0,57	0,13	0,17	0,41	0,04	0,04	1,07
	<i>SADS</i>	45,25	1,82	30,89	1,19	0,20	0,36	0,32	0,46	19,46
		2,60	0,22	2,46	0,50	0,08	0,13	0,04	0,04	2,05
	<i>SAD/SADS</i>	45,28	1,77	32,14	1,24	0,23	0,45	0,31	0,45	17,88
		2,11	0,18	2,52	0,39	0,09	0,27	0,04	0,04	2,67
<i>SAD1</i>	43,45	1,72	32,20	1,42	0,15	0,29	0,35	0,49	19,46	
	1,63	0,18	1,35	0,22	0,09	0,11	0,03	0,03	2,66	
<i>Santa Maria</i>	<i>STA</i>	48,16	1,87	28,16	1,84	0,13	0,28	0,32	0,46	18,63
		8,93	0,43	6,81	0,56	0,05	0,05	0,04	0,04	3,80
	<i>STA1</i>	66,11	0,99	20,51	2,30	0,85	0,35	0,33	0,47	7,82
		3,59	0,33	2,58	0,39	0,32	0,14	0,04	0,04	1,12
<i>Sobradinho</i>	<i>S</i>	27,49	1,61	25,78	23,07	0,12	0,32	0,26	0,39	20,48
		0,90	0,53	6,58	14,60	0,09	0,07	0,02	0,02	8,44
	<i>SA</i>	43,64	2,04	30,90	3,42	0,22	0,37	0,30	0,43	18,50
		7,05	0,35	2,88	1,53	0,07	0,10	0,06	0,07	6,51
<i>Bonsucesso</i>	<i>Superior (C2-C16)</i>	48,08	1,80	34,33	1,71	0,21	0,15	0,25	0,62	13,25
		0,66	0,14	0,82	0,62	0,21	0,07	0,06	0,59	0,46
	<i>Basal (A1-C1)</i>	40,64	0,97	21,07	24,11	0,82	0,18	0,26	1,88	9,89
		6,03	0,28	4,29	11,13	0,32	0,08	0,04	0,65	0,76
	<i>BONC/BONA</i>	45,71	1,54	30,11	8,83	0,40	0,16	0,25	1,02	12,18
		4,82	0,44	6,75	12,23	0,38	0,07	0,05	0,85	1,70

O nível de sílica e alumínio nos perfis de intemperismo da área de Brazlândia (76,96%), de Santo Antônio do Descoberto (SAD/SADS 77,42%; SAD1 75,65%) e da parte superior da mina Bonsucesso (82,41%), exibe uma distribuição homogênea, com desvio padrão máximo de 2,51 para sílica na área de Brazlândia e 2,52 para o alumínio na de Santo Antônio do Descoberto (Tabela VII.10, Figura VII.7 a VII.9, VII.12). Já nos perfis de intemperismo da área de Santa Maria (STA 75,85% e STA1 86,62%), de Sobradinho (SA 74,54% e S 53,27%) e na parte inferior da mina Bonsucesso (61,71%), a distribuição desses elementos não é homogênea, sendo o desvio padrão máximo de 8,93 para sílica e 6,81 para alumínio, ambos da área de Santa Maria (Tabela VII.10, Figura VII.10 a VII.12).

Nota-se que no perfil de intemperismo STA da área de Santa Maria e nos perfis S e SA da área de Sobradinho, os teores de sílica diminuem em direção ao topo dos mesmos, com correspondente aumento do alumínio, destacando-se inversão entre as curvas de sílica e alumínio no perfil STA e no S (Figura VII.10, VII.11). Pode-se observar que os valores

destes elementos estão em consonância com o predomínio de Gibbsita - $\text{Al}(\text{OH})_3$ - na parte superior destas áreas em detrimento à caulinita - $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ (Seção VII.1.1).

Como se verifica, os teores somados de sílica e alumínio superam o valor mínimo (70%) considerado potencial de uma argila pozolânica, exceto o perfil de intemperismo S da área de Sobradinho e a parte inferior da mina Bonsucesso.

A distribuição do ferro na maioria dos perfis de intemperismo das áreas é relativamente homogênea com médias de Fe_2O_3 variando de 1,24% na área de Santo Antônio do Descoberto a 3,42% no perfil SA na área de Sobradinho e desvio padrão máximo de 1,53 no perfil SA da área de Sobradinho e mínimo de 0,22 no perfil SAD1 da área de Santo Antônio do Descoberto (Tabela VII.10). Porém, a distribuição do Fe_2O_3 no perfil de intemperismo S da área de Sobradinho (média de 23,07%) e na parte basal da mina Bonsucesso (média de 24,11%) não é homogênea, apresentando valores de desvio padrão de 14,6 e 11,13, respectivamente. Pode-se observar que os teores de ferro elevados na área de Bonsucesso, principalmente nas amostras BON-A3-BON-A4, e no perfil S da área de Sobradinho, correspondem aos níveis mais ricos em goethita e goethita/hematita, respectivamente (Figura VII.12, Seção VII.1.1).

Nas áreas de Bonsucesso, de Brazlândia e no perfil S da área de Sobradinho, os teores de ferro são mais elevados na base dos perfis de intemperismo (Figura VII.12, VII.7, VII.11). Uma análise da composição química do Fe_2O_3 associada ao MgO , K_2O , SiO_2 e Al_2O_3 ao longo do perfil intempérico da área de Bonsucesso, mostra semelhanças nas curvas do Fe_2O_3 com as de MgO e de K_2O . Destaca-se que há correlação inversa das curvas destes elementos com as de SiO_2 e de Al_2O_3 , ou seja, a redução de Fe_2O_3 , MgO e K_2O é acompanhado pelo aumento de SiO_2 e Al_2O_3 da base para o topo do perfil intempérico (Figura VII.12).

Os teores de Fe_2O_3 observados nos perfis das áreas, associado aos estudos de coloração do cimento (Seção VII.3), demonstraram não haver impedimento para a fabricação de cimento, exceto as argilas do perfil S da área de Sobradinho (23,07%) e as argilas da parte inferior da mina Bonsucesso (24,11%).

A distribuição de magnésio na maioria dos perfis de intemperismo das áreas é homogênea, variando a média de 0,12% no perfil S da área de Sobradinho até a 0,33% no perfil SAD da área de Santo Antônio do Descoberto, com desvio padrão máximo de 0,21 na parte superior da mina Bonsucesso e mínimo 0,05 no perfil STA da área de Santa Maria (Tabela VII.10). Contudo, o perfil de intemperismo STA1 da área de Santa Maria e a parte basal da mina Bonsucesso se mostraram menos homogêneos com média e o desvio padrão de MgO mais elevados: 0,85%/0,32 e 0,82/0,32, respectivamente.

Comparativamente, pode-se observar que os teores de MgO e K_2O são baixos e correlacionáveis, principalmente no perfil STA da área de Santa Maria e no perfil de Brazlândia, secundariamente em Santo Antônio do Descoberto, Sobradinho e Bonsucesso (Figura VII.10, VII.7 a VII.9, VII.11, VII.12), enfatizando-se que o perfil STA1 é o único

em que a correlação de magnésio não ocorre com o potássio, mas com o titânio e com o ferro (Figura VII.10).

Verifica-se que mesmo os maiores teores de MgO identificados, ainda são significativamente inferiores à limitação imposta ao cimento (2,5 a 3,5% de MgO).

Quanto aos álcalis, na média dos perfis, observa-se o predomínio do K₂O sobre o Na₂O em todas as áreas. A distribuição de ambos os elementos na maioria dos perfis de intemperismo das áreas é homogênea, sendo as maiores médias de sódio (0,35%) e de potássio (0,49%) encontradas no perfil SAD1 da área de Santo Antônio do Descoberto. O desvio padrão máximo observado é de 0,06 para sódio e de 0,07 para potássio, ambos no perfil SA da área de Sobradinho (Tabela VII.10). No entanto, a distribuição de K₂O no perfil da mina Bonsucesso (média de 1,02%) não é homogênea, apresentando valores de desvio padrão de 0,85.

A relação K₂O/Na₂O é semelhante em quatro áreas, variando de 1,40 em Santo Antônio do Descoberto a 1,52 em Brazlândia. Contudo, esta relação em Bonsucesso é de 4,08 em todo o perfil e de 7,23 na parte inferior em função dos maiores valores de potássio. Desse modo, exceto na parte inferior de Bonsucesso, as curvas de ambos os elementos são correlacionáveis entre si, razão porque se apresenta apenas a distribuição do potássio nas figuras de VII.7 a VII.12.

Os teores de sódio de todas as áreas são substancialmente inferiores ao regido pela norma brasileira (1 a 1,4% de Na₂O), não obstando à fabricação de cimento.

Os níveis de titânio são semelhantes nas áreas, sendo o valor máximo de 2,07% no perfil da área de Brazlândia e o mínimo de 0,97% na parte basal da mina Bonsucesso, com desvio padrão máximo de 0,53 na área de Sobradinho e mínimo de 0,14 na parte inferior da mina Bonsucesso, caracterizando uma distribuição homogênea que, de modo geral, se assemelha à curva do alumínio, exceto na área de Santa Maria (Tabela VII.10, Figura VII.7 a VII.12).

Observa-se que os perfis das áreas de Santa Maria, de Sobradinho e a parte basal da mina Bonsucesso exibem tendência de aumento do teor titânio da base para o topo do perfil de intemperismo (Figura VII.10 a VII.12). Verifica-se que a distribuição de titânio é equivalente à distribuição mineralógica, principalmente o anatásio (TiO₂) nas amostras calcinadas da área de Bonsucesso e de Sobradinho (Tabela VII.9, VII.8).

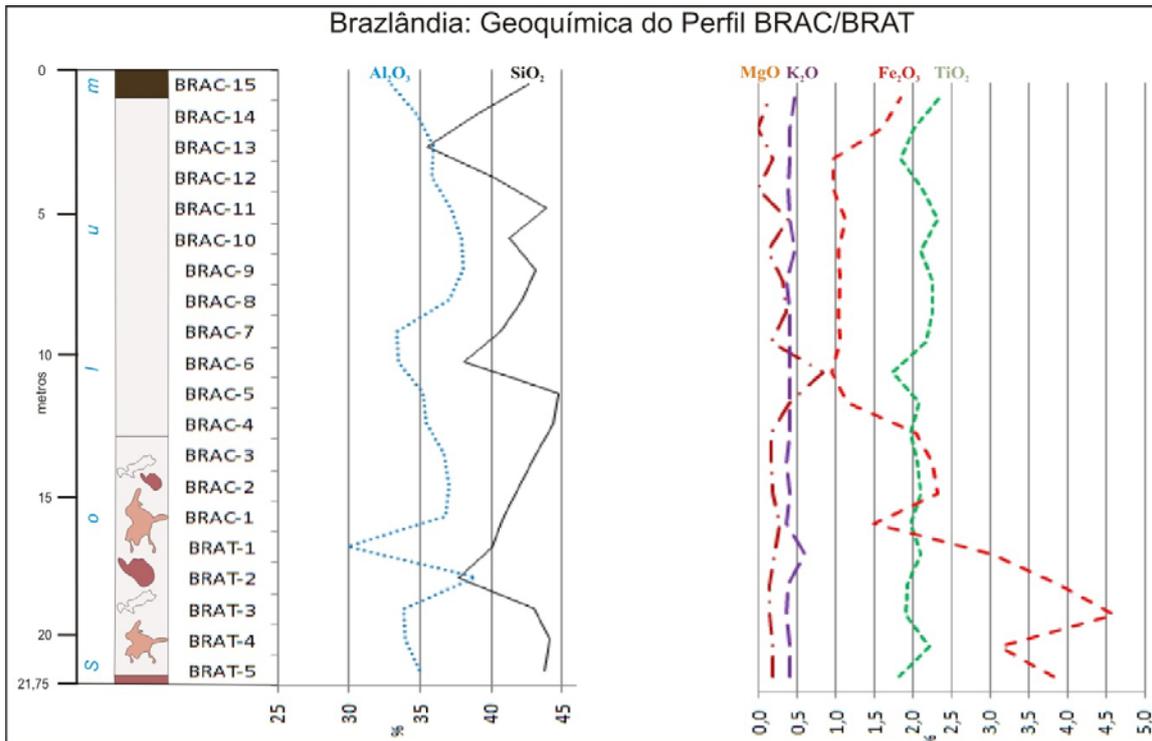


Figura VII.7 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo BRAC/BRAT. Os dados bases utilizados para a construção da Figura podem ser encontrados no anexo 3, Figura A3.1.

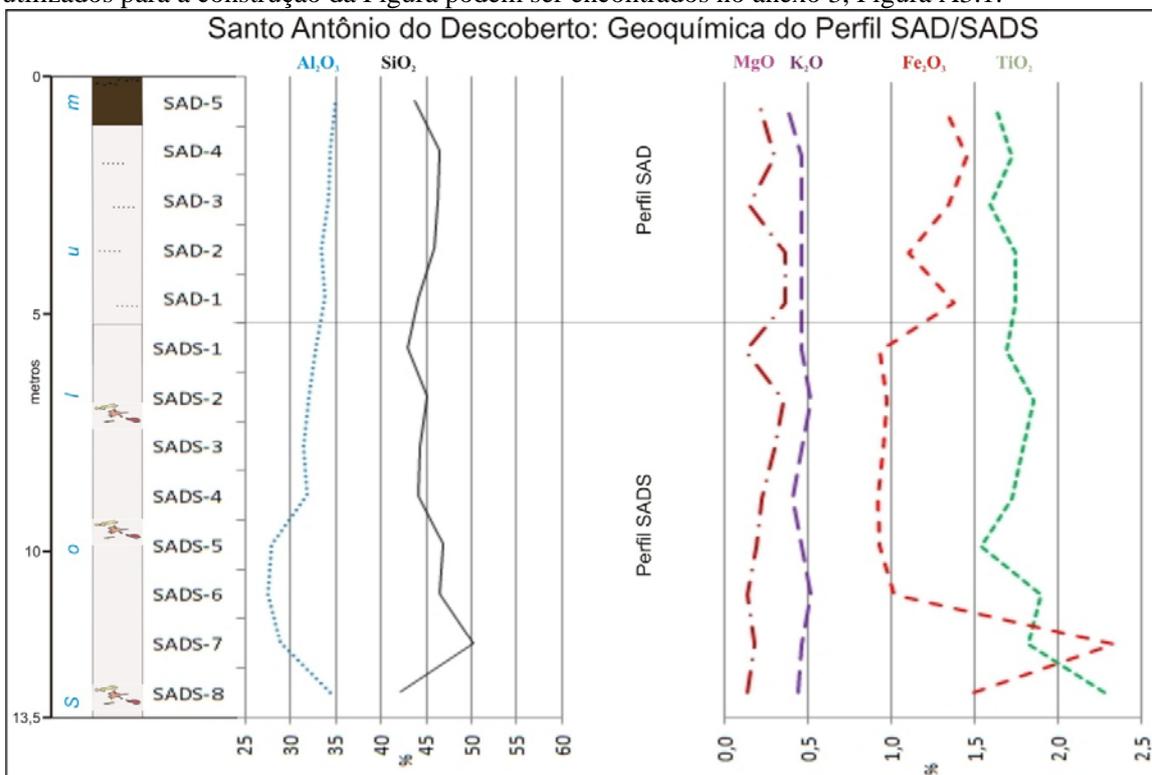


Figura VII.8 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo SAD/SADS. Os dados bases utilizados para a construção da figura podem ser encontrados no anexo 3, Figura A3.2.

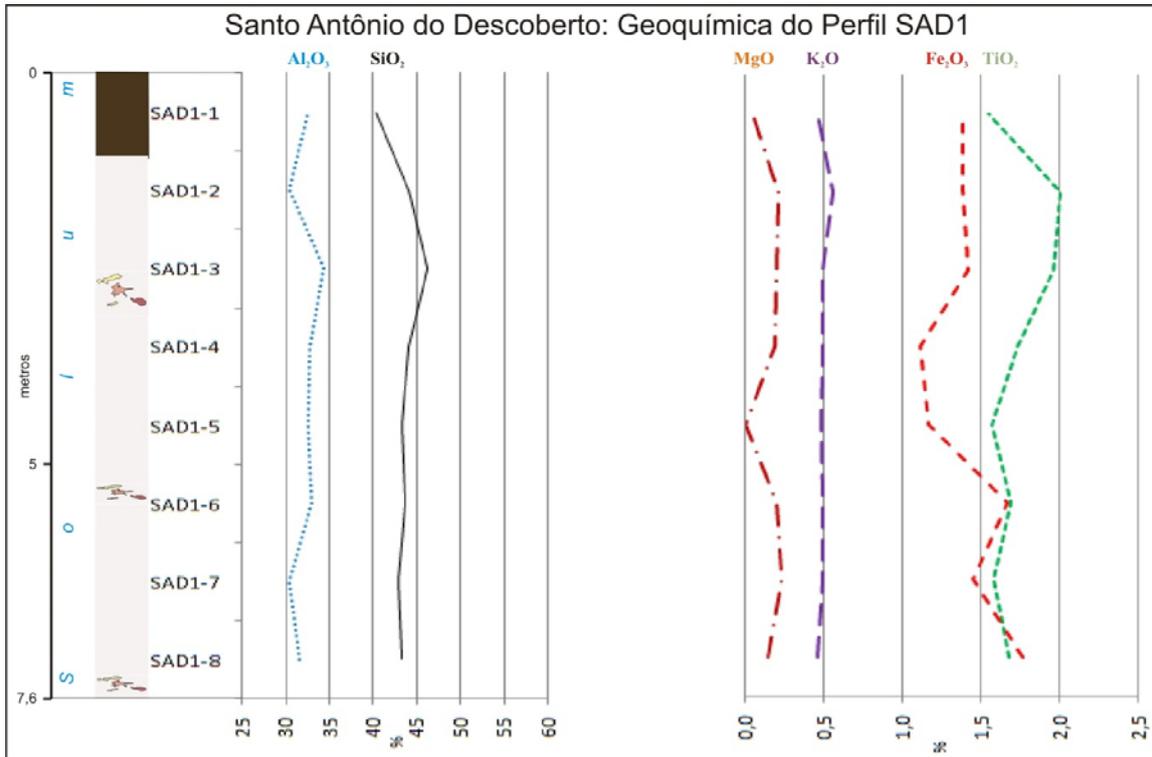


Figura VII.9 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo SAD1. Os dados bases utilizados para a construção da figura podem ser encontrados no anexo 3, Figura A3.3.

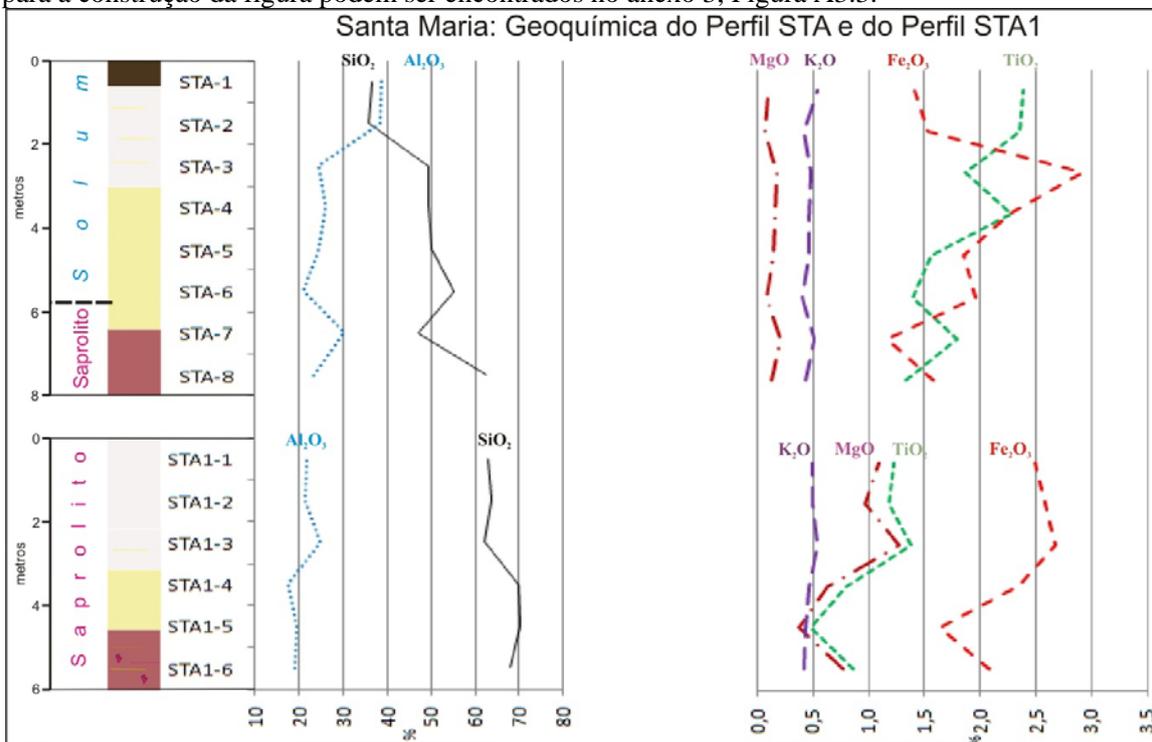


Figura VII.10 – Distribuição geoquímica nos perfis de intemperismo STA e STA1. Os dados bases utilizados para a construção da figura podem ser encontrados no anexo 3, Figura A3.4.

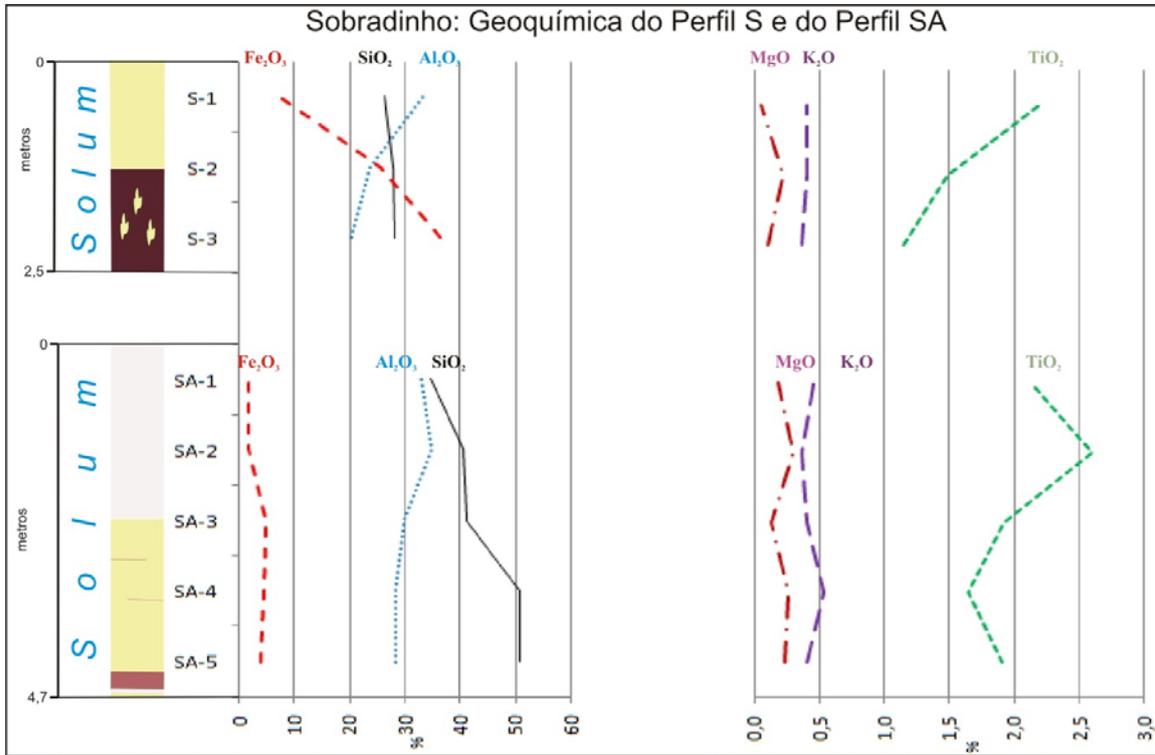


Figura VII.11 – Distribuição geoquímica nos perfis de intemperismo S e SA. Os dados bases utilizados para a construção da figura podem ser encontrados no anexo 3, Figura A3.5.

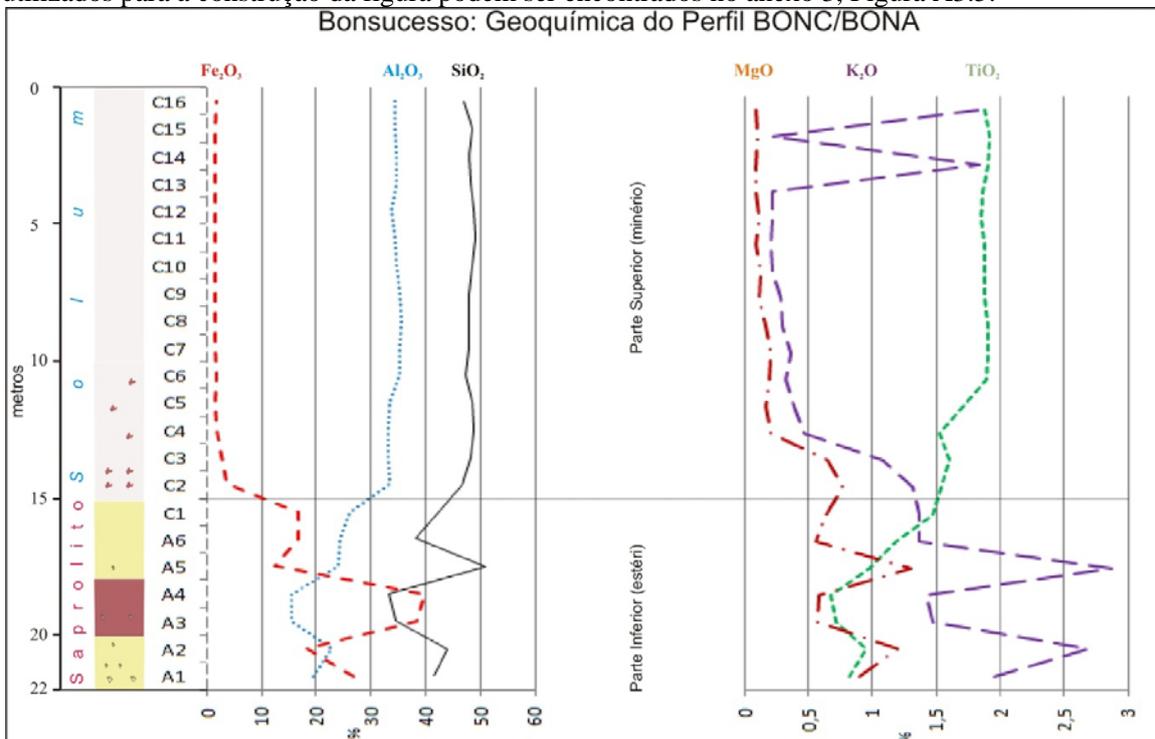


Figura VII.12 – Distribuição geoquímica no perfil de intemperismo BONC/BONA. Os dados bases utilizados para a construção da figura podem ser encontrados no anexo 3, Figura A3.6.

VII.2.1 – Relações entre Geoquímica e Materiais Intempéricos

Neste tópico foram realizados estudos geoquímicos com os materiais intempéricos já examinados mineralogicamente (seção VII.1.1.1), a fim de se ampliar a compreensão do processo de evolução do manto intempérico. Similarmente, verificou-se a relação entre a cor de argilas mosqueadas, a cor de lateritos, a cor de argilo-lateritos e a transição rocha matriz/saprolito com a composição química.

Relação entre Geoquímica e Cor de Argilas Mosqueadas

A Figura VII.13 agrupa os teores dos elementos químicos segundo a cor das argilas (Figura VI.4, VI.8A, VI.9, VII.2). Tomando-se a sequência que inicia na argila vermelha até a bege clara, pode-se verificar a redução gradual do ferro, do sódio e do potássio, caracterizando o processo de lixiviação, com consequente concentração de sílica, de alumínio e de titânio. Comparando-se a análise mineralógica (Figura VII.3) com a geoquímica, nota-se a concordância entre ambas. A argila bege clara exhibe os menores teores de ferro das amostras analisadas, em acordo com a não identificação de goethita e hematita. A argila bege rósea apresenta ligeira diminuição da sílica e alumínio e pequeno aumento no teor do ferro, coadunando-se com a identificação de traço de goethita e hematita. Nas argilas amarela e vermelha os teores mais elevados de ferro encontram correspondência mineralógica com a ocorrência de goethita como constituinte menor.

Desse modo, como verificado nas observações geológicas (Seção VI.1) e mineralógicas (Seção VII.1.1.1), a análise geoquímica confirma o processo de solubilização do ferro a partir da argila vermelha até a bege clara na fase final, causando o gradativo clareamento da argila da mina Brazlândia.

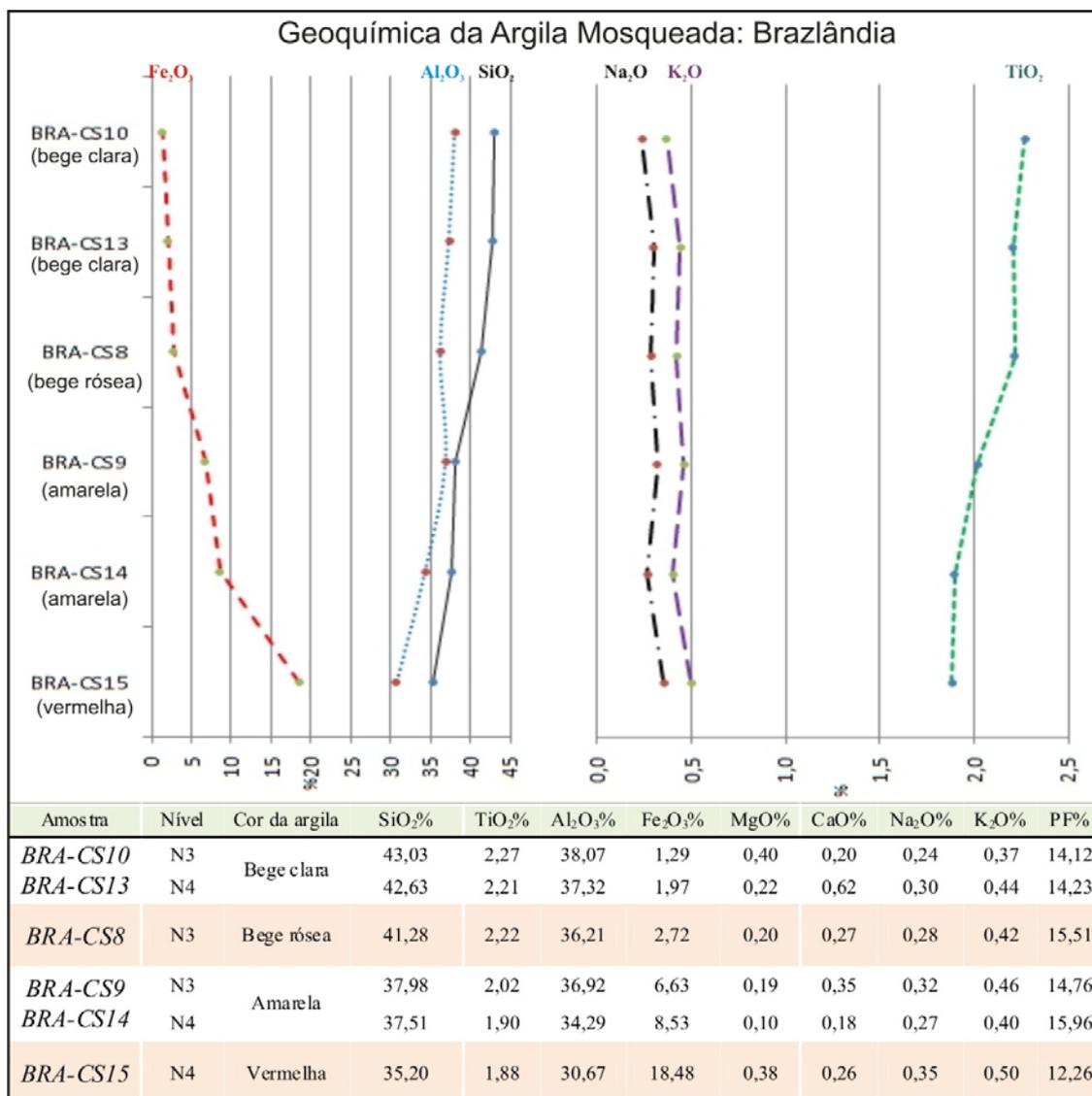


Figura VII.13 – Distribuição geoquímica de argilas mosqueadas em função das cores de argilas da área de Brazlândia, perfil W-E. Observar a redução gradativa de potássio, de sódio e de ferro a partir da argila vermelha em direção à argila bege clara, evidenciando o processo de lixiviação. As amostras podem ser localizadas nas Figuras VI.4 e VI.8A.

Relação entre Geoquímica e Cor de Argilo-Laterito

De acordo com a tabela VII.11, as diferenças significativas observadas são relativas ao ferro, a sílica e ao alumínio da argila amarela, sendo o ferro o de maior teor das três amostras e o inverso com os outros dois elementos, em correspondência com a identificação de goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) como constituinte maior e da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$), como constituinte menor, na porção amarela da amostra (Tabela VII.4).

Este estudo permite ainda analisar a relação que há entre a cor da argila, o teor de ferro e o mineral presente (goethita - $\text{FeO}(\text{OH})$ e hematita - Fe_2O_3). Assim, observa-se que o maior teor de ferro encontra-se na argila amarela mais rica em goethita do que a vermelha. Como demonstrado nos estudos de cores de argilas calcinadas na Seção VII.3, a fase mineral responsável pela coloração vermelha daquelas argilas estudadas é a hematita. No caso em estudo, a hematita foi identificada como traço na argila vermelha e não foi observada na porção amarela, podendo indicar, neste caso específico, que a coloração vermelha estaria vinculada à presença de hematita e não ao maior teor de ferro. Todavia, algumas perguntas necessitariam serem respondidas para posicionamentos conclusivos. Destaca-se: qual o mínimo de hematita necessária para tornar vermelha a argila? Quanto há de ferro amorfo nas amostras? Qual a influência dele na coloração da argila? Desse modo, para um posicionamento conclusivo seria necessário o aprofundamento no estudo que o presente trabalho não tem como objetivo fundamental.

Tabela VII.11 – Geoquímica de argilo-laterito localizada na porção leste da área de Brazlândia, perfil W-E. As amostras podem ser localizadas nas Figuras VI.4 e VI.8A.

Argilo-laterito (<i>in natura</i>)	Composição Química - Amostragem Seletiva								
	Área Brazlândia: Perfil W-E								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
BRA-CSI	37,90	1,68	29,81	15,89	0,40	0,50	0,28	0,42	12,66
<i>BRA-CS1A – Vermelha</i>	38,68	1,39	29,28	15,85	0,46	0,37	0,28	0,42	12,60
<i>BRA-CS1B – Amarela</i>	30,64	1,44	25,57	27,30	0,58	0,29	0,28	0,42	12,78

Relação entre Geoquímica e Cor de Laterito

Similarmente ao argilo-laterito, as diferenças observadas no laterito dizem respeito, principalmente ao ferro, cuja porção preta ferruginosa é cerca de duas vezes mais rica neste elemento do que na porção amarelo-vermelha. Observa-se que os dados geoquímicos diferem da identificação mineralógica, que mostrou distribuição equivalente de goethita e hematita em ambas as amostras, possivelmente indicando a presença de ferro amorfo não identificável por DRX. Igualmente, a sílica e o alumínio têm teores maiores na porção amarelo-vermelha, em concordância com a mineralogia (Figura VII.5). Estes dados indicam um processo de concentração de ferro na porção ferruginosa.

Tabela VII.12 – Geoquímica de laterito localizado na porção mais elevada da área de Brazlândia, perfil W-E. As amostras podem ser localizadas nas Figuras VI.4 e VI.8A.

Laterito (<i>in natura</i>)	Composição Química - Amostragem Seletiva								
	Área Brazlândia: Perfil W-E								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
BRA-CS2	19,00	1,10	18,33	47,40	0,31	0,30	0,28	0,42	12,83
<i>BRA-CS2A – Amarelo-vermelha</i>	29,38	1,23	25,94	27,00	0,43	0,15	0,28	0,42	15,86
<i>BRA-CS2B – Preto ferruginosa</i>	13,85	0,83	14,23	57,09	0,27	0,24	0,28	0,42	12,77

Relação entre Geoquímica e Interface Rocha Matriz/Saprolito

Conforme se verifica na tabela VII.13, os dados geoquímicos, concordando com os dados mineralógicos (Tabela VII.6), não permitem distinguir diferenças significativas entre

as amostras. O teor de ferro maior na amostra contendo remanescentes de rocha matriz está em acordo com os dados mineralógicos.

Os dados mineralógicos e geoquímicos sugerem que as semelhanças entre as amostras seriam decorrentes do mesmo estágio de evolução intempérica, a despeito da preservação de estruturas da rocha matriz, indicando que os aspectos morfológicos macroscópicos da rocha matriz não preservam suas características originais após o intemperismo.

Tabela VII.13 - Geoquímica de muscovita-quartzo-xisto intemperizado da área de Santo Antônio do Descoberto, perfil W-E: amostras SAPWE-127rocha e SADPWE-127-argila, com e sem estruturas da rocha matriz, respectivamente. As amostras podem ser localizadas na Figura VI.12.

Laterito (<i>in natura</i>)	Composição Química - Amostragem Seletiva Área Santo Antônio do Descoberto: Perfil W-E					
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	PF%
SADPWE-127rocha	52,09	0,80	30,54	3,38	1,24	11,94
SADPWE-127argila	52,22	1,78	32,21	2,30	0,41	11,05

VII.3 – Coloração do Cimento

As argilas calcinadas foram utilizadas nos ensaios de difração de raios-X, na determinação de atividade pozolânica e na interpretação de restrição de cor na produção de cimento. Este tópico trata dos reflexos que a cor da argila calcinada impõe ao cimento pozolânico produzido a partir dela.

Nesta tese, o critério baseado na cor, para restrição do uso de pozolanas destinadas a cimentos convencionais – normalmente cinza -, leva em conta a cor do cimento sem pozolana, denominado cimento de referência, comparado, através de corpos-de-prova, com a cor do cimento com pozolana. Trata-se de avaliação visual preliminar, abalizada pela experiência. Para decisões do uso industrial de pozolanas, as fábricas de cimento normalmente dispõem de instrumentos de medição de cor, precisos, em que, são estabelecidas faixas com limites superiores e inferiores de tonalidades aceitas na cor predominante do cimento.

Pozolanas, cujas cores não satisfaçam os requisitos do cimento convencional, podem ser destinadas à produção de cimentos especiais para atendimento de nichos de mercados próprios, geralmente mais rentáveis.

As Figuras VII.14 a VII.17 apresentam a comparação de cor entre: argila *in natura*; argila calcinada; e corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e argila calcinada. Conforme pode ser observado, há significativas diferenças entre as áreas. A exemplo dessas diferenças se observa que as argilas de coloração amarelada na condição *in natura* podem se tornar avermelhadas após a calcinação. E esta é a principal alteração de cor que ocorre nas argilas, sendo bastante marcante na base do perfil Bonsucesso, na área de Sobradinho, notadamente a base do perfil SA, e em algumas amostras do perfil da área de Brazlândia (Figura VII.17, VII.16, VII.14). A origem dessa mudança de cor é devida à desidratação da

goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) que se transformou em hematita (Fe_2O_3) por meio da calcinação (Seção VII.1.2).

Nota-se, ainda, que a intensidade da cor vermelha tende a refletir a maior proporção de goethita e/ou o maior teor de ferro na amostra. Essa condição está bem ilustrada na área de Bonsucesso nas amostras BON-A3 e BON-A4 (Figura VII.9, VII.12, VII.17). Em algumas amostras, como por exemplo, a BRA-C4 da área de Brazlândia, a argila calcinada tornou-se avermelhada, sem que a goethita tenha sido identificada, mas apenas o Fe_2O_3 (Tabela VII.3, VII.7, VII.14). Isto, provavelmente, se deve às fases amorfas de hidróxido de ferro na amostra ou ainda a não identificação de goethita como constituinte traço em função das reflexões de baixa intensidade (Seção VII.1).

Na área de Santo Antônio do Descoberto (Figura VII.15) as argilas na condição *in natura* têm cor predominantemente bege com níveis avermelhados. Após a calcinação, não foram observadas alterações destas cores para o vermelho, sendo este resultado compatível com a ausência de goethita, não identificada nos perfis verticais daquela área (Tabela VII.5). As demais alterações de cor provocadas pela calcinação das argilas são de pequena variação, não trazendo significativas modificações no aspecto da argila calcinada, podendo-se perceber, inclusive, que há manutenção da cor original da argila *in natura* em diversas amostras calcinadas de todas as áreas.

A influência da cor da argila calcinada sobre o cimento pôde ser avaliada através da moldagem de corpos-de-prova de cimento CP II-F-32 com 35% da argila calcinada (Seção V.2.4.2). Amostras da área de Santo Antônio do Descoberto e da parte médio-superior da mina Bonsucesso mostraram-se como aquelas em que há menor influência da cor da argila sobre o cimento (Figura VII.15, VII.17). Nas amostras da área de Brazlândia o impacto da cor vermelha sobre o cimento não foi expressivo, como verificado em amostras próximo à base do perfil e na amostra de topo do perfil (Figura VII.14).

Nas amostras da base do perfil de Bonsucesso e em amostras da área de Sobradinho, a cor vermelha da argila calcinada é praticamente dominante no resultado final no corpo-de-prova, descaracterizando completamente a cor original do cimento, tornando-as impróprias para a fabricação de cimento portland convencional - cinza (Seção V.2.3, Figura VII.16, VII.17). Nas demais áreas o impacto das cores de argilas calcinadas no cimento não se constitui em impedimento para fabricação de cimento convencional.

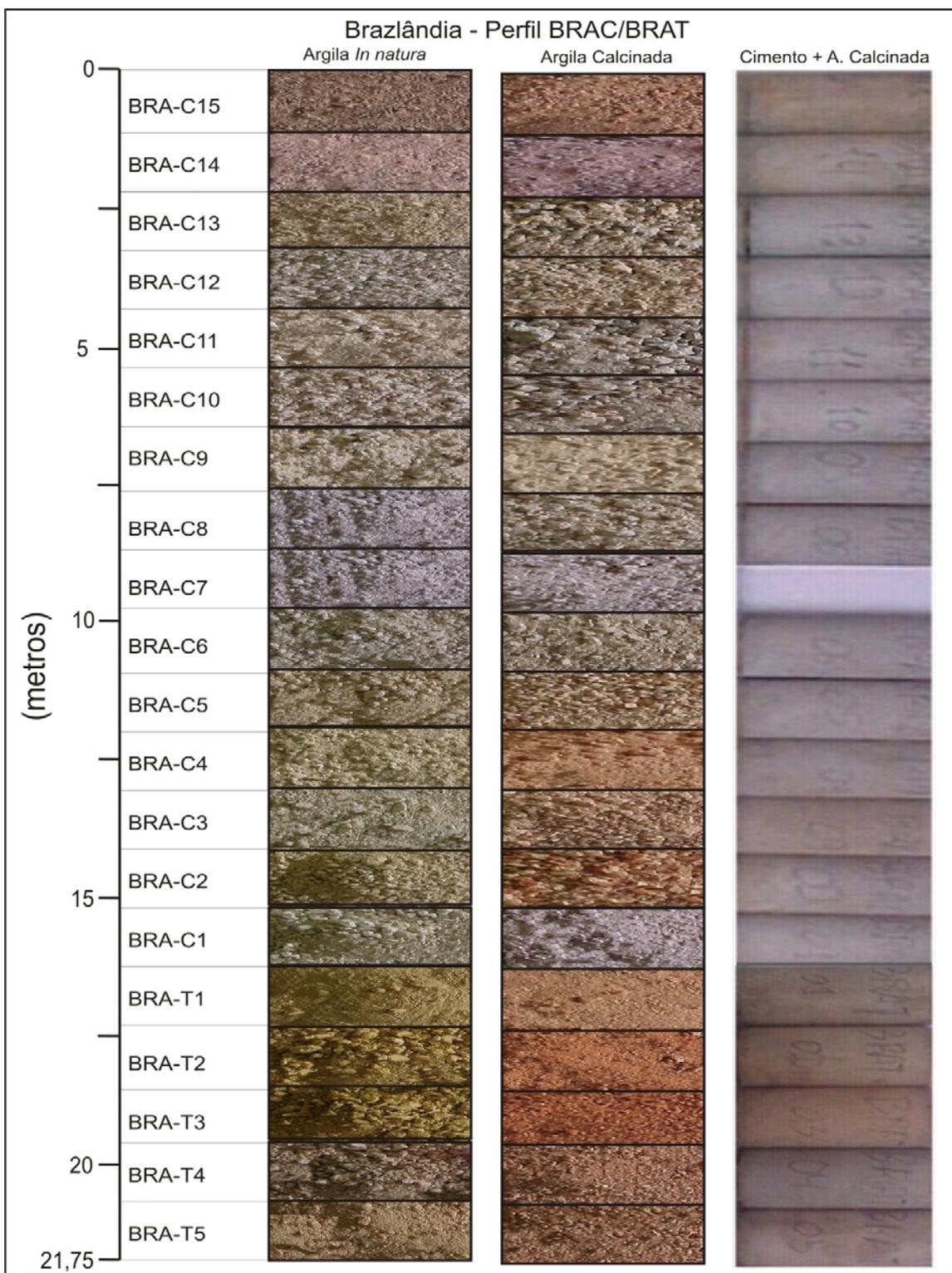


Figura VII.14 – Comparação de cor: argila *in natura*; argila calcinada a 800°C por 30 minutos; e corpos-de-prova moldados com cimento CP II- F-32 e 35% da argila calcinada. O corpo-de-prova da amostra BRA-C7 foi destruído. A comparação dos corpos-de-prova com o corpo-de-prova do cimento de referência encontra-se no anexo 5, Figura A5.1.

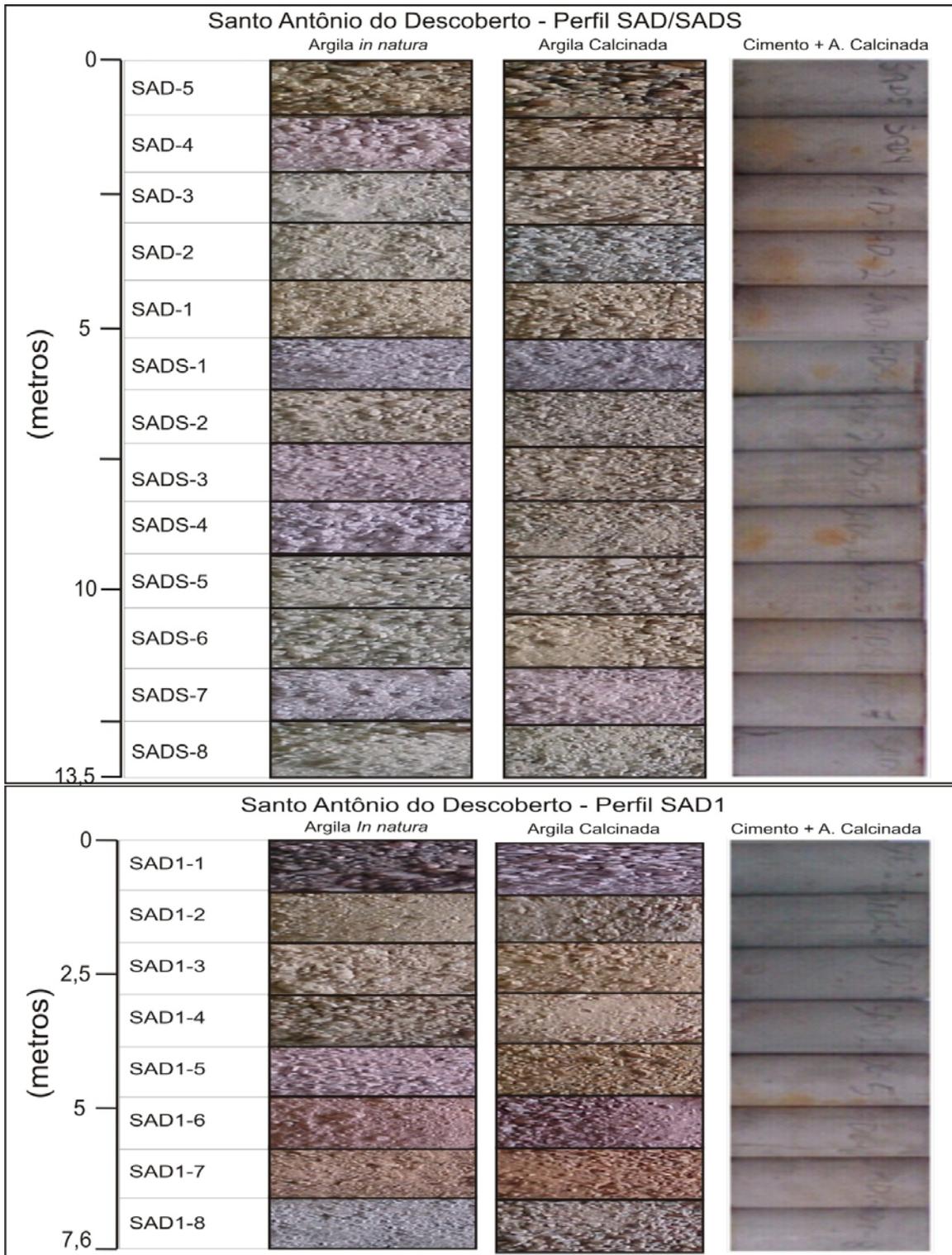


Figura VII.15 – Comparação de cor: argila *in natura*; argila calcinada a 800°C por 30 minutos; e corpos-de-prova moldados com cimento CP II- F-32 e 35% da argila calcinada. A comparação dos corpos-de-prova com o corpo-de-prova do cimento de referência encontra-se no anexo 5, Figura A5.2.

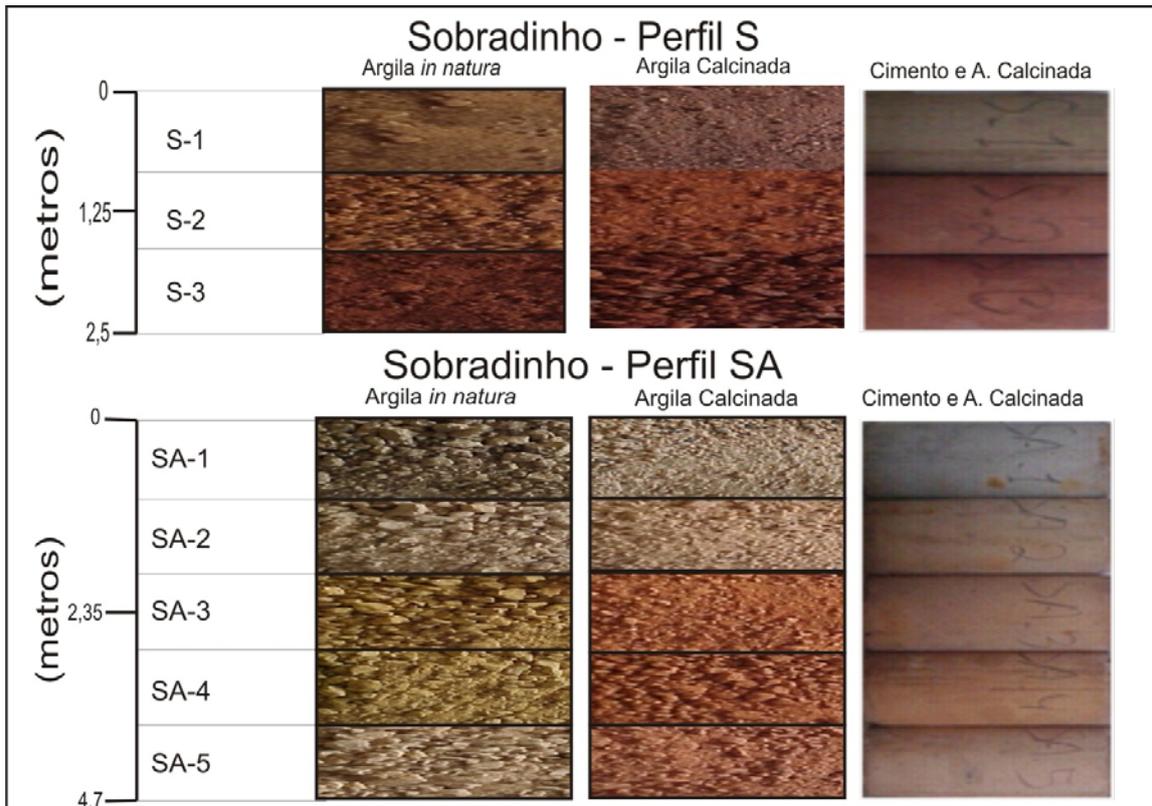


Figura VII.16 – Comparação de cor: argila *in natura*; argila calcinada a 800°C por 30 minutos; e corpos-de-prova moldados com cimento CP II- F-32 e 35% da argila calcinada. A comparação dos corpos-de-prova com o corpo-de-prova do cimento de referência encontra-se no anexo 5, Figura A5.3.

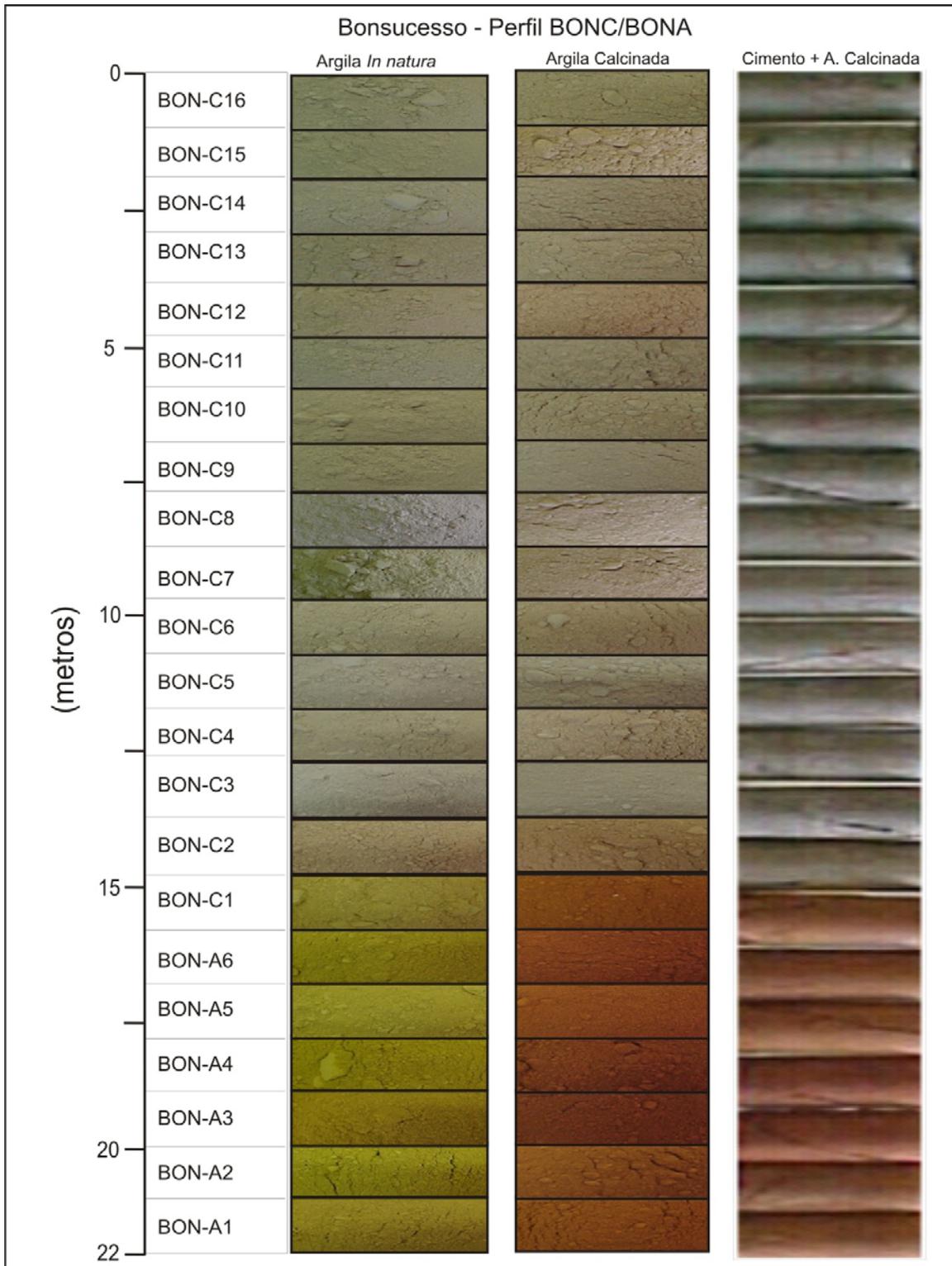


Figura VII.17 – Comparação de cor: argila *in natura*; argila calcificada a 800°C por 30 minutos; e corpos-de-prova moldados com cimento CP II- F-32 e 35% da argila calcificada. A comparação dos corpos-de-prova com o corpo-de-prova do cimento de referência encontra-se no anexo 5, Figura A5.4.

VII.4 - Atividade Pozolânica

A tabela VII.14 apresenta os resultados de atividade pozolânica média com os respectivos valores de desvio padrão dos perfis das quatro áreas estudadas (Tabela V.8). As Figuras VII.18 a VII.21 exibem a distribuição da atividade pozolânica ao longo dos perfis. Os resultados estão organizados em dois grandes grupos: ensaios com hidróxido de cálcio e ensaios com cimento.

A seguir são apresentadas as análises dos resultados segundo as três formas de medição da atividade pozolânica: hidróxido de cálcio com argila *in natura*; hidróxido de cálcio com argila calcinada; e cimento com argila calcinada. As análises incluem as próprias áreas e a comparação entre elas (Tabela VII.14, VII.15, Figura VII.18 a VII.21).

Tabela VII.14 – Atividade pozolânica média dos perfis das quatro áreas estudadas. O IAP foi obtido aos 28 dias para Bonsucesso e aos 7 dias para as demais áreas (Seção V.2.4.2). O valor de resistência mecânica à compressão do cimento de referência é de 31,0 MPa para Bonsucesso e de 34,3 MPa para as demais áreas. Os dados utilizados na elaboração da tabela podem ser encontrados no anexo 6, Figuras A6.1 a A6.5.

Atividade Pozolânica - Média e Desvio Padrão					
Área de Estudo	Perfil	Ca(OH) ₂ + Argila		Cimento + Argila	
		<i>In natura</i>	Calcinada	Calcinada	
		Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Índice de atividade pozolânica (IAP) (%)
<i>Brazlândia</i>	<i>BRAC/BRAT</i>	1,9	20,7	24,4	71,1
		0,57	2,14	3,74	10,91
<i>Santo Antônio do Descoberto</i>	<i>SAD</i>	1,5	15,8	25,4	74,1
		0,41	1,80	1,17	3,40
	<i>SADS</i>	1,7	19,7	30,6	89,2
		0,53	1,26	1,36	3,96
	<i>SAD/SADS</i>	1,6	18,2	28,6	83,4
		0,49	2,46	2,91	8,49
<i>SADI</i>	3,1	19,5	26,0	75,8	
	0,66	1,95	2,37	6,90	
<i>Sobradinho</i>	<i>S</i>	0,1	5,7	23,6	68,8
		0,11	2,97	4,16	12,14
	<i>SA</i>	0,4	19,1	30,7	89,5
		0,49	2,03	1,80	5,26
<i>Bonsucesso</i>	<i>Parte Superior (C2-C16)</i>	1,6	16,0	21,4	69,0
		0,48	1,82	1,38	4,47
	<i>Parte basal (A1-C1)</i>	0,3	8,3	21,6	69,7
		0,32	2,30	2,75	8,86
	<i>BONC/BONA</i>	1,2	13,9	21,5	69,4
		0,74	4,00	1,78	5,74

VII.4.1 - Atividade Pozolânica: Ca(OH)₂ com argila *in natura*

Conforme exigências da norma brasileira NBR 12653/92, a atividade pozolânica com a cal hidratada deve ser maior ou igual a 6 MPa de resistência mecânica à compressão

(RMC) de corpos-de-prova rompidos aos 7 dias (Tabela III.5; Seção V.2.4.1). Os resultados dos ensaios com a argila *in natura* para as áreas estudadas exibiram todos os valores de RMC abaixo de 6 MPa, sendo que o maior valor médio obtido não ultrapassou 3,1 MPa, no perfil SAD1 de Santo Antônio do Descoberto. Estes resultados caracterizam todas as argilas *in natura* como não pozolânicas. Portanto, os dados das áreas estudadas mostram ser desnecessários ensaios da argila *in natura* com cimento, já que não apresentaram atividade pozolânica (Tabela VII.14, VII.18, VII.21).

Apesar de baixos, as distribuições dos valores de RMC de hidróxido de cálcio e argila *in natura* ao longo dos perfis, permitem algumas observações. Conforme Figura VII.18, verifica-se que a distribuição desses resultados de RMC varia entre as diferentes áreas. Nas amostras dos perfis das áreas de Brazlândia e de Bonsucesso há crescimento de RMC da base para o topo, com queda na parte superior. Ao contrário, nas amostras das áreas de Santo Antônio do Descoberto e do perfil SA da área de Sobradinho observa-se redução dos valores de RMC em direção ao topo dos perfis destas áreas. O perfil S da área de Sobradinho praticamente não evidenciou RMC.

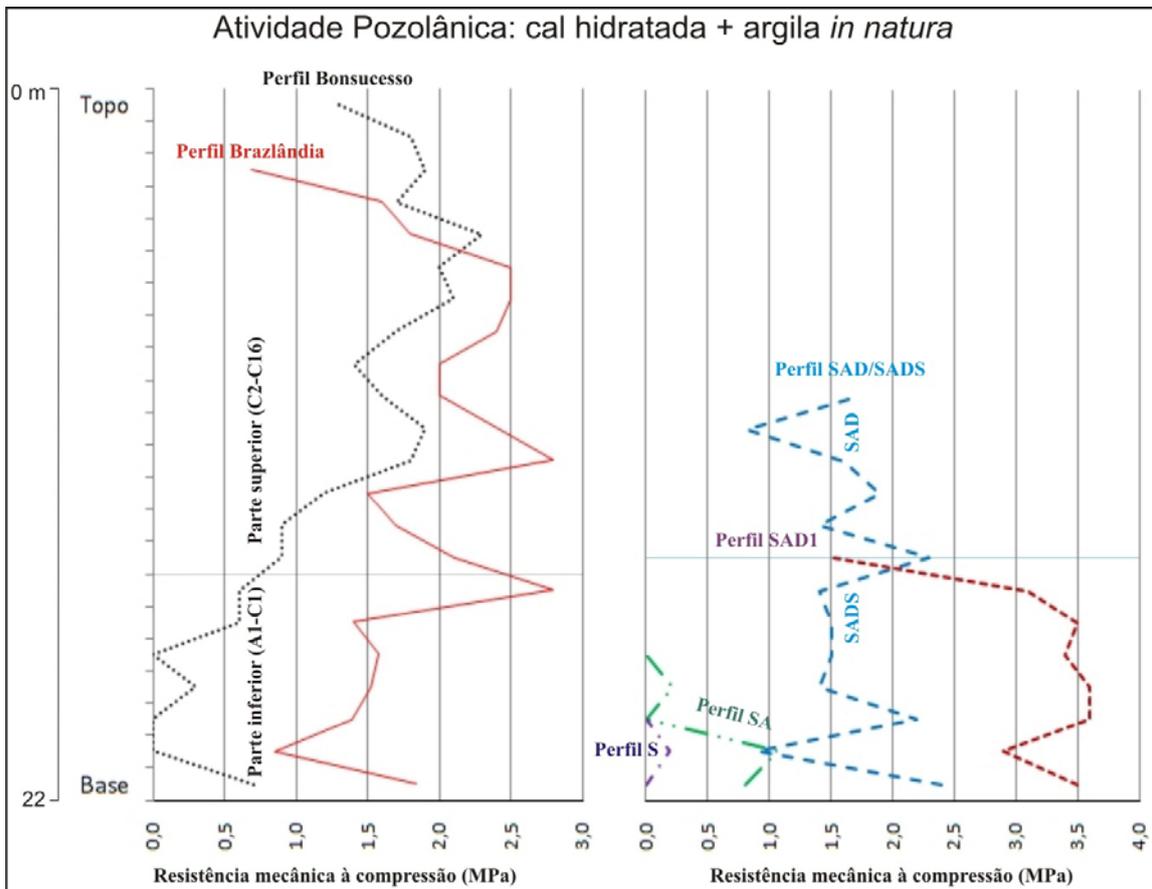


Figura VII.18 – Distribuição da atividade pozolânica de Ca(OH)_2 + argila *in natura* para os perfis: Bonsucesso, Brazlândia, SAD/SADS, SAD1, SA, S. Os dados utilizados na elaboração dos gráficos podem ser encontrados no anexo 6, Figuras A6.1 a A6.5.

De modo geral, os valores de RMC mais elevados estão em acordo com as maiores proporções de caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), provavelmente indicando haver alguma parcela de caulinita e/ou Ilita ($(\text{K},\text{H}_3\text{O})\text{Al}_2\text{Si}_3\text{AlO}_{10}(\text{OH})_2$) estruturalmente desorganizadas, mas suficiente para prover os valores mínimos de RMC encontrados. Valores menores de RMC são observados nas partes superiores do perfil da área de Brazlândia, perfil SAD1 da área de Santo Antônio do Descoberto e o perfil SA da área de Sobradinho, provavelmente devido a presença de Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), mineral de baixa atividade pozolânica (Tabela III.3).

VII.4.2 - Atividade Pozolânica: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ com argila calcinada

As argilas da maioria dos perfis das áreas estudadas, quando calcinadas e submetidas aos ensaios físicos de atividade pozolânica com o hidróxido de cálcio, mostraram valores de RMC muito superiores ao valor mínimo (6 MPa) requerido por norma (Tabela VII.14, Figura VII.19, VII.21). Os valores médios de RMC variaram do mínimo de 13,8 MPa na área de Bonsucesso ao máximo de 20,7 MPa na área de Brazlândia, caracterizando as argilas como pozolânicas de acordo com a NBR 12653/92 (Seção III.5.2). Destaca-se que na área de Santo Antônio do Descoberto o resultado de atividade pozolânica no perfil SAD apresentou valor de RMC (15,8 MPa) significativamente menor do que nos perfis SADS (19,7 MPa) e SAD1 (19,5 MPa).

Apenas o perfil S da área de Sobradinho apresentou valores de RMC inferiores a 6 MPa. A causa do não atingimento do parâmetro de pozolanicidade deveu-se ao maiores teores de ferro presente na goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e na hematita (Fe_2O_3), bem como ao domínio de Gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$), mineral de baixa atividade pozolânica, no topo do perfil (Figura VII.19, VII.21, VII.11, VII.16, Tabela III.3). Também no perfil da área de Bonsucesso há valores menores do que 6 MPa. Todavia estes dados não comprometeram o resultado médio da área (13,9 MPa). Importa destacar que no perfil da área de Bonsucesso os dados que não atingiram o valor normativo restringem-se nos níveis BON-A3-BON-A4, em que o ferro tem seus maiores valores pelo enriquecimento da goethita e proporcional empobrecimento da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) (Figura VII.19, VII.21, VII.12, VII.17, Tabela VII.9).

A distribuição dos valores de RMC obtidos com hidróxido de cálcio e argila calcinada varia entre as diferentes áreas (Figura VII.19). Nas áreas de Brazlândia, de Bonsucesso e nos perfis SAD e SAD1 da área de Santo Antônio do Descoberto há tendência de crescimento de RMC da base para o topo do perfil. No perfil SADS da área de Santo Antônio do Descoberto e na área de Sobradinho praticamente não se verifica tendência definida.

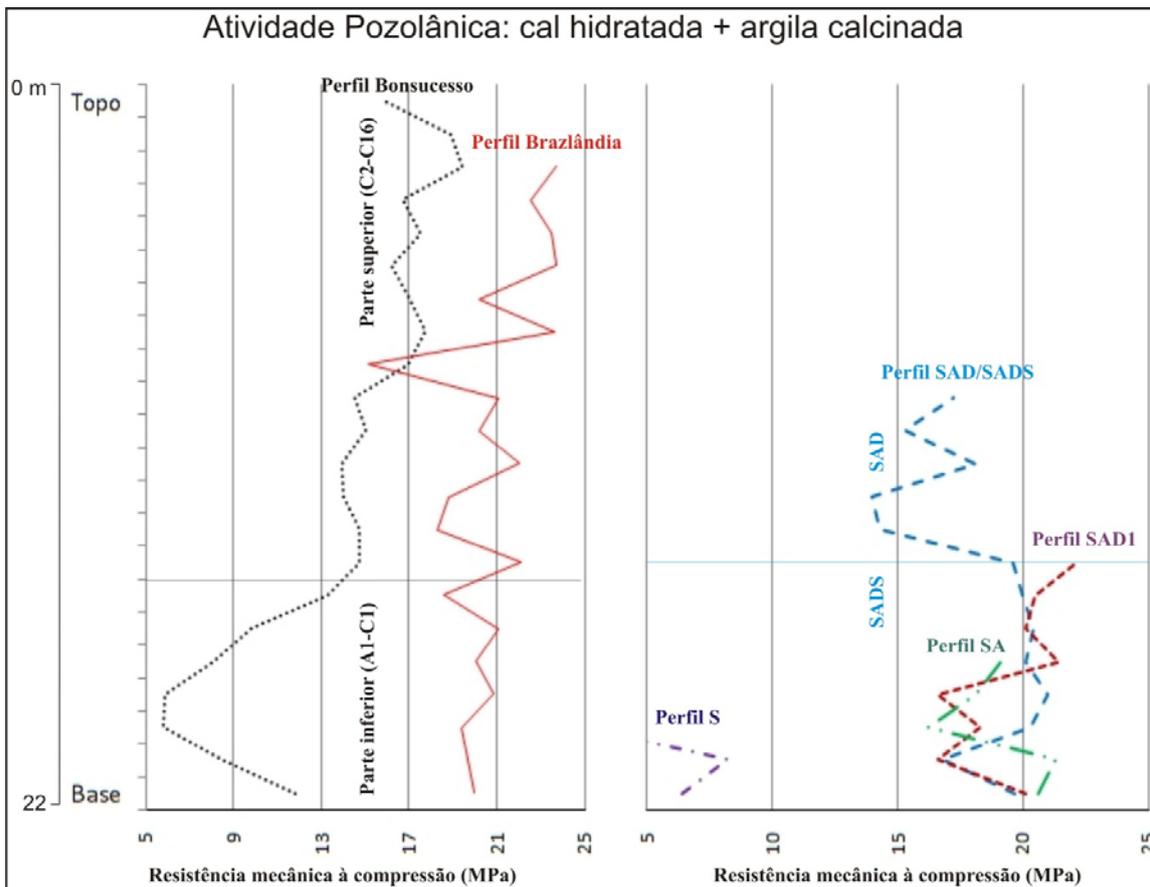


Figura VII.19 – Distribuição da atividade pozolânica de Ca(OH)_2 + argila calcinada para os perfis: Bonsucesso, Brazlândia, SAD/SADS, SAD1, SA, S. Os dados utilizados na elaboração dos gráficos podem ser encontrados no anexo 6, Figuras A6.1 a A6.5.

A tendência de crescimento de RMC em direção ao topo dos perfis está em concordância com o processo evolutivo do manto de intemperismo. No caso das áreas estudadas, o processo de lixiviação proporcionou enriquecimento de caulinita da base para o topo do perfil intempérico. Após a calcinação a caulinita transformou-se na metacaulinita, material amorfo responsável pela atividade pozolânica de argilas pozolânicas cauliníticas. Dessa forma, o crescimento de atividade pozolânica da base para o topo dos perfis de intemperismo, provavelmente deveu-se à maior proporção de metacaulinita em direção ao topo destes perfis.

VII.4.3 - Atividade Pozolânica: cimento com argila calcinada

Os valores médios do índice de atividade pozolânica (IAP) variaram entre as diferentes áreas, sendo o mínimo de 68,8% no perfil S e o máximo de 89,5% no perfil SA, ambos da área de Sobradinho (Tabela VII.14, Figura VII.21). Observa-se que na área de Santo Antônio do Descoberto o resultado de atividade pozolânica no perfil SAD exibiu valor de IAP (74,1%) significativamente menor do que no perfil SADS (89,2%).

A distribuição do IAP não apresentou padrão comum entre as áreas. Mostrou-se praticamente sem tendência definida nos perfis das áreas de Brazlândia e de Bonsucesso; diminuiu da base para o topo nos perfis da área de Santo Antônio do Descoberto e no perfil S da área de Sobradinho; e aumentou da base para o topo do perfil SA da área de Sobradinho (Figura VII.20).

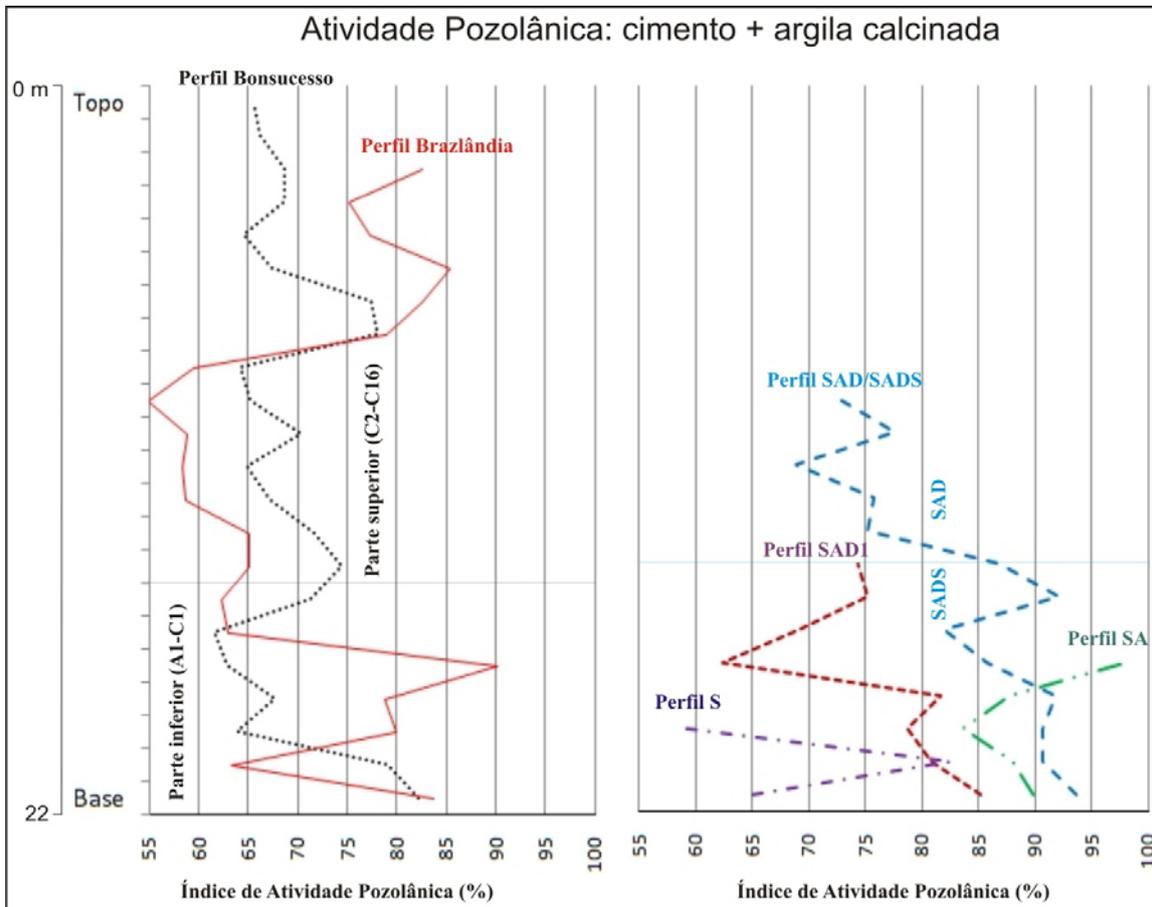


Figura VII.20 – Distribuição da atividade pozolânica de cimento + argila calcinada, expresso pelo IAP, para os perfis: Bonsucesso, Brazlândia, SAD/SADS, SAD1, SA, S. Os dados utilizados na elaboração dos gráficos podem ser encontrados no anexo 6, Figuras A6.1 a A6.5.

Índice de crescimento de RMC (ICR)

A fim de auxiliar na compreensão do significado destes resultados, a tabela VII.15 e a Figura VII.21 comparam os valores de RMC de argilas calcinadas com cal hidratada (RMC1 e B) com aqueles de RMC de argilas calcinadas com cimento (RMC2 e C). Nesta tese, o resultado dado pela relação $RMC2-RMC1/RMC1 \times 100$ é denominado índice de crescimento de resistência mecânica à compressão (ICR).

Observa-se crescimento de RMC em todas as áreas, variando o ICR de 17,9% no perfil da área de Brazlândia até 314,0% no perfil S da área de Sobradinho. Salienta-se a

significativa variação de ICR entre os perfis das áreas e a notável evolução de ICR no perfil S da área de Sobradinho (314,0%) e na parte basal da área de Bonsucesso (160,2%) (Tabela VII.15).

Analisando a distribuição dos valores de RMC1 (B) comparadas com a distribuição dos valores de RMC2 (C) na Figura VII.21, verifica-se que a evolução de ICR ao longo dos perfis, varia da base para o topo na maioria destes perfis. Destaca-se o intervalo formado pelas amostras BRA-C1 a BRA-C9 no perfil da área de Brazlândia. Neste intervalo RMC2 (C) praticamente se sobrepõe à RMC1 (B), inclusive com valores de ICR nulo e negativos (amostras BRA-C7 = 0%, BRA-C6 = -9,2% e BRC-C8 = -10,6%).

Conforme as observações acima, não há correlação direta entre RMC1 e RMC2. Além disso, observa-se que algumas tendências das curvas de evolução de RMC1 não são as mesmas tendências das curvas de evolução de RMC2. Portanto, a explicação utilizada na interpretação de atividade pozolânica com cal hidratada (RMC1) em função do conteúdo de metacaulinita, se torna subordinada e imperceptível na atividade pozolânica com cimento (RMC2). Esta situação decorre, fundamentalmente, da compatibilidade entre pozolana e cimento, pois como se sabe, a combinação de cimento com argila calcinada depende das afinidades entre a pozolana e o cimento utilizado. Enquanto o Ca(OH)_2 é um composto único na reação com a pozolana, o cimento tem uma complexidade muito maior, com uma variedade de compostos químicos e que não pode ser reproduzida pelo hidróxido de cálcio (Seção III.5.2, V.2.4).

Desse modo, observa-se, que, ao contrário dos resultados de atividade pozolânica com cal hidratada (Seção VII.4.2), não há relação entre a atividade pozolânica da argila calcinada com cimento e a maturidade do perfil intempérico, indicando que a combinação dos compostos do cimento (Seção II.2) com os compostos das argilas calcinadas dos perfis, dependem mais das afinidades químicas entre estes compostos do que da maturidade do perfil de alteração.

Tabela VII.15 – Comparação da atividade pozolânica de argila calcinada com cal hidratada (RMC1) versus argila calcinada com cimento (RMC2), expressado pelo índice de crescimento de resistência (ICR). O RMC2 foi obtido aos 28 dias para Bonsucesso e aos 7 dias para as demais áreas (Seção V.2.4.2). Os dados utilizados na elaboração da tabela podem ser encontrados no anexo 6, Figuras A6.1 a A6.5.

Evolução de Resistência Mecânica à Compressão (RMC): Ca(OH) ₂ x Cimento				
Área de Estudo	Perfil	RMC1 Argila Calcinada + Cal (MPa)	RMC2 Argila Calcinada + Cimento (MPa)	Índice de crescimento de RMC (ICR) (RMC2-RMC1)/RMC1 (%)
<i>Brazlândia</i>	<i>BRAC/BRAT</i>	20,7	24,4	17,9
<i>Santo Antônio do Descoberto</i>	<i>SAD</i>	15,8	25,4	60,8
	<i>SADS</i>	19,7	30,6	55,3
	<i>SAD/SADS</i>	18,2	28,6	57,1
	<i>SADI</i>	19,5	26,0	33,3
<i>Sobradinho</i>	<i>S</i>	5,7	23,6	314,0
	<i>SA</i>	19,1	30,7	60,7
<i>Bonsucesso</i>	<i>Parte Superior (C2-C16)</i>	16,0	21,4	33,8
	<i>Parte basal (A1-C1)</i>	8,3	21,6	160,2
	<i>BONC/BONA</i>	13,9	21,5	54,7

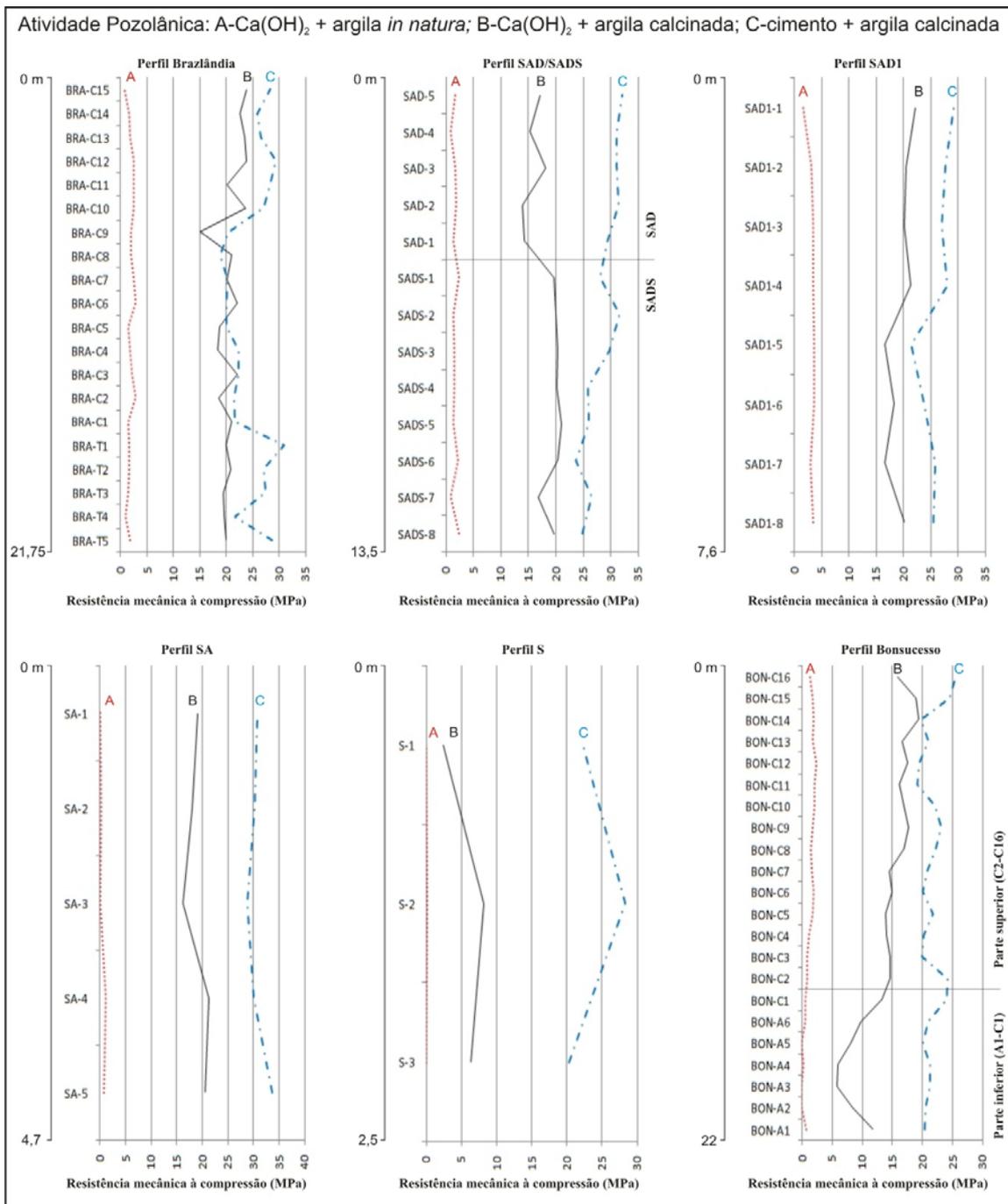


Figura VII.21 – Distribuição da atividade pozolânica ao longo dos perfis, mostrando o expressivo ganho de RMC em todos perfis da argila *in natura* (A) após a calcinação a 800°C por 30 minutos (B). O ganho de RMC é menor de Ca(OH)₂/argila calcinada (B) para Cimento/argila calcinada (C). No perfil da área de Brazlândia (C), destacam-se as amostras BRC-C7, C6 e C8, cujo crescimento de resistência foi nulo ou negativo, 0%, -9,2% e -10,6%, respectivamente. Para cálculo do índice de crescimento de RMC (ICR): B = RMC1; C = RMC2. Os dados utilizados na elaboração dos gráficos podem ser encontrados no anexo 6, Figuras A6.1 a A6.5.

VIII – Discussões

Mantos intempéricos que ocorrem no Distrito Federal e entorno são as fontes de argilas com atividade pozolânica. O estudo destas argilas, a partir de exemplos distribuídos em cinco áreas de ocorrência, abordou aspectos geológicos, mineralógicos, geoquímicos e sua aplicabilidade à indústria cimenteira, levando-se em conta a coloração do cimento e a atividade pozolânica das argilas. Neste capítulo será discutida a evolução intempérica dos mantos de intemperismo, no intuito de se estabelecer um modelo de evolução intempérica. Serão debatidos, ainda, os aspectos referentes à atividade pozolânica das argilas e suas relações com o hidróxido de cálcio e com o cimento.

Evolução Intempérica do Manto de Intemperismo de Argilas Pozolânicas

Não há uma litologia padrão da qual se originou o manto intempérico com material pozolânico, pois o material pozolânico é encontrado, tanto acima dos ritimitos, pelitos e pelito-carbonáticos do Grupo Paranoá, como em filitos e xistos do Grupo Canastra (Faria *et al.*, 1997). As rochas da unidade Metarritimitos argilosos (R4) do Grupo Paranoá são o substrato do manto intempérico das áreas de Brazlândia, de Santa Maria (perfil STA) e de Sobradinho, enquanto que a unidade Pelito-carbonatada do Grupo Paranoá é o substrato para a mina Bonsucesso. Na área de Santo Antônio do Descoberto o manto de intemperismo gerador de argila pozolânica se processou a partir da Litofácies Micaxisto do Grupo Canastra. As áreas de Brazlândia e de Santo Antônio do Descoberto apresentaram as melhores exposições de manto intempérico recobrimdo os metargilitos em Brazlândia e os muscovita-quartzo-xistos em Santo Antônio do Descoberto. Na mina Bonsucesso, estruturas da rocha matriz estão preservadas no saprolito, permitindo identificar o metalamito. Em Sobradinho, cujo perfil de pequena espessura não alcançou a rocha matriz e nem o saprolito, não foi possível tal identificação.

Os perfis da área de Santa Maria apresentaram duas situações distintas. O perfil STA1 exibiu fragmentos da rocha matriz no saprolito, além de exposições da mesma nas adjacências da área, sendo identificado o quartzito como a rocha matriz para a alteração intempérica da base do perfil, enquanto no perfil STA não há remanescentes da rocha matriz. Verificou-se também que a mineralogia (Tabela VII.7) e a geoquímica (Tabela VII.10, Figura VII.10) são distintas para os diferentes perfis. Adicionalmente, ainda que não tenham sido realizados experimentos de medição da atividade pozolânica, a mineralogia indica que a porção mediana do perfil STA – caulinita como constituinte maior -, deve provavelmente ser formada por argilas pozolânicas, enquanto que no perfil STA1, onde o quartzo e a muscovita são os constituintes maiores, o material não deve ser pozolânico. Tais constatações indicam que o perfil Santa Maria é constituído pela intemperização de duas unidades litológicas distintas: Metarritimitos (R4) na parte superior (Seção VI.3) e Quartzitos (Q3) na base. O Metarritimito do perfil STA já foi todo intemperizado e os Quartzitos, tanto no perfil STA1, como a SW da área, continuam sofrendo o processo de intemperização (Figura VI.24).

A despeito das diferenças entre Grupos e unidades a que pertencem as litologias responsáveis pela formação do manto de intemperismo pozolânico das áreas estudadas,

verificou-se que há em comum entre eles a origem sedimentar de rochas constituídas de pelitos.

Os mantos de intemperismo das áreas, formados pela rocha matriz, saprolito e *solum*, foram submetidos a um processo de lixiviação, solubilizando sódio, potássio, cálcio, magnésio, parte da sílica e ferro, este último caracterizando o processo de desferrificação dos perfis, permanecendo alumínio, parte da sílica e titânio na fase residual. Por meio da reação de hidrólise – monossilatização – sobre a Ilita das áreas Brazlândia e Bonsucesso e sobre a muscovita em Santo Antônio do Descoberto e Santa Maria (perfil STA1), foi produzida a caulinita presente em todas as áreas, não sendo observado este processo em Sobradinho. A caulinita, mineral responsável pela pozolanicidade das argilas presentes na diferentes áreas, foi gerada em dois estágios evolutivos ao longo do processo de maturidade dos perfis. Primeiro formou-se o politipo 1Md no saprolito da parte basal do manto intempérico, coexistindo com Ilita ou muscovita. Em um segundo estágio foi formado o politipo 1A localizado na parte superior, dentro do intervalo de *solum* do manto intempérico das áreas. Na transição entre o *solum* e o saprolito da área de Bonsucesso, o politipo da caulinita não é bem definido (Figura VII.1).

Em todas as áreas, exceto Bonsucesso, ocorreu alitização, produzindo Gibbsita a partir da dessilicatação de caulinita. A ausência de Gibbsita na área de Bonsucesso poderia indicar maior disponibilidade de sílica com a conseqüente menor proporção de alumínio durante o processo intempérico, explicando o não aparecimento de Gibbsita. A ausência de Gibbsita na área de Bonsucesso poderia, ainda, ser devida a um processo de intemperismo menos intenso (Guimarães, 2009). Além destas possibilidades, estudos complementares poderiam revelar uma terceira, em que processos erosivos mais acentuados poderiam ter removido a parte superior portadora de Gibbsita. Ao contrário da área de Bonsucesso, nos perfis STA da área de Santa Maria e S de Sobradinho, o processo de alitização alcançou o estágio mais avançado de dessilicatação de caulinita das áreas estudadas (Tabela VII.7, Figura VII.10).

Como resultado do processo de lixiviação de diversos elementos químicos, houve concentração de caulinita e Gibbsita nas partes superiores dos perfis intempéricos que, combinado com a desferrificação, produziu uma coloração bege-clara dos pacotes de argilas pozolânicas. Este processo pôde ser estudado em detalhe a partir de mantos intempéricos com argilas mosqueadas e homogêneas da área de Brazlândia, através de investigações geológicas, mineralógicas e geoquímicas. Os resultados evidenciaram que a lixiviação alterou a cor original da argila em uma seqüência que vai do vermelho-amarelo para bege róseo até bege claro (Figura VI.9, Seção VII.1.1.1, VII.2.1).

Observou-se que a parte central da área de Brazlândia possui maior espessura de argila bege clara do que nas suas bordas, onde a maior espessura do pacote de argila é mosqueada (Figura VI.8B, VI.18). Estas constatações indicaram que o “clareamento” das argilas, e a conseqüente formação de argila pozolânica, ocorreu da parte central da mina para as suas bordas.

A Figura VIII.1 detalha a região da área de Brazlândia, em que se observa a existência de outras três minas de pozolana a NE da área estudada. Esta observação

evidencia que a direção do maior eixo de avanço do processo de intemperização ocorre ao longo de NE-SW. Estas observações permitem inferir que o pacote de argila pozolânica, provavelmente continuaria a SW da área investigada. No entanto, para confirmação desta assertiva, seria necessário estudar os aspectos geomorfológicos, estruturais e litológicos em termos regionais, a fim de se identificar que controles determinam a formação do pacote pozolânico e sua preservação aos processos erosivos, tarefa que não foi objeto desta tese.

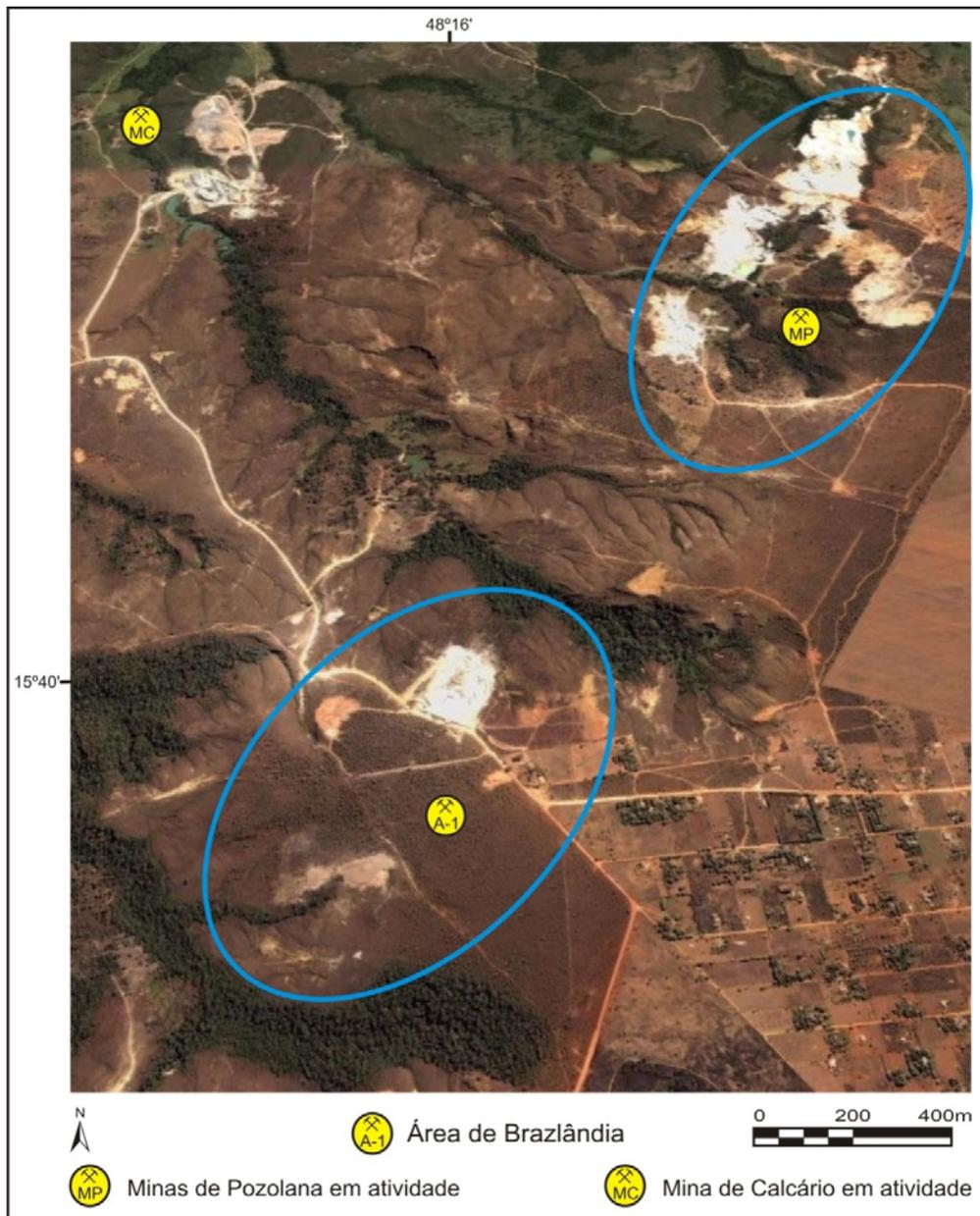


Figura VIII.1 – Detalhe da região da área de Brazlândia, mostrando a área estudada e outras três minas de pozolana, alinhadas segundo NE-SW. A elipse inferior envolve a área de estudo e a parte SW, inferindo-se a continuidade do manto intempérico portador de argila pozolânica nesta última (Adaptado de Google Earth).

Da mesma forma que na área de Brazlândia, na área de Santo Antônio do Descoberto o maior eixo de avanço do processo de intemperização ocorre segundo a direção NE-SW (Figura VIII.2).

Na região de Santo Antônio do Descoberto foi possível observar que o processo de intemperização está avançando de SW para NE, respectivamente C e A na Figura VIII.2, ou seja, o manto de intemperismo tende a ser mais jovem e menos espesso a NE (de B para A) e mais antigo e mais espesso a SW (de B para C). A parte da área representada pelo segmento AB é composta de manto de intemperismo predominantemente amarelo, envolvendo elevações testemunhos de muscovita-quartzo-xisto em processo de intemperização (Figura VI.12). Há exposições de rocha matriz e de saprolito. Na interface rocha matriz/saprolito a mineralogia predominante é constituída por muscovita, quartzo e caulinita 1Md. Na parte representada pelo segmento BC aflora manto de intemperismo bege claro no qual a argila pozolânica está inserida, dentro do intervalo do *solum*. O manto de intemperismo no segmento BC é constituído predominantemente por caulinita 1A, oriunda do processo de monossilicização. A região do ponto C, ocupado por aglomerados urbanos, está além dos limites da área estudada. Todavia, a sequência evolutiva de intemperismo observada acima, permite inferir que aquela porção do manto de intemperismo, provavelmente é formada por argilas pozolânicas mais ricas em Gibbsita, geradas pelo processo de alitização.



Figura VIII.2 - Detalhe da região da área de Santo Antônio do Descoberto. O perímetro demarcado em branco representa o manto de intemperismo, aproximadamente (Adaptado de Google Earth).

Os dados obtidos neste estudo indicaram que as argilas pozolânicas são produtos de evolução intempérica autóctone. Contudo, no perfil SAD/SADS da área de Santo Antônio do Descoberto, há evidências que indicam haver uma massa alóctone que provavelmente teria se movimentado a partir da porção mais elevada no extremo SE da área estudada para NW, assentando-se onde hoje é a mina (Figura VIII.3).

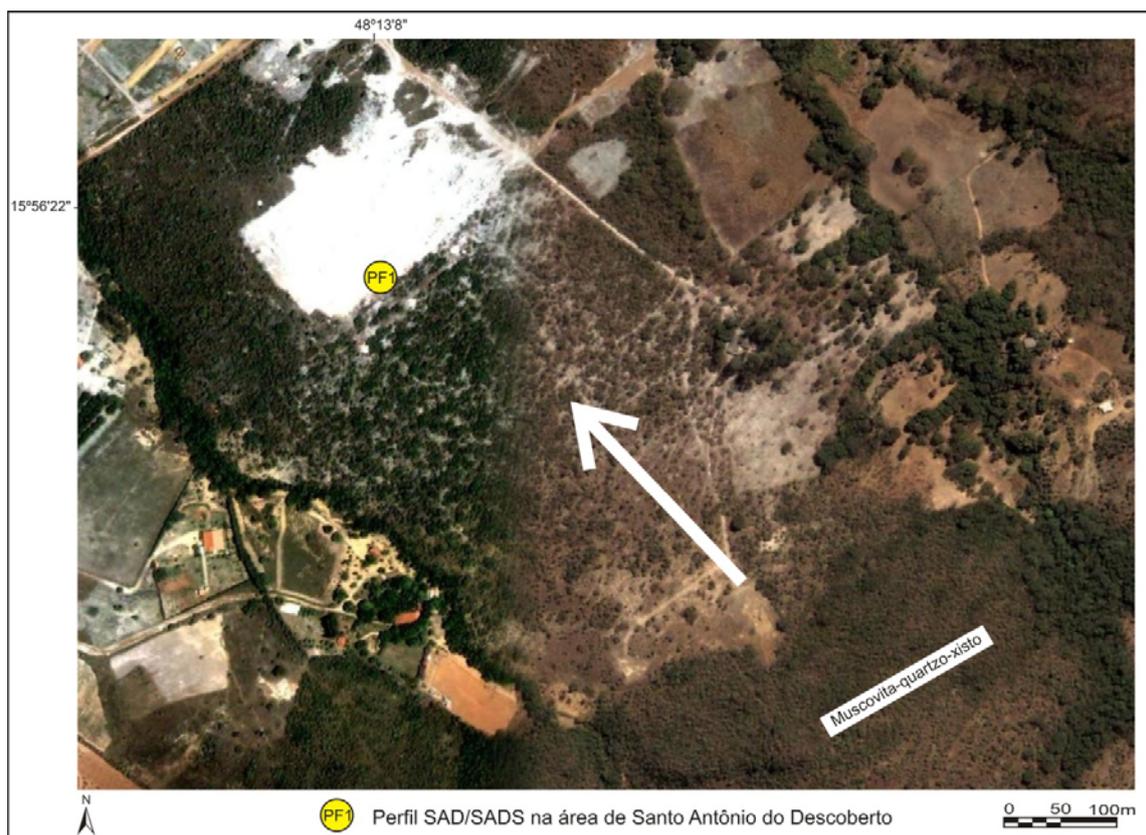


Figura VIII.3 – Detalhe da mina Santo Antônio do Descoberto. A seta mostra provável sentido de aloctonia de parte do manto de intemperismo, ocorrido de SE para NW (Adaptado de Google Earth).

Os elementos indicadores da aloctonia de parte do manto de intemperismo são: descontinuidade mineralógica no contato do perfil SADS e SAD; atividade pozolânica das argilas do perfil SAD discrepante em relação as argilas dos perfis SADS e SAD1; e presença de laterito na porção superior do perfil SAD.

A descontinuidade mineralógica entre o perfil SADS e o perfil SAD é marcada pelo contato de muscovita na base do perfil SAD com o perfil SADS, ausente de muscovita (Tabela VII.5). A presença de muscovita na amostra SAD-1 (Tabela VII.5) é incompatível com uma evolução normal de perfil intempérico autóctone, pois este mineral é um constituinte típico da base de perfis intempéricos mais jovens. Numa sequência normal de evolução intempérica do perfil, seria mais provável concentração gradativa de caulinita ao longo da parte superior do perfil e formação de Gibbsita no topo do mesmo, como

observado no perfil SAD1. Ao contrário, o que se observou ao longo do perfil SAD foi a muscovita transformar-se para Ilita e a Ilita passar, gradativamente, de constituinte menor a constituinte traço ao longo do perfil, caracterizando um processo de maturidade intempérica contínuo e independente da evolução intempérica do SADS. Complementarmente, no perfil SAD foram identificados hematita e rutilo, não encontrados nos outros dois perfis, sugerindo ambientes de evolução intempérica distintos.

Os resultados de atividade pozolânica com hidróxido de cálcio do perfil SAD (Tabela VII.14), quando comparados com os dos perfis SADS e SAD1, apresentaram RMC significativamente menores (15,8 MPa) do que naqueles (19,7 e 19,5 MPa), indicando atividade pozolânica mais compatível com a base de perfis de alteração intempérica do que com a parte superior destes, que tende a exibir valores de RMC superiores em função da maior concentração de caulinita.

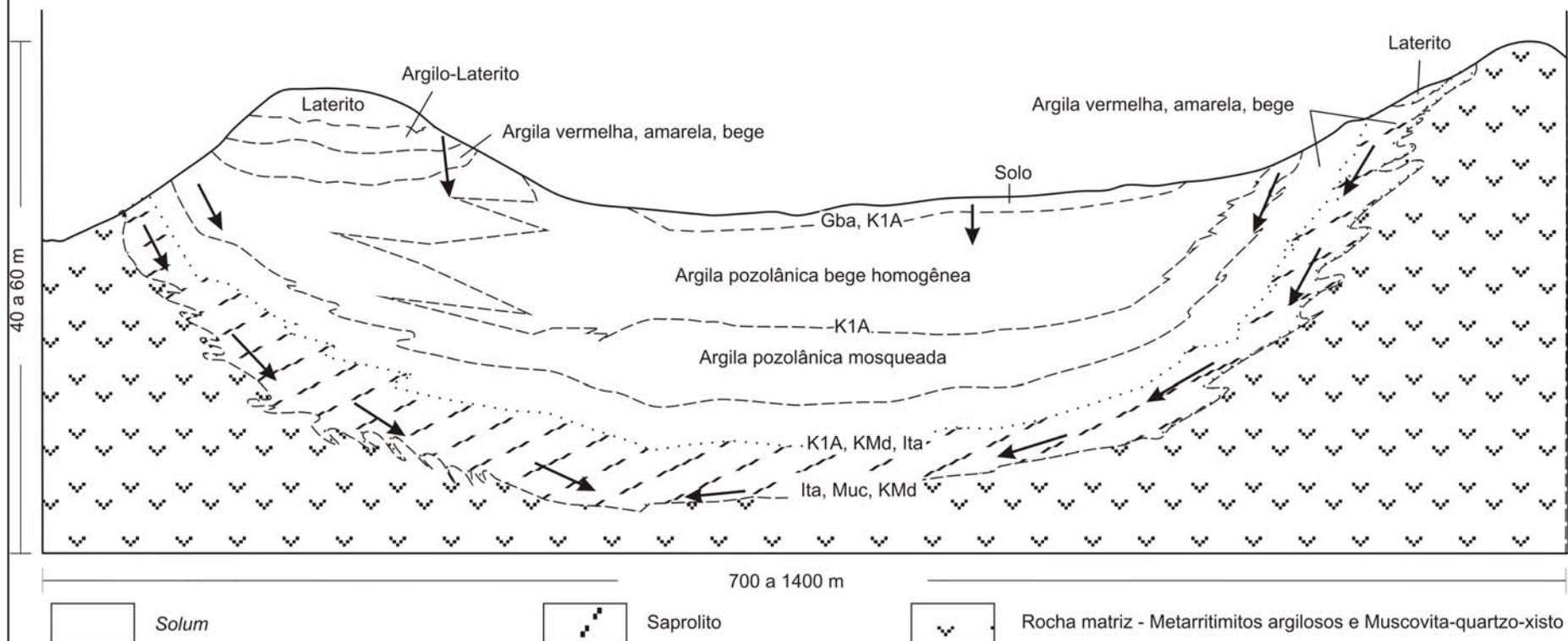
Nas áreas em que há ocorrências de lateritos (Brazlândia, Santo Antônio do Descoberto e Sobradinho), verificou-se que os lateritos se localizam nas suas porções topograficamente mais elevadas (Figura VI.4, VI.8B, VI.12, VI.27, VI.30). O perfil SAD situa-se em parte topograficamente mais baixa (Figura VI.12) e a presença de leitos de laterito neste perfil constituiu-se uma condição atípica (Figura VI.14). Observando-se os leitos centimétricos de laterito existentes no extremo sudeste da área de Santo Antônio do Descoberto (Figura VI.13C), verifica-se que são bastantes semelhantes ao leito laterítico encontrado no perfil SAD (Figura VI.14). Desse modo, a presença de leitos de laterito nas porções topograficamente mais baixas da área de Santo Antônio do Descoberto, poderia indicar que o manto de intemperismo teria se movimentado em direção à parte topograficamente mais baixas (Figura VI.12), reforçando a proposição de aloctonia de parte do manto de intemperismo.

Por fim, se observou que a distribuição de titânio ao longo dos perfis é independente da distribuição do magnésio nos mantos de intemperismo oriundos das unidades Metarritimito e Pelito-carbonatada do Grupo Paranoá e da Litofácies do Grupo Canastra. No manto de intemperismo gerado de quartzitos da unidade Q3 do Grupo Paranoá, há forte correlação entre estes dois elementos e também o ferro (Figura VII.10). Este comportamento geoquímico diferente entre unidades litológicas poderia constituir-se em um critério de identificação da unidade litológica de mantos de alteração sem remanescentes de rocha matriz, sendo necessário, no entanto, estudos de novos perfis de outras áreas, a fim de se verificar se este comportamento se repetiria.

Com base na discussão acima foi elaborado um modelo de evolução intempérica de argilas pozolânicas para o Distrito Federal e entorno (Figura VIII.4). Segundo esta interpretação, o desenvolvimento do manto intempérico, formador de argilas pozolânicas, originou-se a partir de rochas pelíticas constituídas por Ilita ou muscovita, gerando argilas vermelha, amarela e bege do saprolito e da base do *solum*. À medida que o processo evoluiu, as argilas do saprolito tornaram-se argilas mosqueadas e em seguida argilas beges homogêneas, que constituem o pacote predominante de pozolana. No topo do perfil podem ocorrer laterito e argilo-laterito como resultado de variações do lençol freático. A ausência de lateritos poderia indicar que o processo de laterização não teria ocorrido em certas regiões ou, que teria se formado e erodido no processo de dissecação geomorfológica ao

qual estão submetidas as áreas base para a construção do modelo proposto. O processo descrito continuaria ocorrendo no presente.

Modelo de Evolução Intempérica de Argilas Pozolânicas do Distrito Federal e Entorno



As setas indicam o sentido principal do processo de lixiviação que atua sobre Ilita (Ita) ou muscovita (Muc) na base do manto de intemperismo, resultando na solubilização de Na, K, Ca, Mg, Fe e parte de Si e concentração de Si na parte médio-superior e Al no topo do manto de intemperismo. O resultado mineralógico deste processo sobre o manto intempérico é a formação de caulinita 1Md (KMd) na base, caulinita 1A (K1A) na porção médio-superior e Gibbsita (Gba) no topo do manto intempérico. Este processo, combinado com a desferrificação do manto intempérico, produz uma cor bege-claro do manto intempérico na parte centro-superior do perfil, formando a argila pozolânica.

Figura VIII.4 – Modelo construído a partir de estudos geológicos, mineralógicos e geoquímicos de manto de intemperismo autóctone nas áreas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto, de Santa Maria, de Sobradinho e de Bonsucesso. Laterito e argilo-laterito não ocorrem em todas as áreas ou podem variar a espessura; argilas mosqueadas podem não ser observadas por ausência de exposições.

O presente trabalho não desenvolveu estudos do modelo de evolução geomorfológica das regiões pesquisadas, assumindo os estudos anteriores (Braun, 1971; Pentead, 1976, Codeplan 1984, Novaes Pinto, 1994, Martins, 2000), que dão conta de que o processo de intemperização das áreas teria se iniciado no Terciário, gerando espessos perfis de latossolos, com pluviosidade anual superior a 1000 mm e com temperaturas ambientes altas, típicas dos climas intratropicais.

Atividade pozolânica das Argilas

A NBR 12653/92 (Tabela III.5) estabelece, juntamente com outros requisitos químicos e físicos, que uma argila será classificada como pozolana quando: sua atividade pozolânica com cal hidratada (RMC) for maior ou igual a 6 MPa (Seção V.2.4.1); e quando sua atividade pozolânica com cimento (IAP) for no mínimo de 75% (Seção V.2.4.2).

Ambos indicadores, RMC e IAP, medem a combinação dos compostos da pozolana com o hidróxido de cálcio (Seção III.4), sendo que no IAP o hidróxido de cálcio é oriundo do clínquer. No primeiro, o resultado é direto e dado pelo RMC, enquanto no IAP o resultado é obtido pela relação cimento/pozolana e cimento, que expressa o quanto de resistência mecânica a combinação cimento/pozolana atingiu comparada com a resistência mecânica do cimento sem pozolana. Ou seja, um cimento pozolânico de IAP 75% indica que a combinação pozolana/cimento atingiu 75% da resistência mecânica do cimento sem pozolana.

Baseando-se na atividade pozolânica medida com cal hidratada (RMC), somente as argilas do perfil S de Sobradinho (5,7 MPa) seriam consideradas como não pozolânicas, enquanto que pela atividade pozolânica medida com cimento (IAP) as argilas das áreas Brazlândia (71,1%), dos perfis SAD (74,1%) e S (68,8%) e de Bonsucesso (69,4%), seriam consideradas como não pozolânicas (Tabela VII.14). A aplicação conjunta dos dois critérios (RMC e IAP) revelou dupla atividade não pozolânica, apenas no perfil S da área de Sobradinho. Considerando que as áreas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto (SAD) e de Bonsucesso são minas em atividade que vêm suprindo as plantas de cimento da região desde 2002, a restrição imposta pelo indicador IAP se mostra incompatível com a realidade.

Este problema foi verificado no estudo da área Bonsucesso, chegando-se a conclusão de que o IAP deveria ser tomado como um referencial e não como um parâmetro de restrição (Lacerda, 2005). No estudo das áreas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto e de Sobradinho, esta tese, para o cálculo do IAP, adotou a medição da resistência da argila com cimento, aos 7 dias, e não, aos 28 dias, conforme NBR 5752/92, a fim de se permitir comparar os resultados de resistência mecânica na mesma base, ou seja, rompimentos aos 7 dias para ambos os experimentos: argila calcinada com cal hidratada e argila calcinada com cimento (Seção V.2.4.2 e V.2.4.1).

Poder-se-ia tentar atribuir parte da incompatibilidade observada como sendo função do rompimento dos corpos-de-prova aos 7 dias e não aos 28 dias. Com tal procedimento haveria menor liberação de Ca(OH)_2 durante as reações de hidratação e, portanto, menos Ca(OH)_2 disponível para a reação com a metacaulinita. Contudo, observando-se a curva de

hidratação do cimento (Figura II.3), verifica-se que a região da curva em que há maior liberação de Ca(OH)_2 ocorre entre 10 horas e 3 dias após o início das reações de hidratação. Ao mesmo tempo, verifica-se, também, que após 7 dias há o período de desaceleração das reações, indicando que a contribuição de Ca(OH)_2 torna-se significativamente menor. Além disso, os resultados em Bonsucesso (rompimento dos corpos-de-prova aos 28 dias) apresentam as características equivalentes às das demais áreas (rompimento dos corpos-de-prova aos 7 dias).

Obviamente, o procedimento acima adotado é apenas de uma tentativa de análise, pois, para um aprofundamento adequado neste tipo de problema, seria necessário, na verdade, medir o quanto de Ca(OH)_2 é liberado nas reações de hidratação do cimento, desde a fase anidra do clínquer até o número de dias estabelecidos para o rompimento dos corpos-de-prova – 7 ou 28. Tal aprofundamento exigiria estudos específicos e amplos e demandaria uma fase posterior do trabalho, um novo projeto.

É importante enfatizar que o RMC leva em conta apenas a influência do hidróxido de cálcio, enquanto o IAP considera a influência do cimento como um todo, muito mais complexo (Seção II.3, II.4, III.5.2, V.2.4). Além disso, não há inter-relação direta entre estes indicadores. Então, a fim de se analisá-los conjuntamente, a tabela VII.15 apresenta a influência do cimento na argila, comparando com a influência da cal hidratada na argila, ambos em bases de resistência mecânica à compressão. Desse modo, observou-se que o índice de crescimento de resistência mecânica à compressão (ICR), devido ao cimento, varia expressivamente entre os perfis das áreas, desde 17,9% em Brazlândia a 314,0% no perfil S da área de Sobradinho.

A influência da afinidade cimento/argila se mostrou tão relevante, que um perfil como o S de Sobradinho, que não foi considerado pozolânico por ambos os critérios (RMC -5,7 MPa e IAP - 68,8%), atingiu, com cimento, valores de resistência mecânica de 23,6 MPa. Comparando-se este valor com os demais perfis, verifica-se que é muito próximo, por exemplo, ao de Brazlândia (24,4 MPa), que é considerada uma pozolana de ótima qualidade pela indústria cimenteira do DF. Por outro lado, se observado o perfil de Brazlândia em detalhe (Figura VII.21), verificar-se-á amostras em que o ICR foi zero ou mesmo negativo (BRA-C7 = 0,0%, BRA-C6 = -9,2%, BRA-C8 = -10,6%).

Ora, como explicar, que uma argila, certificadamente não pozolânica, passe a apresentar resistência mecânica à compressão tão elevada, quando misturada com cimento? Como explicar que um cimento, com valor de resistência mecânica à compressão intrínseco (31,0 MPa), torne a mistura com uma argila, certificadamente pozolânica (20,7 MPa), de menor resistência mecânica à compressão do que a mistura com o próprio cimento, como é o caso da amostra BRA-C8 (RMC com cal 21 MPa; RMC com cimento 18,8 MPa)? Certamente, os maiores valores acusam a extrema afinidade entre a argila e o cimento utilizado no ensaio, enquanto o contrário ocorre nos menores valores. Mas, o que provoca a afinidade ou não afinidade entre certos cimentos com certas pozolanas?

No segundo caso, o hidróxido de cálcio disponibilizado durante as reações de hidratação do cimento teria sido absorvido em reações com outras substâncias, gerando um produto sem qualquer atividade cimentícia (Zampieri, 1989). Esta condição explicaria o

crescimento zero do ICR, mas não elucidaria o decréscimo. Devem ter havido outras reações envolvendo compostos da pozolana que afetaram os componentes do próprio cimento, antes geradores de fases com atividade cimentícia, que teriam sido transformados em fases sem atividade cimentícia. Mas, que componentes mineralógicos e químicos participariam das reações? Por que estas reações ocorreriam? Qual o controle? Como evitá-las? Tendo em vista o enorme potencial de crescimento de resistência observado neste estudo, responder as estas questões, poderia proporcionar expressivas oportunidades de redução de custos de produção para a indústria.

No caso do expoente crescimento de resistência mecânica à compressão, deve ter ocorrido mais do que simplesmente a utilização, pela pozolana, de todo o Ca(OH)_2 liberado pelo clínquer durante as reações de hidratação, uma vez que nos ensaios de RMC, em que há exclusivamente Ca(OH)_2 para a combinação com a pozolana, o valor de RMC alcançado foi apenas de 5,7 MPa contra 23,6 MPa na combinação com cimento. Esta argila, seguramente, forneceu outros compostos químicos que combinaram com certas fases metaestáveis do clínquer (alita, belita, aluminato tricálcico, ferroaluminato tetracálcico), promovendo o aumento de resistência mecânica verificado. Observou-se que as áreas de maiores ICR (Perfil S de Sobradinho e parte basal da área de Bonsucesso) são mais ricas em ferro contidos na goethita/hematita e goethita, respectivamente. Mas, qual a relação entre estes compostos e o cimento? Há outros? Há amorfos? Enfim, reconhecer estes compostos na pozolana; identificar qual fase (ou quais fases) do clínquer está (ão) envolvida (s) nas reações; e compreender os mecanismos que as controlam, poderia, não somente tornar viável o uso de áreas que, pelo critério atual seriam descartadas, mas, principalmente, viabilizar novas áreas pozolânicas, atualmente nem consideradas como potenciais.

Finalmente os estudos indicaram que a atividade pozolânica medida com hidróxido de cálcio e argila calcinada pode ser correlacionada com a maturidade intempérica do perfil, ao passo que tal correlação nem sempre se verifica quando a atividade pozolânica é medida com cimento no lugar do hidróxido de cálcio, indicando que a influência da mineralogia e do quimismo do cimento é expressiva.

IX – Conclusões

A presente tese estudou as áreas de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto, de Santa Maria, de Sobradinho e de Bonsucesso, quanto aos aspectos geológicos, mineralógicos, geoquímicos, de coloração do cimento e de atividade pozolânica, que permitiram extrair conclusões e recomendações sobre o conhecimento de pozolanas no Distrito Federal e entorno e sua utilização industrial.

Evolução Intempérica dos Perfis

As áreas estudadas são produtos intempéricos das unidades Metarritimitos e Pelito-carbonatada do Grupo Paranoá e da Litofácies Micaxisto do Grupo Canastra.

Os perfis estudados configuram mantos de intemperismo típicos, formados por rocha matriz e saprolito na parte inferior e por *solum* na parte superior, que sofreram processo de lixiviação, produzindo principalmente caulinita, Gibbsita a partir de Ilita e muscovita.

Na parte inferior dos perfis há predomínio de caulinita, politipo 1Md, coexistindo com Ilita ou muscovita; ocorre também quartzo, goethita, hematita, rutilo e anatásio, geralmente como constituintes traço ou menor nos perfis intempéricos. Na parte superior há predomínio da caulinita, politipo 1A, juntamente com constituintes menores ou traços de Gibbsita, quartzo, anatásio, rutilo, goethita, hematita e eventualmente traços de Ilita.

A lixiviação dos perfis é bem definida por parâmetros químicos. Há solubilização de sódio, de potássio, de cálcio, de magnésio, de parte da sílica e de ferro, esse último caracterizando um processo de desferrificação. A fase residual é representada por alumínio, parte da sílica e titânio.

Devido à perda de ferro, o processo de lixiviação ao longo dos perfis está alterando a cor da argila em uma sequência que vai do vermelho-amarelo para bege róseo até bege claro, caracterizando zonas de argilas mosqueadas na parte médio inferior dos perfis. O resultado desse processo foi a concentração da caulinita em direção ao topo, formando jazidas de pozolana bege claro.

A caulinita é formada como produto de maturidade intempérica dos perfis por meio de reações de hidrólise – monossilicificação – em dois estágios. O primeiro estágio produziu caulinita 1Md no saprolito a partir de Ilita ou muscovita contidas nos metassedimentos; a segunda etapa transformou o politipo 1Md em politipo 1A no *solum*. A Gibbsita é produzida por alitização na parte superior do *solum*.

Nas áreas de Brazlândia e de Santo Antônio do Descoberto o processo de intemperização avança segundo o eixo maior na direção NE-SW. Em Santo Antônio do Descoberto o sentido de avanço do eixo maior está se dando de SW para NE. Estas constatações forneceram elementos de prospecção, permitindo inferir a continuidade dos pacotes estudados. Além disso, elas abrem caminho para estudos de caráter mais

abrangente a fim de se verificar que controle ou controles são responsáveis pela produção e preservação das pozolanas estudadas, recomendando-se verificar os aspectos geomorfológicos, estruturais e litológicos.

Os dados geológicos obtidos nas cinco áreas estudadas indicaram que os pacotes pozolânicos são autóctones, exceto na porção superior da área de Santo Antônio do Descoberto, onde evidências geológicas, mineralógicas e de atividade pozolânica indicaram tratar-se de uma massa alóctone que teria se deslocado das porções topograficamente mais elevadas a SW da área para a parte mais rebaixada onde se localiza a mina.

Estudos com argilo-laterito em Brazlândia sugeriram que a cor de argilas contendo ferro, é mais dependente da mineralogia do que do teor desse elemento, sendo que o vermelho da argila está associado à ocorrência de hematita, enquanto que o amarelo deve-se a presença de goethita. Recomenda-se estudo complementar quanto ao conteúdo de ferro amorfo e sua influência na cor da argila.

Estudos com laterito na área de Brazlândia evidenciaram que a parte ferruginosa dos lateritos concentra o ferro em cerca de duas vezes mais do que a parte amarelo-vermelho do laterito.

Estudos no manto intempérico formado por rocha matriz e saprolito da área de Santo Antônio do Descoberto, evidenciaram não haver diferenças mineralógicas e geoquímicas significativas entre a argila com remanescentes das estruturas da rocha matriz e argila sem estruturas da rocha matriz. As semelhanças entre as amostras seriam decorrentes do mesmo estágio de evolução intempérica, a despeito da preservação de estruturas da rocha matriz, indicando que os aspectos morfológicos macroscópicos da rocha matriz não preservam suas características originais após o intemperismo.

Sugerem-se estudos futuros em perfis intempéricos de Quartzitos (Q3) de outras áreas, a fim de se comparar com o padrão geoquímico de Mg e Ti observado no perfil STA1 de Santa Maria. A confirmação permitiria a identificação da unidade litológica de mantos intempérico sem remanescentes de rocha matriz, comparados com aqueles das unidades Metarritimitos e Pelito-carbonatada do Grupo Paranoá e da Litofácies Micaxisto do Grupo Canastra, que possuem padrões geoquímicos semelhantes entre si e diferentes do perfil STA1 da área de Santa Maria.

Atividade Pozolânica

A caulinita é o argilomineral responsável pela atividade pozolânica de todas as áreas e, quando calcinada a 800°C por 30 minutos, produziu atividade pozolânica, decorrente do desarranjo estrutural de seu retículo cristalino e conseqüente formação de metacaulinita. De modo geral, a calcinação das argilas, produziu: desaparecimento de caulinita, de goethita, de Gibbssita e de muscovita e formação de hematita por desidratação de goethita, com alteração da argila de amarelo para vermelho, sendo verificado que a maior ou menor intensidade do vermelho tende a refletir a maior ou menor proporção de goethita e/ou de ferro amorfo (?).

Na condição calcinada, as argilas da área de Brazlândia, de Santo Antônio do Descoberto e da parte superior da área de Bonsucesso foram classificadas como pozolânicas sem qualquer restrição. As argilas do perfil SA da área de Sobradinho e a parte basal da área de Bonsucesso foram classificadas como pozolânicas, com restrição de cor, não atendendo aos requisitos necessários à produção de cimento convencional - cinza. Estas pozolanas poderão constituir-se em fontes para produção de cimentos voltados a mercados específicos. As argilas do perfil S da área de Sobradinho foram classificadas como não pozolânicas por não atenderem aos requisitos mínimos de RMC.

Na condição *in natura*, as argilas de todas as áreas foram classificadas como não pozolânicas por não atenderem aos requisitos mínimos de RMC.

As argilas da área de Santa Maria não foram calcinadas e nem avaliadas quanto à atividade pozolânica. Todavia, os dados mineralógicos e geoquímicos permitiram apresentar um prognóstico da classificação. O perfil STA, caulinita como constituinte maior, seria pozolânico, sendo, no entanto, esperados menores valores de RMC em sua parte superior, em função da presença de Gibbsita como constituinte maior, juntamente com a caulinita. O perfil STA1 seria não pozolânico em função de quartzo e muscovita como constituintes maiores.

O RMC de argila calcinada com cal hidratada evidenciou o crescimento da atividade pozolânica com o aumento da maturidade do manto intempérico. Os mesmos ensaios com cimento não mostraram relação entre a atividade pozolânica e a maturidade do perfil, evidenciando a participação dos compostos mineralógicos e químicos do cimento nas reações entre a pozolana e o cimento.

A atividade pozolânica tendeu-se a diminuir no topo dos perfis intempéricos pela presença Gibbsita.

O IAP, “índice de atividade pozolânica com cimento aos 28 dias, em relação ao controle” (NBR 12653/92), não é um parâmetro adequado para classificação de pozolanas em função de variações na compatibilidade cimento/pozolana.

Sugere-se utilizar o IAP como referencial de qualidade da pozolana e não como requisito limitador de qualidade, transformando-o em indicador de acompanhamento, que sinalizaria as incompatibilidades entre cimento e pozolana.

Para classificação de atividade pozolânica de uma argila, considerando os dados obtidos nesta tese, sugere-se uma revisão do índice de atividade pozolânica (IAP), propondo sua substituição pelo índice de crescimento de resistência (ICR), dado pela relação $RMC2-RMC1/RMC1 \times 100$, onde o RMC1 indica a atividade pozolânica da argila com cal e RMC2 a atividade da argila com cimento. O rompimento dos corpos-de-prova deverão ser realizados aos 28 dias, conforme NBR 12653/92. A argila seria considerada pozolânica se o ICR for maior ou igual a zero, mantidos os demais requisitos estabelecidos pela NBR 12653/92.

Prospecção e Utilização de Argilas Pozolânicas

O RMC mostrou ser o único método conclusivo acerca da pozolanidade das argilas e deve ser combinado com a verificação de cor da argila calcinada em função do cimento a ser produzido. Contudo, para prospecção de novas áreas de argilas pozolânicas, a composição mineralógica fornece bons indicativos de pozolanidade potencial, sendo recomendável sua utilização na fase inicial das pesquisas.

São recomendáveis estudos adicionais quanto aos aspectos geomorfológicos, estruturais e litológicos das áreas trabalhadas nesta tese, bem como de outras áreas formadas por argilas pozolânicas, a fim de se identificar e compreender que controles determinam a formação dos mantos intempéricos de argilas pozolânicas e como estes mantos intempéricos são preservados frente aos processos erosivos.

Para a aplicação industrial de pozolanas é recomendável que seja estudada a compatibilidade entre o clínquer produzido pela planta e a pozolana que será utilizada na fabricação de cimento pozolânico. Uma avaliação de custo x benefício poderia justificar alterações nas especificações do clínquer ou, a utilização de outras pozolanas mais compatíveis com o clínquer da planta, a fim de atender ao melhor desempenho de RMC no cimento pozolânico produzido, permitindo redução de custos.

X – Referências Bibliográficas

- Al-Rawas, A. A. & Hago, A. W. 2005. Evaluation of field and laboratory produced burnt clay pozzolans. *Applied Clay Science*, 31: 29-35.
- Ambroise J., Martin-Calle S., Pera J. 1992. Pozzolanic behavior of thermally activated kaolin. In: Malhotra VM, editor. *Proceedings of the Fourth International Conference On Fly Ash, SF, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, vol. 1. Istanbul, Turkey; 1992; p. 731-741.
- Ambroise, J., Murat, M., Pêra, J. 1985. Hydration reaction and hardening of calcined clays and related minerals. V. Extension of the research and general conclusions. *Cement Concrete Res.*, 15: 261-268.
- Ambroise, J., Murat, M., Pêra, J. 1986. Investigations on synthetic binders obtained by middle-temperature thermal dissociation of clay minerals. *Silicates Industries*7(8): 99-107.
- Almeida, F.F.M., 1967. *Origem e Evolução da Plataforma Brasileira*. Rio de Janeiro. DGM/DNPM. (Bol. 241), 36pp.
- Almeida, F.F.M., 1968. Evolução tectônica do Centro-Oeste brasileiro no Proterozóico Superior. *Anais Academia Brasileira de Ciências*, 40: 285-96.
- Almeida, F.F.M., 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, São Paulo, Brasil, 7: 349-364.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y. & Brito Neves, B.B. 1976. The Upper Precambrian of South America. *Bol.IG/USP*, 7: 45-80. São Paulo.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y. & Brito Neves, B.B. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. *Atas 8º Simp. Geol. Nordeste*, Campina Grande, Recife, SBG/NNE, pp. 363-391.
- Andrade Ramos, I. R. 1958. *Folha Geológica do Futuro Distrito Federal. Relatório Anual do Diretor, DNPM-DGM*, 72-73, Rio de Janeiro.
- Araújo Filho, J. O. 1978. The Geology of Pirenópolis – Corumbá de Goiás, Central Brazil: a contribution. 6. *Geowissenschaftliches Lateinamerika, Kolloquium*, Stuttgart, p.7-8.
- Araújo Filho, J. O. 1981. Contribuição à estratigrafia e tectônica da região da Megainflexão dos Pirineus, Goiás Centro-meridional. *Anais I Simpósio Geologia Centro Oeste*, Goiânia, SBG, p. 24-26.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1982. NBR 7214/82: Areia normal para ensaio de cimento.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 9831/91: Cimento Portland destinado à cimentação de poços petrolíferos.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5732/91: Cimento Portland comum.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5733/91: Cimento Portland de alta resistência inicial.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5735/91: Cimento Portland de alto forno.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 5736/91: Cimento Portland pozolânico.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 7215/91: Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão.

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1991. NBR 11578/91: Cimento Portland composto.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5737/92: Cimento Portland resistentes a sulfatos.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5751/92: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cal – Índice de atividade pozolânica com cal, 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5752/92: Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento, 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 12653/92: Materiais pozolânicos, 3p.
- Baeta Jr., J. D. A.; Fogaça, C. C.; Ramos, J.B.; S^o, J. A. G. de; Barbieri, M. 1978. Projeto Manganês no Centro-Sul de Goiás, Relatório Final, VII vol. Goiânia, DNPM, CPRM. 98p.
- Bailey, S. W. 1980. Structures of Layer Silicates. In: Brindley, G. W. & Brown, G. (ed.). Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification. Mineralogical Society, London, pp:2-23.
- Bailey, S. W. 1982. Nomenclature for regular interstratifications. *American Mineralogist*, 67:394-398.
- Barbosa, O. 1955. Guia das excursões do Congresso Brasileiro de Geologia, 9. Águas do Araxá, MG. Sociedade Brasileira de Geologia. Not. 3:3-5. Rio de Janeiro.
- Barbosa, O.; Baptista, M. B.; Braun, O. P. G.; Dyer, R. C. & Cotta, J. C. 1969. Geologia e Inventário dos Recursos Minerais do Projeto Brasília. Relatório Prospec/DNPM Rio de Janeiro – 148p.
- Barbosa, O.; Baptista, M. B.; Braun, O. P. G.; Dyer, R. C.; Cotta, J. C. 1970. Geologia do Triângulo Mineiro. Relatório DNPM/DFPM. Rio de Janeiro. Boletim 136 – 140p.
- Biondi, J. C.; Bartoszek, M. K. & Vanzela, G. A. 2001. Controles Geológicos e Geomorfológicos dos Depósitos de caulim da Bacia de Campo Alegre (SC). *Revista Brasileira de Geociências*, 31:13-20.
- Biondi, J. C.; Santos, E. R. 2004. Depósito de caulim de Tijucas do Sul (Mina Fazendinha, Tijucas do Sul- PR). *Revista Brasileira de Geociências*, 34:243-252.
- Braun, O. P. G. 1968. Contribuição à Estratigrafia do Grupo Bambuí. In: Anais do 22º Congresso Brasileiro de Geologia. Belo Horizonte (MG), p.155-166.
- Braun, O. P. G. 1971. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central, *Revista Brasileira de Geografia*, 32(3):3-39.
- Braun, O. P. G. & Baptista, M. B. 1978. Considerações sobre a Geologia Pré-Cambriana da região Sudeste e parte da região Centro-Oeste do Brasil. Sociedade Brasileira de Geologia. Anais, Publicação Especial nº3, Salvador (BA), p.255-368.
- Brindley, G. W. 1963. Crystallographic aspects of some decomposition and recrystallization reactions. *Prog. Ceramic. Sci* 3: 3-55.
- Brindley, G. W. 1976. Thermal transformations of clays and layer silicates. *Proc. Intern. Clay Conference 1975*. Applied Publishing Ltd., Wilmette, Illinois. pp. 119-129.
- Brindley, G. W. 1980. Order-Disorder in Clay Mineral Structures. In: G. W. Brindley & G. Brown (eds.) *Crystal Structures of Clay Mineral and their X-ray Identification*. Mineral Society, Monograph 5, London, pp.:125-195.
- Brindley, G. W. & Lemaitre, J. 1987. Thermal, oxidation and reduction reactions of

- clay minerals. In A.C.D. Newman (Editor), *Chemistry of Clays Mineralogy* Mineralogical Society. Longman Scientific and Technical.
- Campos Neto, M. C. 1984. Litoestratigrafia, relações estratigráficas e evoluções Paleogeográfica dos Grupos Canastra e Paranoá – Região de Vazante-Lagamar, MG. São Paulo. *Revista Brasileira de Geociências*. 14(2):81-91.
- Campos, T. W. & Souza Santos, H. 1978 – Estudo comparativo das mulitas formadas a partir de haloisita de Capão Bonito e do mineral caulinítico especial de Piedade, Estado de São Paulo. *Cerâmica*; 24: 1-15..
- Carvalho, J. C., Guimarães, E. M., Lima, M. C. & Ribeiro, M. O. 2002. Variação no comportamento térmico de caulinita de uma cobertura superficial no Distrito Federal. XII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. Cobramseg. 537-546.
- Cassedane, J. P. & Cassedane, J. O. 1978. Os estromatólitos globulosos da Fazenda Serra Virgem (Minas Gerais). *RBG, Núcleo São Paulo, Brasil*, 8:219-234.
- Centurione, S.L. 1999. A Mineralização do Clinquer Portland e seus Benefícios Tecnológicos. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 156p.
- Chakchouk, A. Samet, B. & Mnif, T. 2006. Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Sci.* 33: 79-88.
- Chamley, H. 1989. *Clay Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin, 623pp.
- Cloud, P. & Dardenne M. A. 1973. Proterozoic Age of the Bambuí Group in Brazil. *Geology Society American Bulletin*, 84: 1973-1976.
- Codeplan 1984. Atlas do Distrito Federal, GDF, Brasília
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2004. Carta Geológica do Brasil ao Milionésimo. Folhas SD-22 (Goiás), SD-23 (Brasília), SE-22 (Goiânia), SE-23 (Belo Horizonte). Ministério das Minas e Energia. Secretaria de Minas e Metalurgia.
- Dardenne, M. A. 1974. Geologia da região de Vazante (Minas Gerais), Brasil. In: 28º Cong. Bras. Geol., Porto Alegre. SBG. Bol. n° 1. p. 182-195.
- Dardenne, M. A. 1978a. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do São Francisco. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, SBG*, 1: 299-308
- Dardenne, M. A. 1978b. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife, SBG*, 2: 597-610
- Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, V. G.; Milani, C. J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (Eds). *Tectonic Evolution of South América*. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, pp. 231-263.
- Dardenne, M. A. & Campos Neto, M. C. 1976. Geologia da região de Lagamar (Minas Gerais). 29º Congresso Brasileiro de Geologia, Ouro Preto, Resumos. Ouro Preto, SBG, p. 17.
- Dardenne, M. A. & Faria, A., 1985. Estratigrafia do Grupo Paranoá na região de Alto Paraíso – GO. *Anais 2º Simpósio de Geologia do Centro-Oeste. Geologia do Pré-Cambriano, Goiânia – GO. SBG/NCO*, p. 65-71.
- Espejo, M. A.; Vicente, E.; Molina, E. & Barragan, E. 1992. Kaolinite Formation from Feldspars: Study of a Weathering Profile in Gneiss from the Iberian Hercynian Massif. In: *Mineralogica et Petrographica Acta. Mediterranean Clay Meeting*, Vol. XXXV-A. p.209-216.

- Faria, A., 1995. Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Paranoá nas Áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'Aliança – Alto Paraíso de Goiás. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 199p.
- Faria, A. & Dardenne, M. A. 1995. Estratigrafia do Grupo Paranoá na região de Alto Paraíso - São João D'Aliança – GO. Anais V Simpósio de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia – GO. SBG/NCO, p. 75-77.
- Faria, A. & Guimarães, E. M. & Figueiredo, A. N., 1997. Mapa Geológico do Distrito Federal. Escala 1:100.000. Programa Cartas de Síntese e Estudos de Integração Geológica. DNPM-UnB.
- Forrester J. A. 1974. Burnt clay pozzolans. In: Lime and Alternative Cement. Proc. Meeting on Small-Scale Manufacture of Cement Materials. Interned Techol Publ., London, pp. 53-9.
- Fuck, R. A. 1990. Dobramentos neoproterozóicos da margem ocidental do Cráton do São Francisco. Congresso Brasileiro de Geologia 33, SBG, Bol. Resumo, P. 288-289.
- Fuck, R. A. 1994. A faixa Brasília e a compartimentação tectônica na Província Tocantins. Resumos Expandidos. Simpósio de Geologia do Centro Oeste: 184-187.
- Fuck, R. A. & Marini, O. J. 1980. O Grupo Araxá e Unidades Homotaxiais. In Simpósio Cráton do São Francisco e suas faixas marginais. Anais. Sociedade Brasileira de Geologia. Salvador. P. 118-129.
- Fuck, R. A., Jardim de Sá, Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., Pedrosa Soares, A. C., 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do São Francisco: síntese de conhecimentos. In: O Cráton do São Francisco. J. M. L. Dominguez & A. Misi (editores). SBG, SBG/BA, CNPq. p. 161-185.
- Fuck, R. A., Pimentel, M. M. & Del-Rey, J. L. H., 1994. Compartimentação Tectônica da Porção Oriental da Província Tocantins. Congresso Brasileiro de Geologia 38 – Camboriú. Boletim de Resumos Expandidos. Vol. I p. 215-216.
- Goma, F., 1979. El cemento portland y otros aglomerantes. Barcelona, Editores Técnicos Asociados S. A. 232p.
- Gomes, C., 1986. Argilas: o que são e para que servem. Fundação Caloute, 457 p.
- Gomes, C. S. F. & Massa, M. E. 1992. Allophane and Spherulitic halloysite, weathering Products of Trachytic Pumice Fall-outs in the Caldeira Velha area (S. Miguel-Azores). In: Mineralogica et Petrographica Acta. Mediterranean Clay Meeting, Vol. XXXV-A. p.283-288.
- Guimarães, E. M., 1997. Estudos de Proveniência e Diagênese com Ênfase na Caracterização dos Filossilicatos dos Grupos Paranoá e Bambuí, na Região de Bezerra-Cabeceiras (GO). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 270p.
- Guimarães, E. M., 2009. Kaolinite and Gibbsite from sub-tropical soils, Distrito Federal, Brazil. XIV International Clay Conference, Castellana Marina, Italy. Book of abstracts, Volume 1, p514.
- He, C., Makovicky, E. & Osbaeck, B. 1994. Thermal stability and pozzolanic activity of calcined illite. Applied. Clay Sci., 9: 337-354.
- He, C., Osbaeck, B., Makovicky, E. 1995. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: activation, reactivity, assessments and technological effects. Cement and Concrete Research. 25:1691-1702.
- Hower, J. & Mowatt, T.C. 1996. The mineralogy of illites and mixed-layer illite-montmorillonites. *American Mineralogist*, **51**:825-854.

- ICDD. 1996. International Centre for Diffraction Data – Powder Diffraction File. Pennsylvania, U.S.A., CD-ROM.
- Indian Standards Institution (IS). 1968. Specification for burnt clay pozzolan; IS 1344. New Delhi.
- Kihara, Y.; Battagin, A. F.; Zampieri, V. A.; Centurione, S. L. & Pecchio, M. 1990. A microscopia do clínquer portland e seus benefícios tecnológicos. In: ABCP, Congresso Brasileiro de Cimento, 2, São Paulo.
- Kitsopoulos, K. P. & Dunkam, A. C. 1996. Heulandite and mordenite-rich tuffs from Greece: a potential source for pozzolanic materials. *Mineralium Deposita*, 31:576-584.
- Kotschoubey, B.; Duarte, A. L. Z. & Truckenbrodt, W. & Hieronymus, B. 1999. Depósitos de Caolim e Argila Semi-Flint no Nordeste do Pará. *Revista Brasileira de Geociências*, 26:71-80.
- Kotschoubey, B.; Duarte, A. L. Z. & Truckenbrodt, W. 1999. Cobertura Bauxítica e Origem do Caulim do Morro do Felipe, Baixo Rio Jari, Estado do Amapá. *Revista Brasileira de Geociências*, 29:331-338.
- Lacerda, M. L. 2001. Estudo de viabilidade econômica para produção de cimentos pozolânicos na fábrica da Cimento Tocantins S.A.. Sobradinho-DF. Relatório interno ao Grupo Votorantim-Cimentos, 5p.
- Lacerda, M. L. 2005. Estudo da Argila Pozolânica Utilizada na Produção de Cimento: Área Bonsucesso – Região Planaltina-DF. Dissertação de Mestrado. Instituto De Geociências, Univ. de Brasília. 167p
- Lea, F. M. 1970. The chemistry of cement and concrete. 3rd ed. Glasgow, Edward Arnold Pub. Ltda.
- Martins, E. S. 1998. Sistemas pedológicos do Distrito Federal. Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos superficiais do Distrito Federal. Relatório Técnico, Vol. 1, IEMA/UnB, pp. 139-163.
- Martins, E. S. 2000. Petrografia, Mineralogia e Geomorfologia de rególitos lateríticos no Distrito Federal. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 196p.
- Marwan T., Pera J. & Ambroise J. 1992. The action of some aggressive solutions on Portland and calcined laterite blended cement concretes. In: Malhotra VM, editor. Proceedings of the Fourth International Conference On Fly Ash, SF, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, vol. 1. Istanbul, Turkey; 1992; p. 763-779.
- Metha, K. 1987. “Natural Pozzolans.” Supplementary Cementing Materials for Concrete, CANMET-SP-86-8e, Canadian Government Publishing Center, Supply and Services, Ottawa. V1, p.1-33.
- Mielenz, R. C.; Greene, K. T. & Schieltz, N. C. 1951. Natural pozzolans for concrete. *Economic Geology*, 46:311-328.
- Millot, G. 1963. Géologie des Argiles: Altération, Sédimentologie, Géochimie. Ed. Masson et C^{ie}, Paris, 499 pp.
- Montanheiro, T. J. 1999. Prospecção e caracterização de pozolanas na bacia do Paraná, Estado de São Paulo. Instituto de Geociências. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 226 p.
- Moore, D. M. & Reynolds, R. C. 1989. X-Ray Diffraction and the Identification and Analysis of Clay Minerals. Editora Oxford University Press, 332 pp.

- Murray, H. H. 1988. Kaolin Minerals: Their Genesis and Occurrences. In Bailey, S. W. (ed.) *Hydrous Phyllosilicates, Reviews in Mineralogy*, Mineralogical Society of América, pp: 67-89.
- Novaes Pinto M. 1994. Caracterização geomorfológica do Distrito Federal, in: M. Novaes Pinto (org.), *Cerrado: caracterização, Ocupação e Perspectivas*, Editora Universidade de Brasília/SEMATEC, Brasília, cap. 9, p. 285-344.
- Oliveira, M. T. G. de; Furtado, S. M. A.; Formoso, M. L. L.; Schenato, S. 2000. Alteração de rochas vulcânicas ácidas e formação de depósitos de caolim na bacia de Campo Alegre, SC, Brasil – Estudo da Mina Ceramarte. *Geochimica Brasiliensis*; 14:175-190.
- Penteado, M. M. 1976. Tipos de concreções ferruginosas nos compartimentos geomorfológicos do Planalto de Brasília, *Not. Geom.*, 16: 39-43.
- Pimentel, M. M.; Heaman, L. & Fuck, R. A. 1992. Idade do metarriólito da Sequência Maratá, Grupo Araxá-Goiás: Estudo Geocronológico pelos métodos U-Pb em zircão, RB-Sr e Sm-Nd. *Anais da Academia Brasileira. Ci.*, 64(1).
- Pimentel, M. M., Jost, H. & Fuck, R. A. 2004. O Embasamento da Faixa Brasília e o Arco Magmático de Goiás. In Mantesso-Neto, V. et al. (ed) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. p. 355-368.
- Sabir, B. B., Wild, S., Bai, J. 2001. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review. *Cement & Concrete Composites* 23:441-454.
- Salvador S. & Davies T. W. 1994. Modeling of combined heating and dehydroxilation of kaolinite particles during flash calcinations; production of metakaolin. *Processing Adv Mater* 9:128-135.
- Salvador S. 1995. Pozzolanic properties of flash-calcined kaonite: a comparative study with soak-calcined products. *Cement Concrete Res.* 25 (1):102-12.
- Souza Santos, P. 1975. *Tecnologia de argilas*. São Paulo, Edgard Blucher. 2v.
- Strieder, A. J. 1990. Análise estrutural da região de Abadiânia (GO), *Revista Brasileira de Geociências*, 20:239-57.
- Środoń, J. & Erbel, D.D. 1984. Illite. In: S. W. Bailey (ed.) *Micas*. Mineralogical Society of America, *Reviews in Mineralogy*, 13(12):495-544.
- Teixeira, M. A. & Danni, J. C. M. 1978. Contribuição à estratigrafia do Grupo Araxá na região de Passos (MG). *Anais 30. Congresso Brasileiro de Geologia*. Volume 1. Recife. P. 700-710.
- Teixeira, w. & Toledo, m. C. M. & Fairchild, t. R. & Taioli, f. (orgs.). 2009. *Decifrando a Terra*. São Paulo: Oficina de Textos. 568 p.
- Valente, C. R. 1985. Projeto Mapas Metalogenéticos e de Previsão de Recursos Minerais. Folha SE.22-X-B. Goiânia. DNPM/CPRM. 51p.
- Valeriano, M. C., Dardenne, M. A., Fonseca, M. A., Simões, L. S. A. & Seer, H. J. 2004. A Evolução Tectônica da Faixa Brasília. In Mantesso-Neto, V., et al. (ed) *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida*. p. 576-592.
- Weaver, C. E. 1989. *Clays, Muds, and Shales*. Ed. Elsevier, New York, 819 pp.
- Zampieri, V. A. 1989. *Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das pozolanas de argilas calcinadas*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 191 p.

Zampieri, V.A. 1993. Cimento Portland aditivado com pozolanas de argilas calcinadas: fabricação, hidratação e desempenho mecânico. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 233 p.

Anexos

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Brazlândia

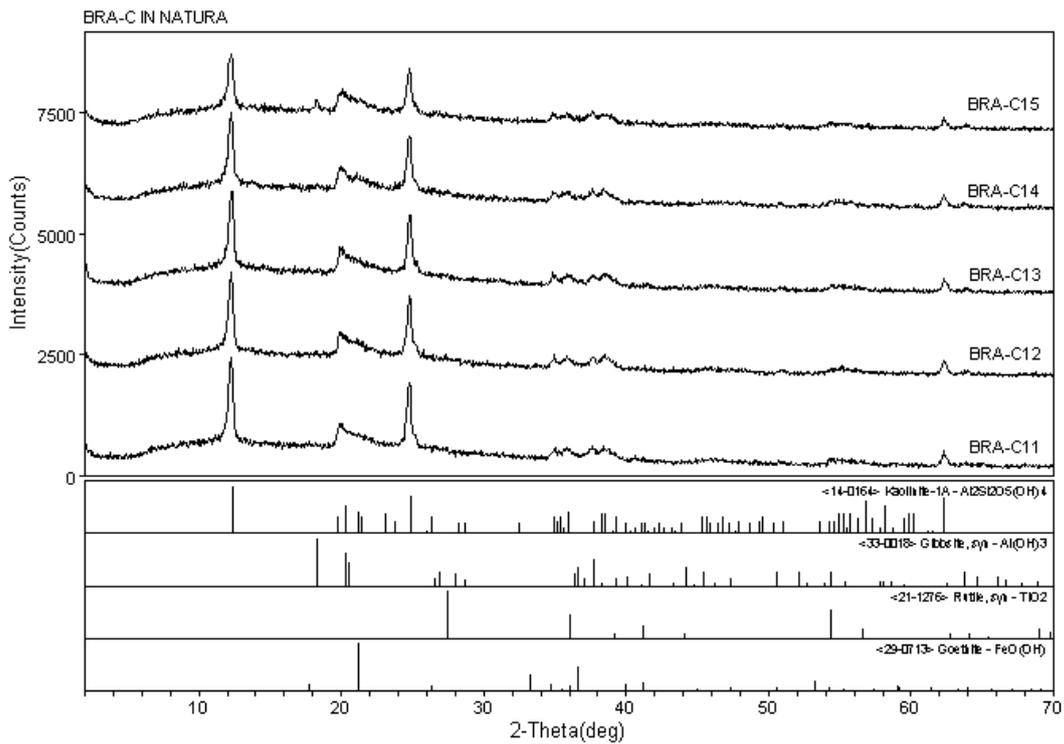
Argila *in natura* - Difractogramas Empilhados da Base para o Topo

Figura A1.1 – Difractogramas BRA-C11 a BRA-C15: Brazlândia

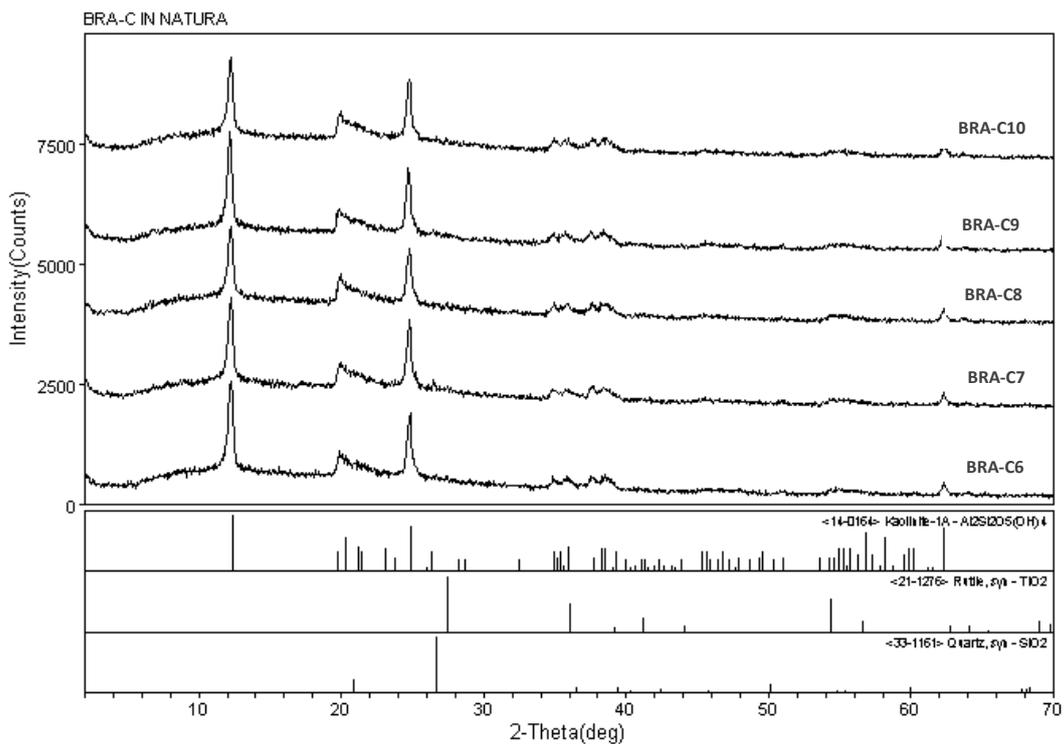
Figura A1.2 – Difractogramas BRA-C6 a BRA-C10: Brazlândia

Figura A1.3 – Difractogramas BRA-C1 a BRA-C5: Brazlândia

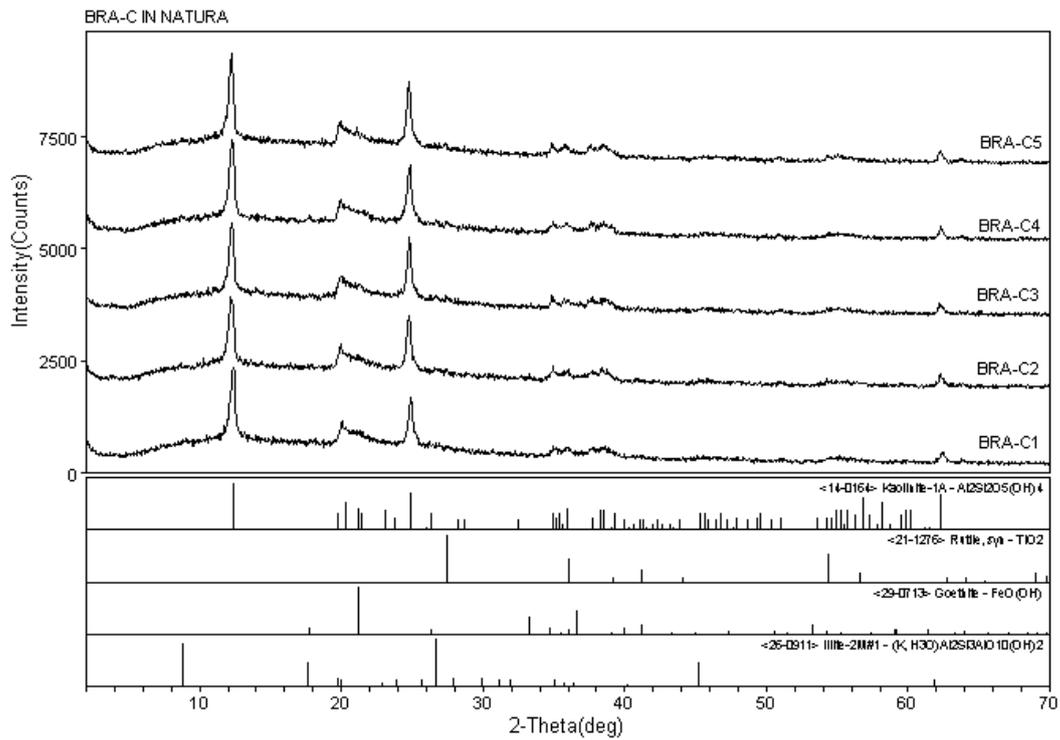
Figura A1.4 – Difractogramas BRA-T5 a BRA-T1: Brazlândia



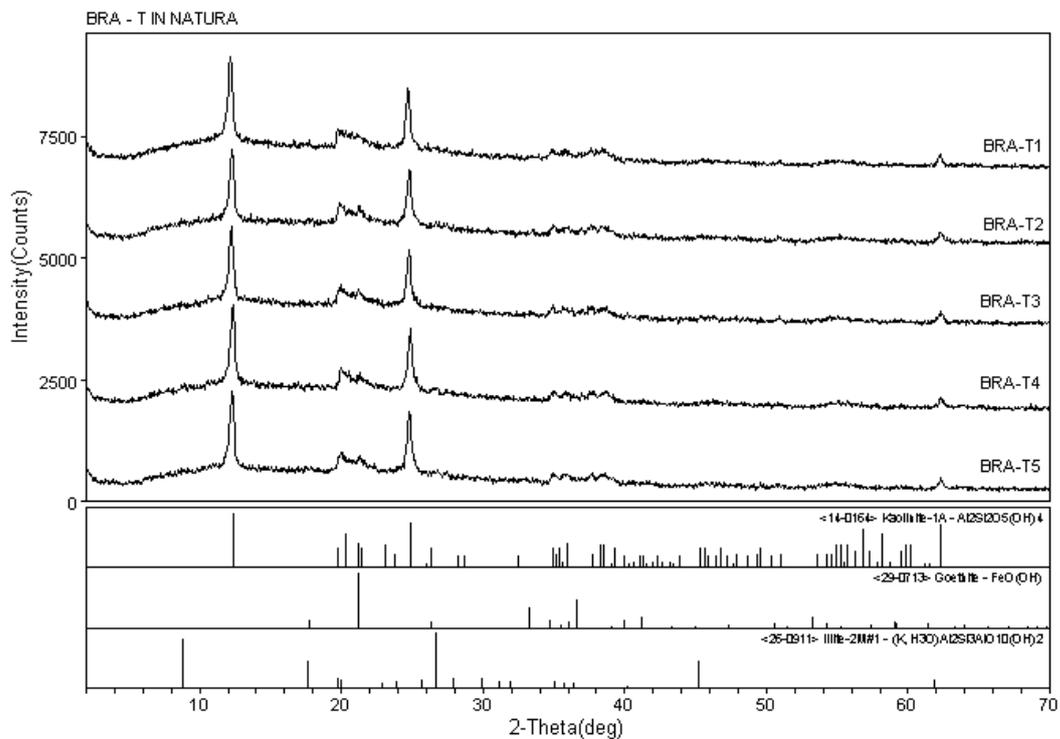
Laboratorio de DRX - IG/UnB <0:\dr\ma\vecode-1\brazil-1\brazil\oemb-1> Wednesday, Sep 23, 2009 09:21a
 Figura A1.1 – Difratoformas BRA-C11 a BRA-C15: Brazlândia.



Laboratorio de DRX - IG/UnB <0:\dr\ma\vecode-1\brazil-1\brazil\oemb-1> Wednesday, Sep 23, 2009 09:16a
 Figura A1.2 – Difratoformas BRA-C6 a BRA-C10: Brazlândia.



Laboratorio de DRX - IG/UnB c:\dr\ma\vector-1\brazil-1\brazilcomb-1- Wednesday, Sep 23, 2009 09:12a
 Figura A1.3 – Difractogramas BRA-C1 a BRA-C5: Brazlândia.



Laboratorio de DRX - IG/UnB c:\dr\ma\vector-1\brazil-1\brazilcomb-1- Wednesday, Sep 23, 2009 09:06a
 Figura A1.4 – Difractogramas BRA-T5 a BRA-T1: Brazlândia.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Brazlândia

Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

Figura A1.5 – Difractogramas BRA-C14 e BRA-C15: Brazlândia

Figura A1.6 – Difractogramas BRA-C12 e BRA-C13: Brazlândia

Figura A1.7 – Difractogramas BRA-C10 e BRA-C11: Brazlândia

Figura A1.8 – Difractogramas BRA-C8 e BRA-C9: Brazlândia

Figura A1.9 – Difractogramas BRA-C6 e BRA-C7: Brazlândia

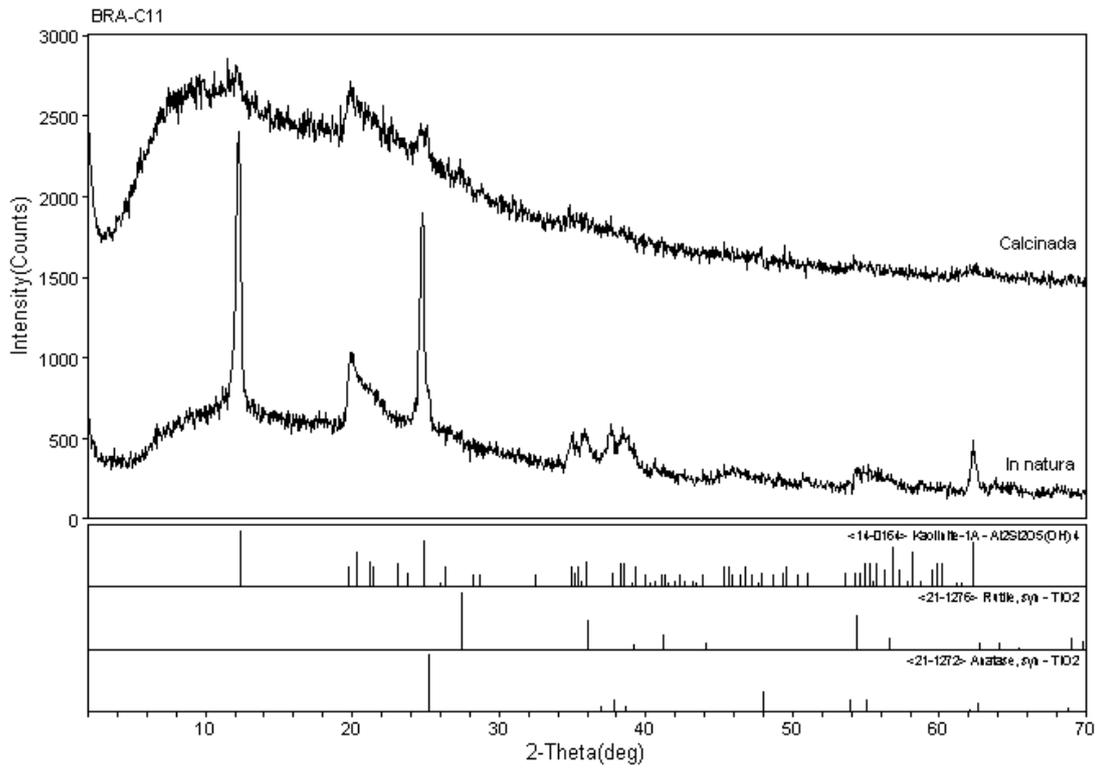
Figura A1.10 – Difractogramas BRA-C4 e BRA-C5: Brazlândia

Figura A1.11 – Difractogramas BRA-C2 e BRA-C3: Brazlândia

Figura A1.12 – Difractogramas BRA-T1 e BRA-C1: Brazlândia

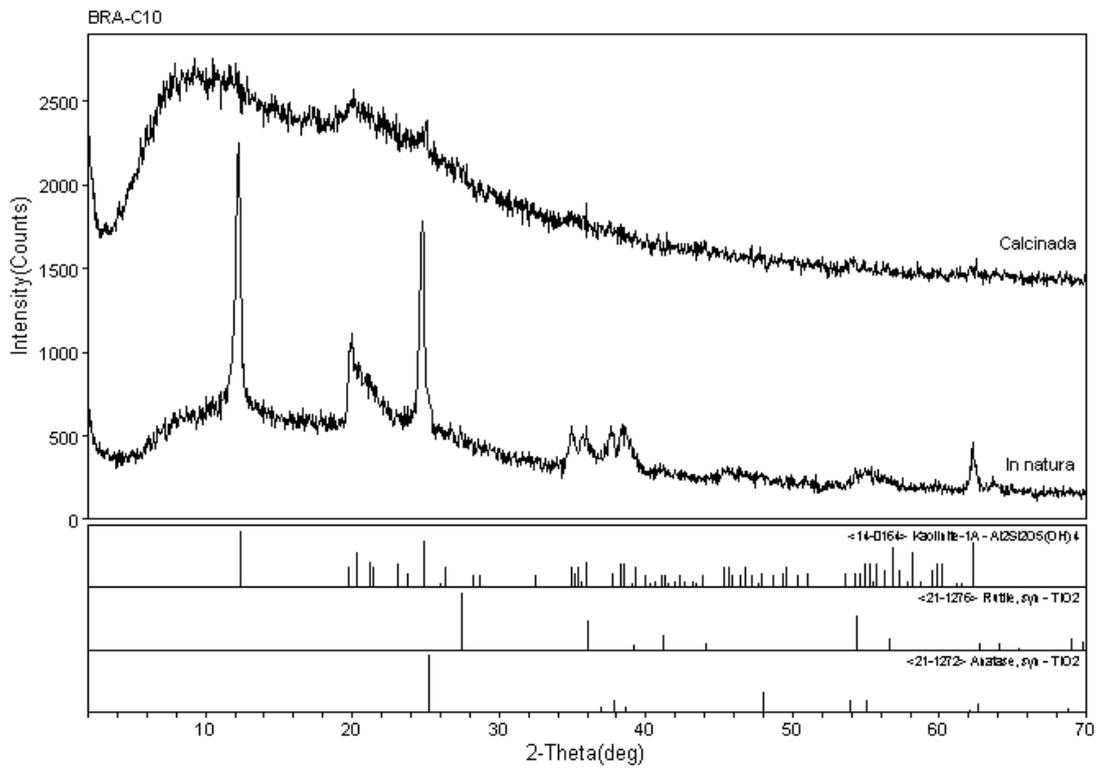
Figura A1.13 – Difractogramas BRA-T3 e BRA-T2: Brazlândia

Figura A1.14 – Difractogramas BRA-T5 e BRA-T4: Brazlândia



Laboratório de DRX - IG/UnB

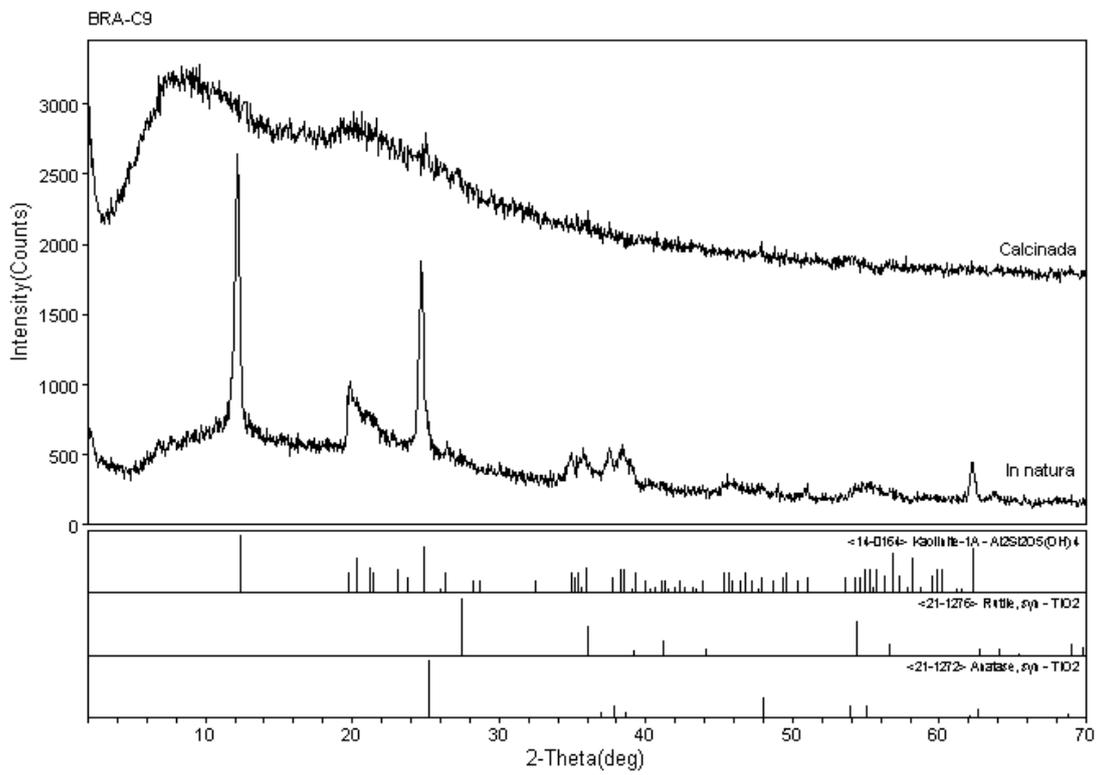
<:drx/mz/veioe-1/braza-1/braucoemb-1> Modar, Sep 21, 2009 @ 10:26



Laboratório de DRX - IG/UnB

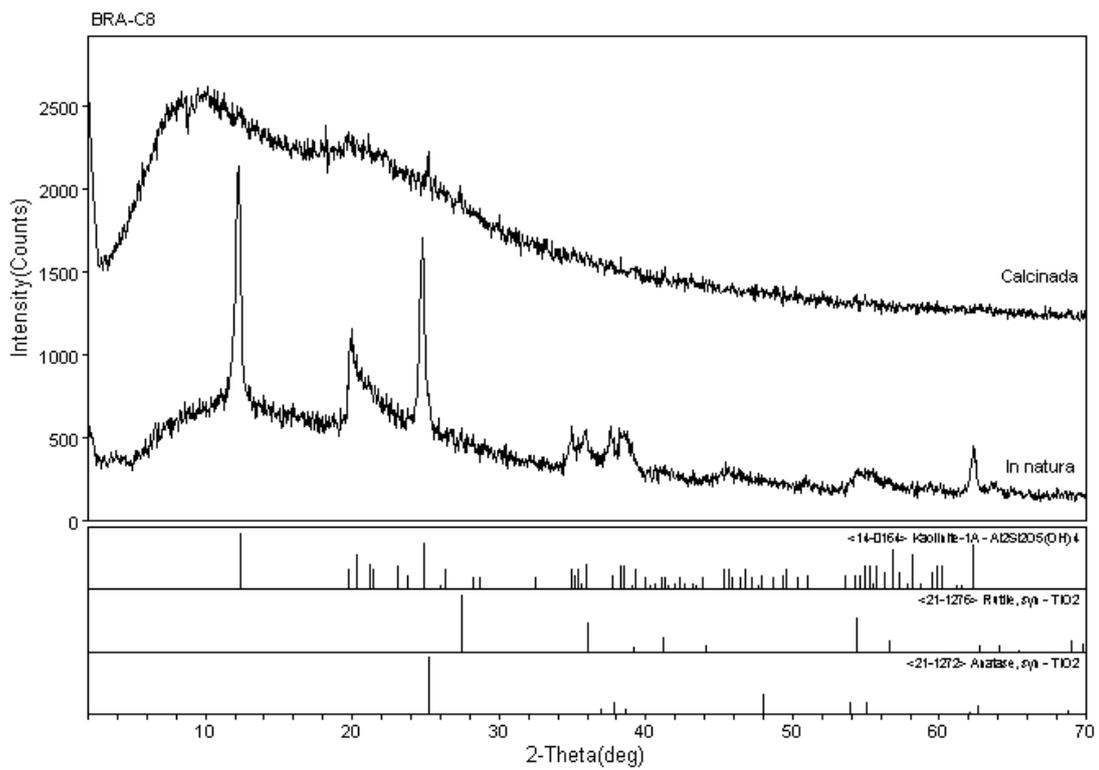
<:drx/mz/veioe-1/braza-1/braucoemb-1> Modar, Sep 21, 2009 @ 10:31

Figura A1.7 – Difrátogramas BRA-C10 e BRA-C11: Brazlândia.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

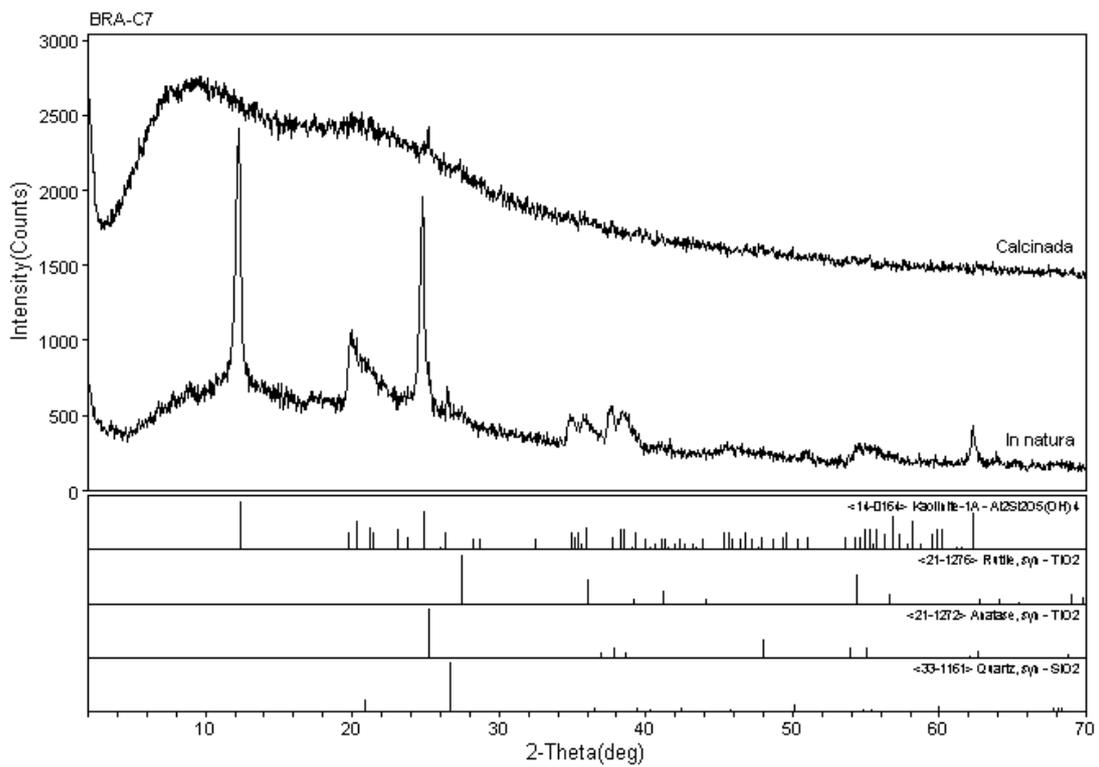
<:drx/mz/veioe-1/brazil-1/brazilcomb-1> Monday, Sep 21, 2009 @ 10:34



Laboratorio de DRX - IG/UnB

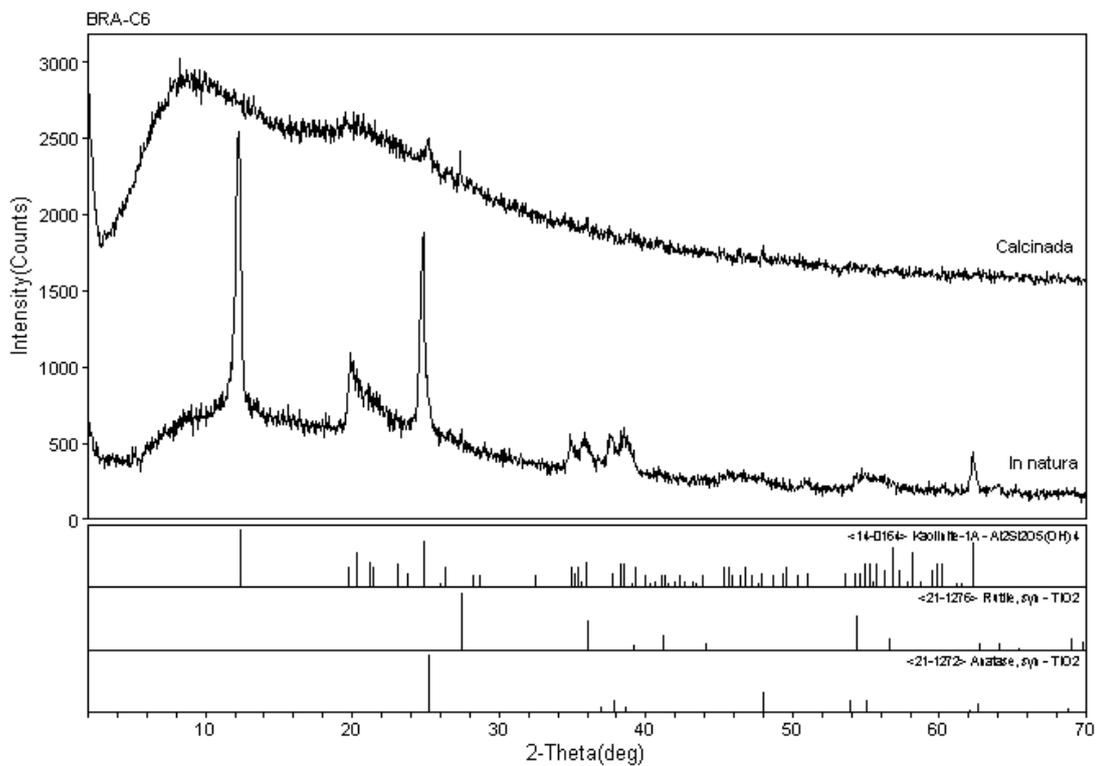
<:drx/mz/veioe-1/brazil-1/brazilcomb-1> Monday, Sep 21, 2009 @ 10:40

Figura A1.8 – Difratoogramas BRA-C8 e BRA-C9: Brazlândia.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

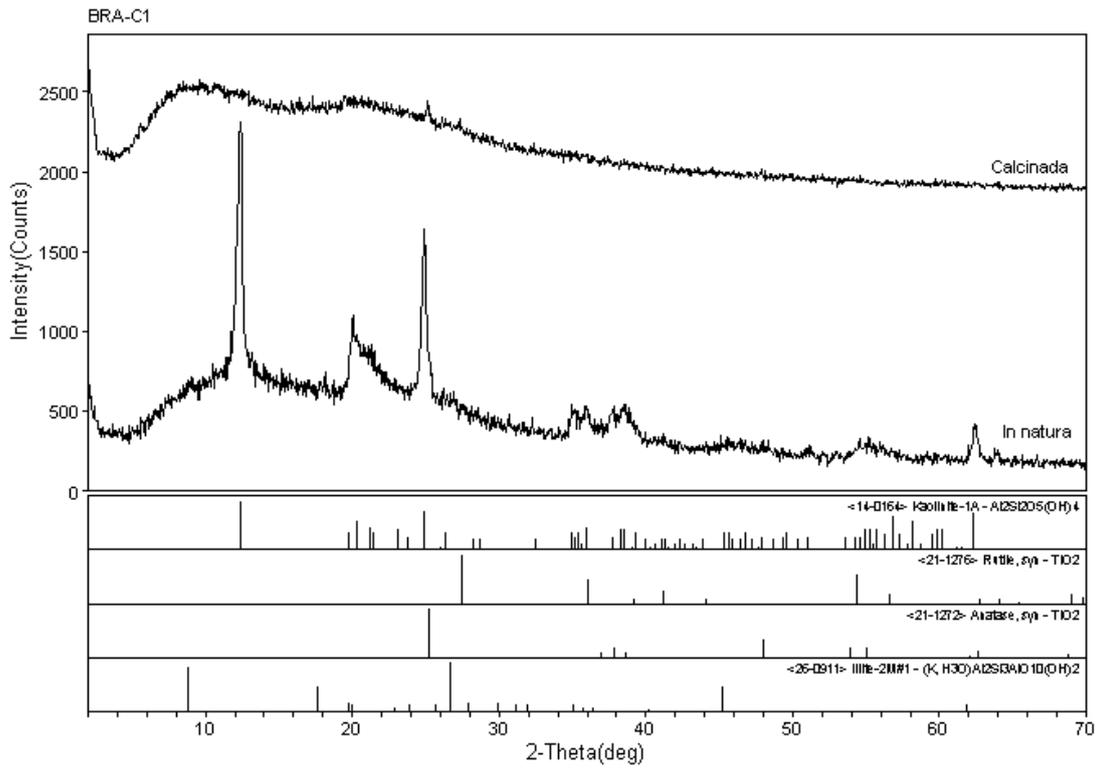
<id:drx/materia/>1/brazilia-1/brazilcemb-1/ Modada: Sep 21, 2019 @ 10:48h



Laboratorio de DRX - IG/UnB

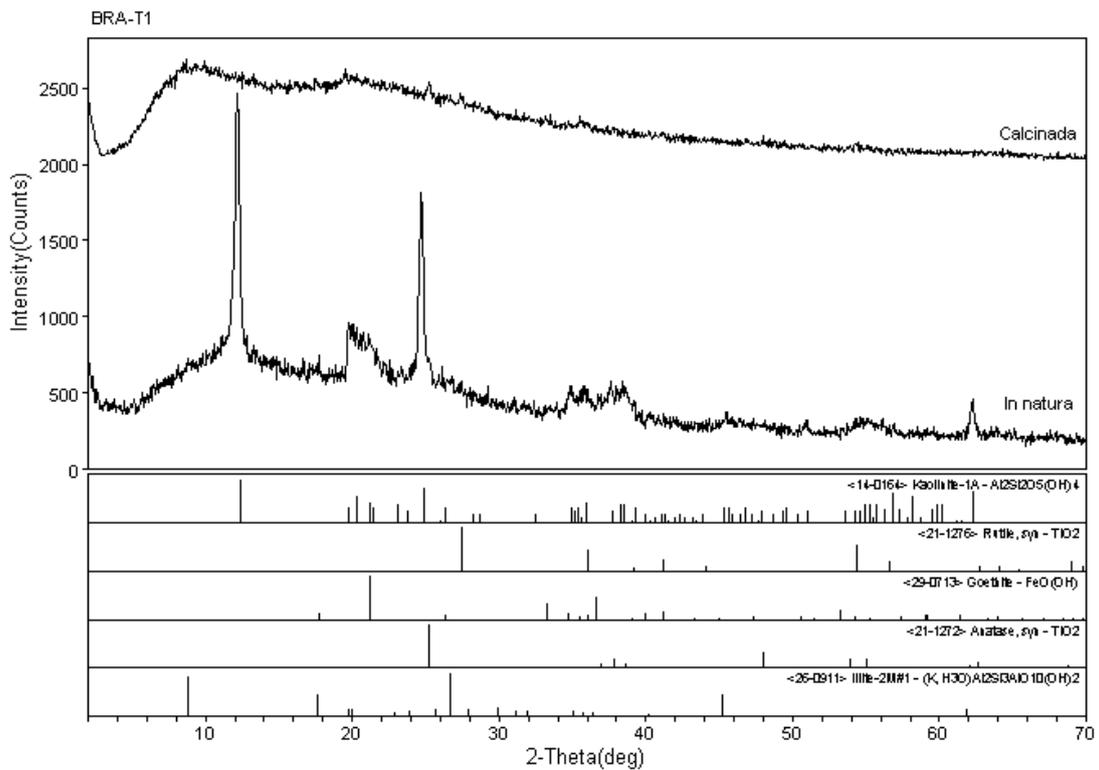
<id:drx/materia/>1/brazilia-1/brazilcemb-1/ Modada: Sep 21, 2019 @ 10:53h

Figura A1.9 – Difratoformas BRA-C6 e BRA-C7: Brazilândia.



Laboratório de DRX - IG/UnB

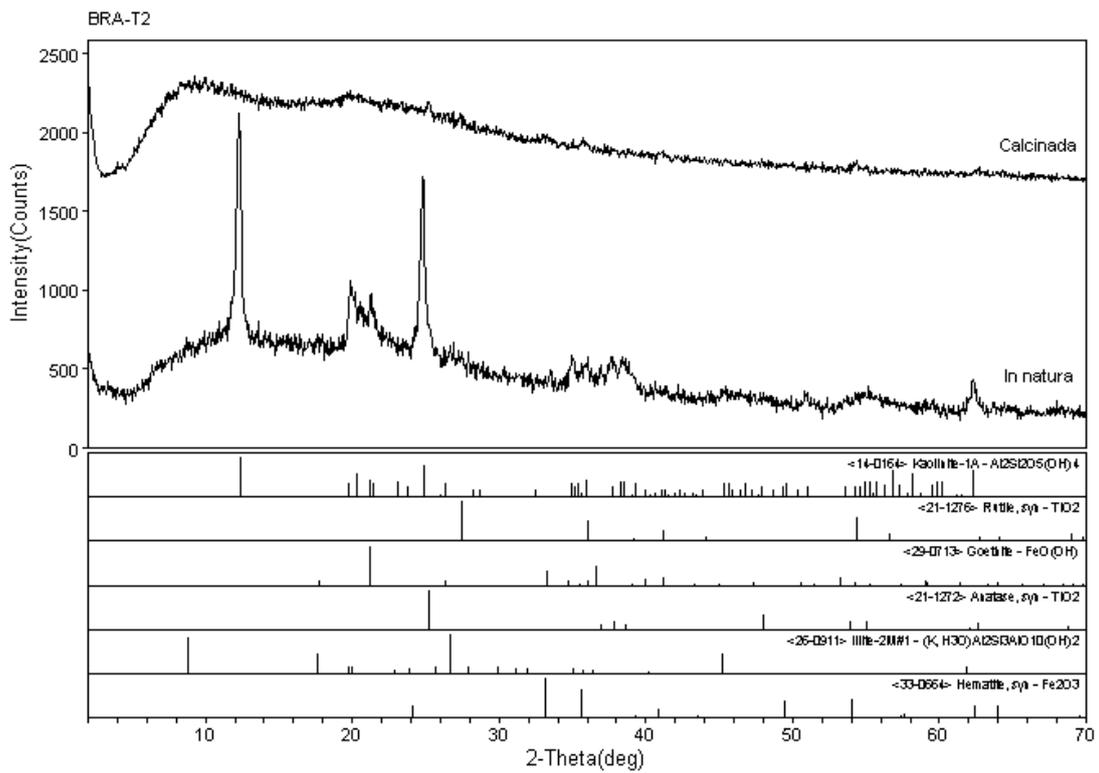
c:\dr\ma\veicde-1\brazla-1\brazluemb-1-1\Moda; Sep 21, 2009 @ 11:12h



Laboratório de DRX - IG/UnB

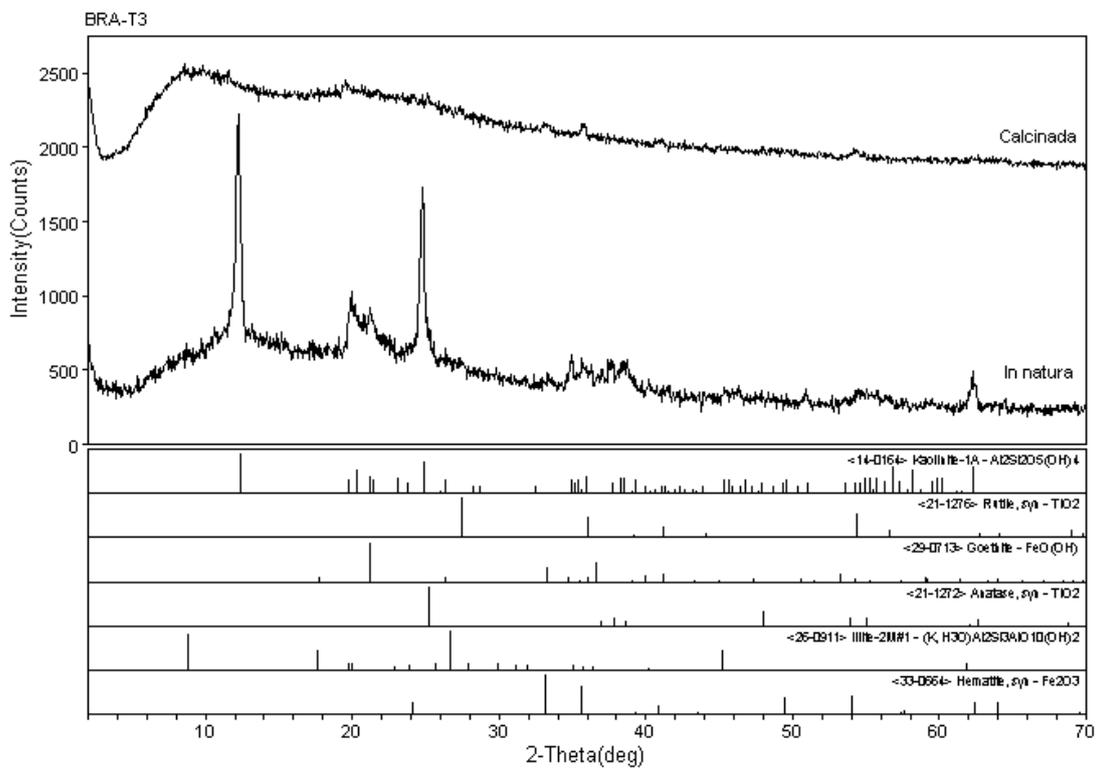
c:\dr\ma\veicde-1\brazla-1\brazluemb-1-1\Moda; Sep 21, 2009 @ 11:19h

Figura A1.12 – Difrátogramas BRA-T1 e BRA-C1: Brazlândia.



Laboratório de DRX - IG/UnB

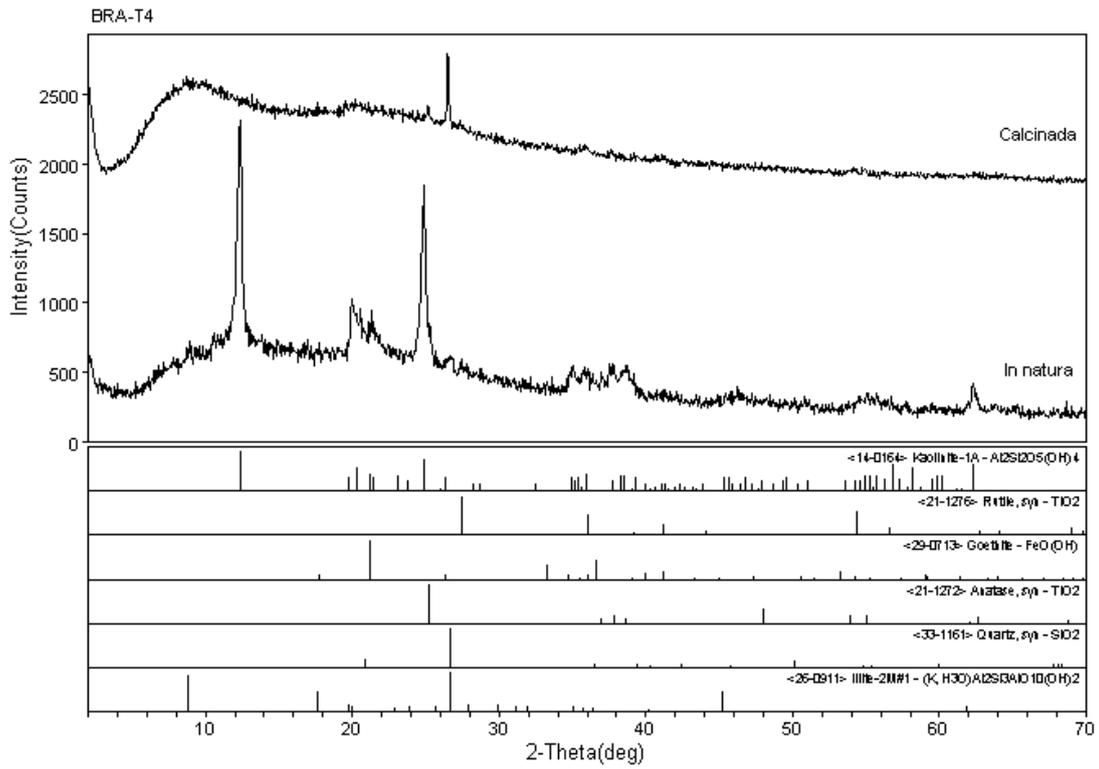
c:\dr\ma\vecoe-1\brazls-1\brafnoemb-1-1\moda- Sep 21, 2009 @ 11:30



Laboratório de DRX - IG/UnB

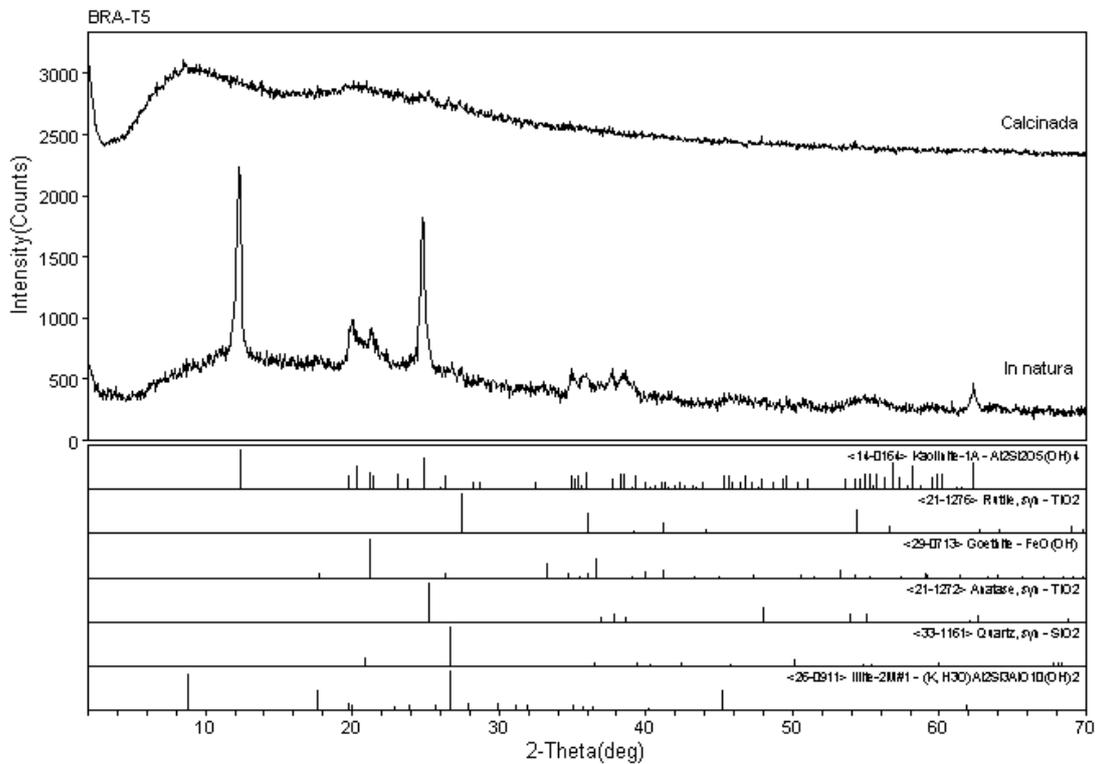
c:\dr\ma\vecoe-1\brazls-1\brafnoemb-1-1\moda- Sep 21, 2009 @ 11:34

Figura A1.13 – Difrátogramas BRA-T3 e BRA-T2: Brazlândia.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\dr\ma\vector\1\brazil\1\brazil\comb\1\ Modar, Sep 21, 2009 @ 11:46



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\dr\ma\vector\1\brazil\1\brazil\comb\1\ Modar, Sep 21, 2009 @ 11:57

Figura A1.14 – Difractogramas BRA-T5 e BRA-T4: Brazlândia.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

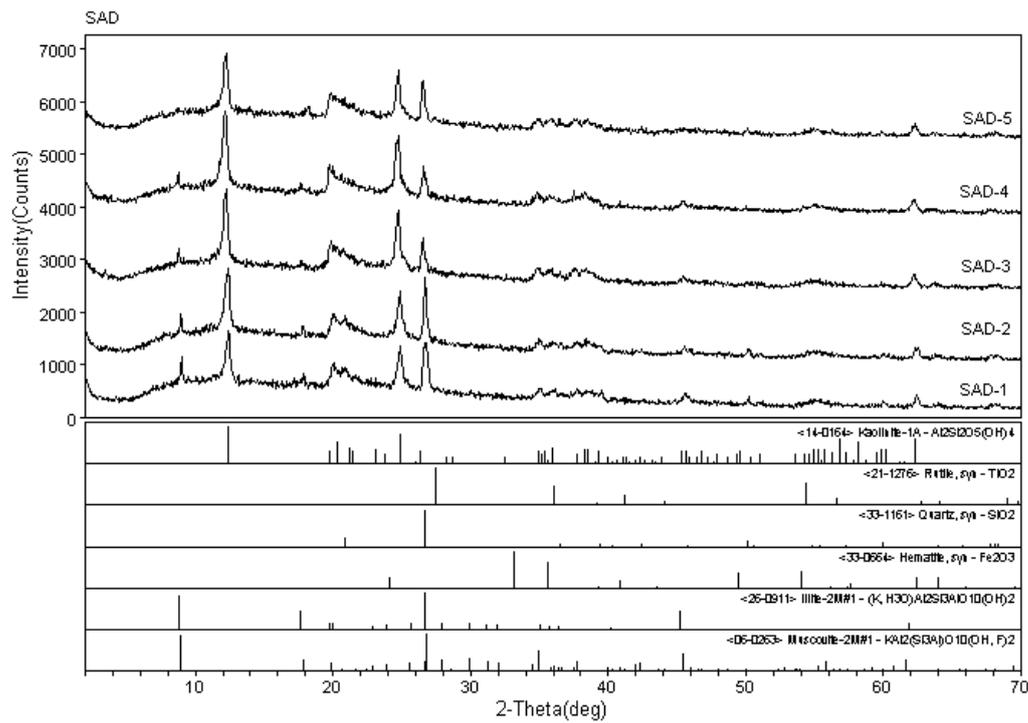
Área Santo Antônio do Descoberto

Argila *in natura* - Difractogramas Empilhados da Base para o Topo

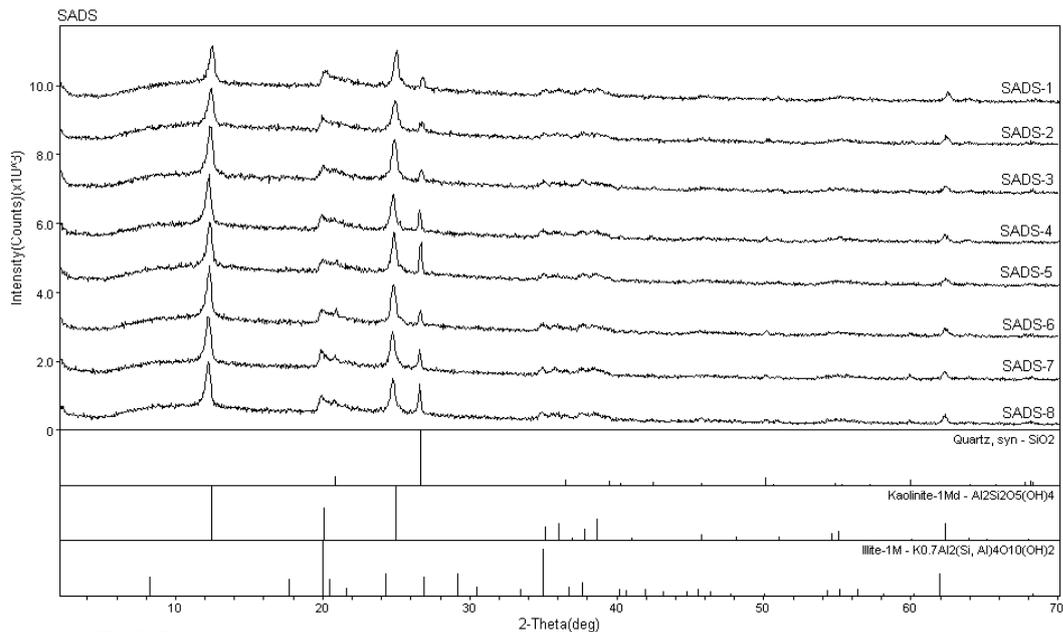
Figura A1.15 – Difractogramas SAD-1 a SAD-5: Santo Antônio do Descoberto

Figura A1.16 – Difractogramas SADS-8 a SADS-1: Santo Antônio do Descoberto

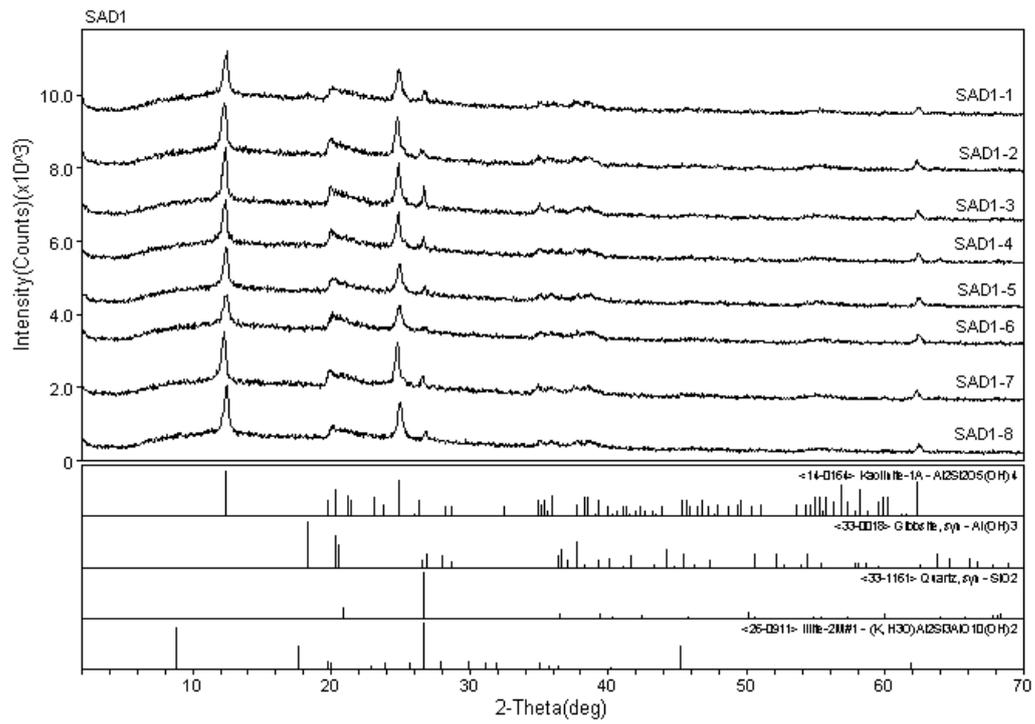
Figura A1.17 – Difractogramas SAD1-8 a SAD1-1: Santo Antônio do Descoberto



Laboratório de DRX - IGAUnB c:\drx\max\recorde-1\sa\sa-1\rad\novemb-15\Medvedev_Sao_23_2008_012170
Figura A1.15 – Difratoformas SAD-1 a SAD-5: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratório de DRX - IGAUnB c:\max\sa-1\sa-1\rad\novemb-15\Medvedev_Sao_23_2008_00018a
Figura A1.16 – Difratoformas SADS-8 a SADS-1: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB c:\drx\ma\rec\de-1\santa-1\sad\ouemb-1- Wednesday, Sep 23, 2009 @ 12:16o
Figura A1.17 – Difractogramas SAD1-8 a SAD1-1: Santo Antônio do Descoberto.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Santo Antônio do Descoberto

Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

- Perfil SAD/SADS

Figura A1.18 – Difractogramas SAD-4 e SAD-5: Santo Antônio do Descoberto

Figura A1.19 – Difractogramas SAD-2 e SAD-3: Santo Antônio do Descoberto

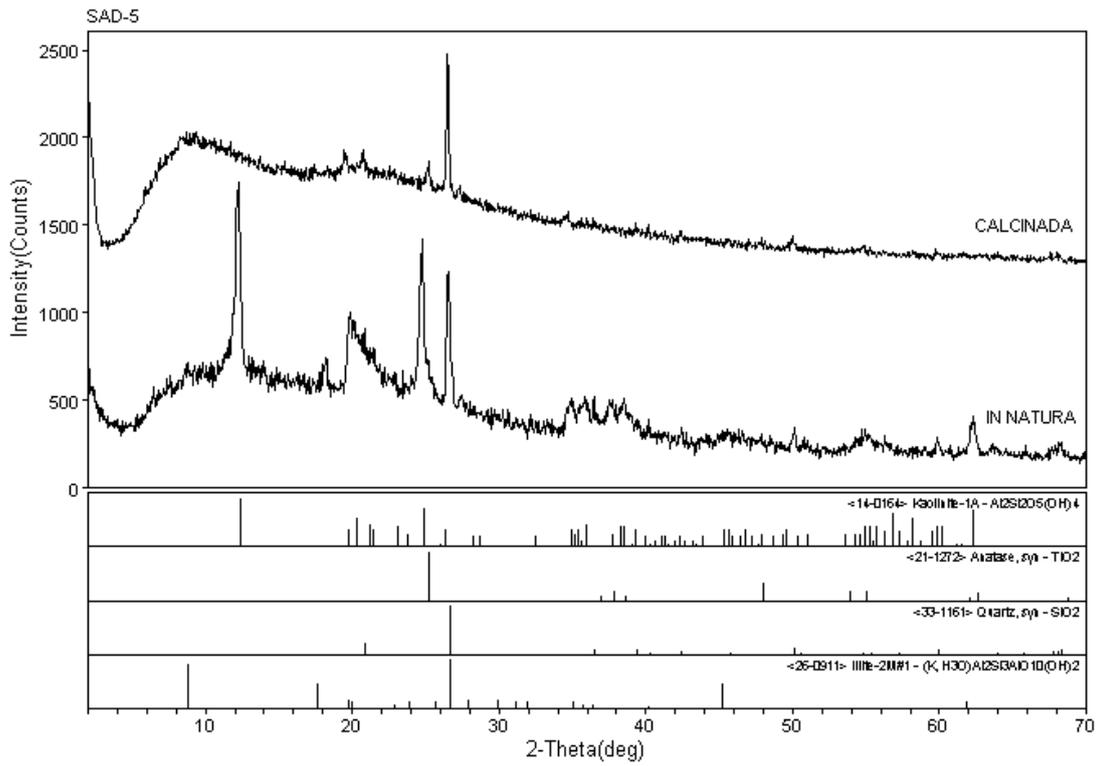
Figura A1.20 – Difractogramas SADS-1 e SAD-1: Santo Antônio do Descoberto

Figura A1.21 – Difractogramas SADS-3 e SADS-2: Santo Antônio do Descoberto

Figura A1.22 – Difractogramas SADS-5 e SADS-4: Santo Antônio do Descoberto

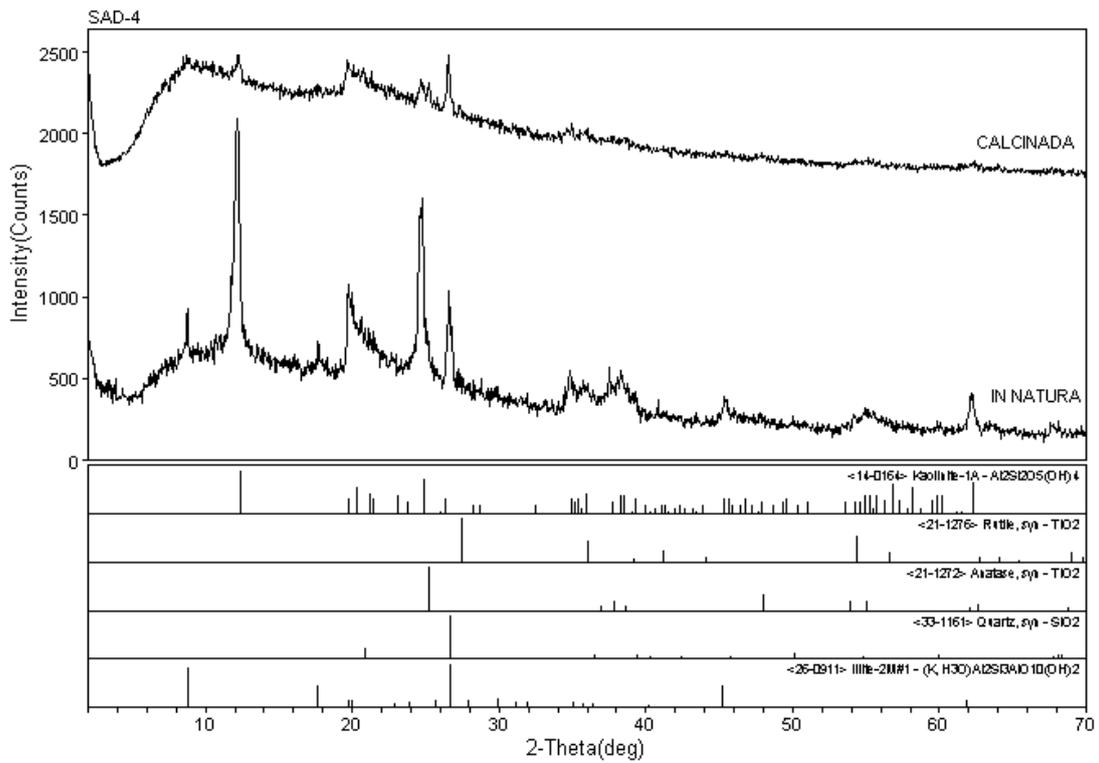
Figura A1.23 – Difractogramas SADS-7 e SADS-6: Santo Antônio do Descoberto

Figura A1.24 – Difractograma SADS-8: Santo Antônio do Descoberto



Laboratorio de DRX - IG/UnB

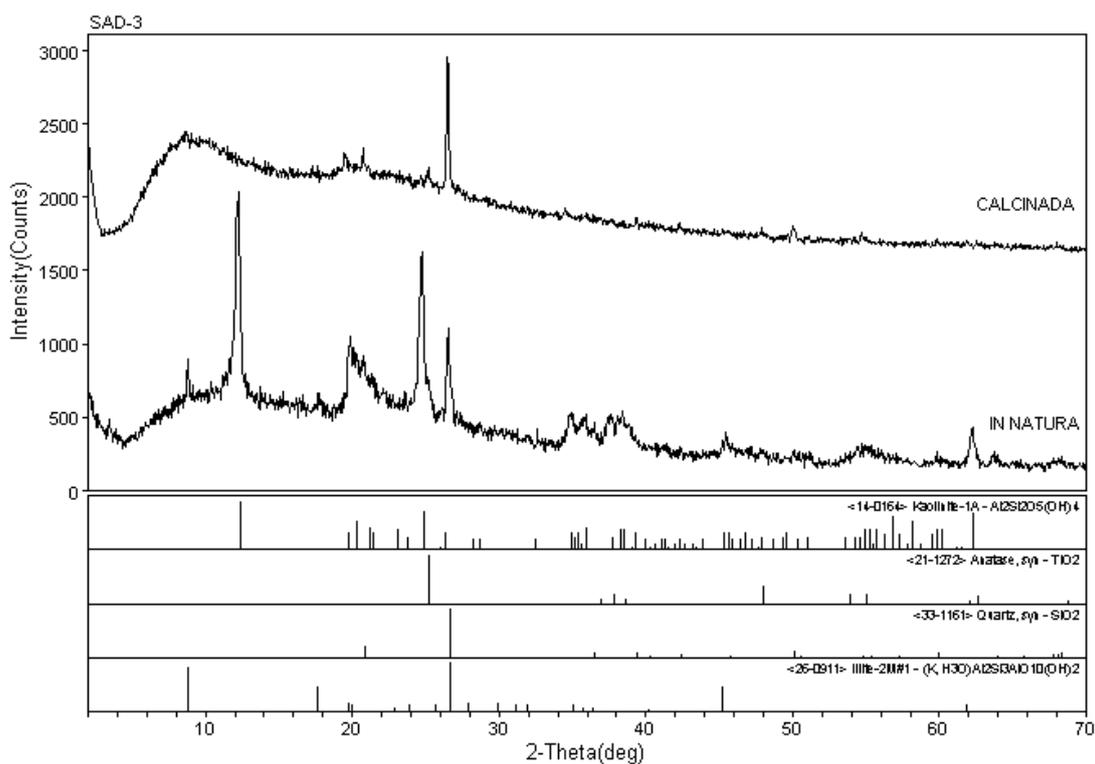
<0:\dr\ma\veo\de-1\avata-1\advouemb-1> \filedesda\ Sep 23, 2009 @ 10:48a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

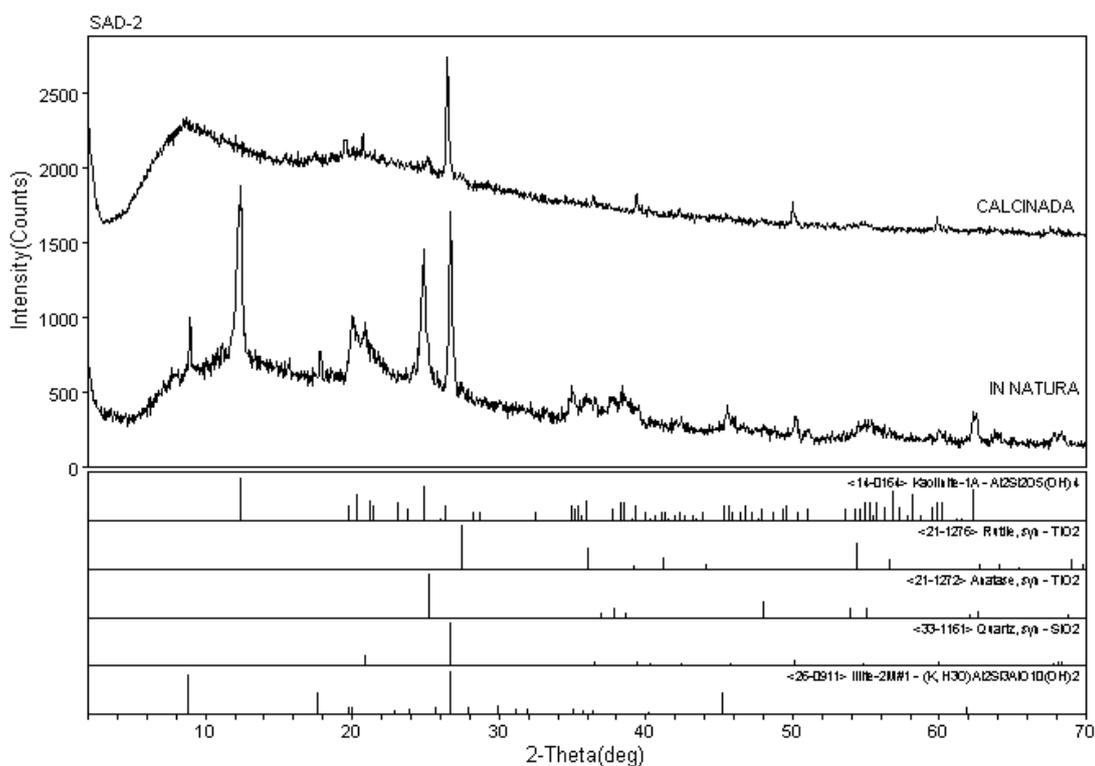
<0:\dr\ma\veo\de-1\avata-1\advouemb-1> \filedesda\ Sep 23, 2009 @ 10:46a

Figura A1.18 – Difractogramas SAD-4 e SAD-5: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

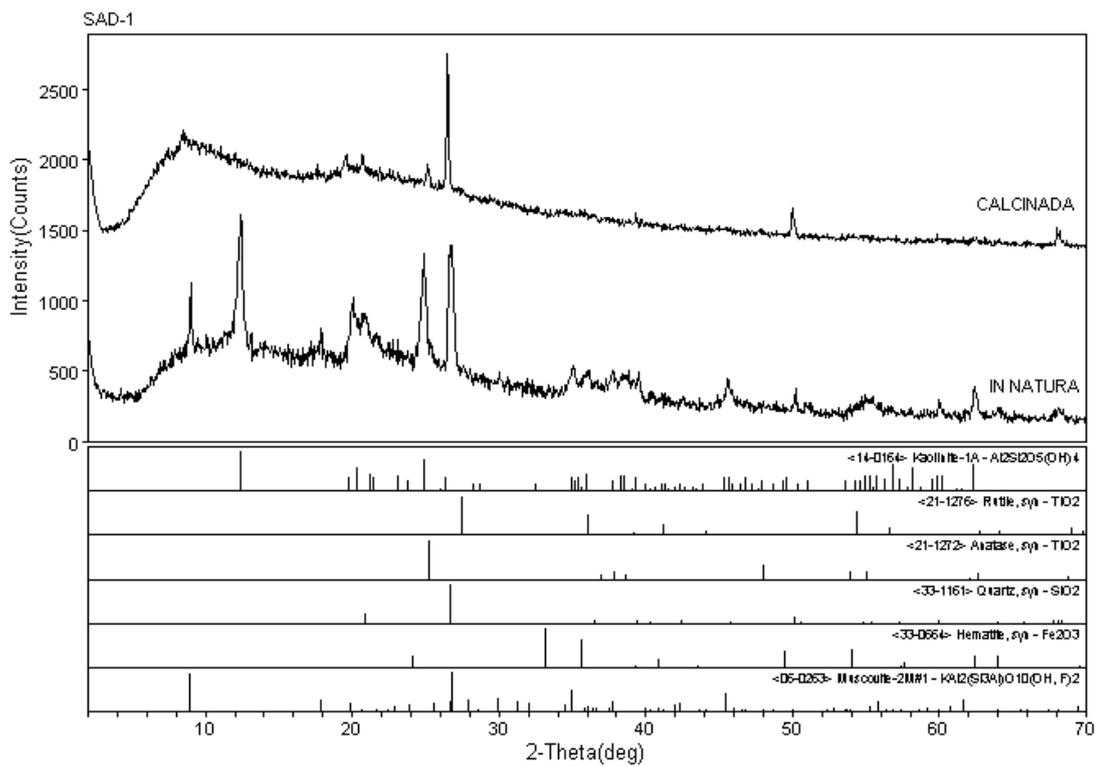
<0:\dr\ma\ve\cde-1\avita-1\adu\omb-1> \file\esdr\ Sep 23, 2009 @ 10:43a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

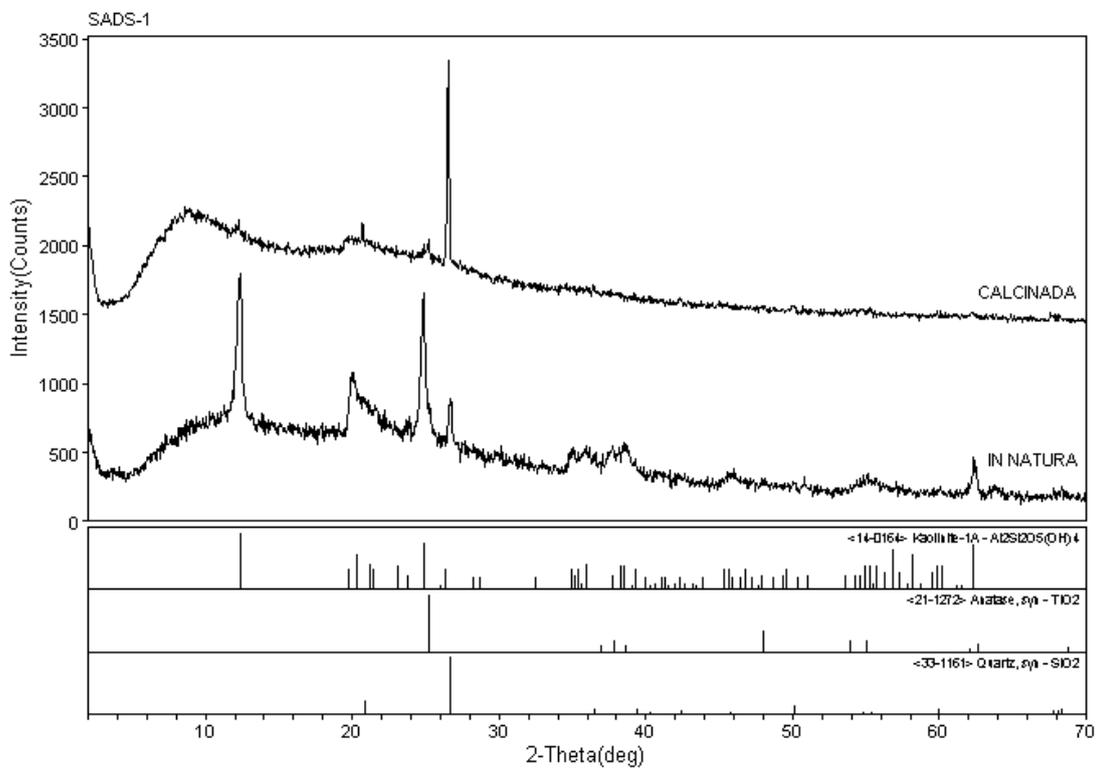
<0:\dr\ma\ve\cde-1\avita-1\adu\omb-1> \file\esdr\ Sep 23, 2009 @ 10:43a

Figura A1.19 – Difractogramas SAD-2 e SAD-3: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

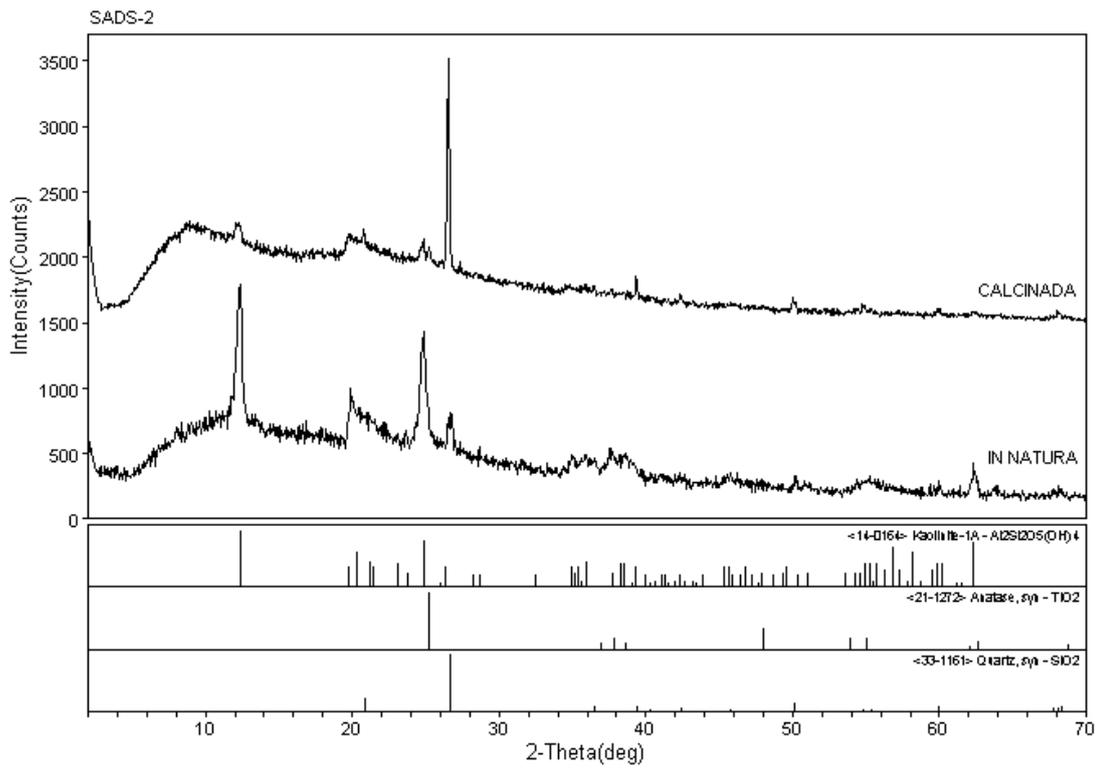
c:\dr\ma\veco\ve-1\aniba-1\radi\ouemb-1-1\medias\drx_Sep 23, 2009 @ 10:25a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

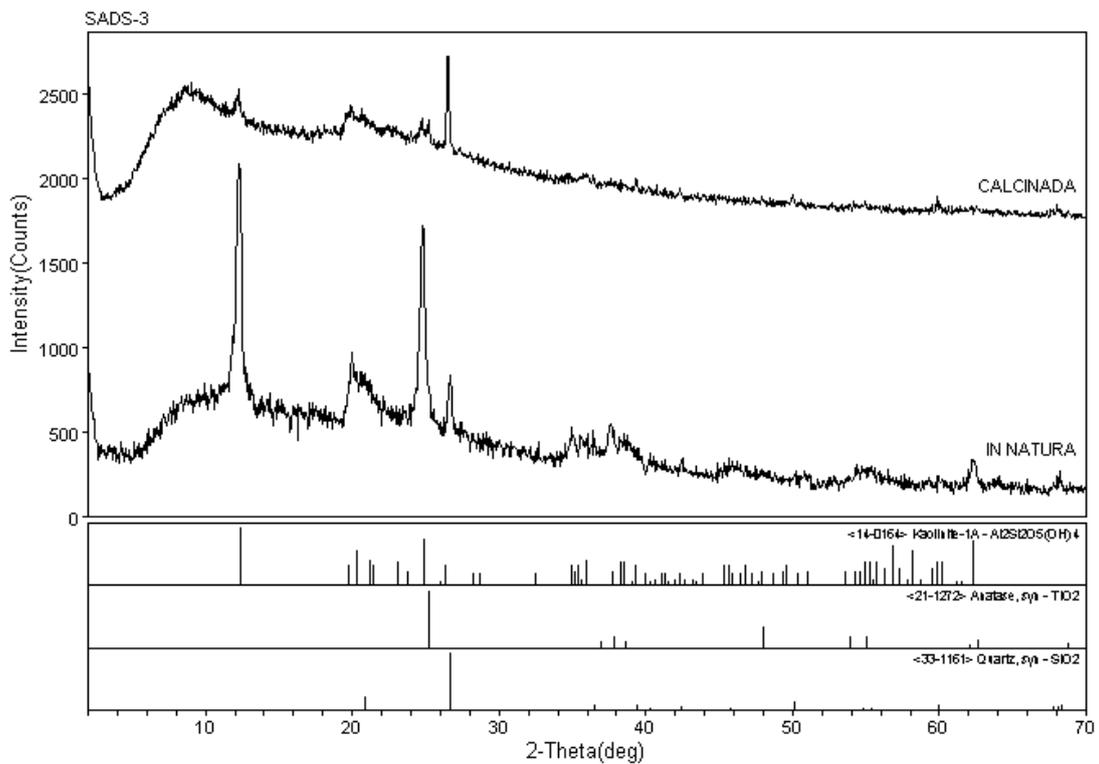
c:\dr\ma\veco\ve-1\aniba-1\radi\ouemb-1-1\medias\drx_Sep 23, 2009 @ 10:52a

Figura A1.20 – Difractogramas SADS-1 e SAD-1: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

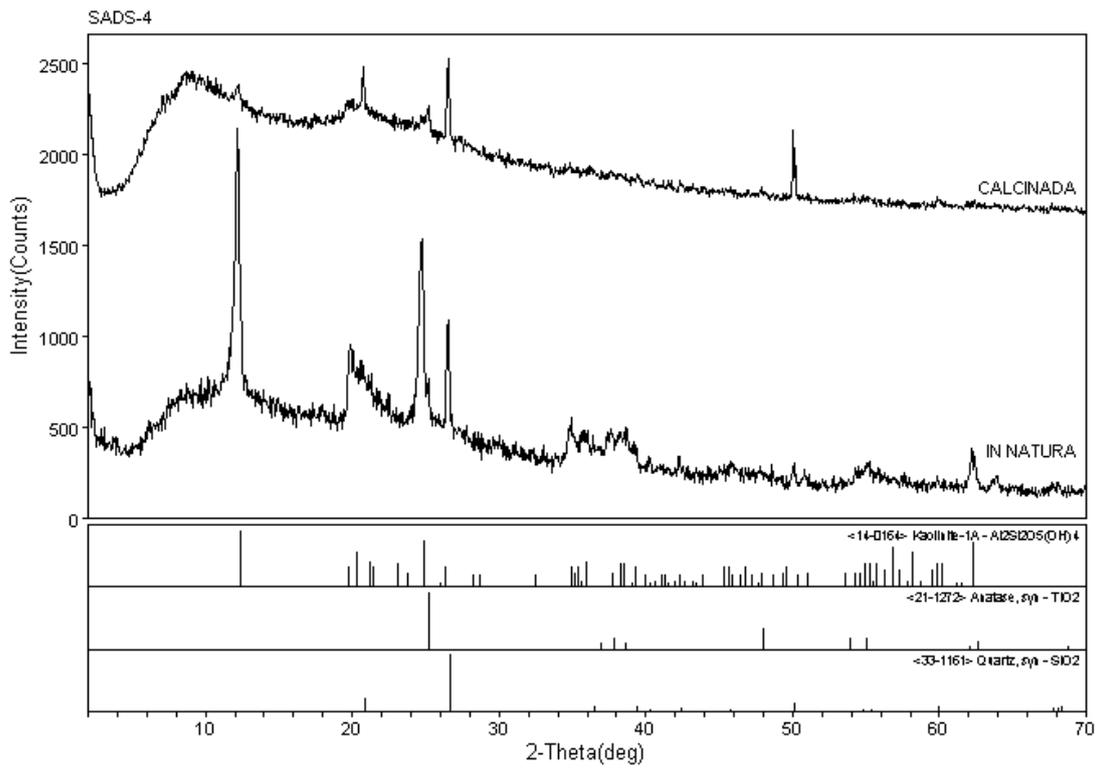
c:\dr\ma\vecope-1\ariba-1\arib\ouemb-1-1\medresda\ Sep 23, 2009 @ 10:58a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

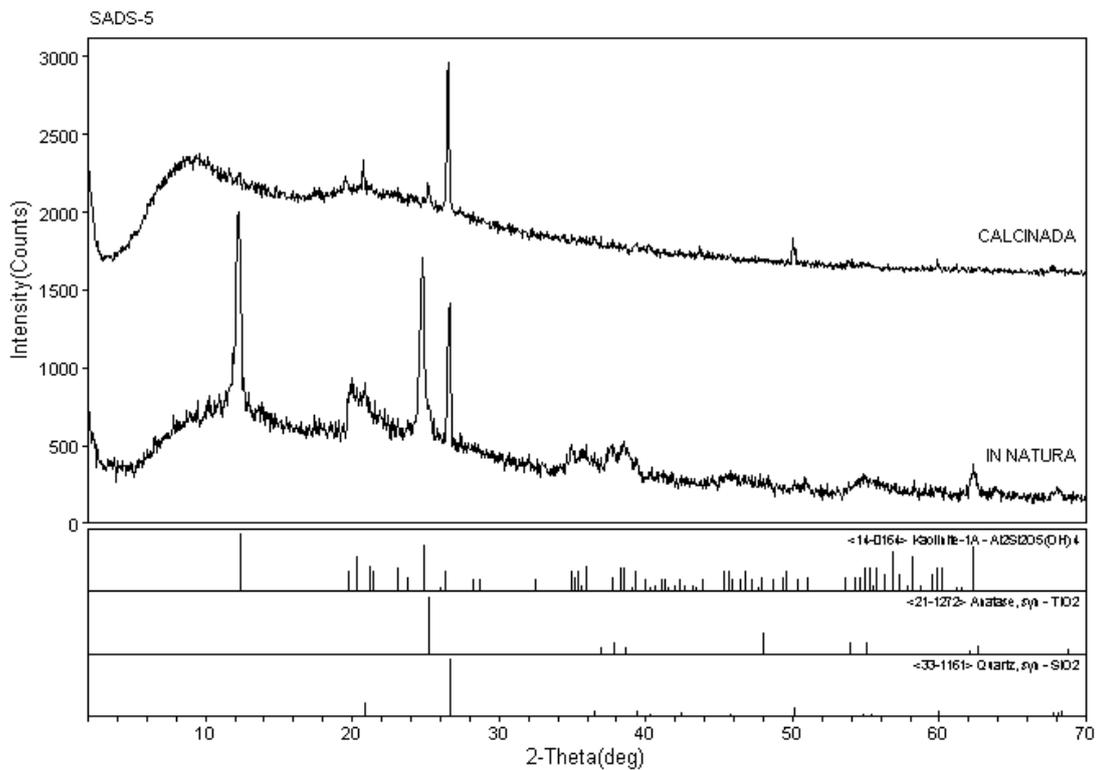
c:\dr\ma\vecope-1\ariba-1\arib\ouemb-1-1\medresda\ Sep 23, 2009 @ 10:58a

Figura A1.21 – Difractogramas SADS-3 e SADS-2: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

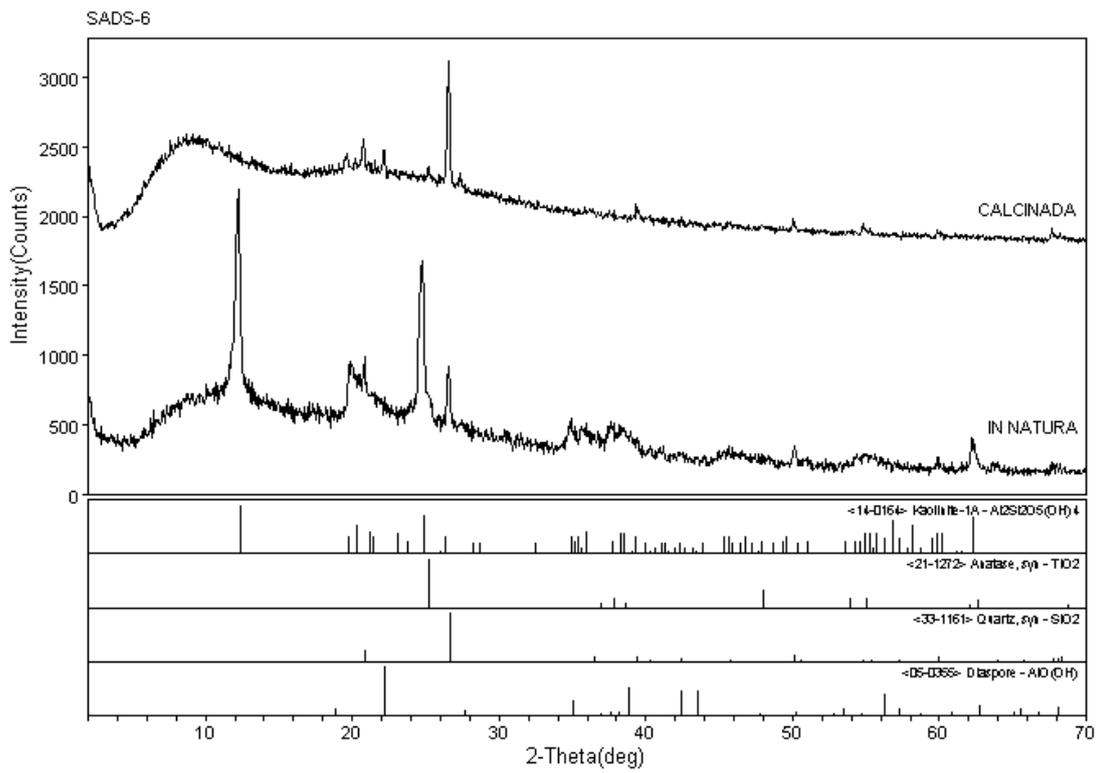
c:\dr\ma\vecope-1\ariba-1\arad\ouemb-1-1\med\esdax_Sep 23, 2009 @ 11:02a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

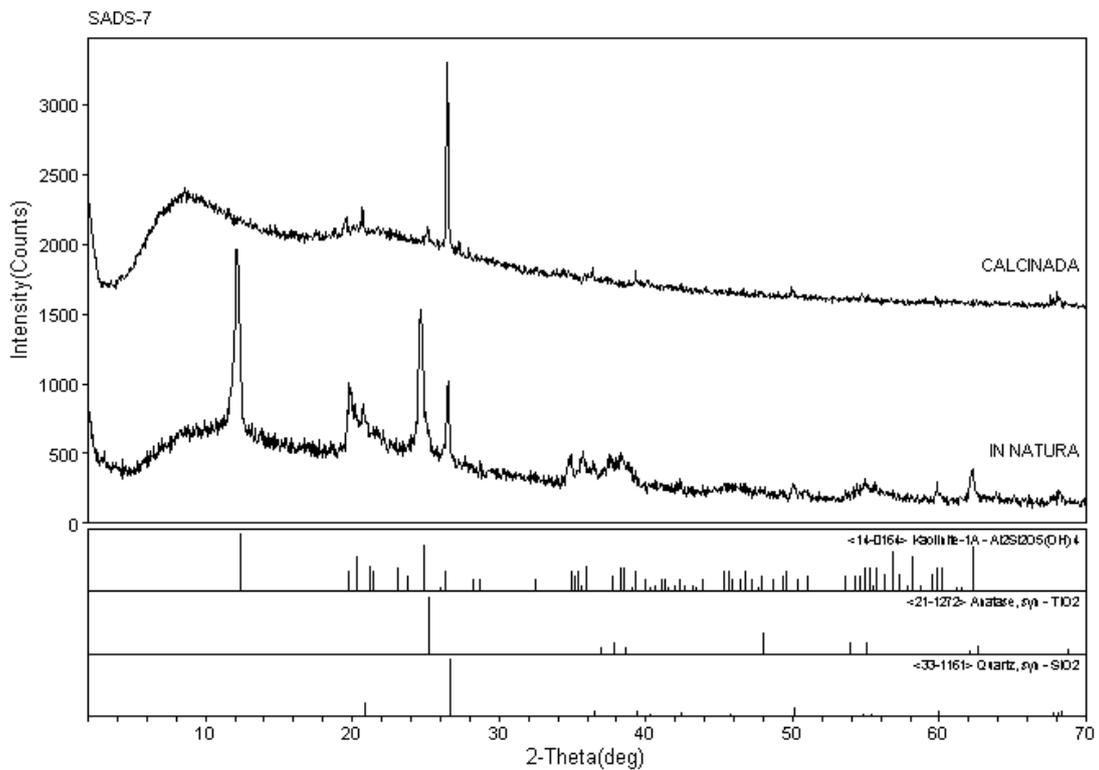
c:\dr\ma\vecope-1\ariba-1\arad\ouemb-1-1\med\esdax_Sep 23, 2009 @ 11:04a

Figura A1.22 – Difractogramas SADS-5 e SADS-4: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

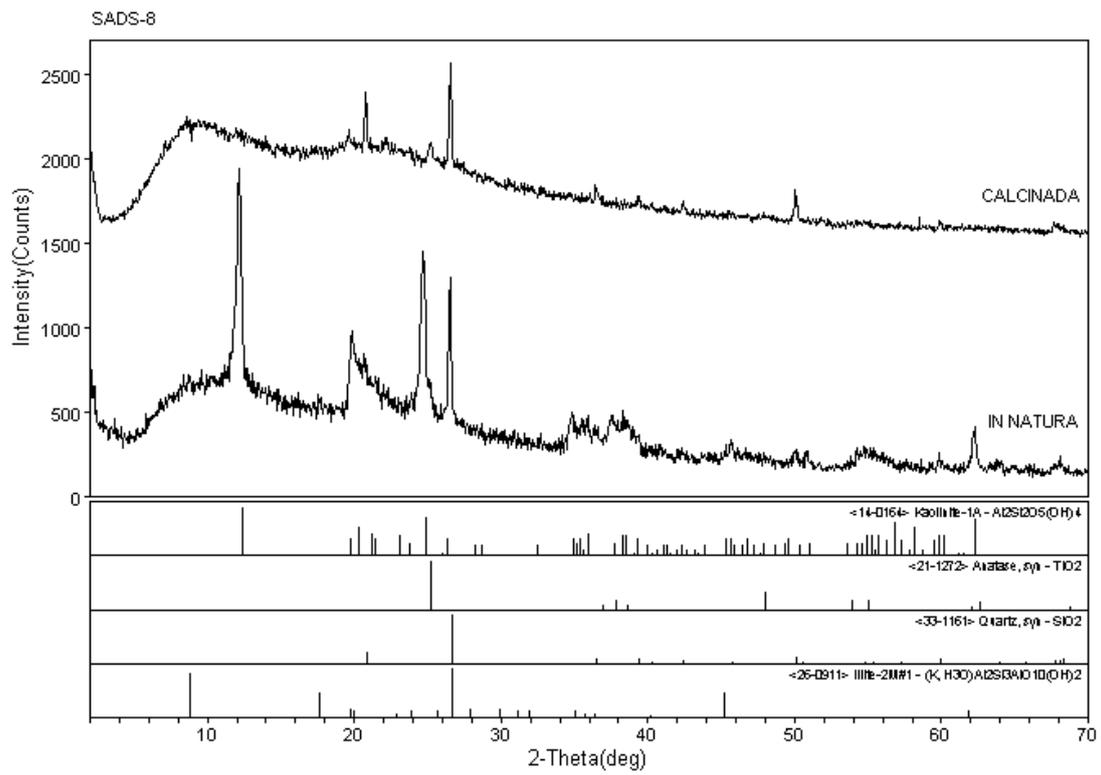
c:\dr\ma\vecofe-1\ariba-1\radi\ouemb-1-1\medias\drx_Sep 23, 2009 @ 11:07a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\dr\ma\vecofe-1\ariba-1\radi\ouemb-1-1\medias\drx_Sep 23, 2009 @ 11:08a

Figura A1.23 – Difractogramas SADS-7 e SADS-6: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

-c:\dr\ma\ve\de-1\ariba-1\ad\oumb-1-1\medresda\ Sep 23, 2009 @ 11:12a

Figura A1.24 – Difratoograma SADS-8: Santo Antônio do Descoberto.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Santo Antônio do Descoberto

Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

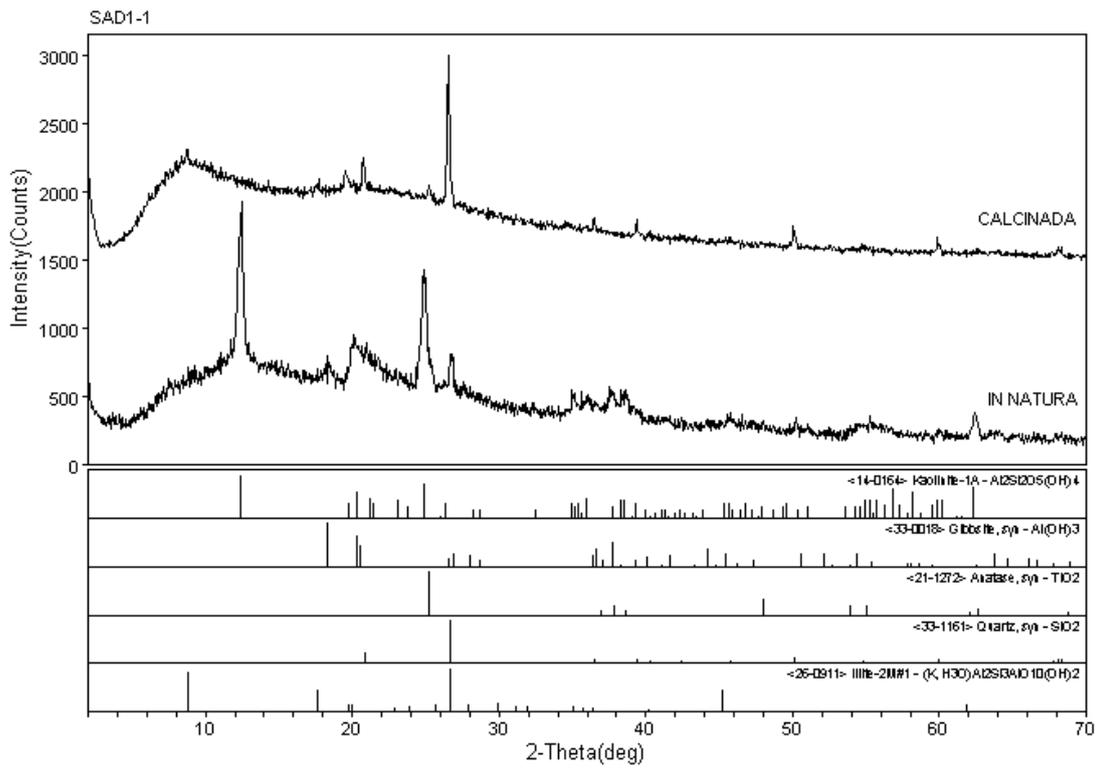
- Perfil SAD1

Figura A1.25 – Difractogramas SAD1-2 e SAD1-1: Santo Antônio do Descoberto

Figura A1.26 – Difractogramas SAD1-4 e SAD1-3: Santo Antônio do Descoberto

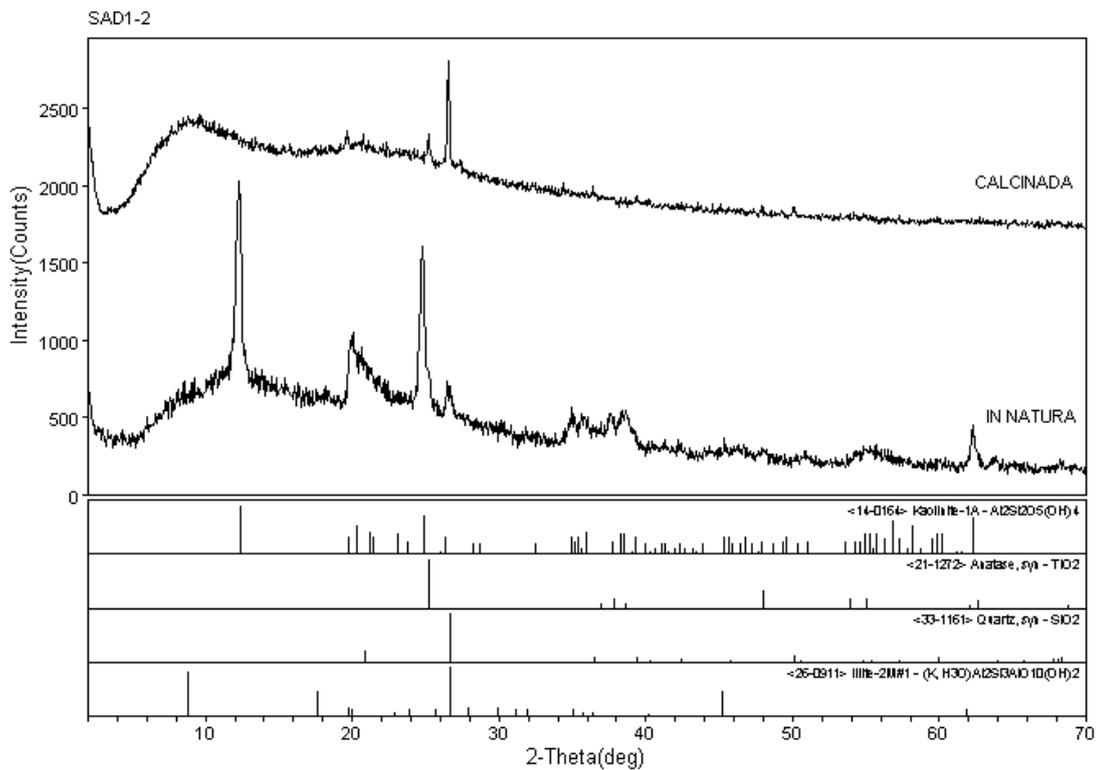
Figura A1.27 – Difractogramas SAD1-6 e SAD1-5: Santo Antônio do Descoberto

Figura A1.28 – Difractogramas SAD1-8 e SAD1-7: Santo Antônio do Descoberto



Laboratorio de DRX - IG/UnB

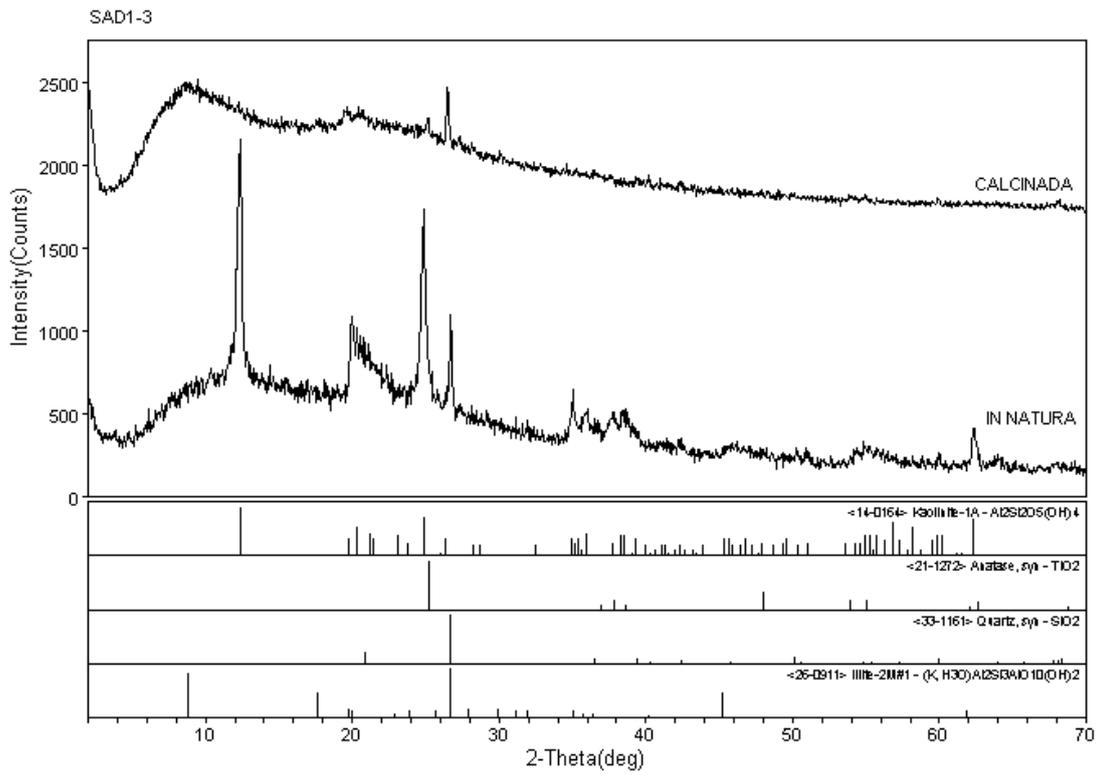
c:\dr\ma\vector\1\ca\lta\1\ad\roumb\1\ Medias.dwg, Sep 23, 2009 @ 11:18a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

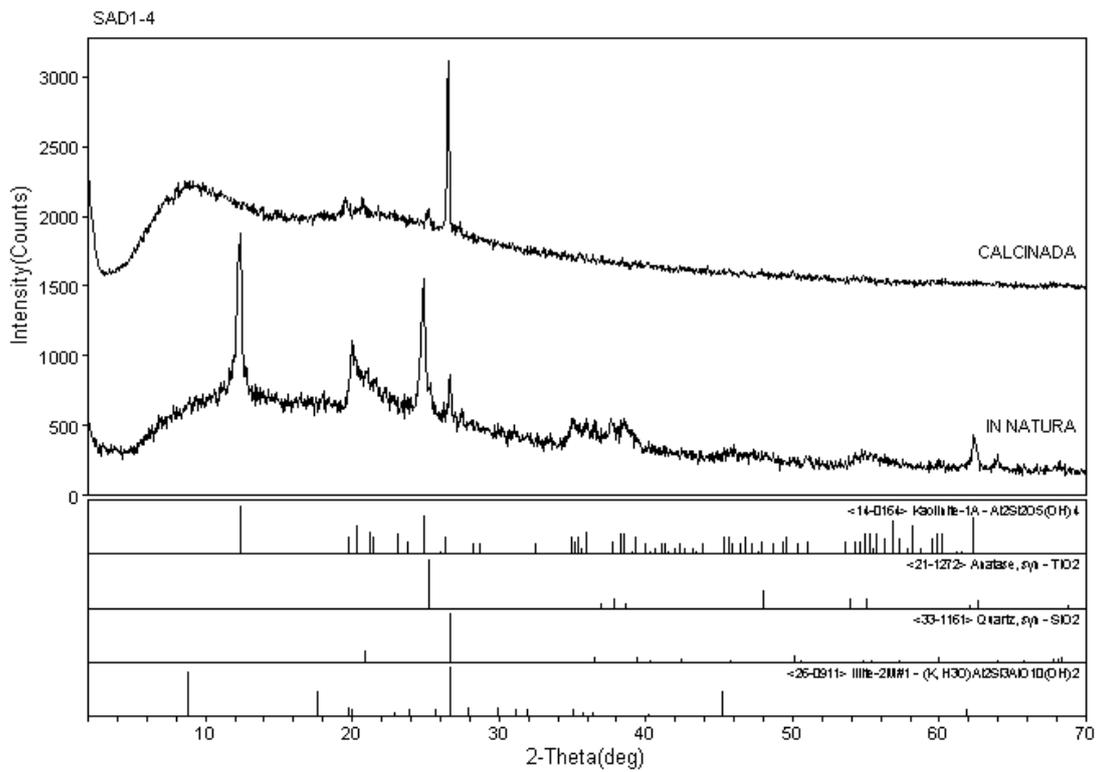
c:\dr\ma\vector\1\ca\lta\1\ad\roumb\1\ Medias.dwg, Sep 23, 2009 @ 11:18a

Figura A1.25 – Difractogramas SAD1-2 e SAD1-1: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

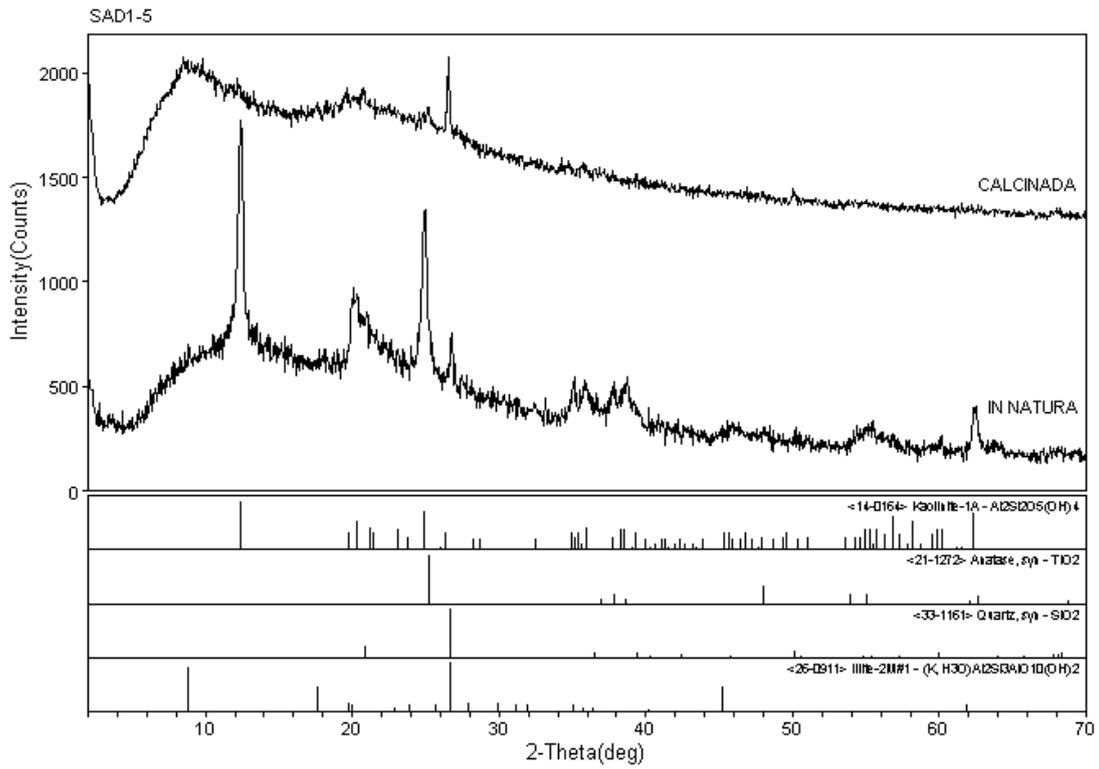
c:\dr\ma\vector\1\ca\1ca-1\rad\roumb-1\ Medias.dwg, Sep 23, 2009 @ 11:28a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

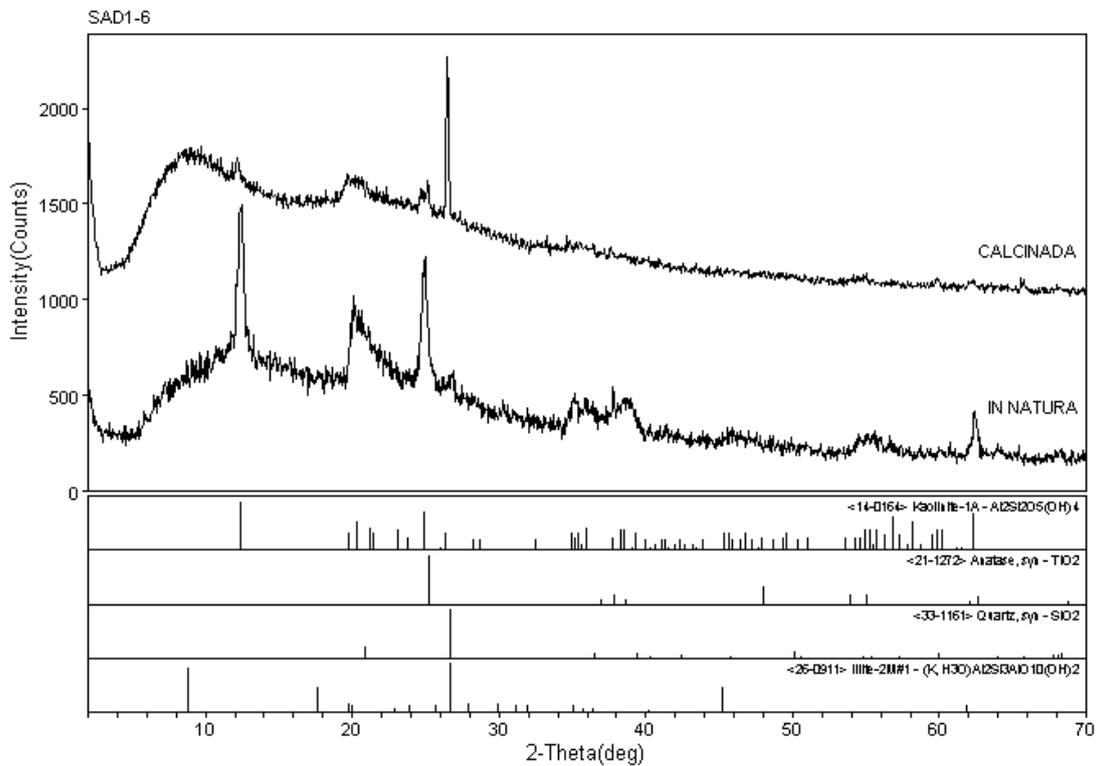
c:\dr\ma\vector\1\ca\1ca-1\rad\roumb-1\ Medias.dwg, Sep 23, 2009 @ 11:28a

Figura A1.26 – Difractogramas SAD1-4 e SAD1-3: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

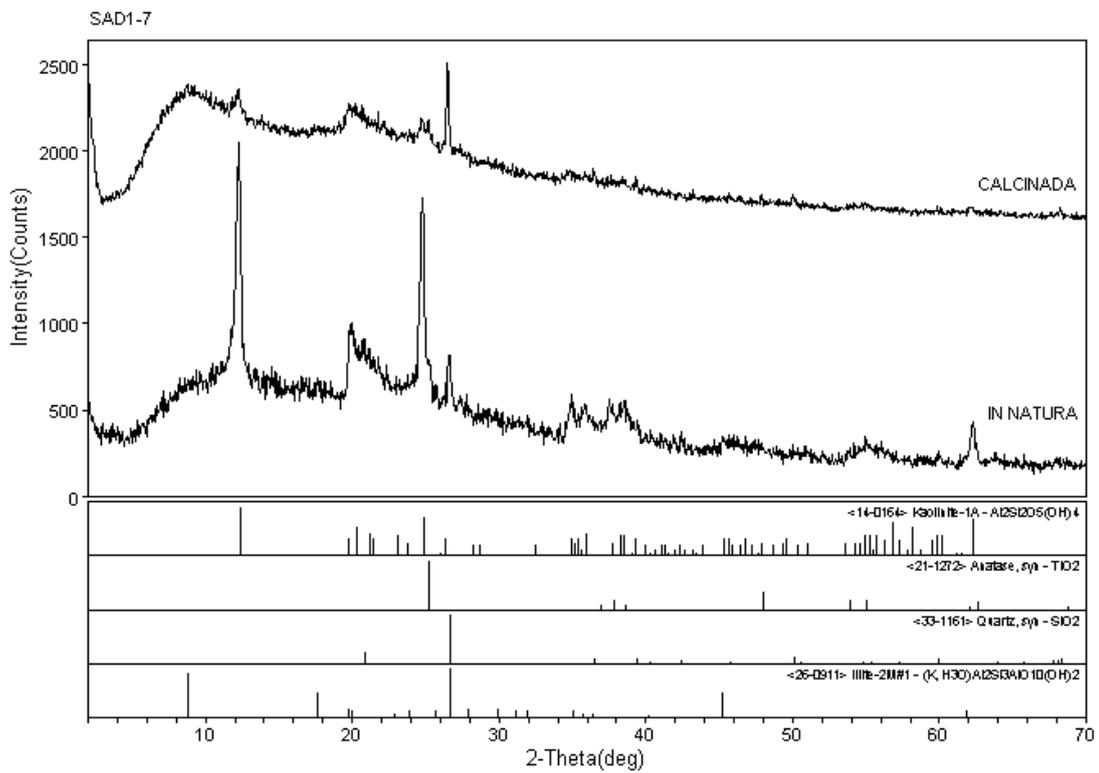
c:\dr\ma\vector\1\calca\1\ad\roumb\1\ Medias.dwg, Sep 23, 2009 @ 11:31a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

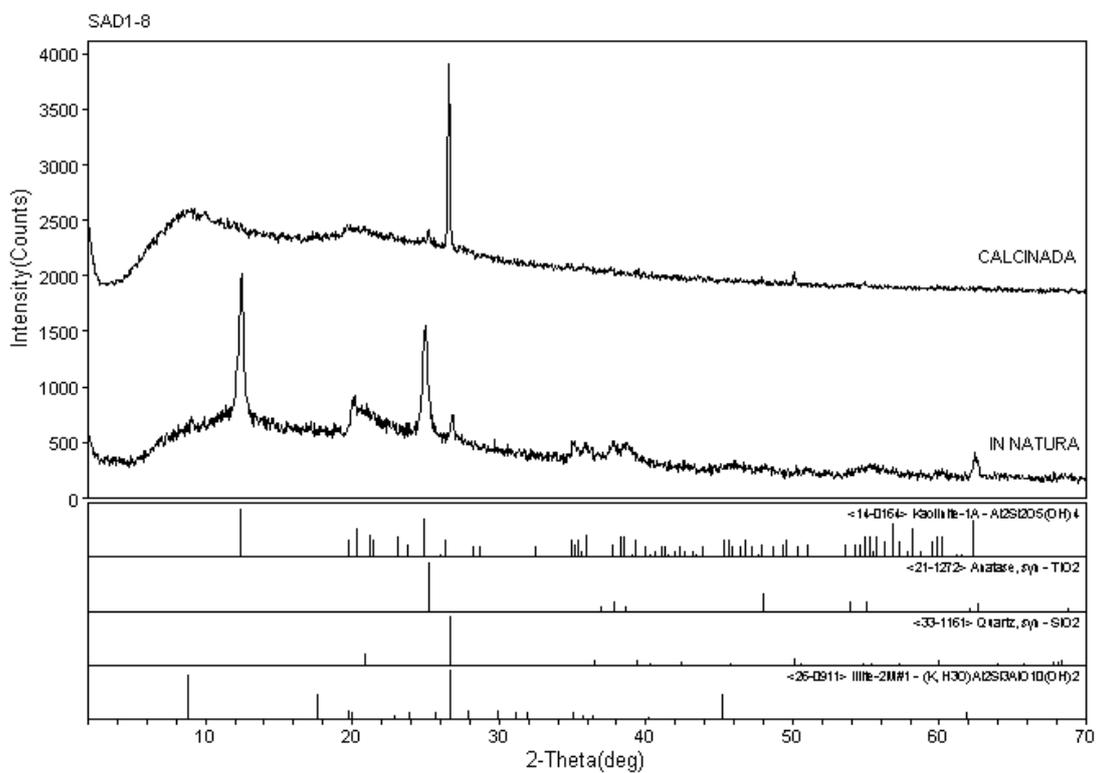
c:\dr\ma\vector\1\calca\1\ad\roumb\1\ Medias.dwg, Sep 23, 2009 @ 11:31a

Figura A1.27 – Difractogramas SAD1-6 e SAD1-5: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\dr\ma\vector\1\ca\ca-1\ad\roumb-1\ Medias da: Sep 23, 2009 @ 11:38a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\dr\ma\vector\1\ca\ca-1\ad\roumb-1\ Medias da: Sep 23, 2009 @ 11:38a

Figura A1.28 – Difractogramas SAD1-8 e SAD1-7: Santo Antônio do Descoberto.

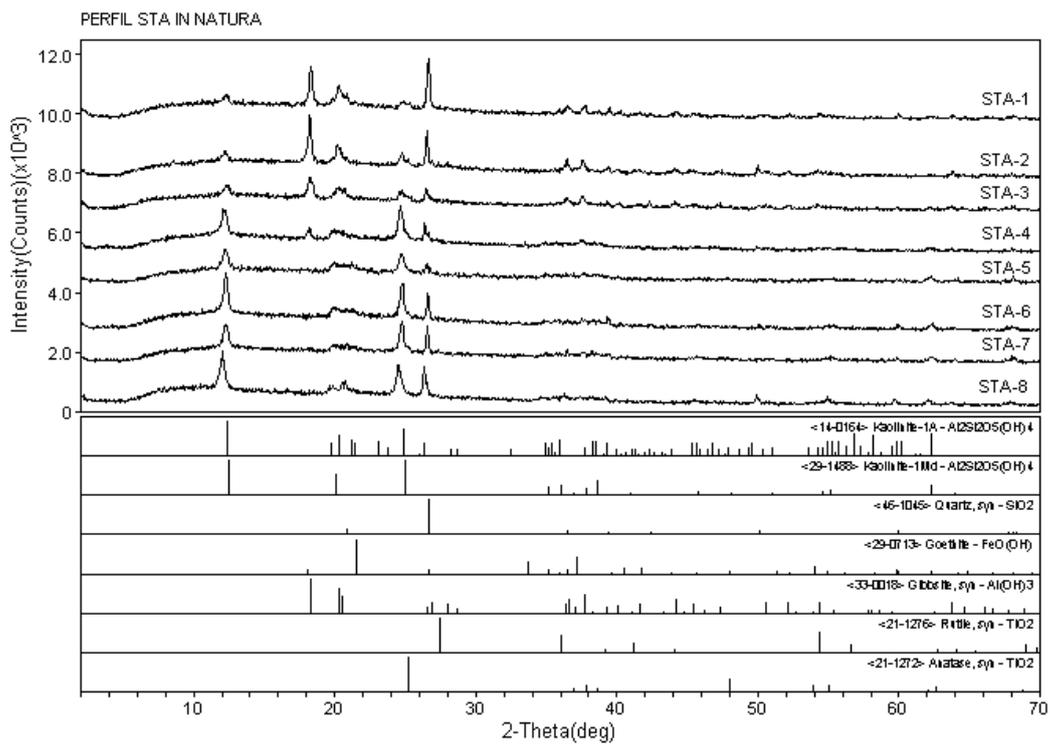
Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Santa Maria

Argila *in natura* - Difractogramas Empilhados da Base para o Topo

Figura A1.29 – Difractogramas STA-8 a STA-1: Santa Maria

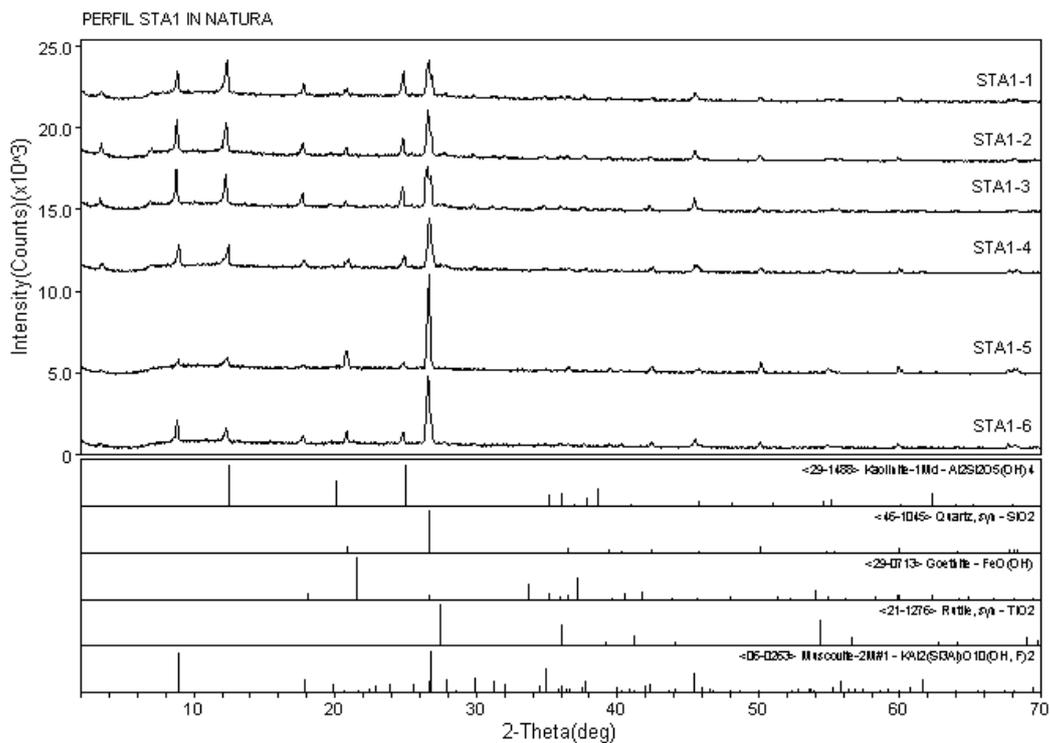
Figura A1.30 – Difractogramas STA1-6 a STA1-1: Santa Maria



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<0:dr\ma\ve\cde-1\stam-1\sta\oemb-1> T11 rsdar, Sep 24, 2019 09:51a

Figura A1.29 – Difratomogramas STA-8 a STA-1: Santa Maria.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<0:dr\ma\ve\cde-1\stam-1\sta\oemb-1> T11 rsdar, Sep 24, 2019 09:26a

Figura A1.30 – Difratomogramas STA1-6 a STA1-1: Santa Maria.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Santa Maria

Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

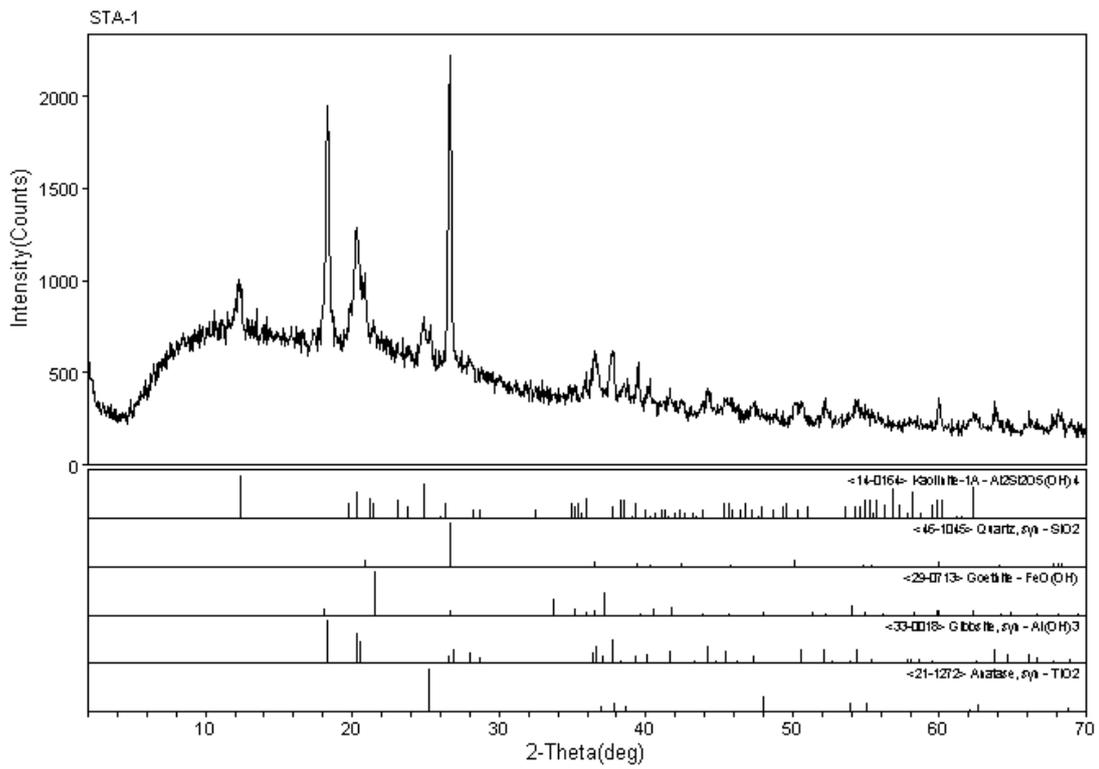
- Perfil STA

Figura A1.31 – Difractogramas STA-2 e STA-1: Santa Maria

Figura A1.32 – Difractogramas STA-4 e STA-3: Santa Maria

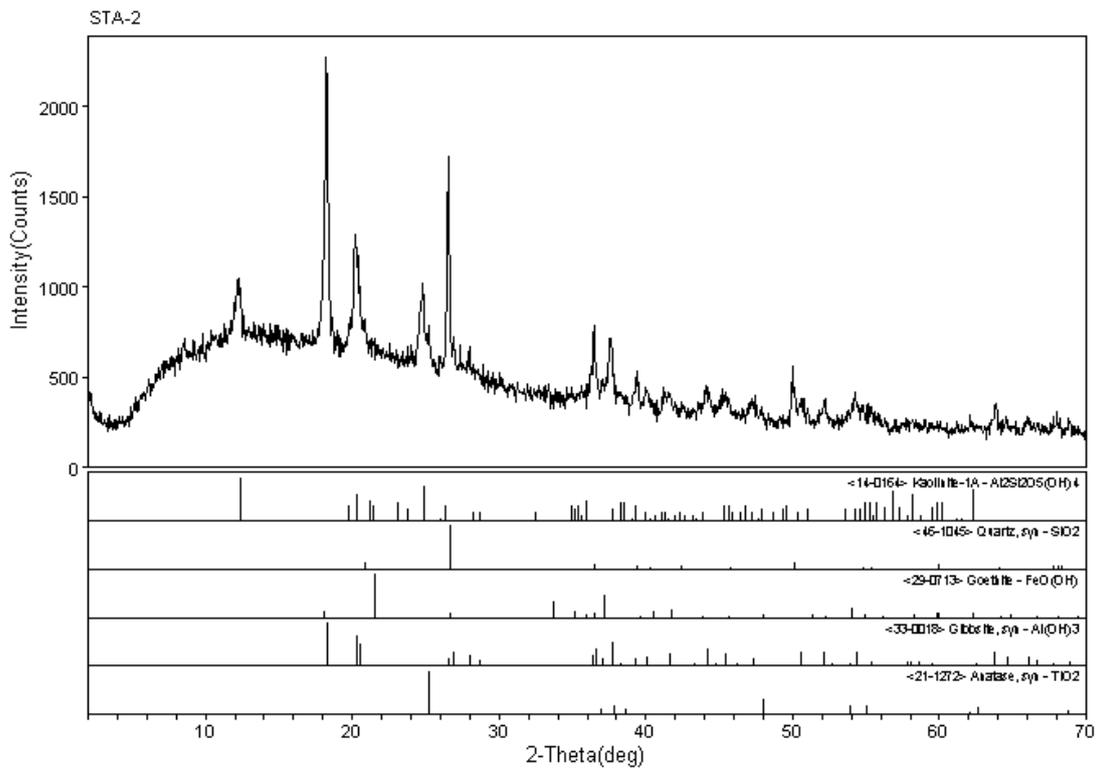
Figura A1.33 – Difractogramas STA-6 e STA-5: Santa Maria

Figura A1.34 – Difractogramas STA-8 e STA-7: Santa Maria



Laboratorio de DRX - IG/UnB

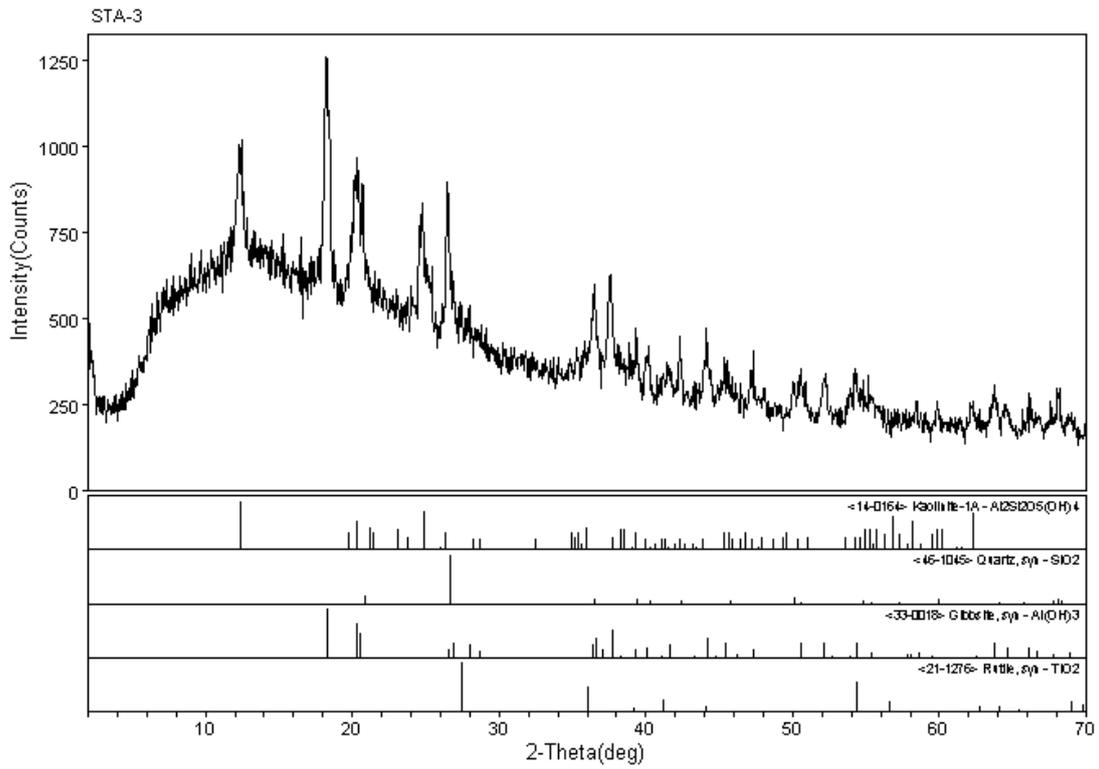
<c:\dr\ma\ve\ope-1\statam-1\1410\comb-1> Thursday, Sep 24, 2009 09:19a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

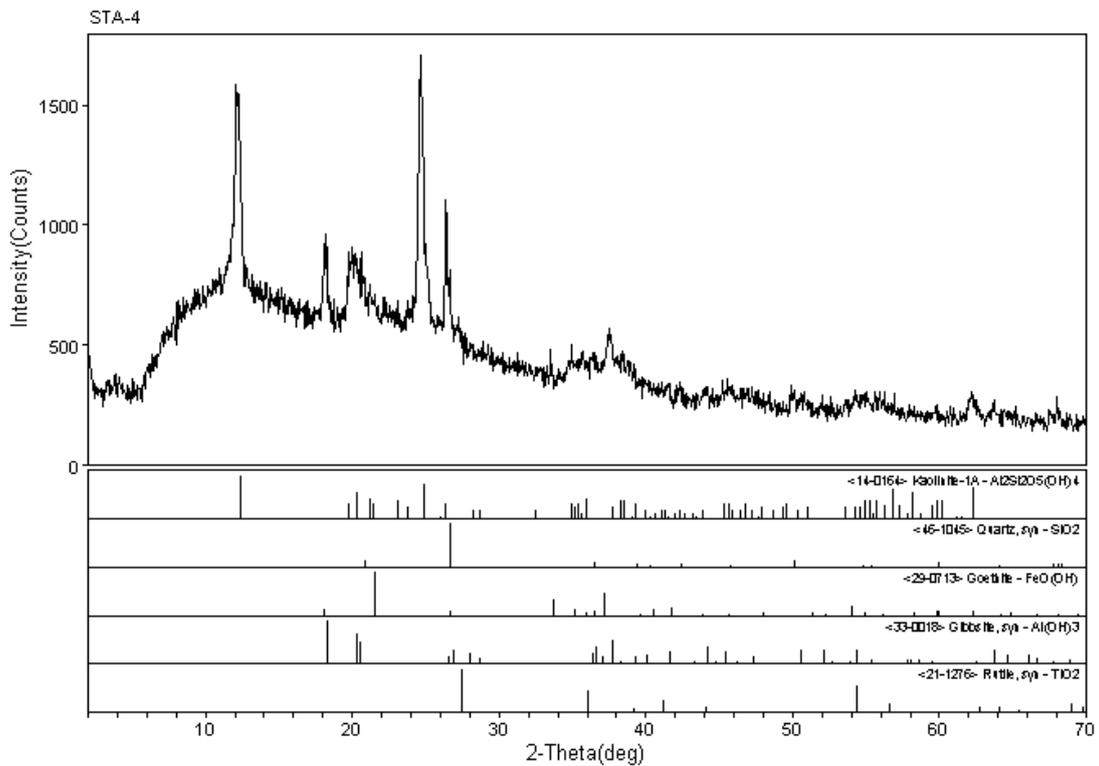
<c:\dr\ma\ve\ope-1\statam-1\1410\comb-1> Thursday, Sep 24, 2009 09:23a

Figura A1.31 – Difractogramas STA-2 e STA-1: Santa Maria.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

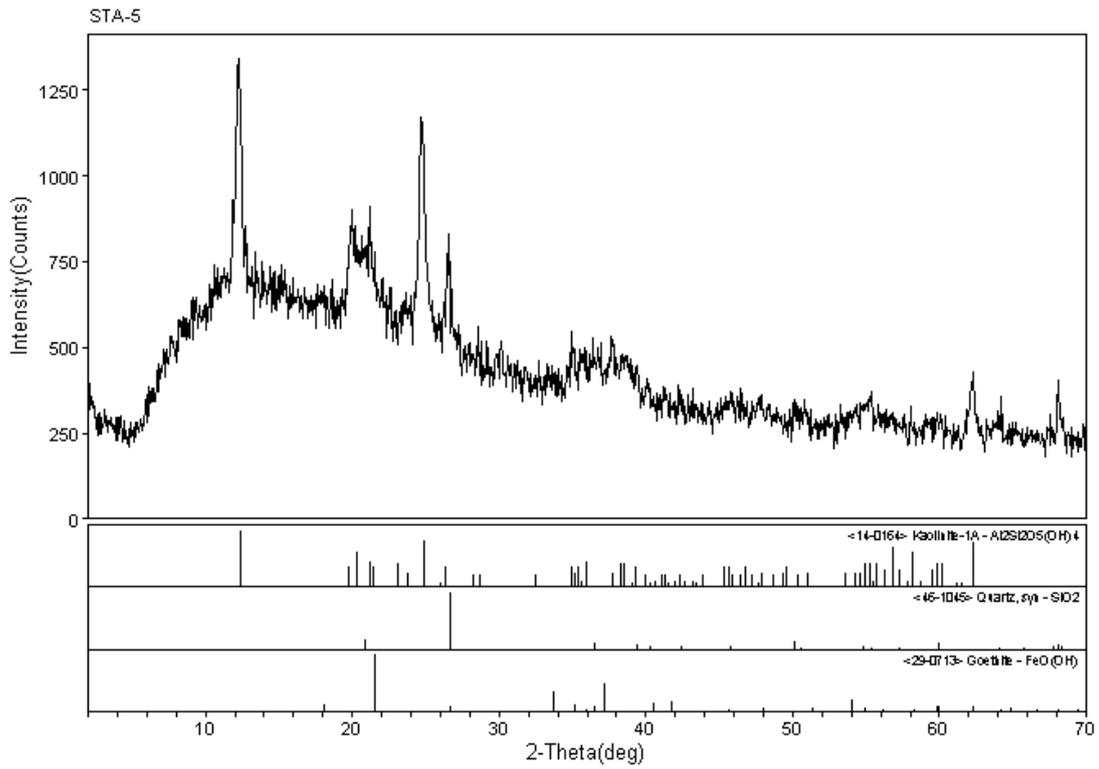
<c:\dr\ma\vecepe-1\statam-1\td\cumb-1> Thursday, Sep 24, 2009 @ 08:32a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

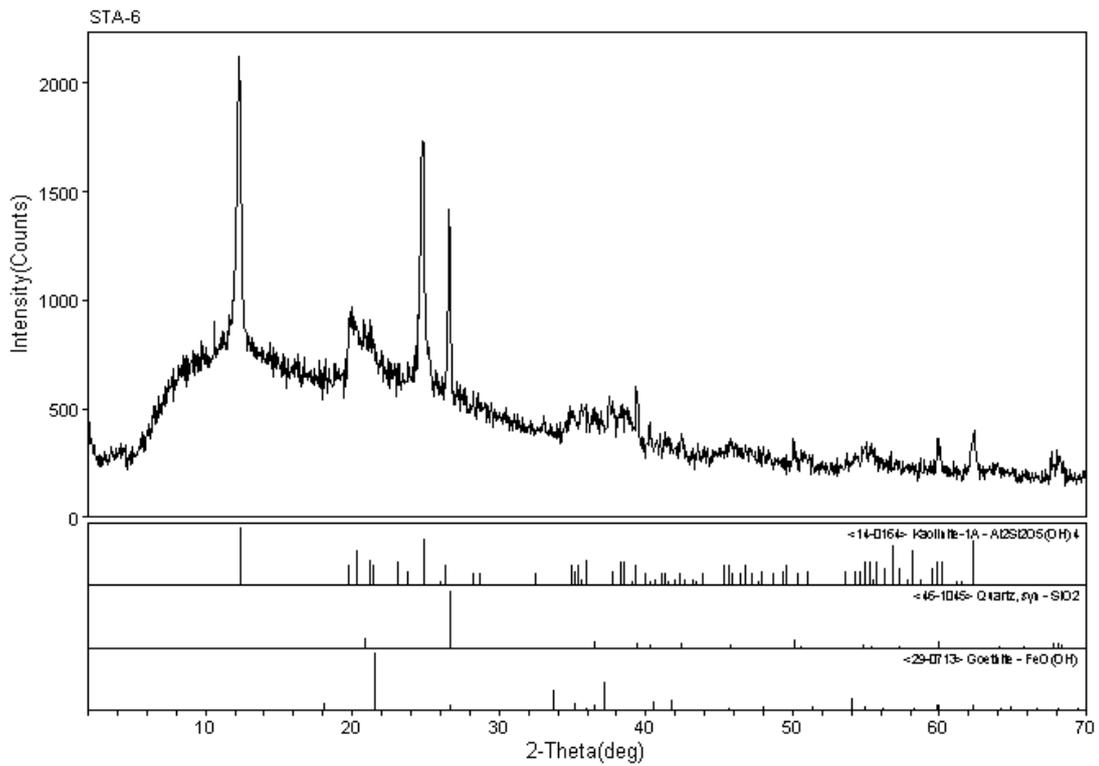
<c:\dr\ma\vecepe-1\statam-1\td\cumb-1> Thursday, Sep 24, 2009 @ 08:35a

Figura A1.32 – Difractogramas STA-4 e STA-3: Santa Maria.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

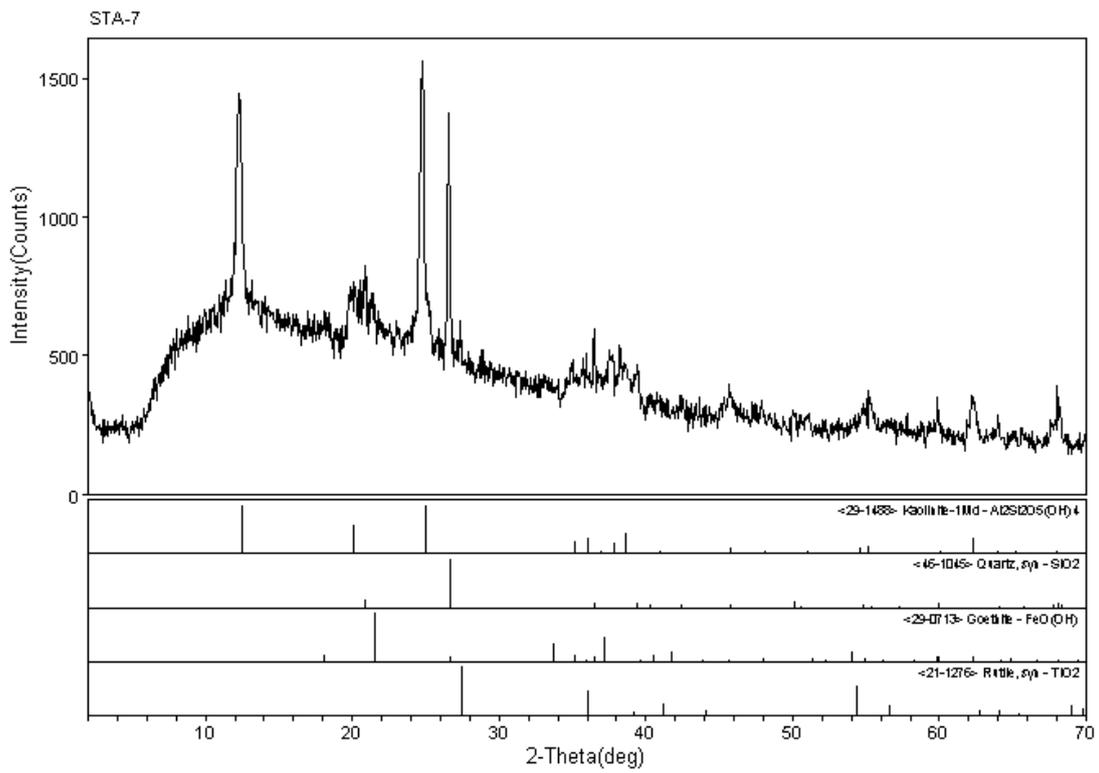
<c:\dr\ma\vecepe-1\sta\sta-5\sta5.dif> Thursday, Sep 24, 2009 08:38a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

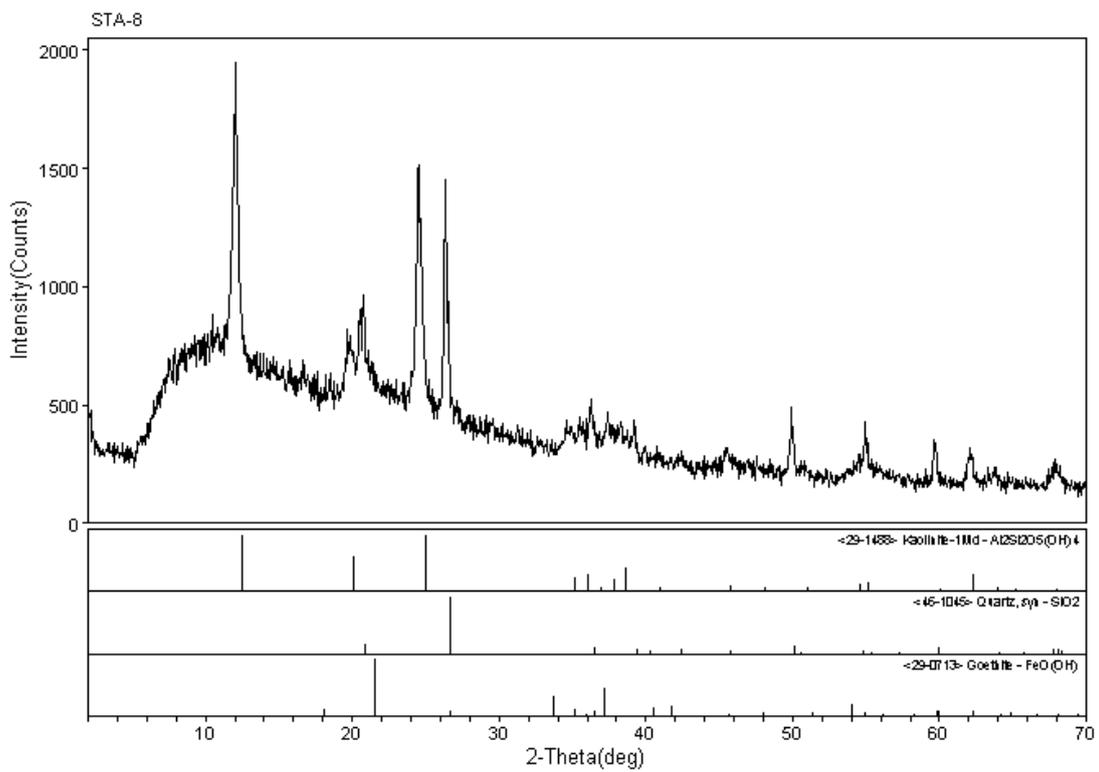
<c:\dr\ma\vecepe-1\sta\sta-6\sta6.dif> Thursday, Sep 24, 2009 08:38a

Figura A1.33 – Difractogramas STA-6 e STA-5: Santa Maria.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<c:\dr\ma\vecepe-1\statm-1\sta\staemb-1> Thursday, Sep 24, 2009 09:40a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<c:\dr\ma\vecepe-1\statm-1\sta\staemb-1> Thursday, Sep 24, 2009 09:41a

Figura A1.34 – Difratogramas STA-8 e STA-7: Santa Maria.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Santa Maria

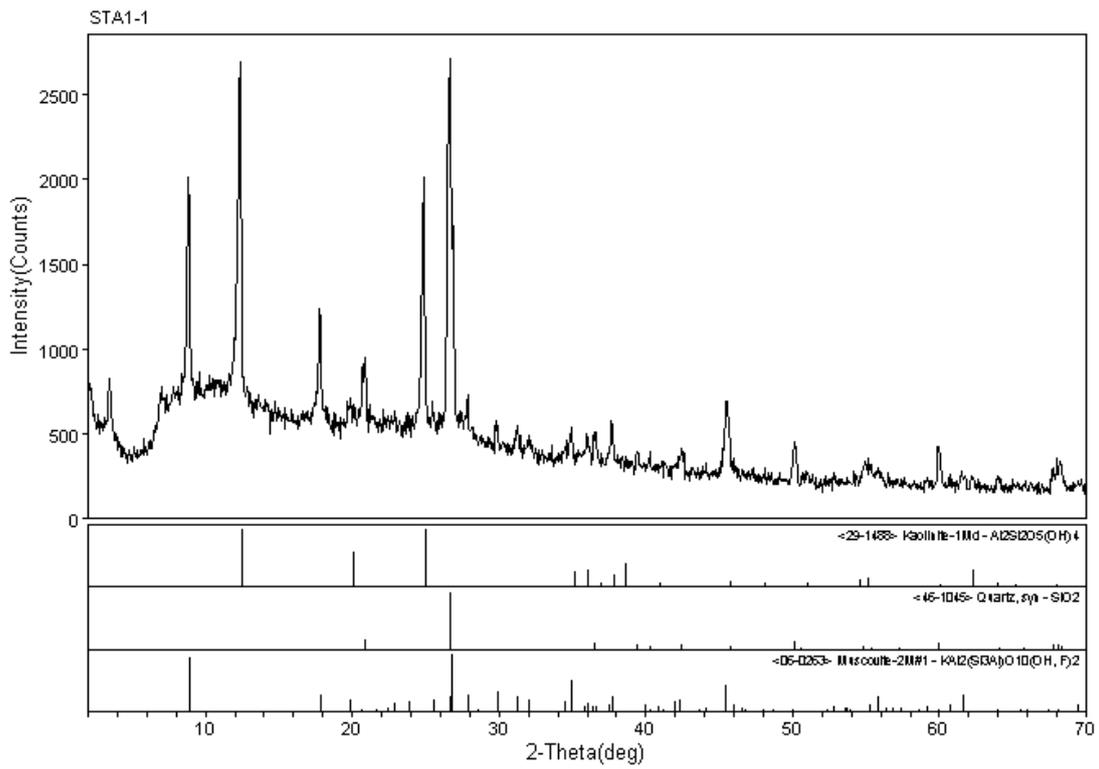
Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

- Perfil STA1

Figura A1.35 – Difractogramas STA1-2 e STA1-1: Santa Maria

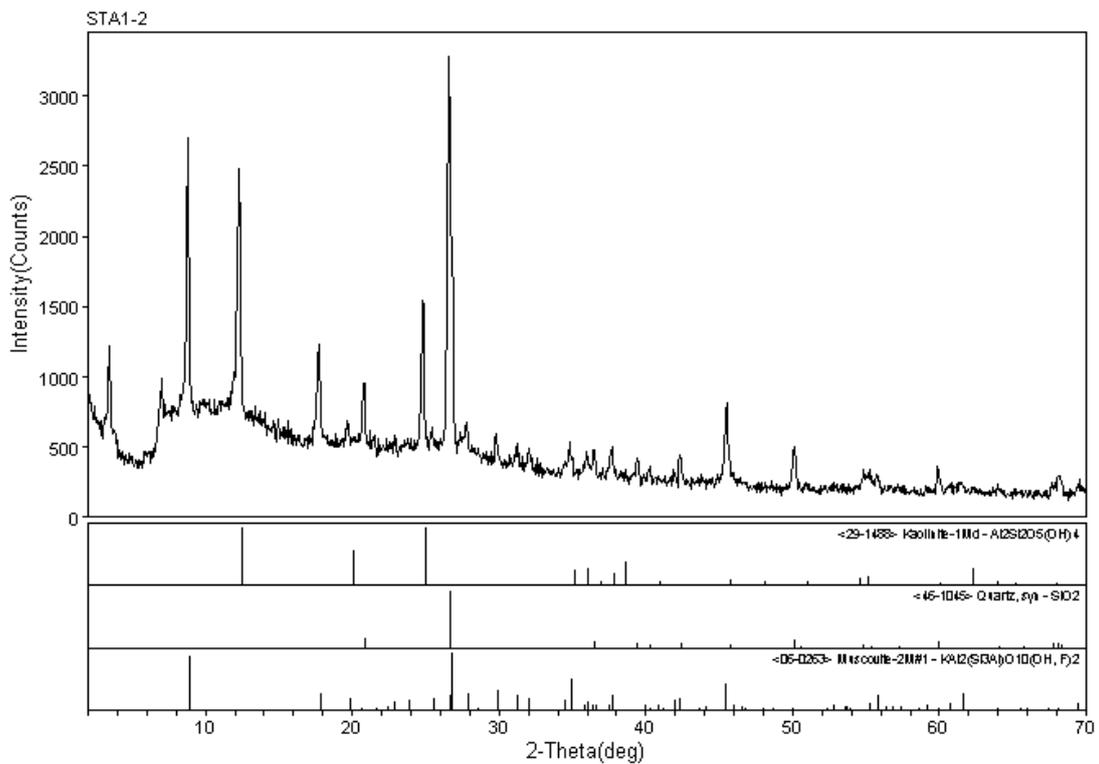
Figura A1.36 – Difractogramas STA1-4 e STA1-3: Santa Maria

Figura A1.37 – Difractogramas STA1-6 e STA1-5: Santa Maria



Laboratorio de DRX - IG/UnB

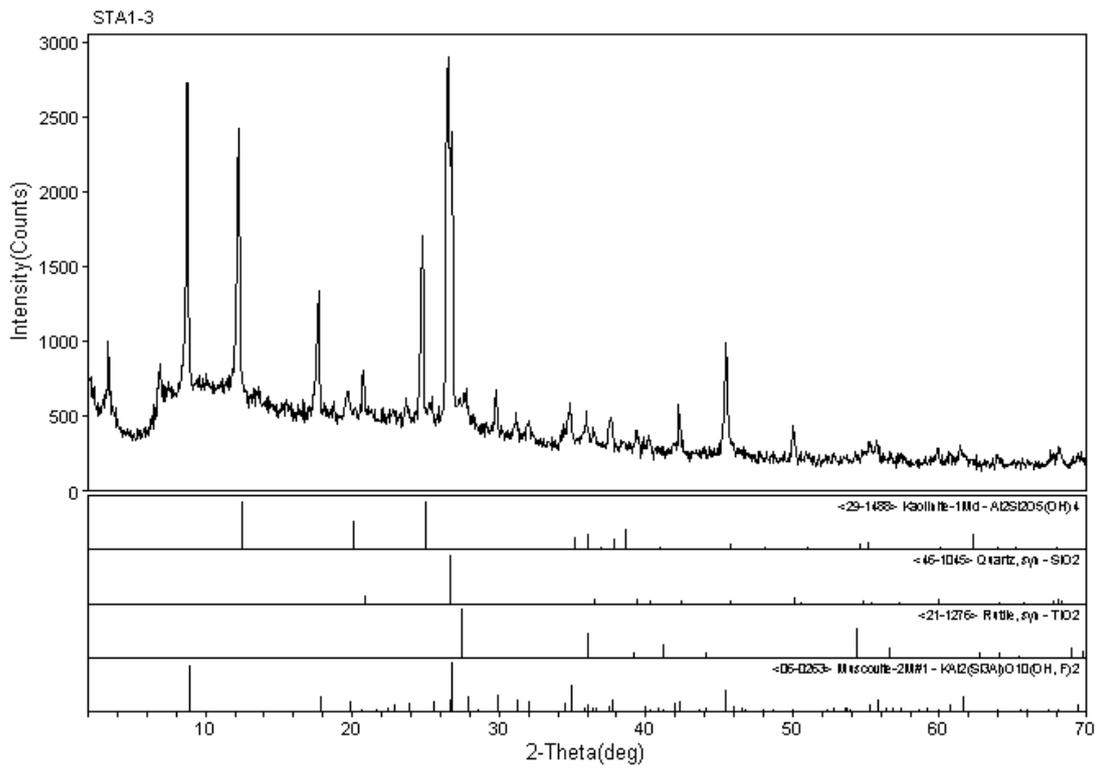
c:\dr\ma\veoide-1\exam-1\data\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 @ 09:16a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

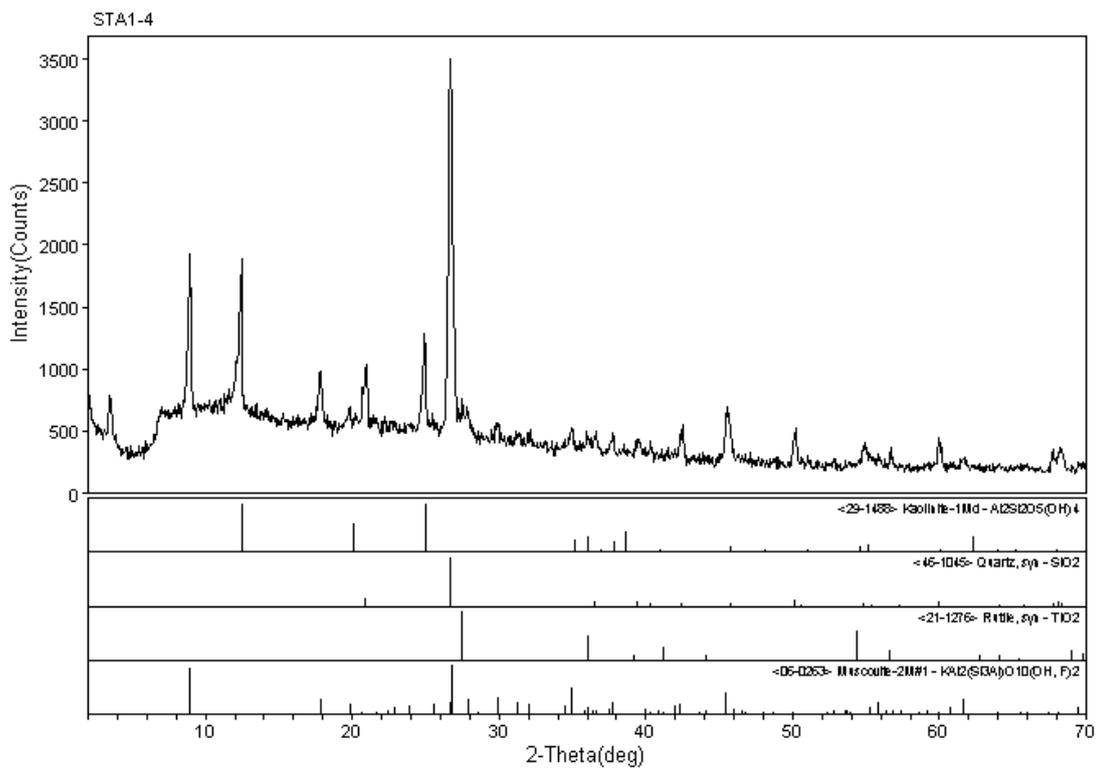
c:\dr\ma\veoide-1\exam-1\data\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 @ 09:16a

Figura A1.35 – Difractogramas STA1-2 e STA1-1: Santa Maria.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

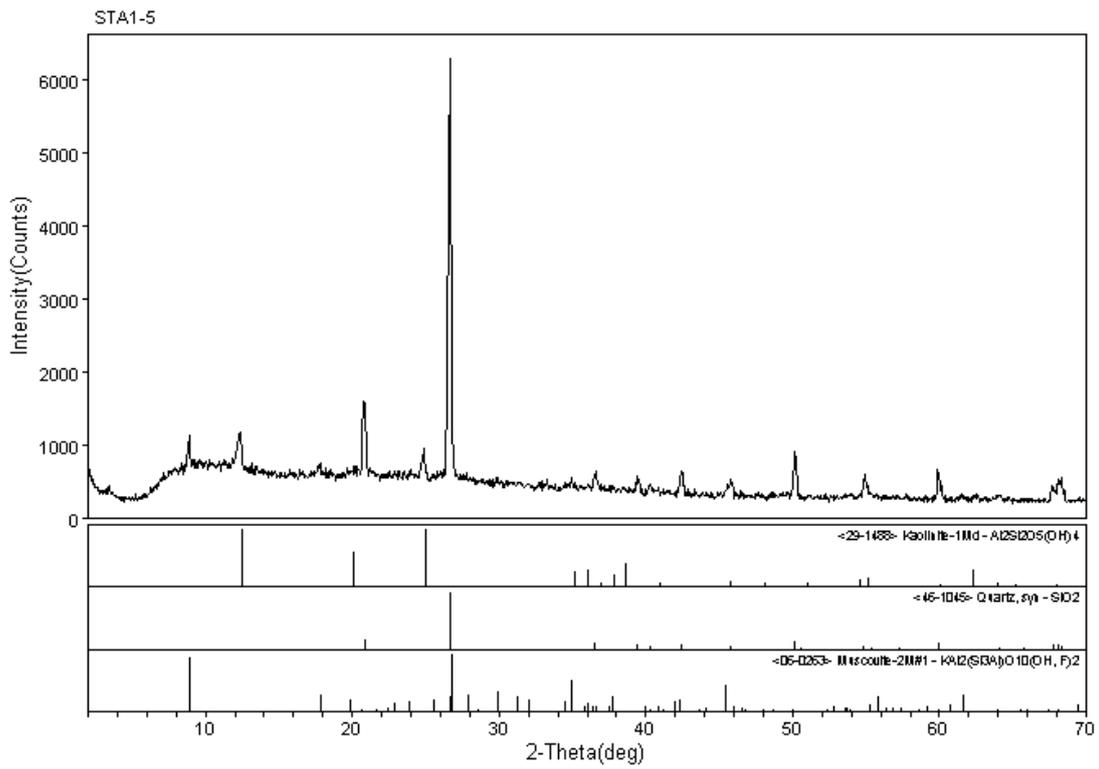
c:\dr\ma\veicde-1\exam-1\data\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 @ 09:13a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

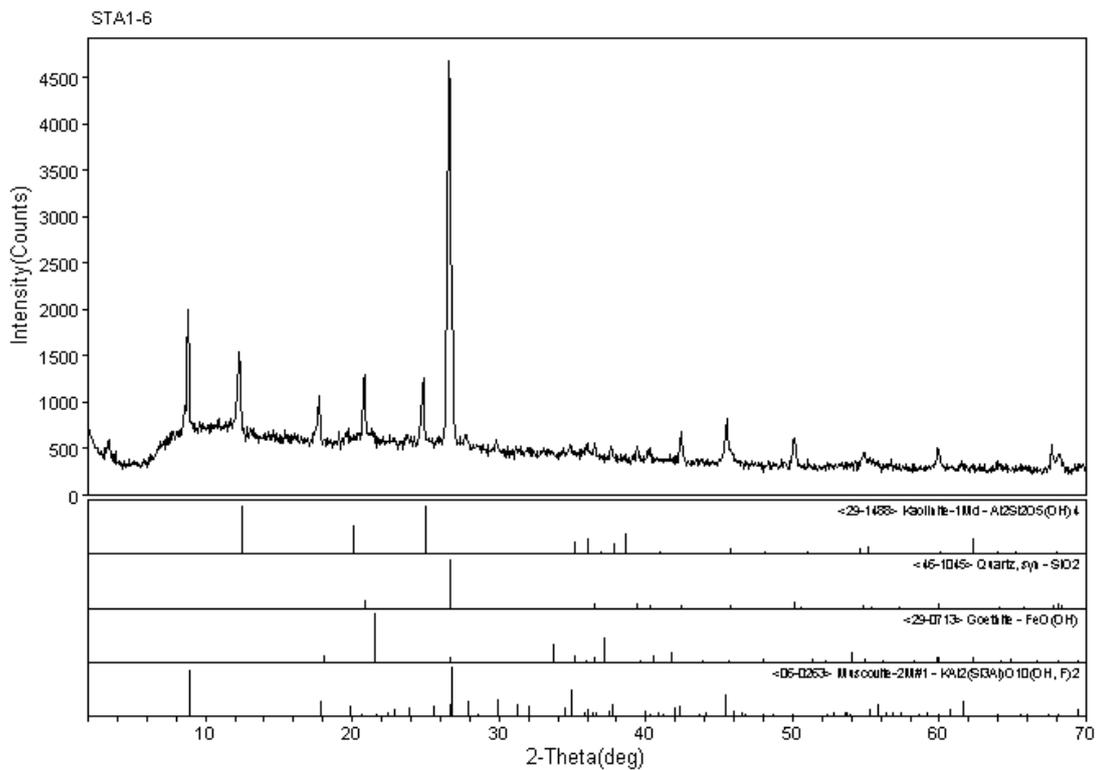
c:\dr\ma\veicde-1\exam-1\data\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 @ 09:17a

Figura A1.36 – Difratogramas STA1-4 e STA1-3: Santa Maria.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\d\ma\vecode-1\exam-1\data\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 09:19a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\d\ma\vecode-1\exam-1\data\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 09:20a

Figura A1.37 – Difractogramas STA1-6 e STA1-5: Santa Maria.

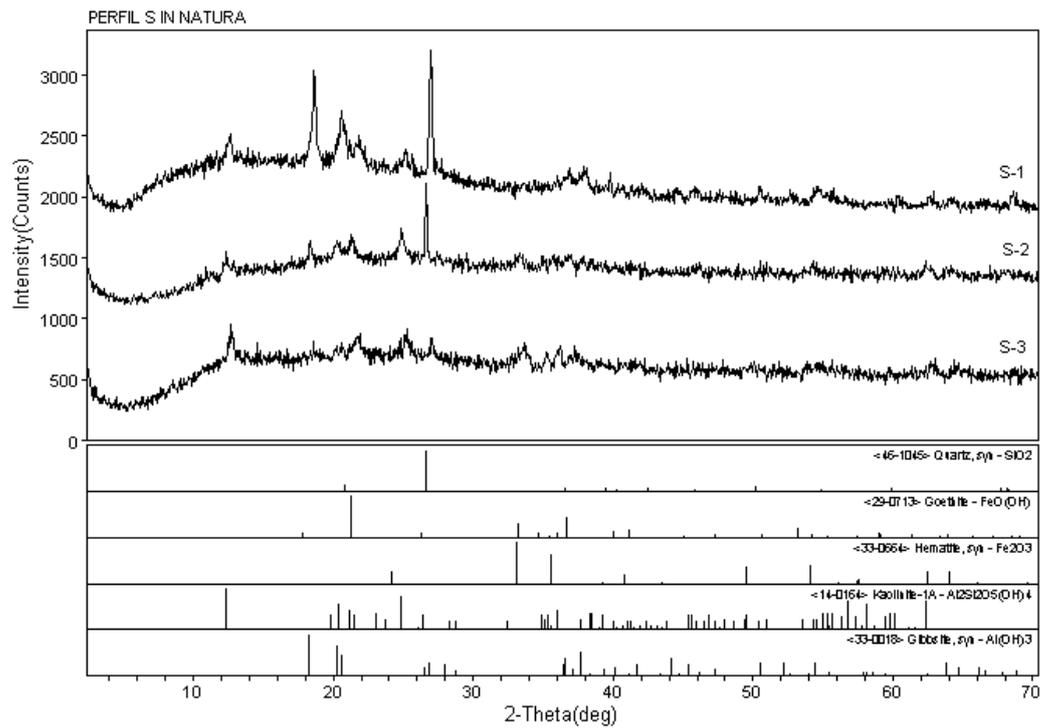
Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Sobradinho

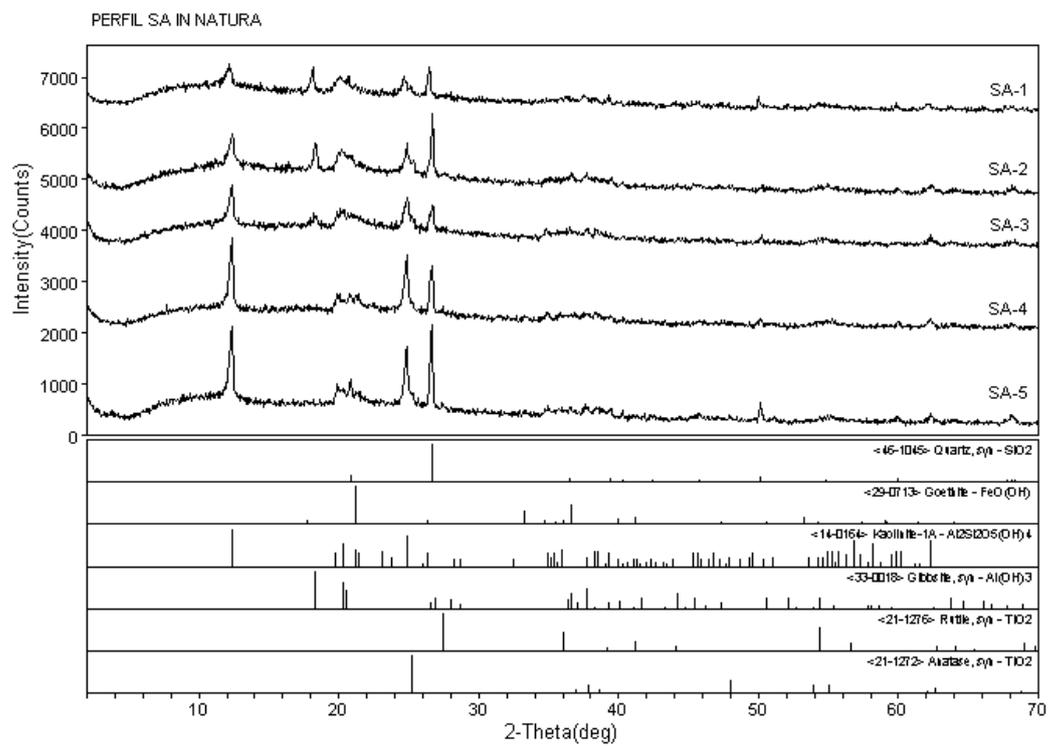
Argila *in natura* - Difractogramas Empilhados da Base para o Topo

Figura A1.38 – Difractogramas S-3 a S-1: Sobradinho

Figura A1.39 – Difractogramas SA-5 a SA-1: Sobradinho



Laboratório de DRX - IG/UnB <0:dir/mz/veicde-1/sobrad-1/souemb-1>-T111ordav, Sep 24, 2019 @ 10:52a
 Figura A1.38 – Difratoformas S-3 a S-1: Sobradinho.



Laboratório de DRX - IG/UnB <0:dir/mz/veicde-1/sobrad-1/souemb-1>-T111ordav, Sep 24, 2019 @ 09:52a
 Figura A1.39 – Difratoformas SA-5 a SA-1: Sobradinho.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

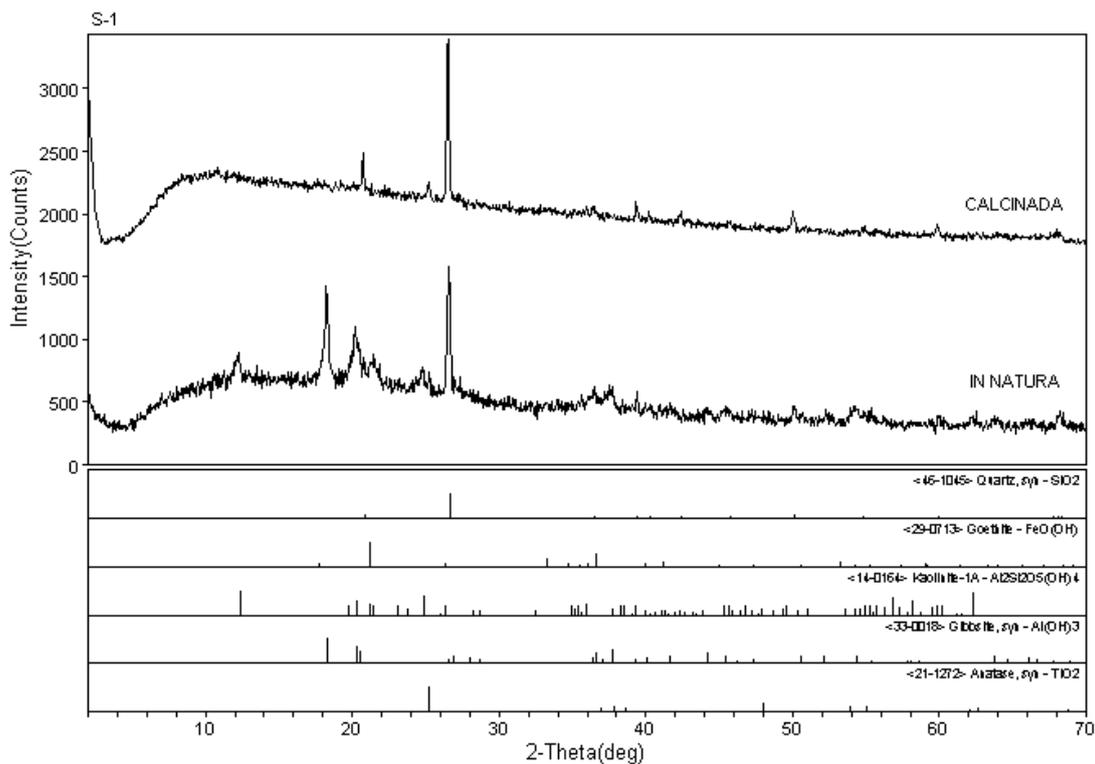
Área Sobradinho

Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

- Perfil S

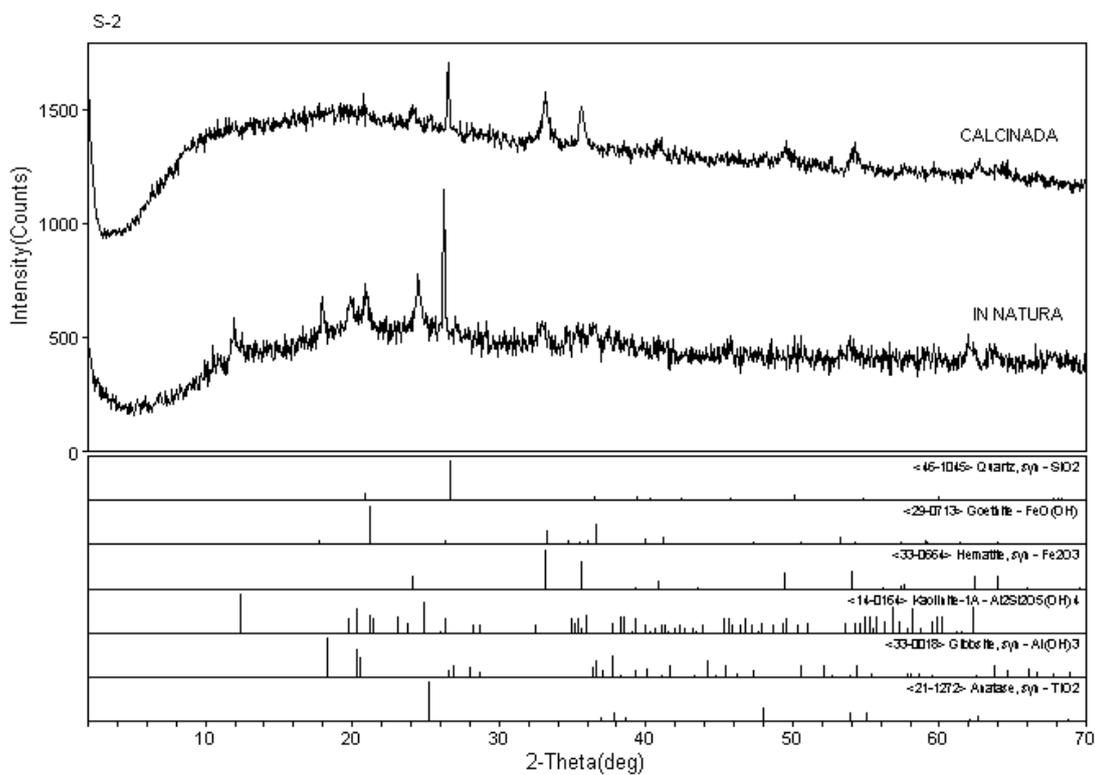
Figura A1.40 – Difractogramas S-2 e S-1: Sobradinho

Figura A1.41 – Difractograma S-3: Sobradinho



Laboratorio de DRX - IG/UnB

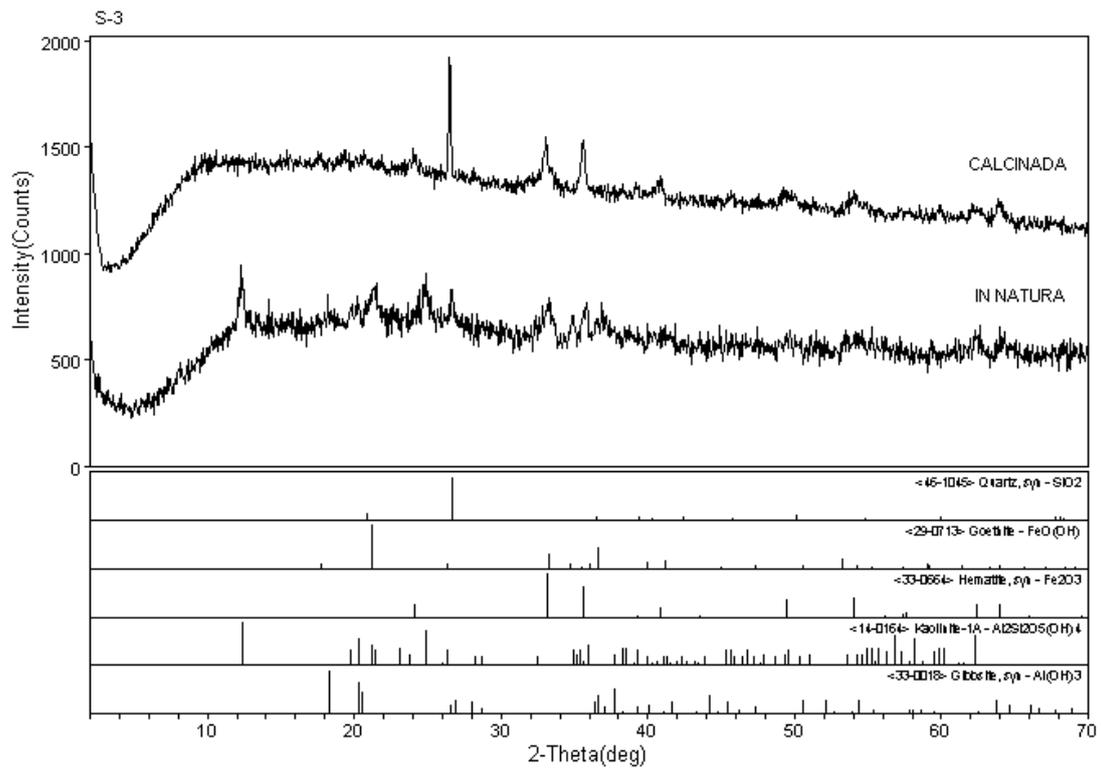
c:\drx\ma\veo\pe-1\sobrad-1\1406emb-1> Thursday, Sep 24, 2009 @ 10:15a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\drx\ma\veo\pe-1\sobrad-1\1406emb-1> Thursday, Sep 24, 2009 @ 10:12a

Figura A1.40 – Difractogramas S-2 e S-1: Sobradinho.



Laboratório de DRX - IG/UnB

c:\drx\ma\ve\drx-1\sobrad-1\w\comb-1- Tit\resdax_Sep 24, 2009 @ 10:20a

Figura A1.41 – Difratoograma S-3: Sobradinho.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Sobradinho

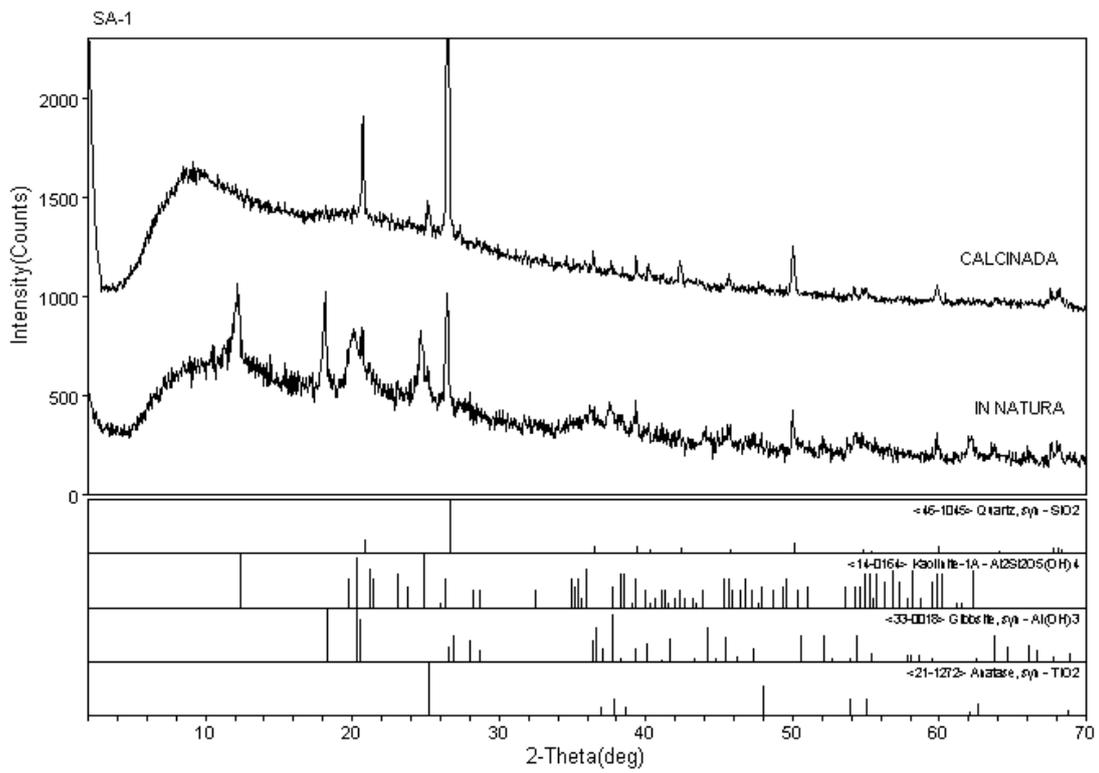
Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

- Perfil SA

Figura A1.42 – Difractogramas SA-2 e SA-1: Sobradinho

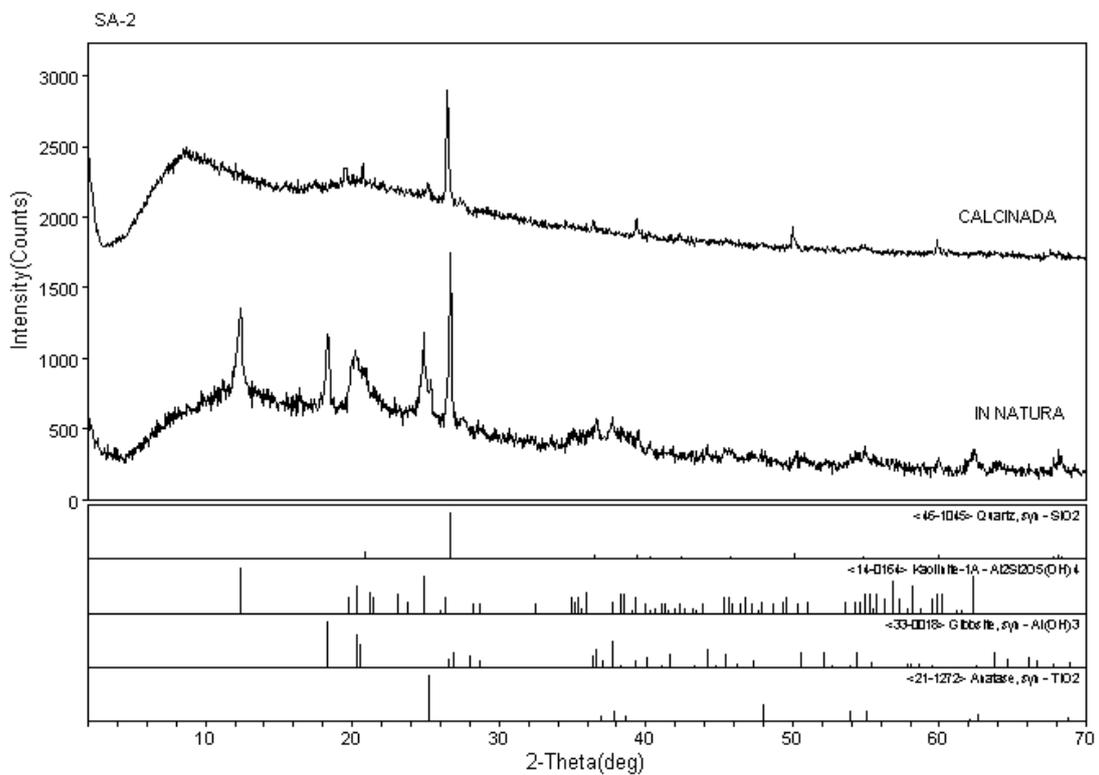
Figura A1.43 – Difractogramas SA-4 e SA-3: Sobradinho

Figura A1.44 – Difractograma SA-5: Sobradinho



Laboratorio de DRX - IG/UnB

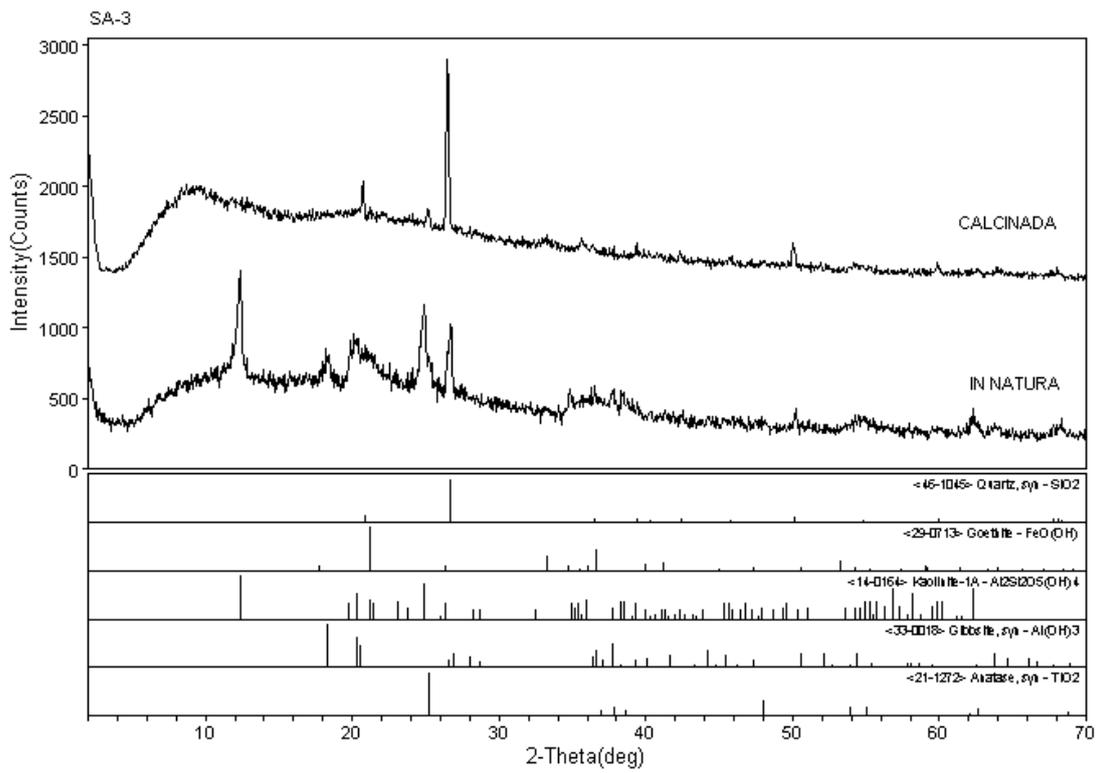
c:\dr\max\scoutb-1\sobrad-1\sa1\comb-1- Ti11rda\ Sep 24, 2009 @ 10:40a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

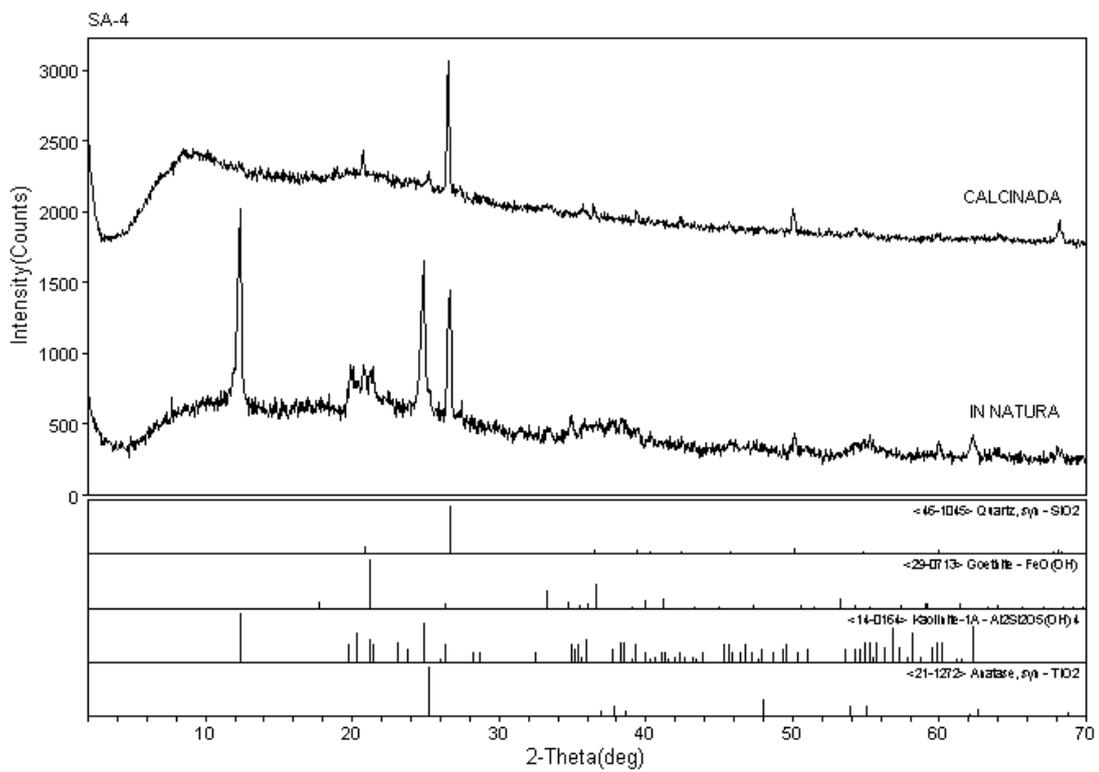
c:\dr\max\scoutb-1\sobrad-1\sa2\comb-1- Ti11rda\ Sep 24, 2009 @ 10:38a

Figura A1.42 – Difractogramas SA-2 e SA-1: Sobradinho.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

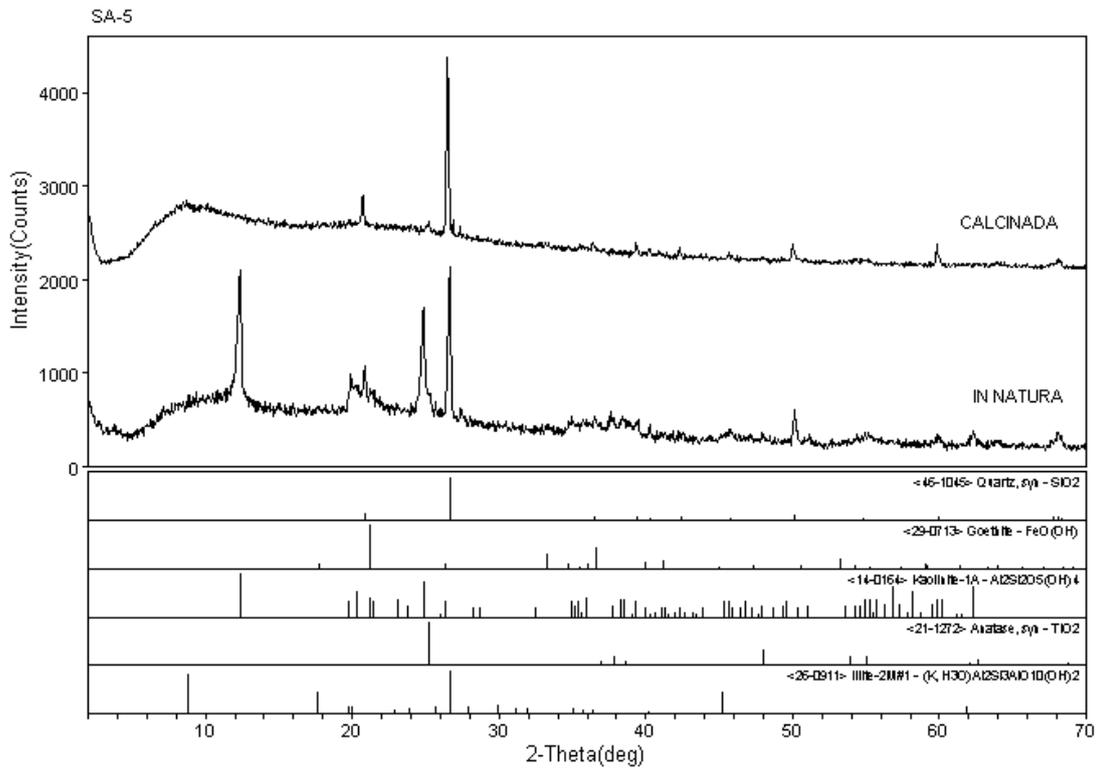
c:\dr\max\resolpe-1\sobrad-1\sa3\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 @ 10:33a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\dr\max\resolpe-1\sobrad-1\sa4\comb-1- Thursday, Sep 24, 2009 @ 10:33a

Figura A1.43 – Difractogramas SA-4 e SA-3: Sobradinho.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

c:\dr\max\recorde-1\sobrad-1\alv\comb-1\ T111res.dat, Sep 24, 2009 @ 10:26a

Figura A1.44 – Difratoograma SA-5: Sobradinho.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Bonsucesso

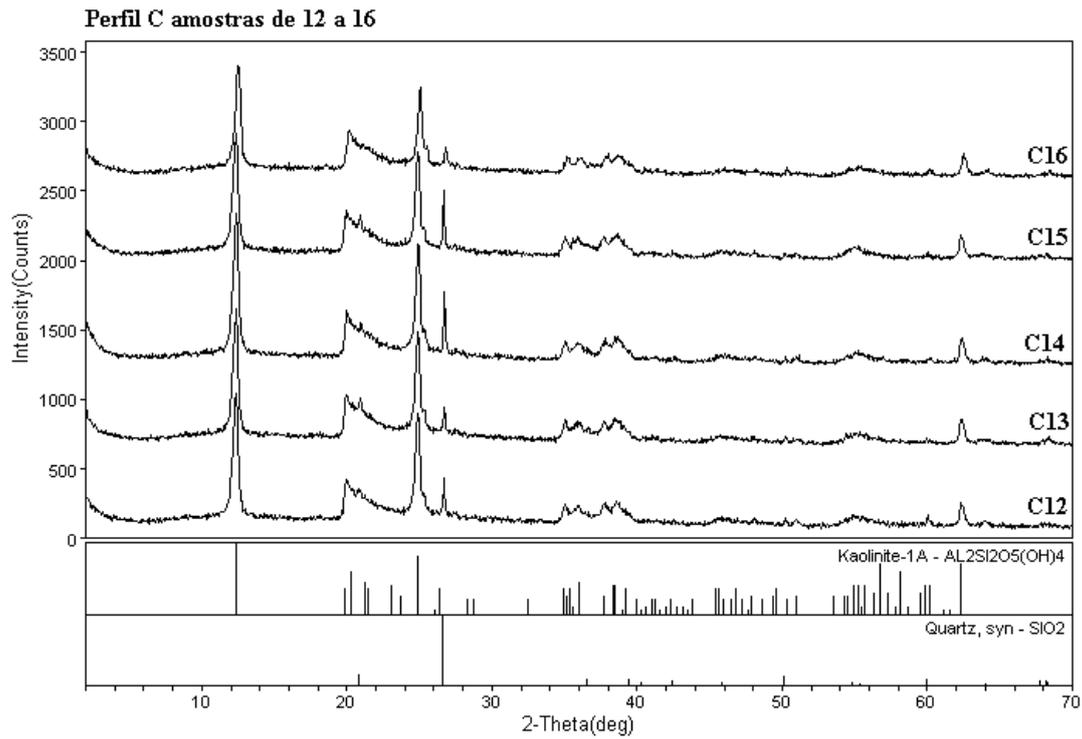
Argila *in natura* - Difractogramas Empilhados da Base para o Topo

Figura A1.45 – Difractogramas BON-C12 a BON-C16: Bonsucesso

Figura A1.46 – Difractogramas BON-C7 a BON-C11: Bonsucesso

Figura A1.47 – Difractogramas BON-C1 a BON-C6: Bonsucesso

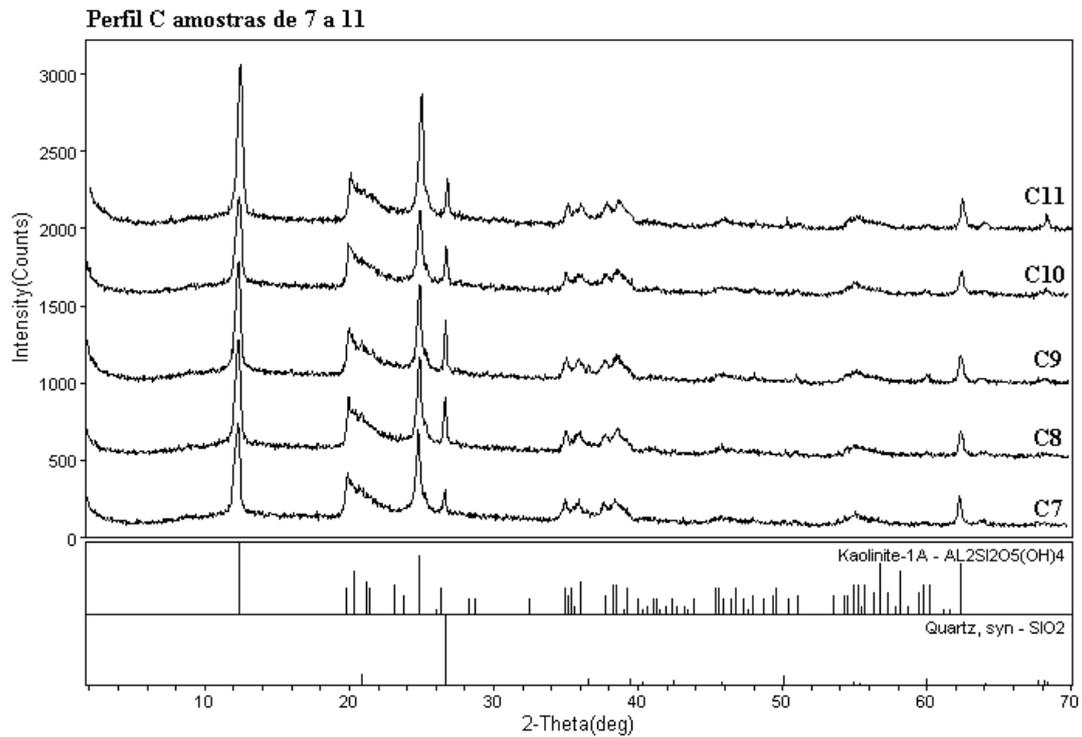
Figura A1.48 – Difractogramas BON-A1 a BON-A6: Bonsucesso



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<d:\max\novemb-1> Monday, Feb 14, 2005 09:10:12a

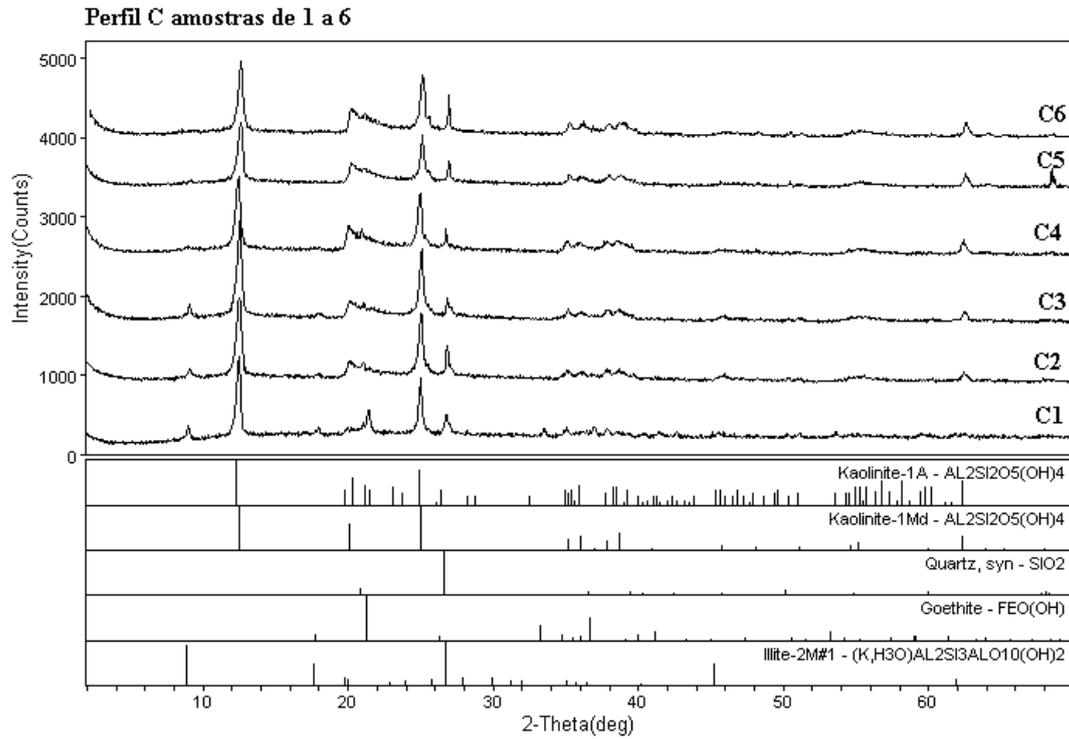
Figura A1.45 – Difratoformas BON-C12 a BON-C16: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<d:\max\novemb-1> Monday, Feb 14, 2005 09:10:14a

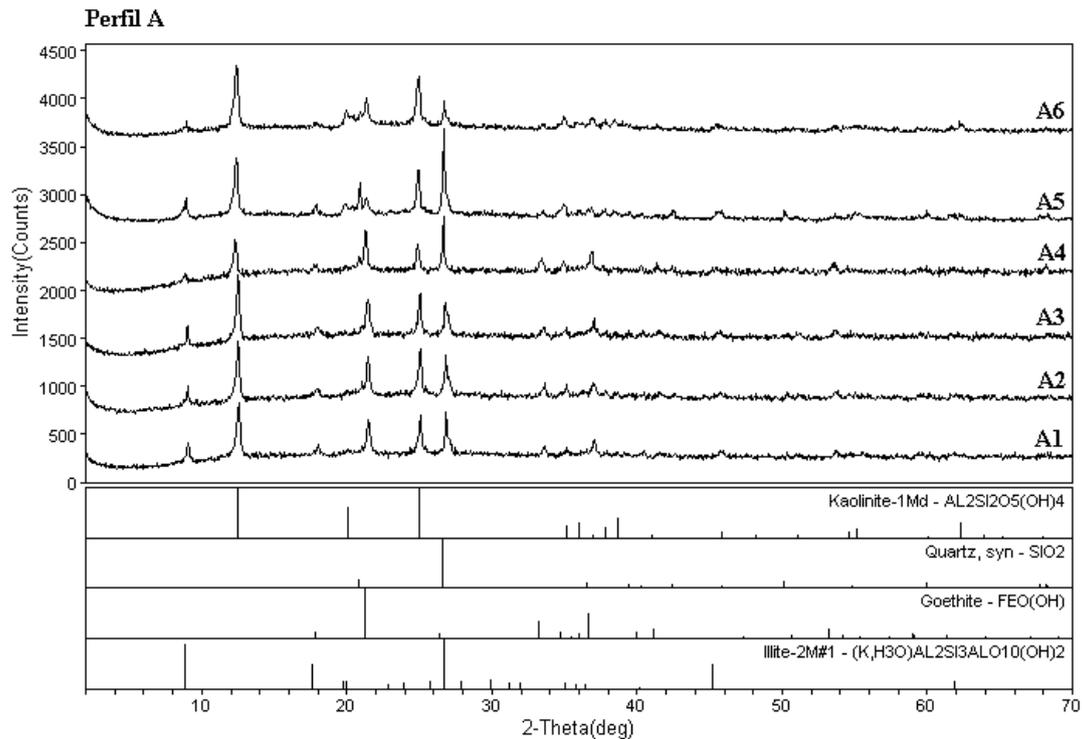
Figura A1.46 – Difratoformas BON-C7 a BON-C11: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<div>max(novemb-1> Friday, Feb 04, 2005 0809:22a

Figura A1.47 – Difratoqramas BON-C1 a BON-C6: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<div>max(novemb-1> Friday, Feb 04, 2005 0802:37a

Figura A1.48 – Difratoqramas BON-A1 a BON-A6: Bonsucesso.

Anexo 1 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem contínua (perfil vertical) de argila *in natura* e calcinada

Área Bonsucesso

Argila *in natura* e calcinada - Difractogramas

Figura A1.49 – Difractogramas BON-C15 e BON-C16: Bonsucesso

Figura A1.50 – Difractogramas BON-C13 e BON-C14: Bonsucesso

Figura A1.51 – Difractogramas BON-C11 e BON-C12: Bonsucesso

Figura A1.52 – Difractogramas BON-C9 e BON-C10: Bonsucesso

Figura A1.53 – Difractogramas BON-C7 e BON-C8: Bonsucesso

Figura A1.54 – Difractogramas BON-C5 e BON-C6: Bonsucesso

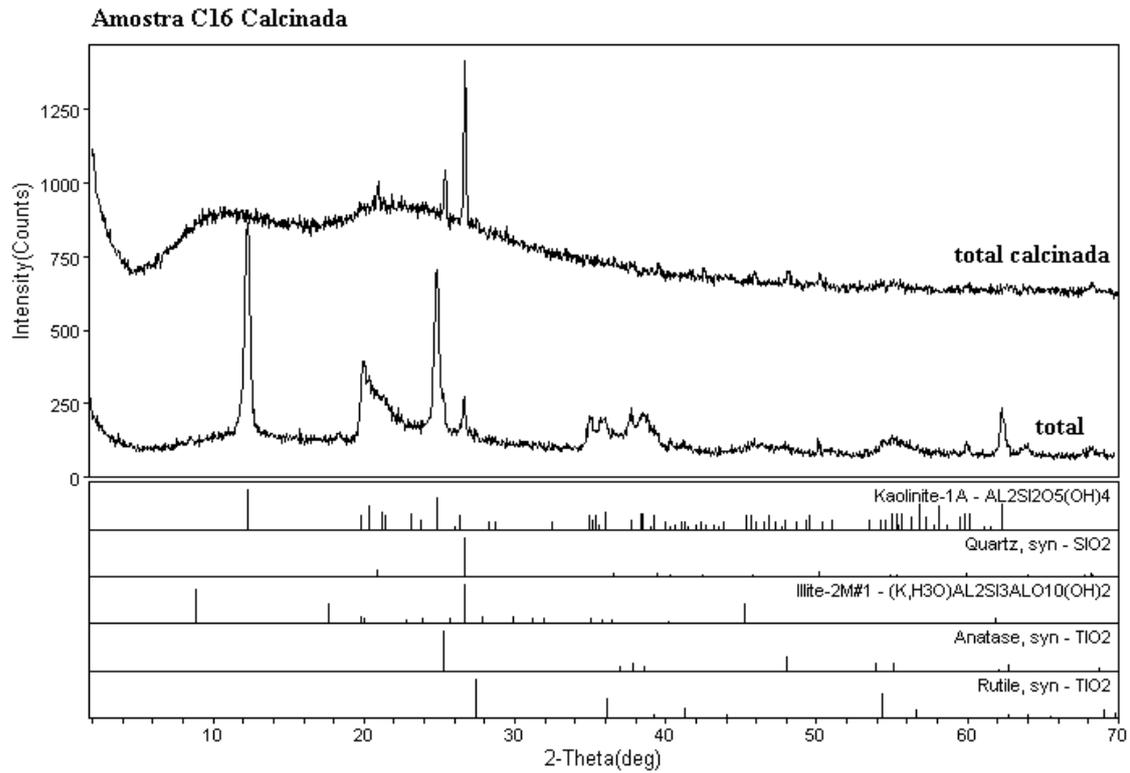
Figura A1.55 – Difractogramas BON-C3 e BON-C4: Bonsucesso

Figura A1.56 – Difractogramas BON-C1 e BON-C2: Bonsucesso

Figura A1.57 – Difractogramas BON-A5 e BON-A6: Bonsucesso

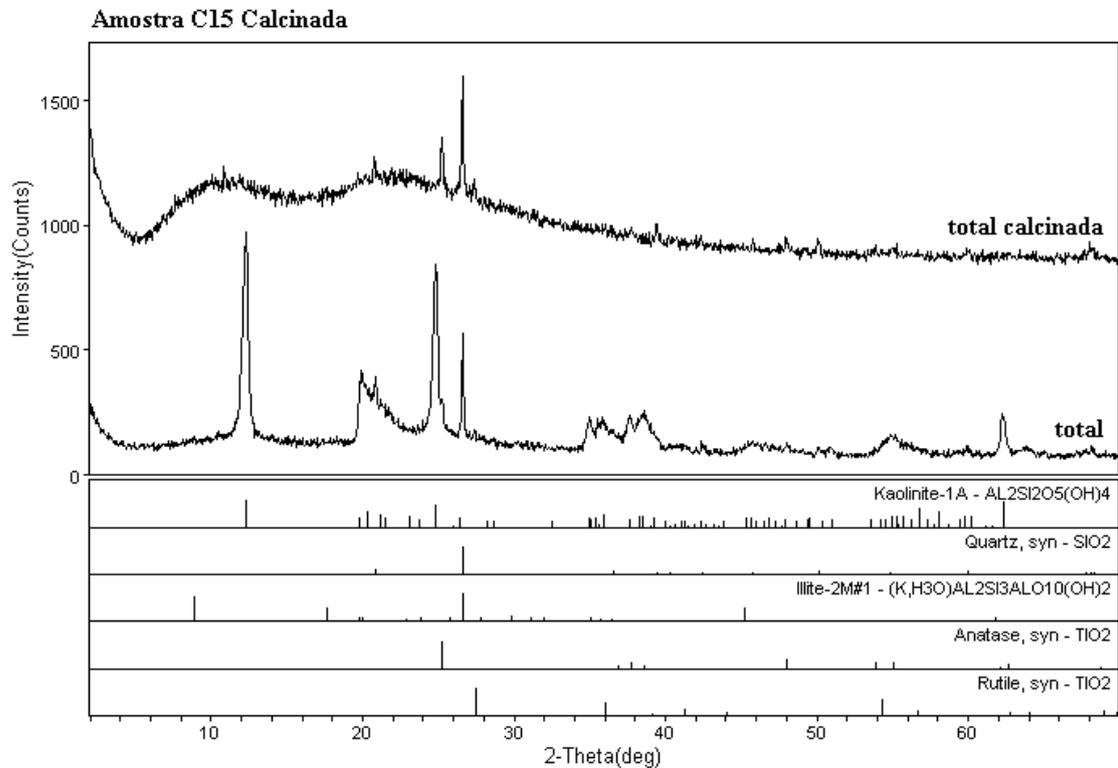
Figura A1.58 – Difractogramas BON-A3 e BON-A4: Bonsucesso

Figura A1.59 – Difractogramas BON-A1 e BON-A2: Bonsucesso



Laboratorio de DRX - IG/UnB

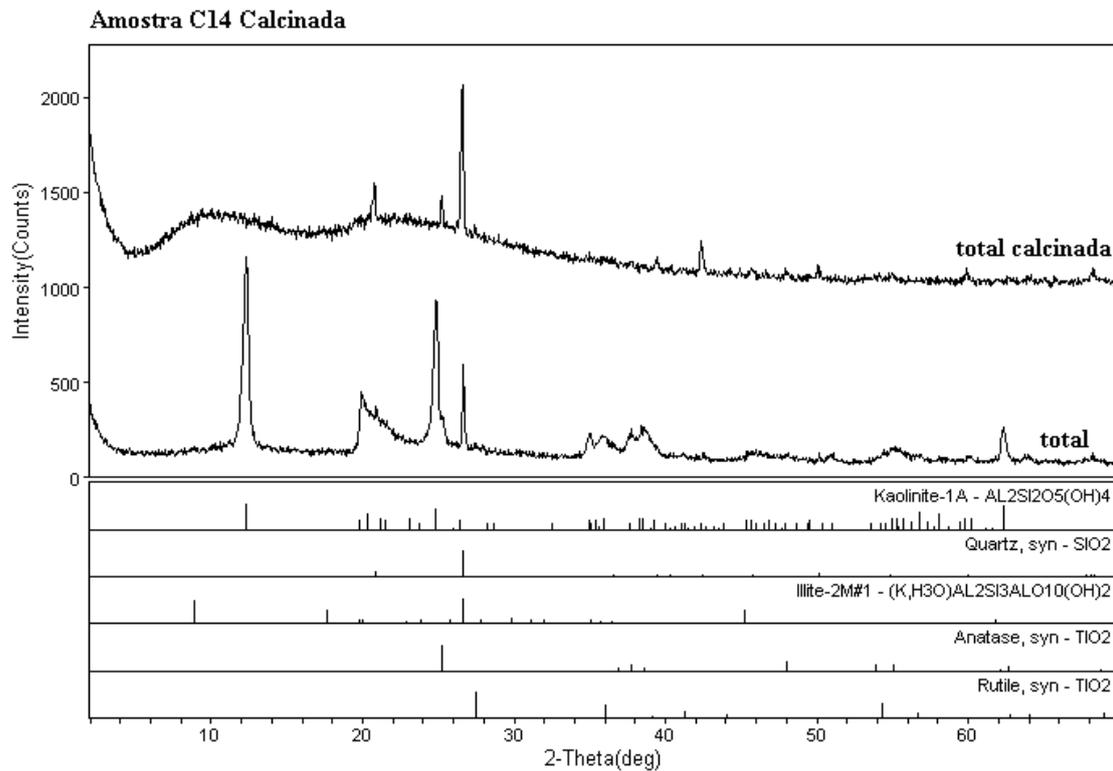
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 12:01a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

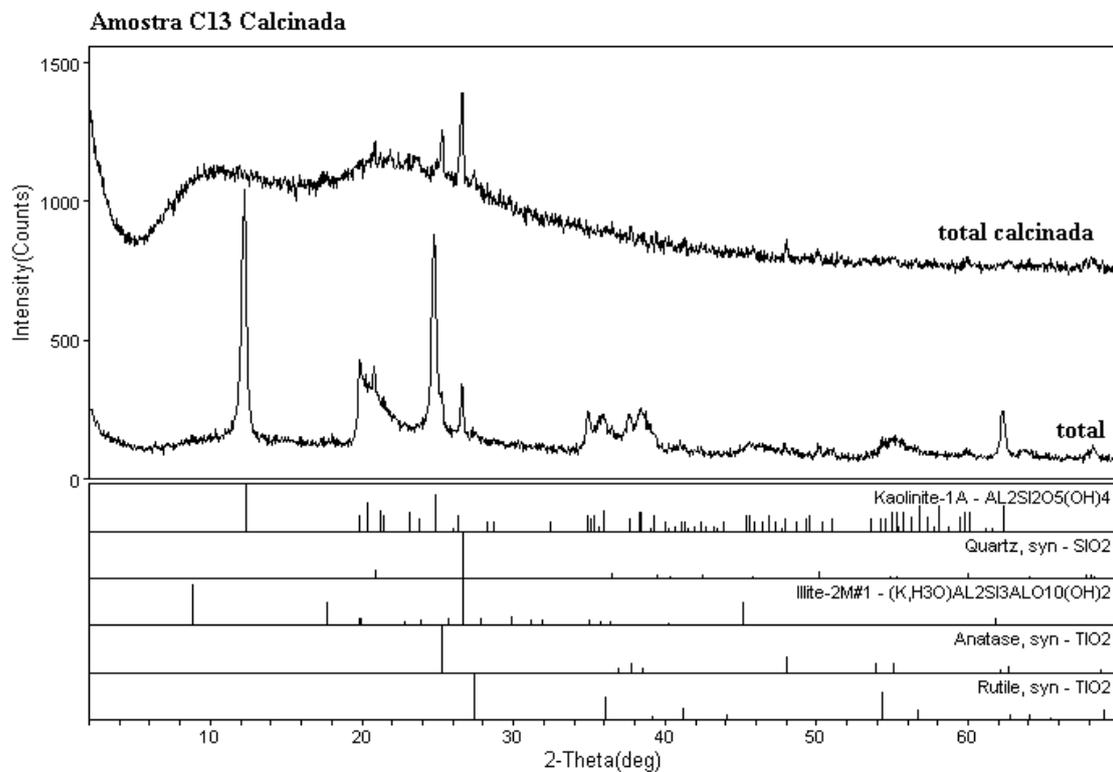
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:39a

Figura A1.49 – Difractogramas BON-C15 e BON-C16: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

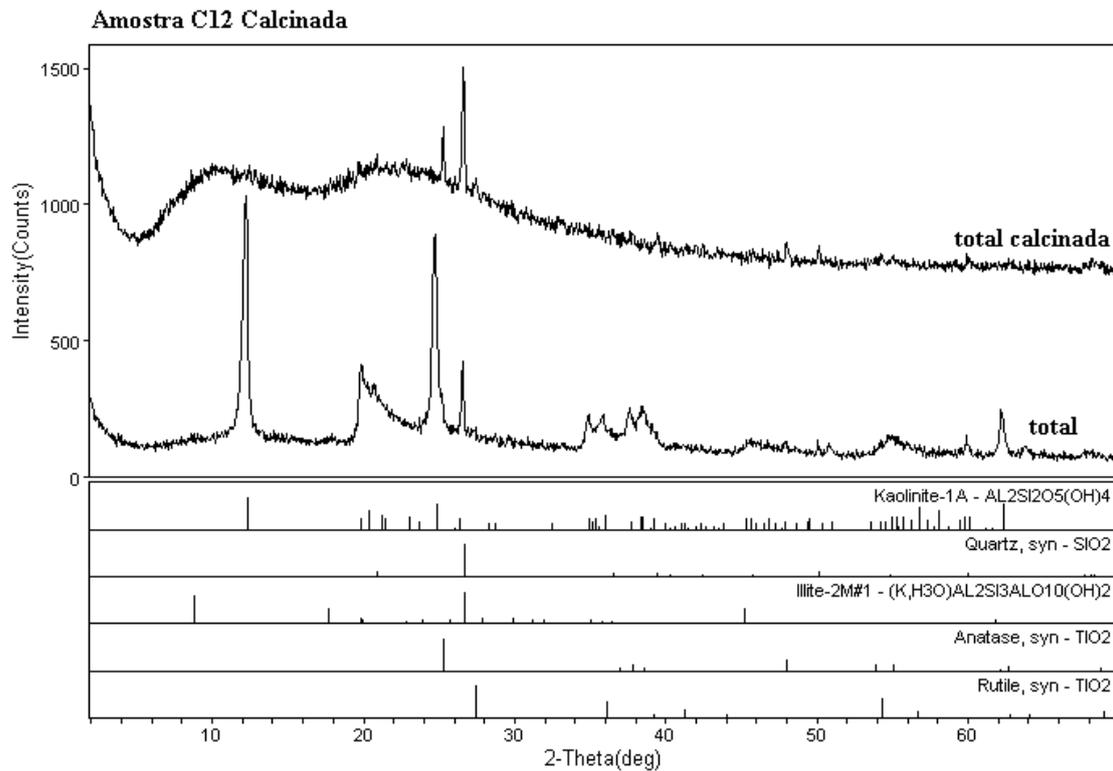
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:52a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

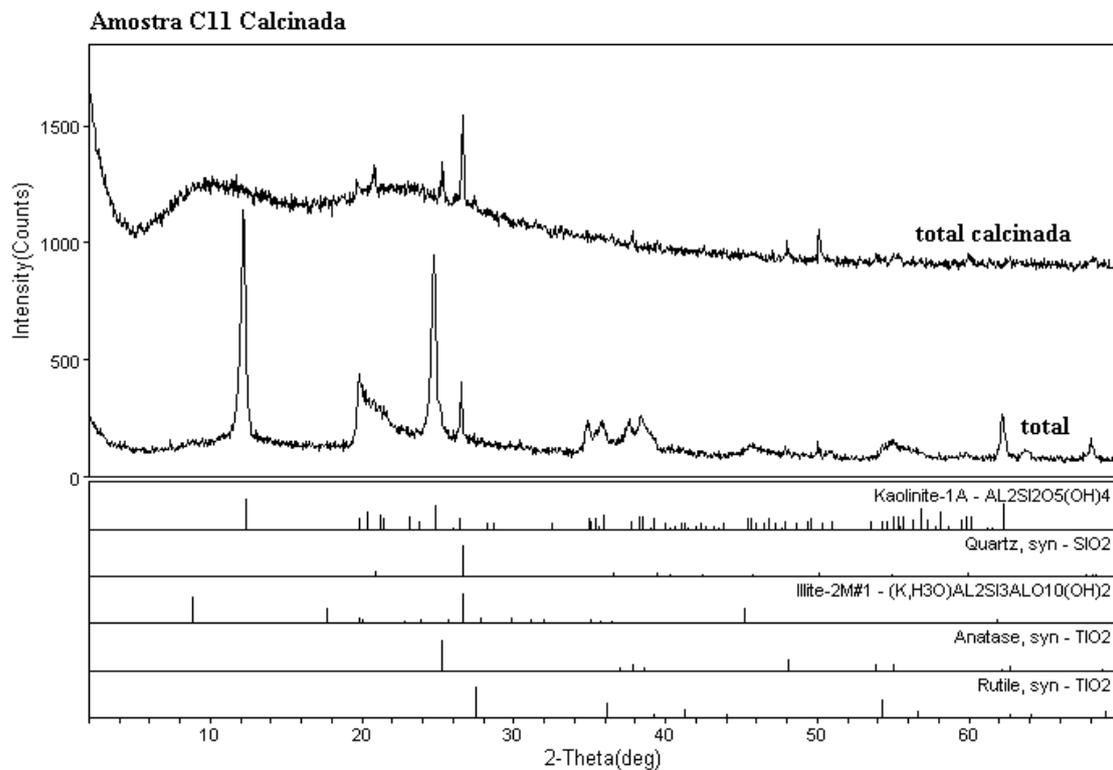
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:51a

Figura A1.50 – Difractogramas BON-C13 e BON-C14: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

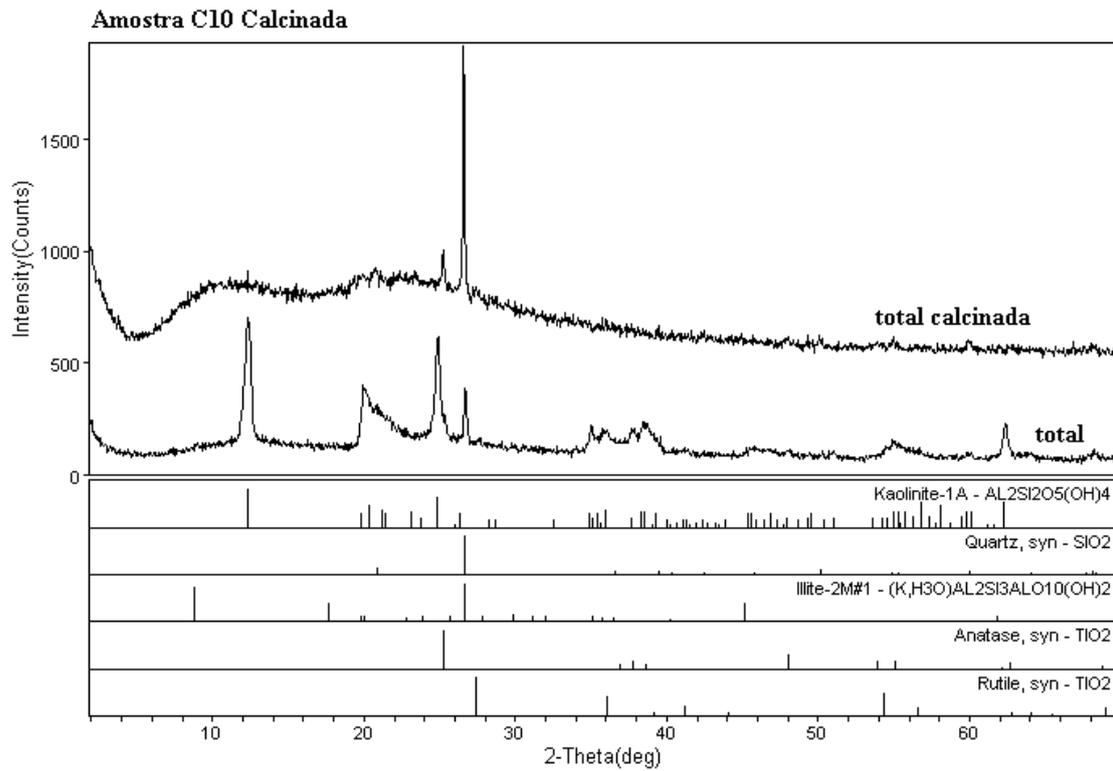
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:52a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

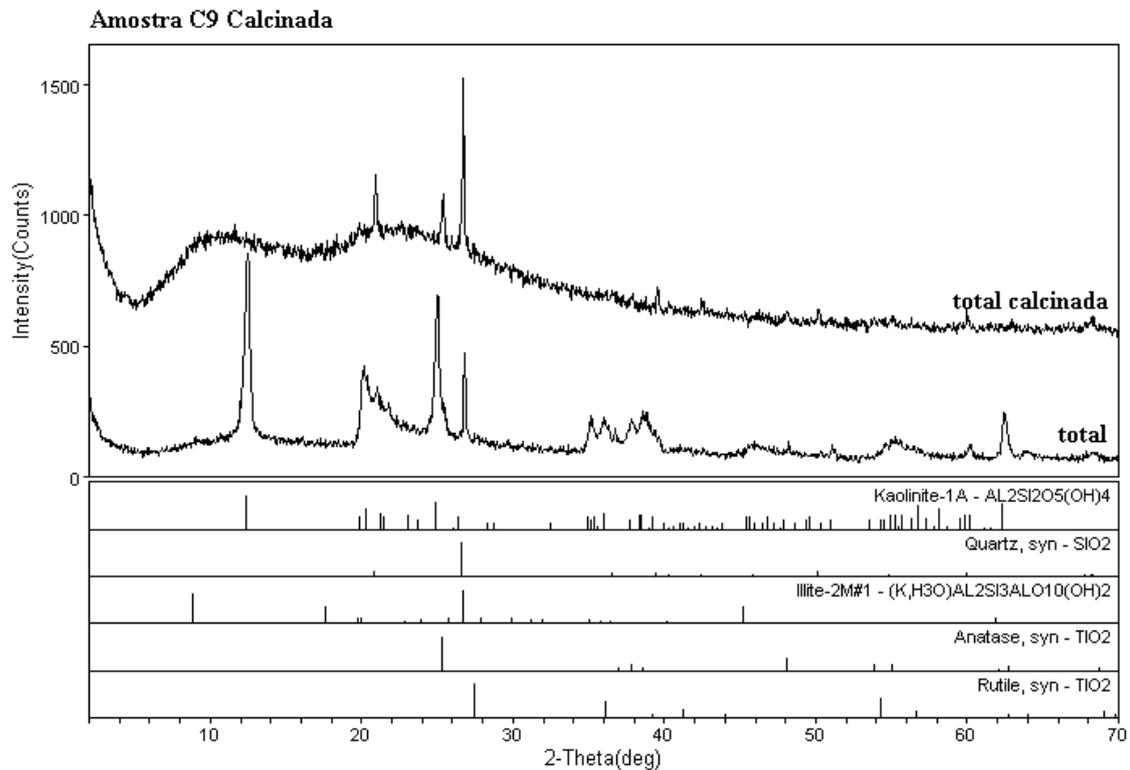
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:47a

Figura A1.51 – Difratoogramas BON-C11 e BON-C12: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

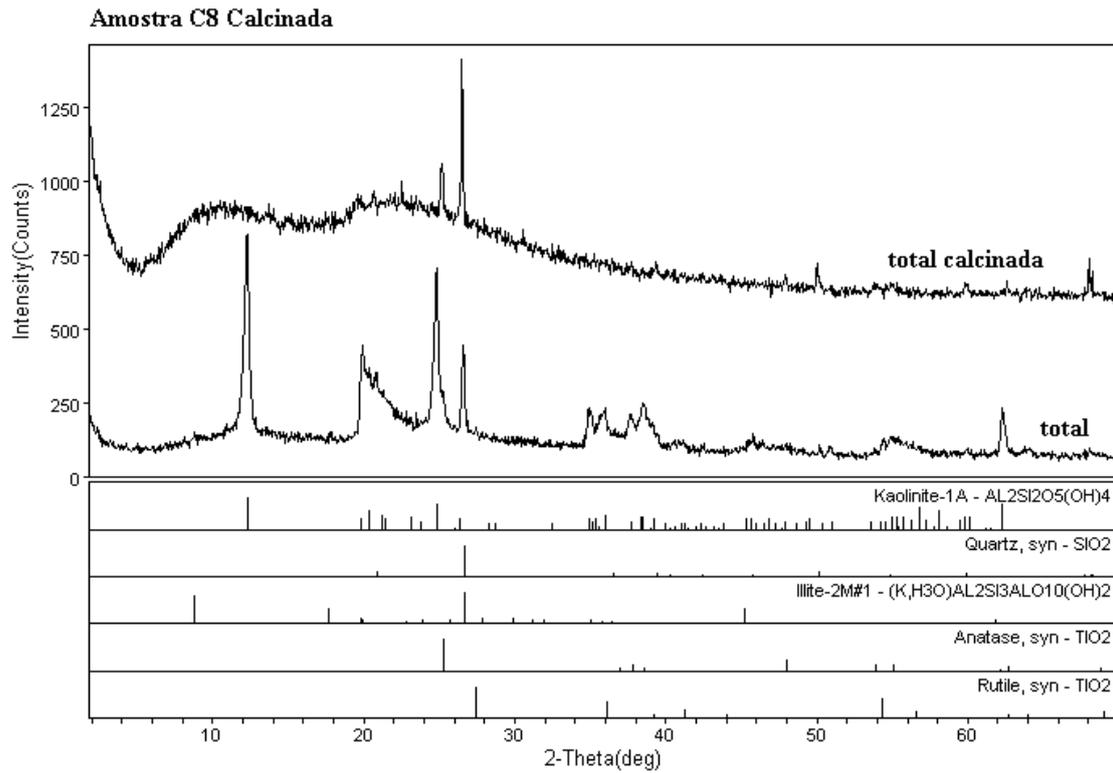
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:42a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

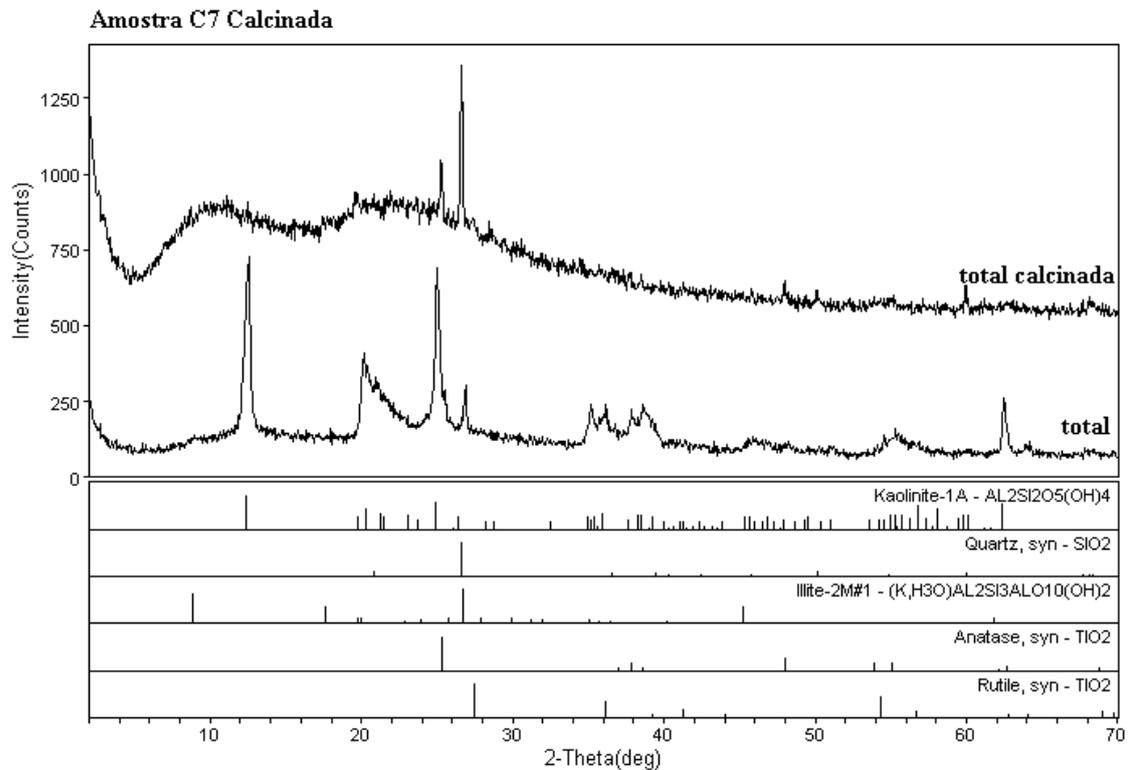
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:42a

Figura A1.52 – Difratoogramas BON-C9 e BON-C10: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

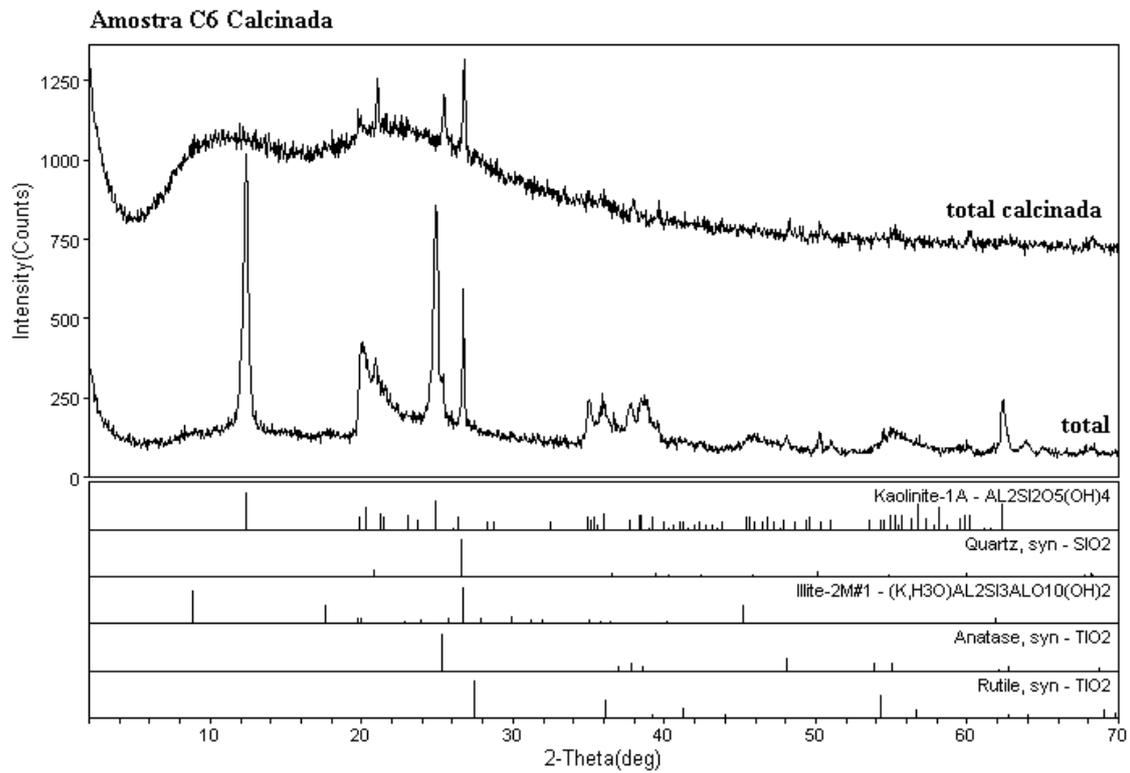
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:40a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

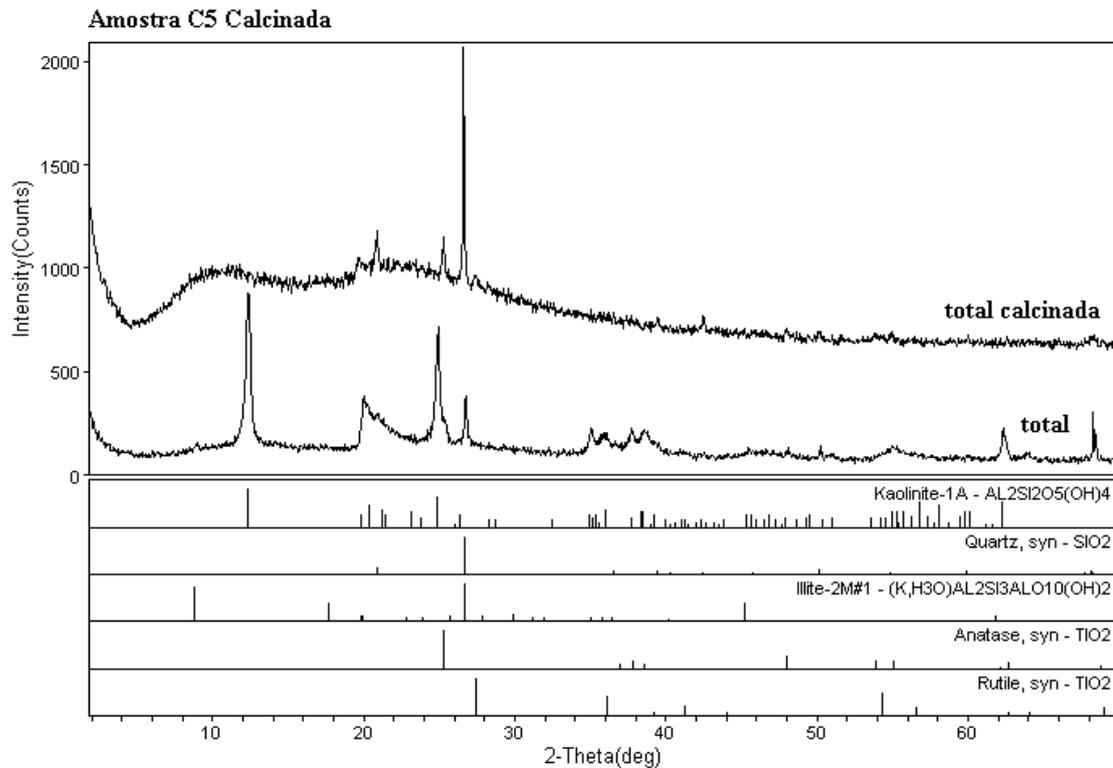
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:39a

Figura A1.53 – Difractogramas BON-C7 e BON-C8: Bonsucesso



Laboratorio de DRX - IG/UnB

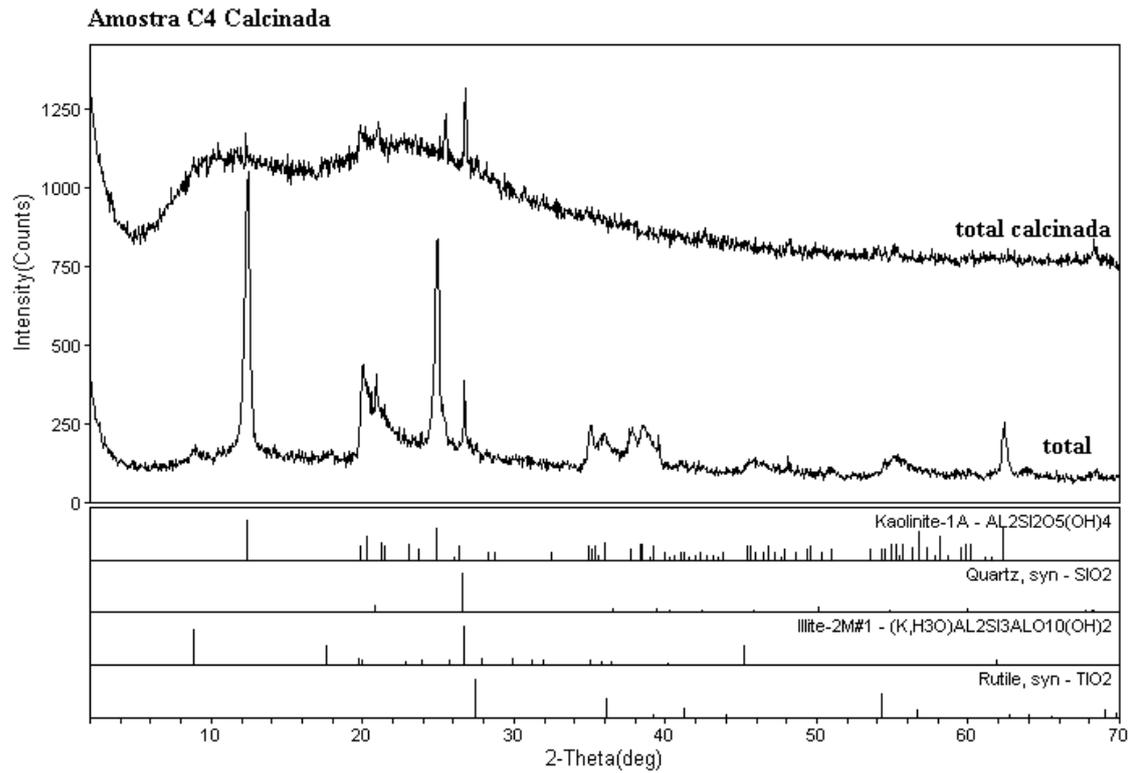
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:25a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

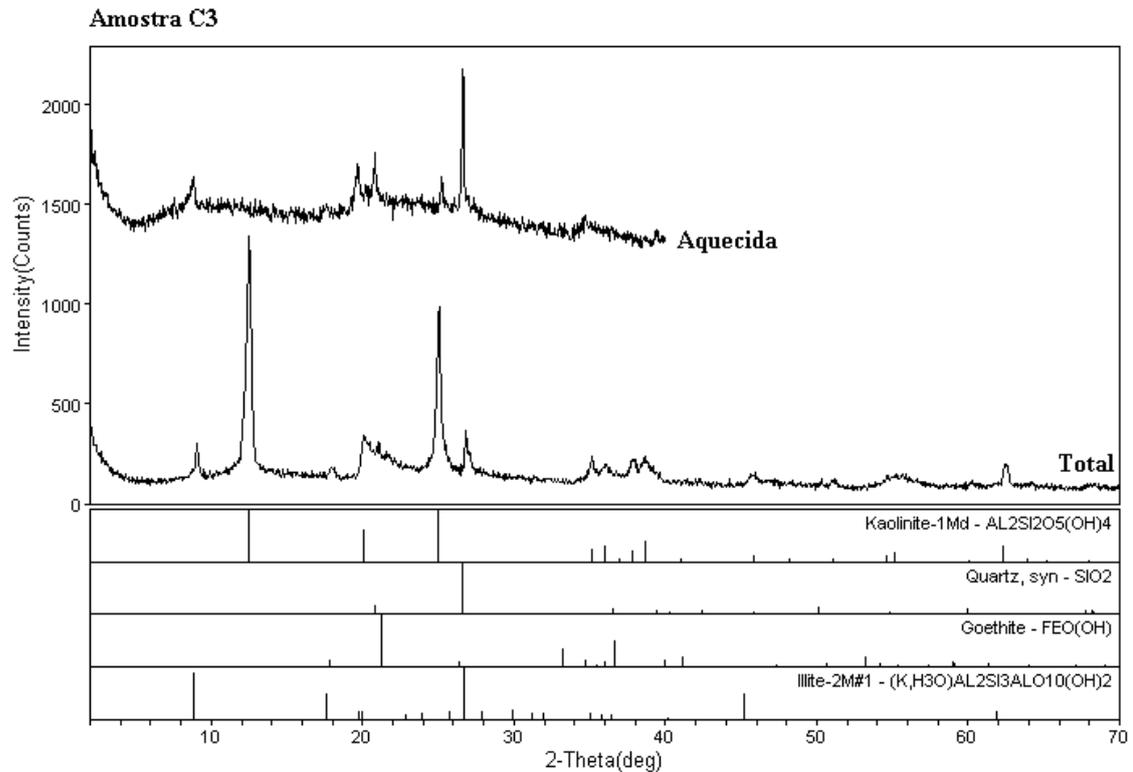
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:33a

Figura A1.54 – Difractogramas BON-C5 e BON-C6: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

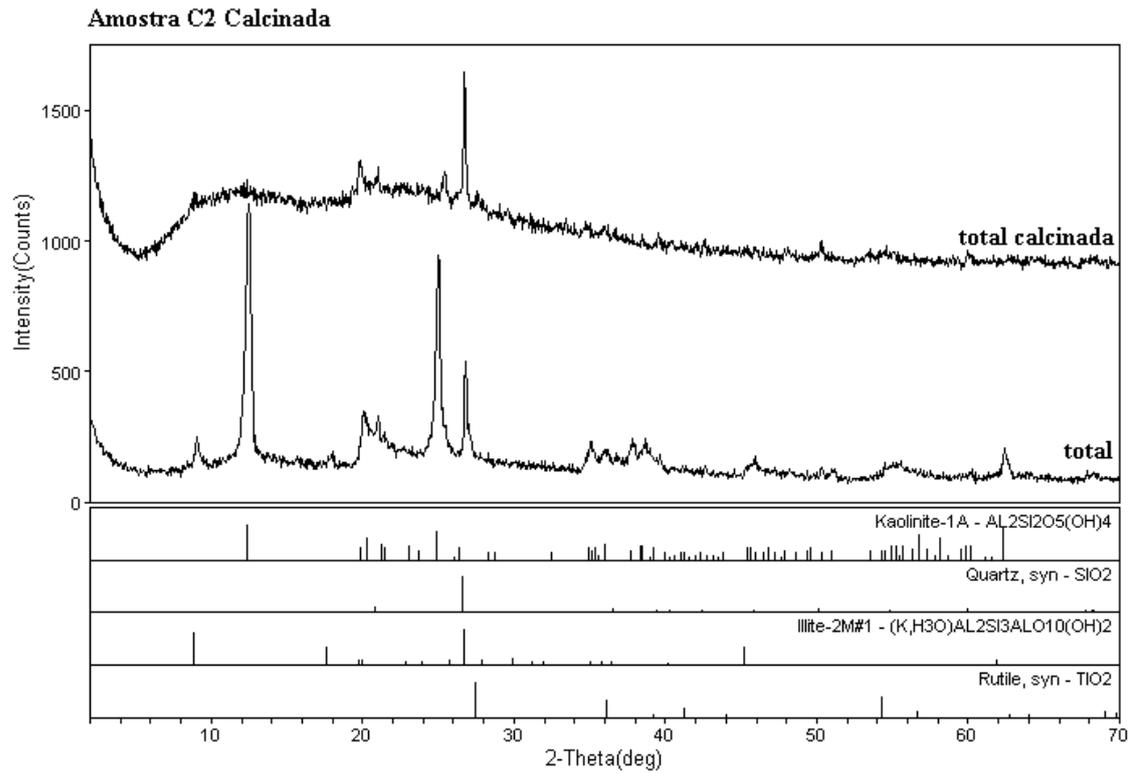
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:21a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

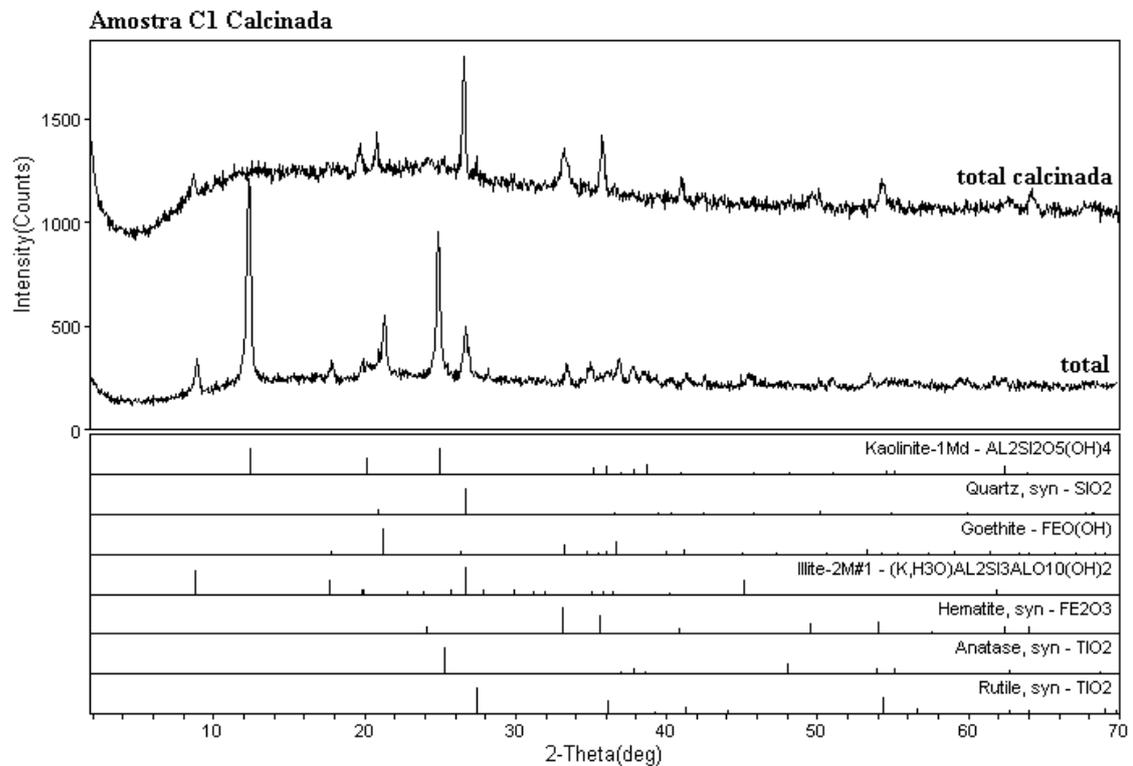
<dlmax/novemb-1> Friday, Feb 04, 2005 @ 03:35a

Figura A1.55 – Difratoogramas BON-C3 e BON-C4: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

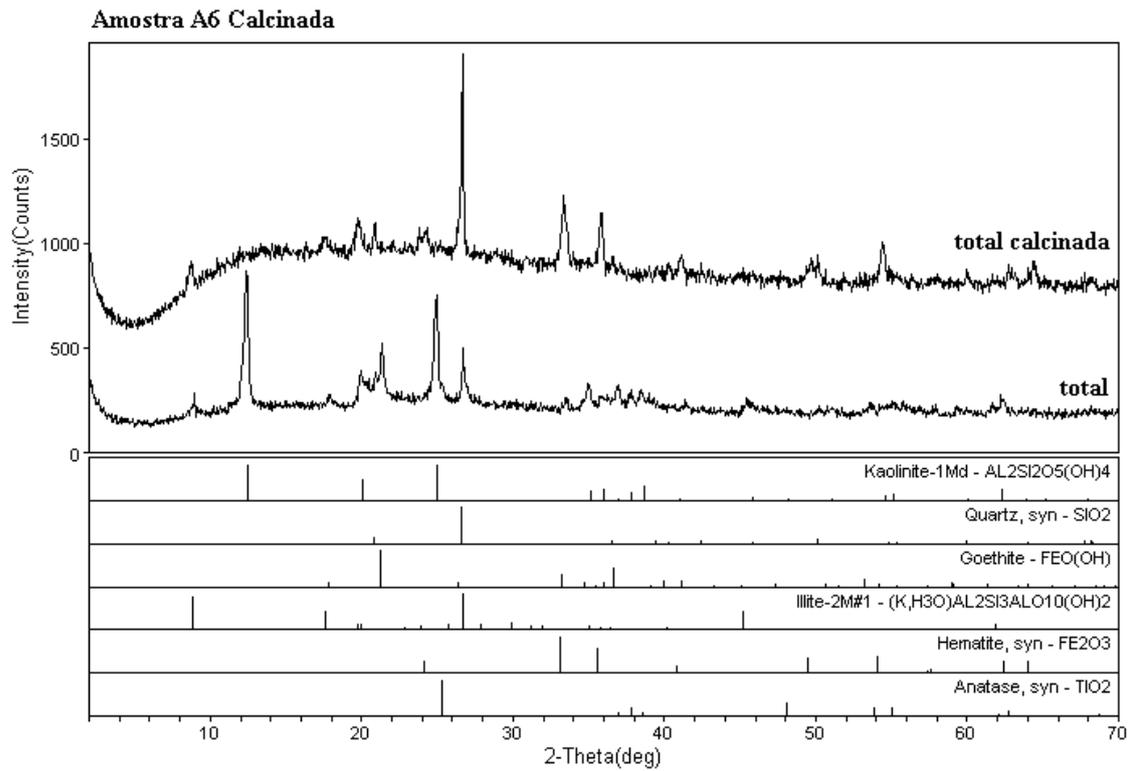
<dd1max/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:24a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

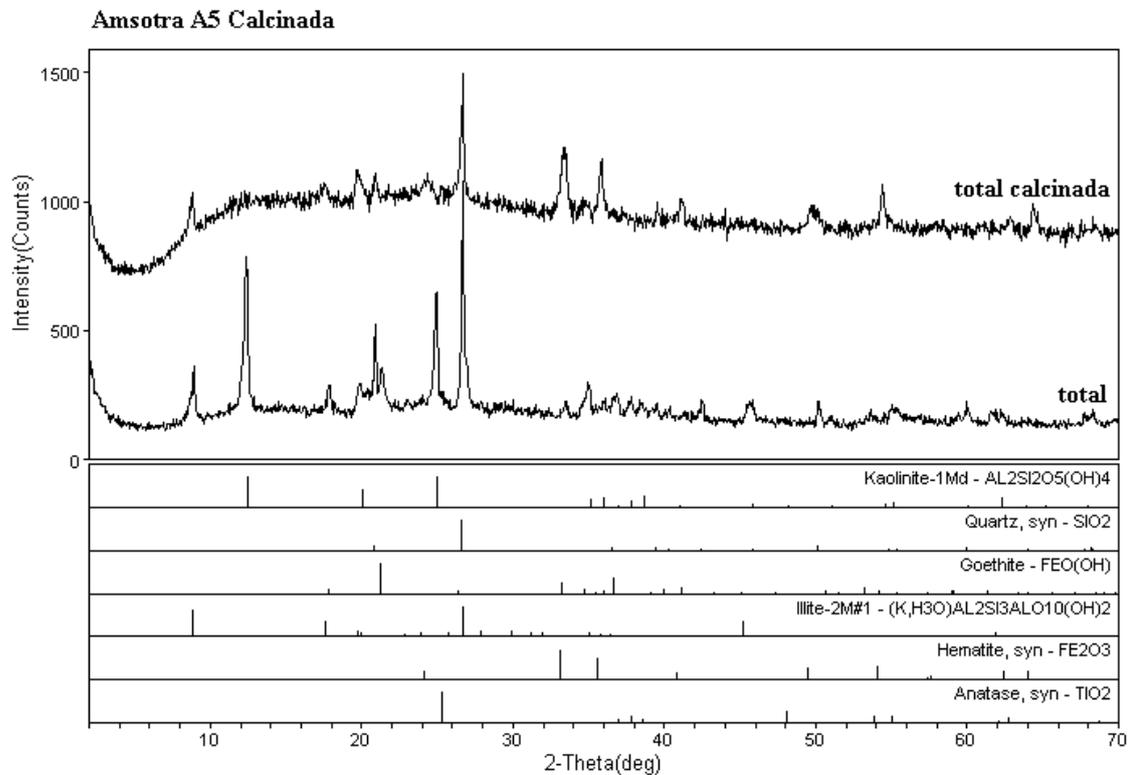
<dd1max/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:20a

Figura A1.56 – Difractogramas BON-C1 e BON-C2: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

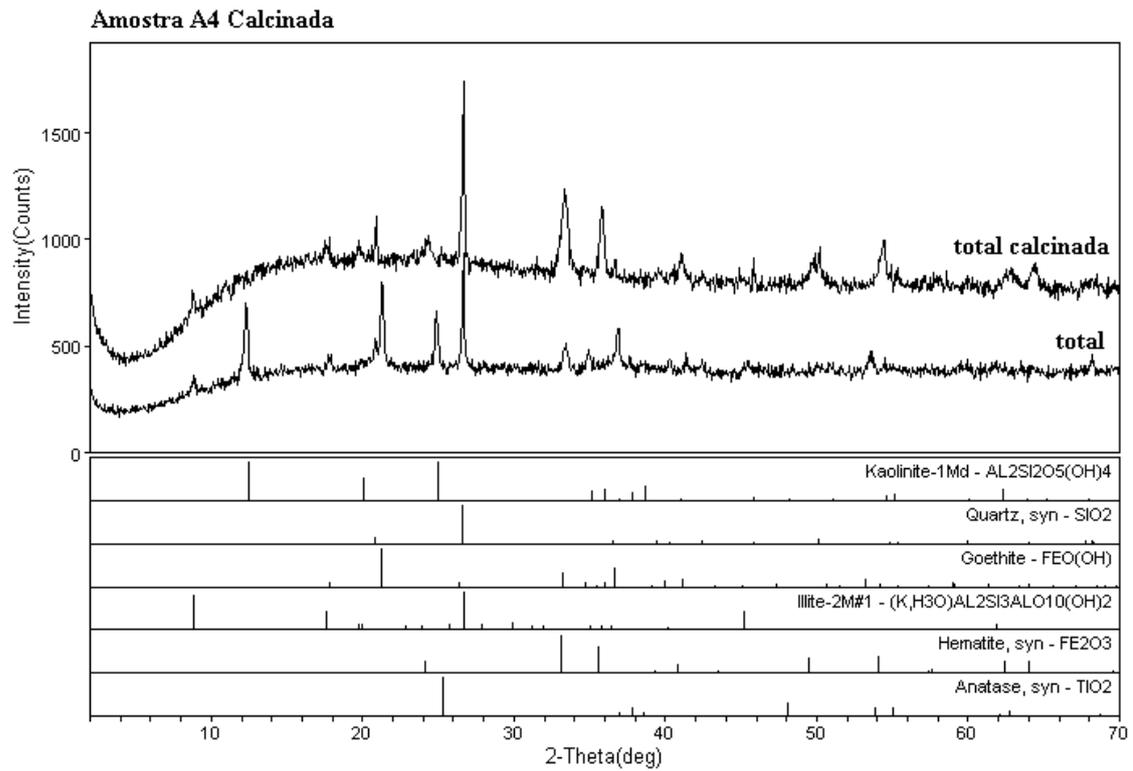
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:17a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

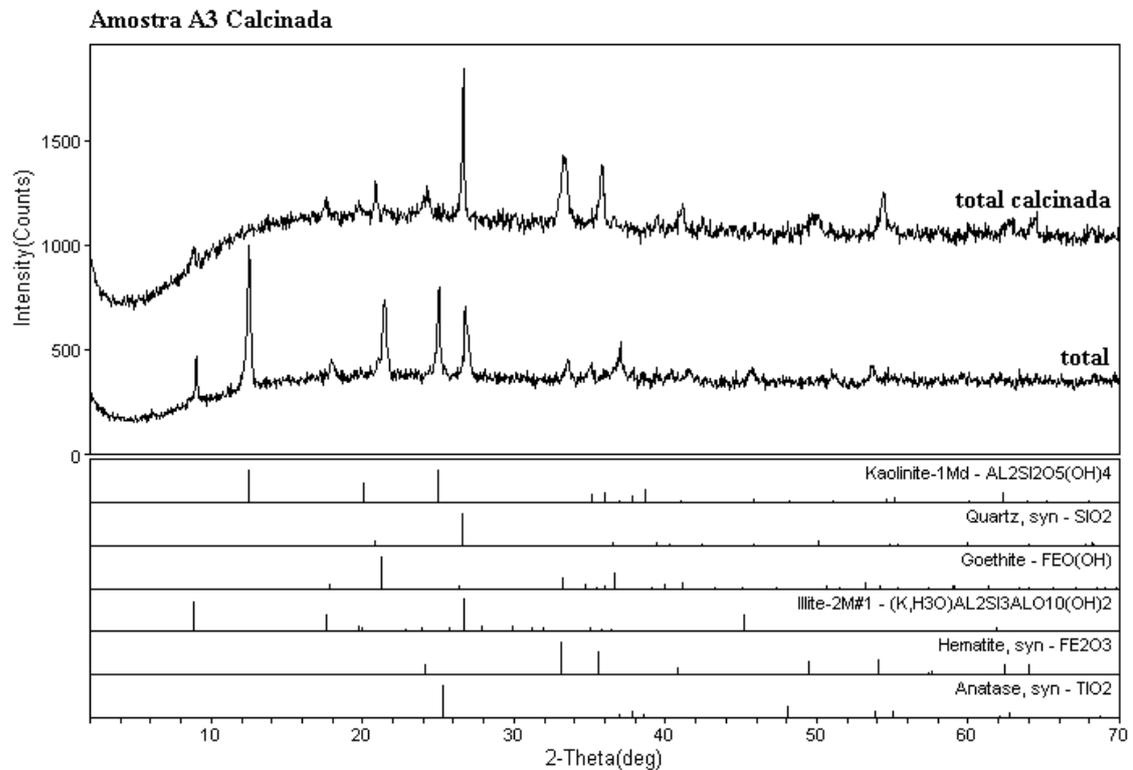
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:14a

Figura A1.57 – Difratoogramas BON-A5 e BON-A6: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

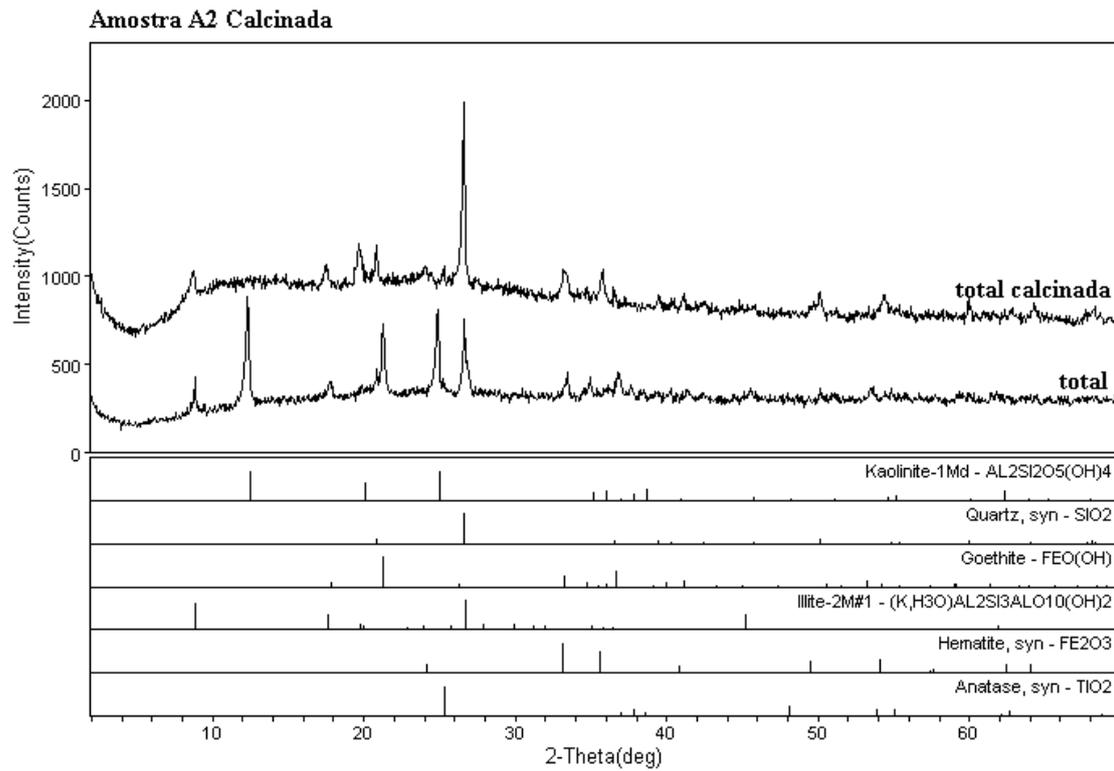
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:11a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

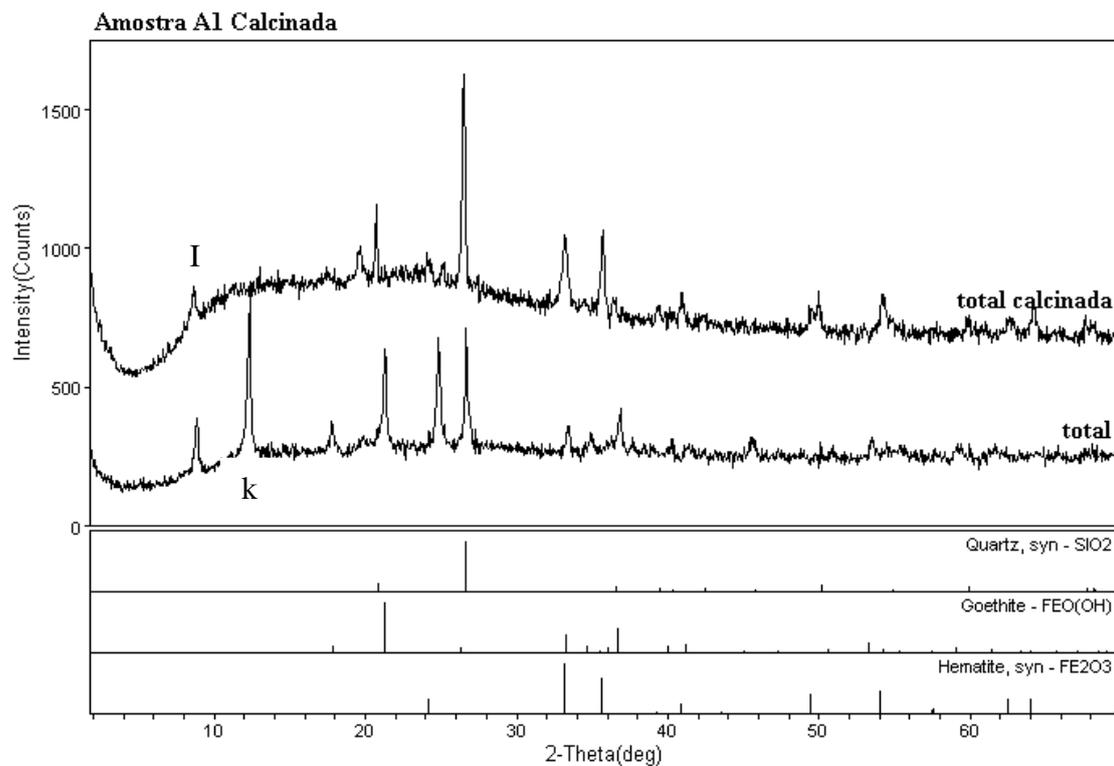
<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:09a

Figura A1.58 – Difratoogramas BON-A3 e BON-A4: Bonsucesso.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 11:09a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<dlmax/novemb-1> Wednesday, Nov 23, 2005 @ 10:59a

Figura A1.59 – Difratoogramas BON-A1 e BON-A2: Bonsucesso. I – Ilita; k – caulinita 1Md.

Anexo 2 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem pontual (caminhamento de superfície) de argila *in natura*

Área Brazlândia

Argila *in natura* – Difractogramas

Figura A2.1 – Difractogramas BRA-CS1A e BRA-CS1: Brazlândia

Figura A2.2 – Difractogramas BRA-CS2 e BRA-CS1B: Brazlândia

Figura A2.3 – Difractogramas BRA-CS2B e BRA-CS2A: Brazlândia

Figura A2.4 – Difractogramas BRA-CS4 e BRA-CS3: Brazlândia

Figura A2.5 – Difractogramas BRA-CS6 e BRA-CS5: Brazlândia

Figura A2.6 – Difractogramas BRA-CS8 e BRA-CS7: Brazlândia

Figura A2.7 – Difractogramas BRA-CS10 e BRA-CS9: Brazlândia

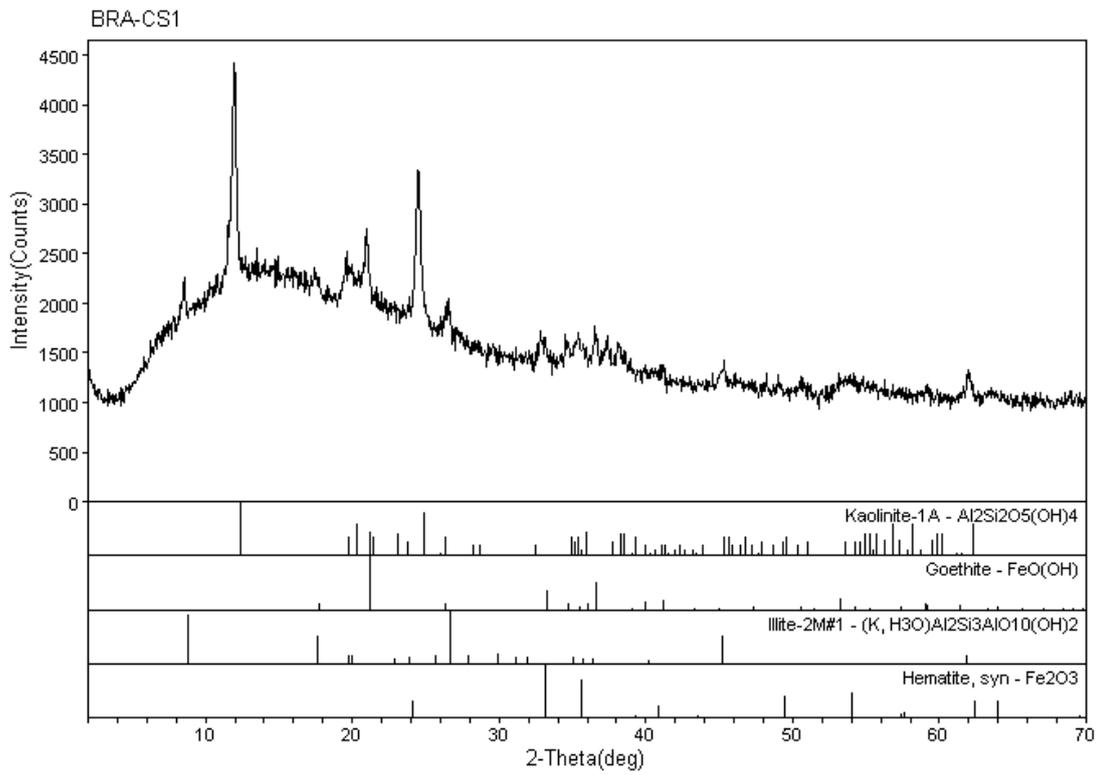
Figura A2.8 – Difractogramas BRA-CS12 e BRA-CS11: Brazlândia

Figura A2.9 – Difractogramas BRA-CS14 e BRA-CS13: Brazlândia

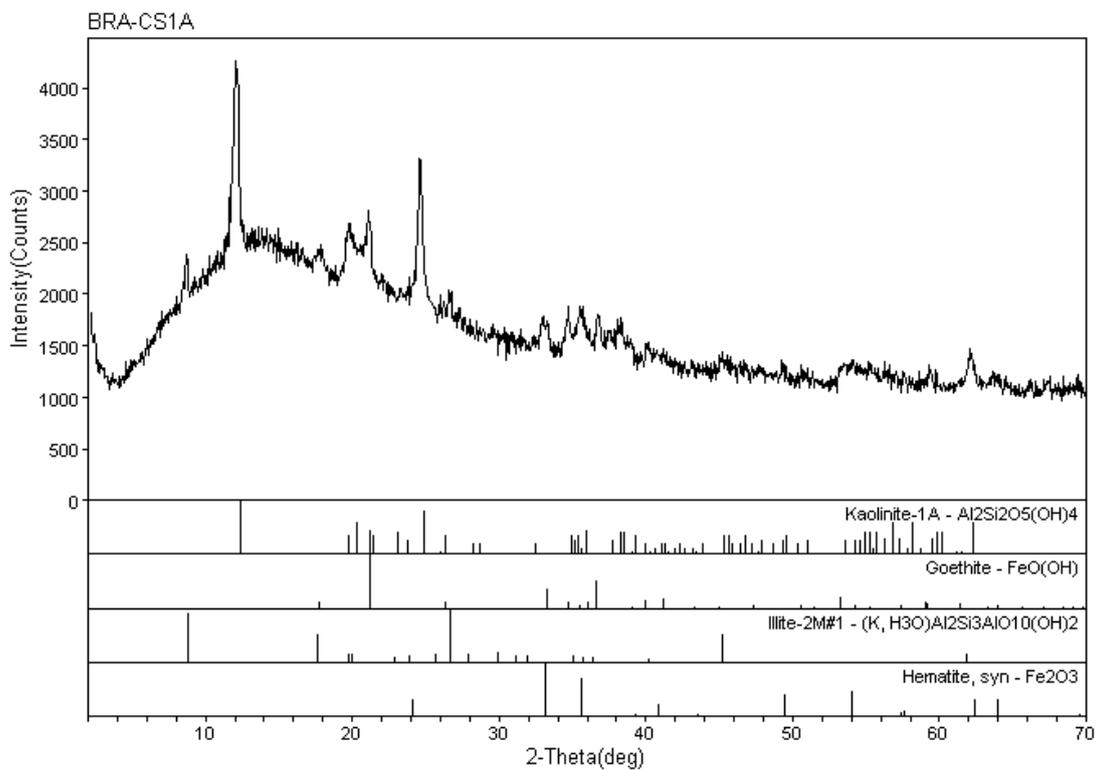
Figura A2.10 – Difractogramas BRA-CS16 e BRA-CS15: Brazlândia

Figura A2.11 – Difractogramas BRA-CS18 e BRA-CS17: Brazlândia

Figura A2.12 – Difractogramas BRA-CS20 e BRA-CS19: Brazlândia

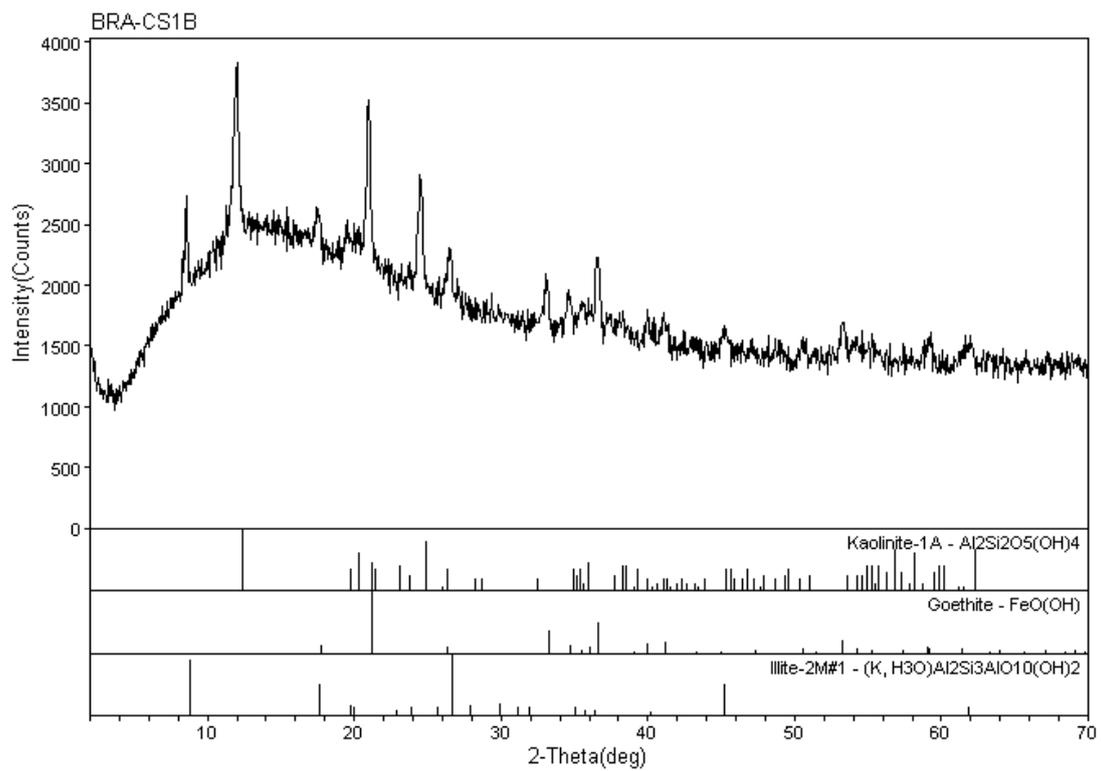


<?xml:space=preserve?>

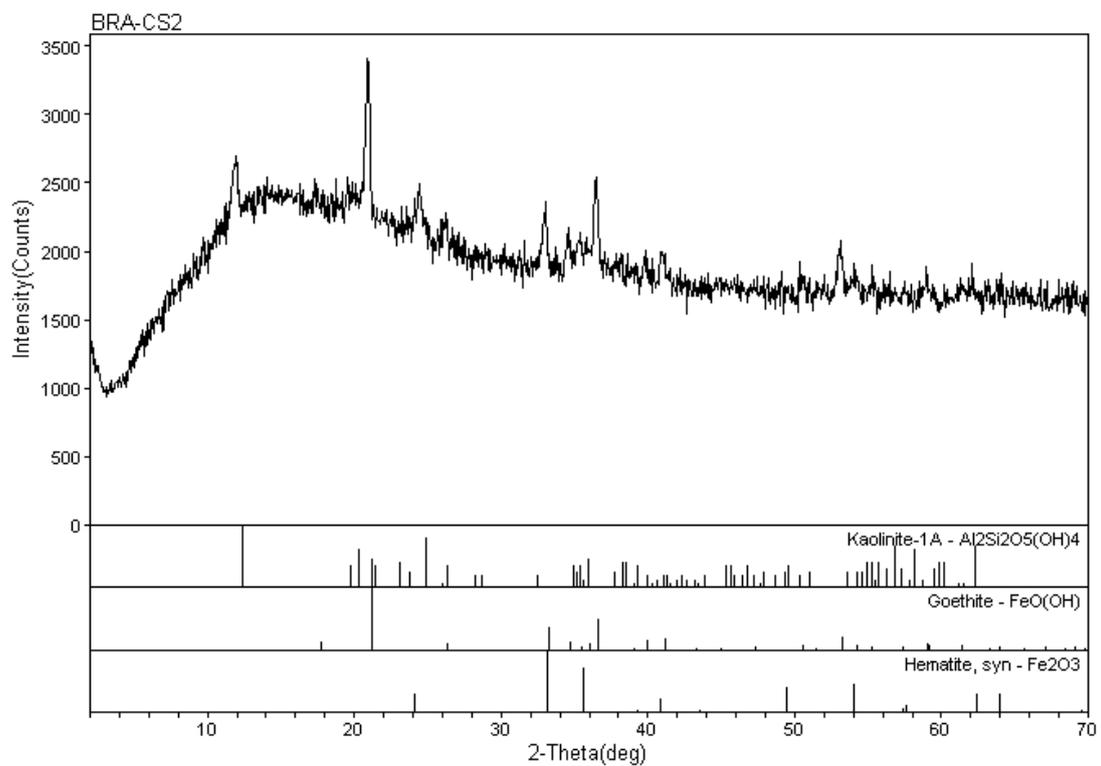


<?xml:space=preserve?>

Figura A2.1 – Difratoformas BRA-CS1A e BRA-CS1: Brazlândia.

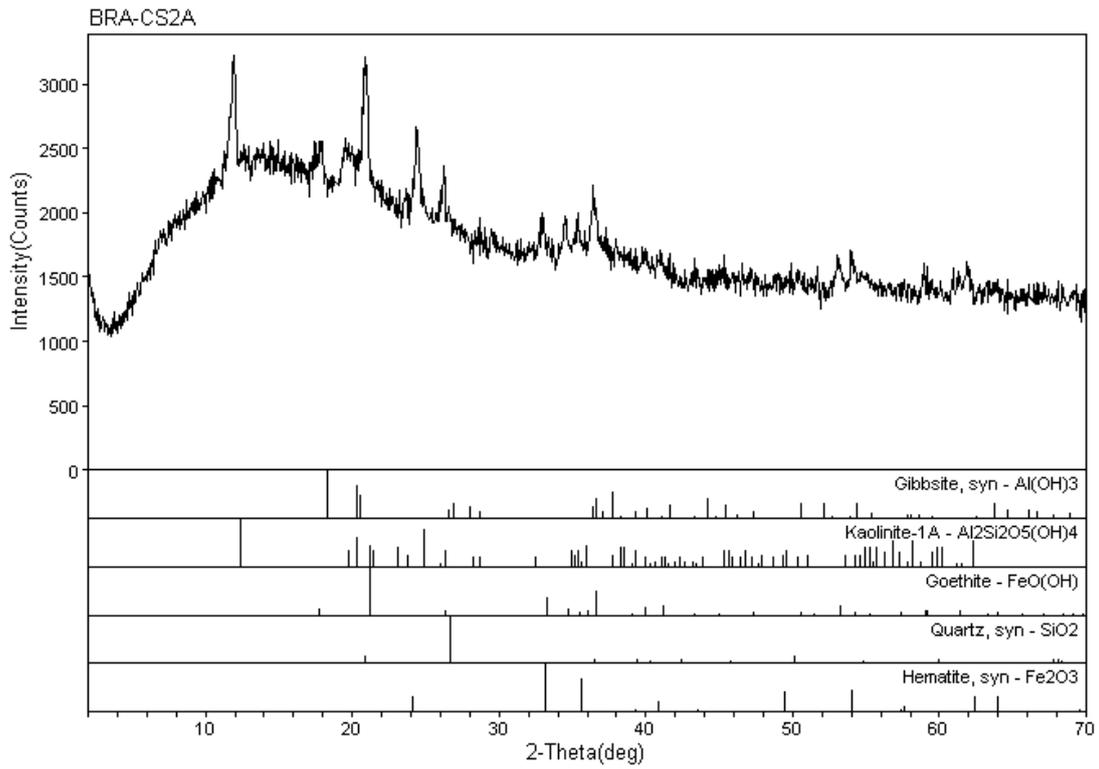


<C:\dm\ma\ve\cbe - 11\k\k07>

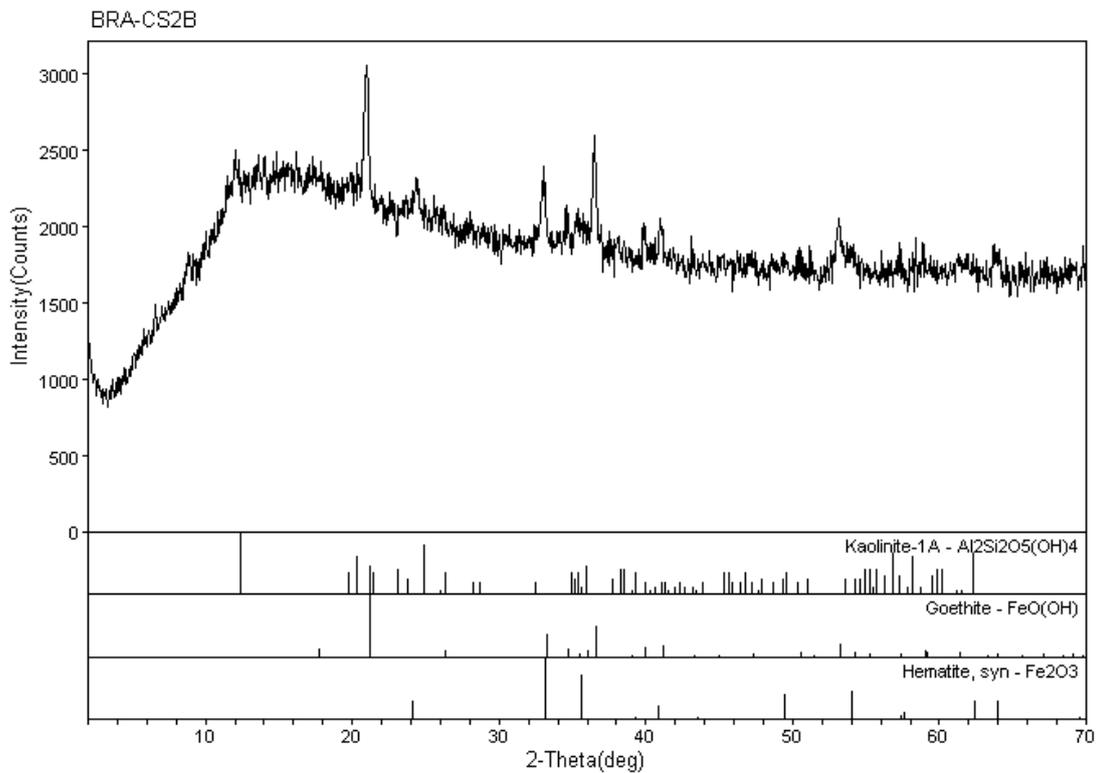


<C:\dm\ma\ve\cbe - 11\k\k07>

Figura A2.2 – Difractogramas BRA-CS2 e BRA-CS1B: Brazlândia.

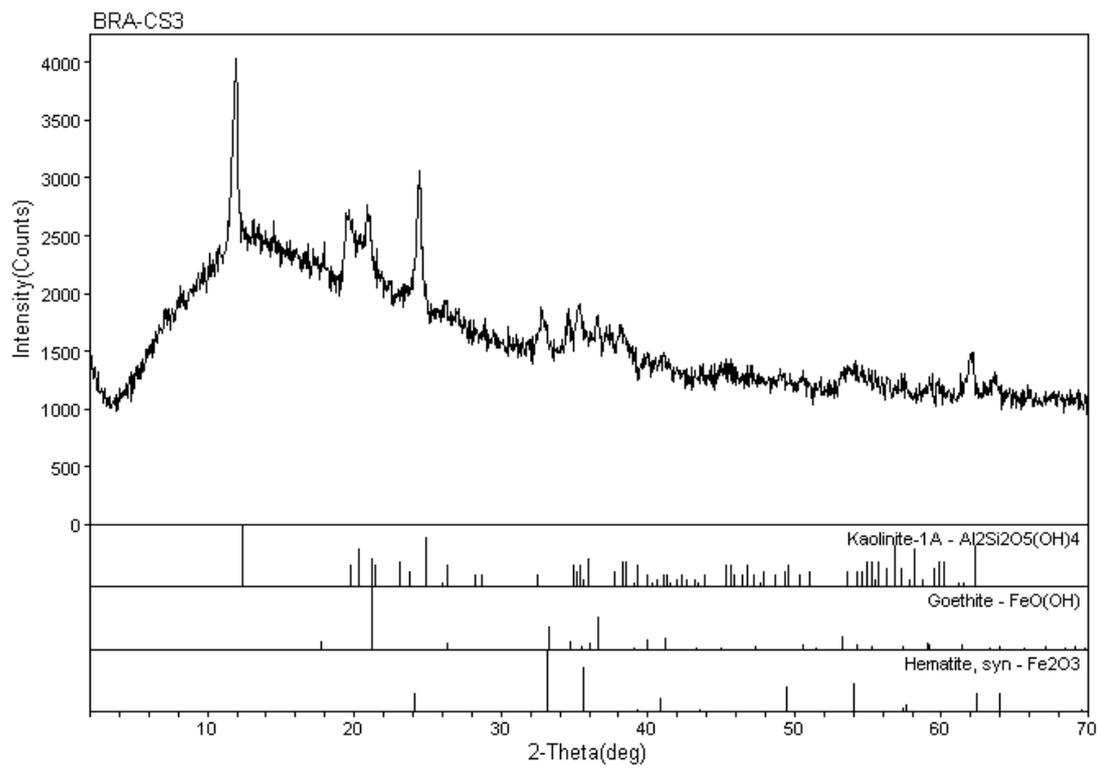


<C:\d\mz\teste - 11\k07>

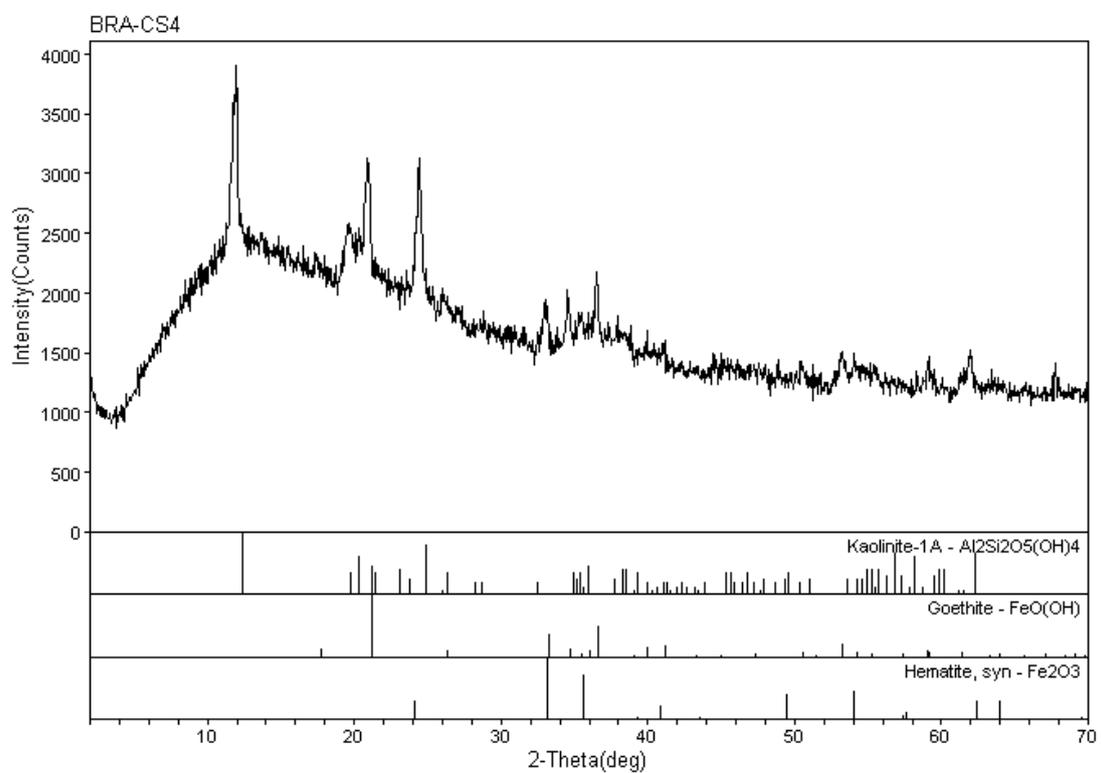


<C:\d\mz\teste - 11\k07>

Figura A2.3 – Difratomogramas BRA-CS2B e BRA-CS2A: Brazlândia.

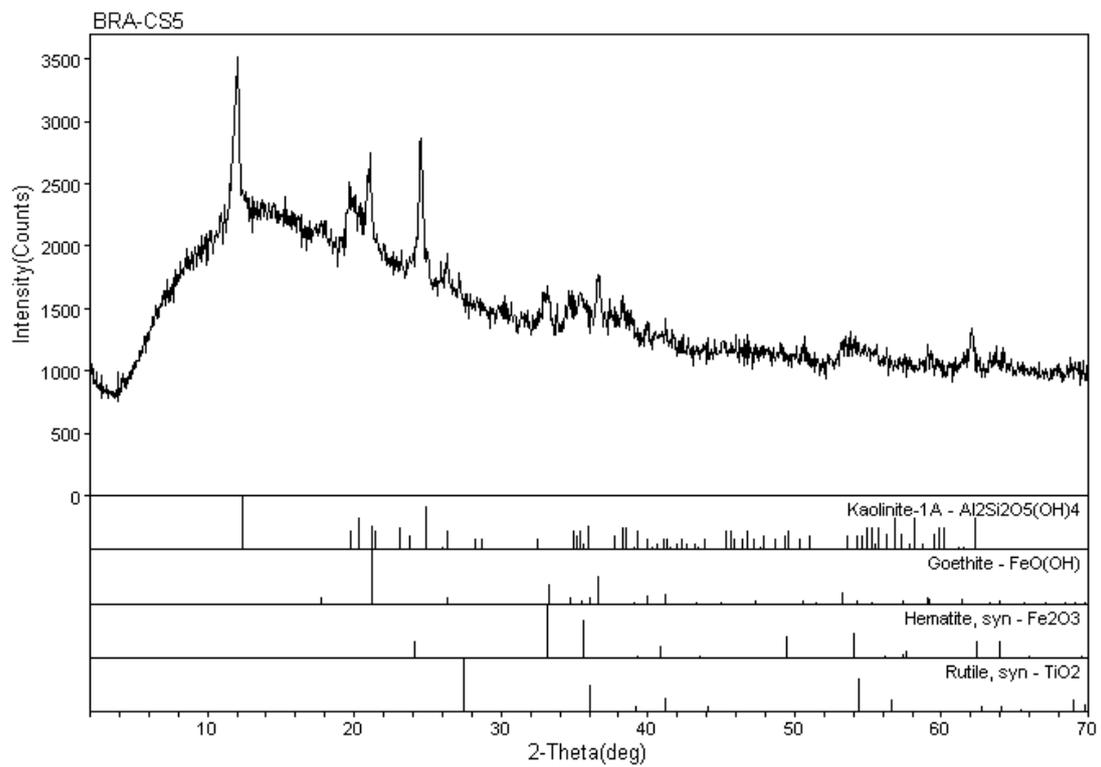


<01d/mz/ve0be-111k007>

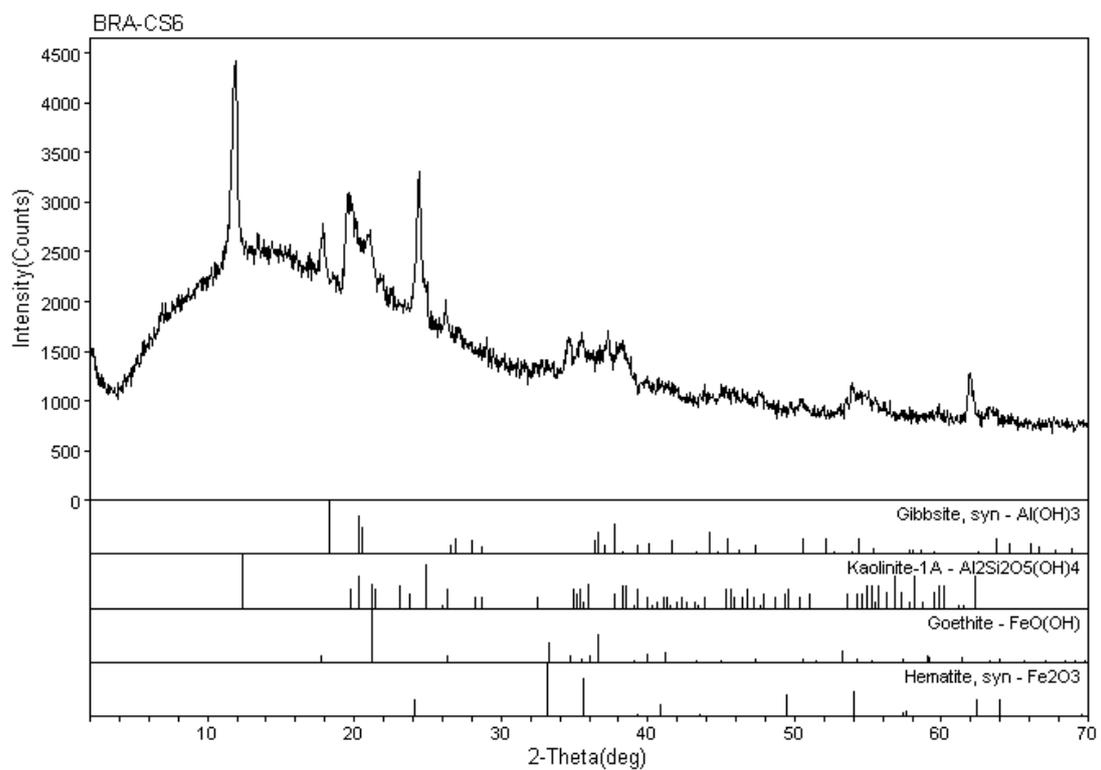


<01d/mz/ve0be-111k007>

Figura A2.4 – Difratoqramas BRA-CS4 e BRA-CS3: Brazlândia.

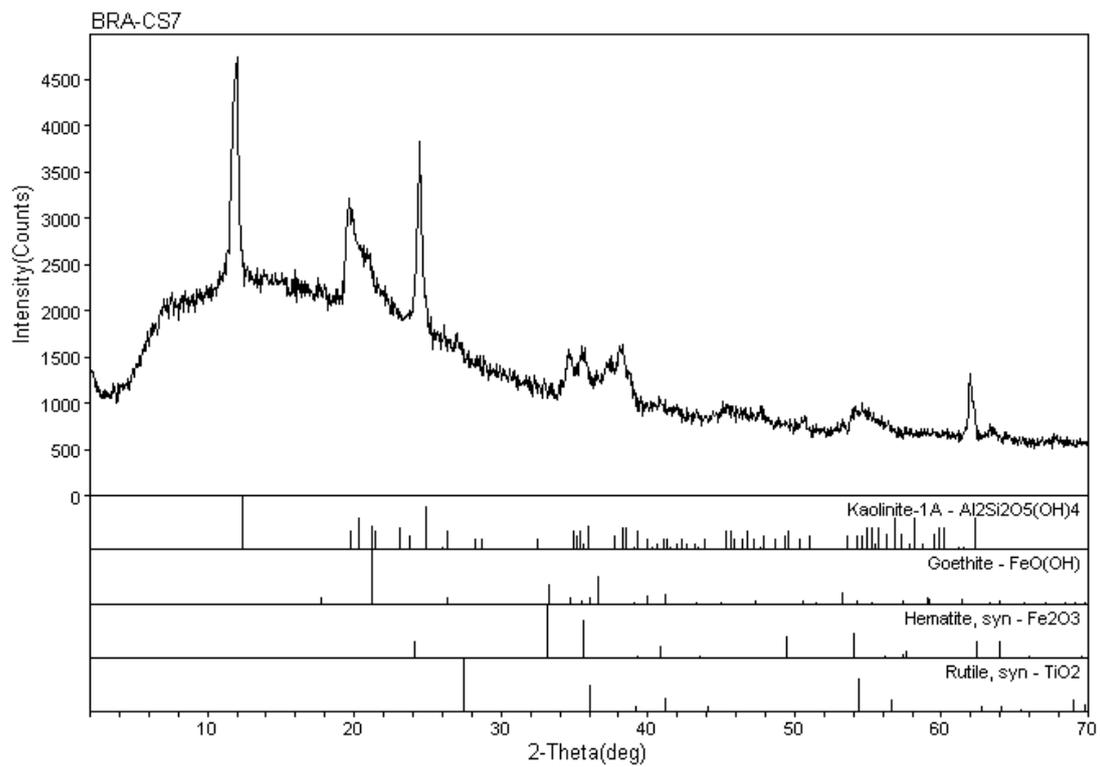


<?xml:space=preserve?>

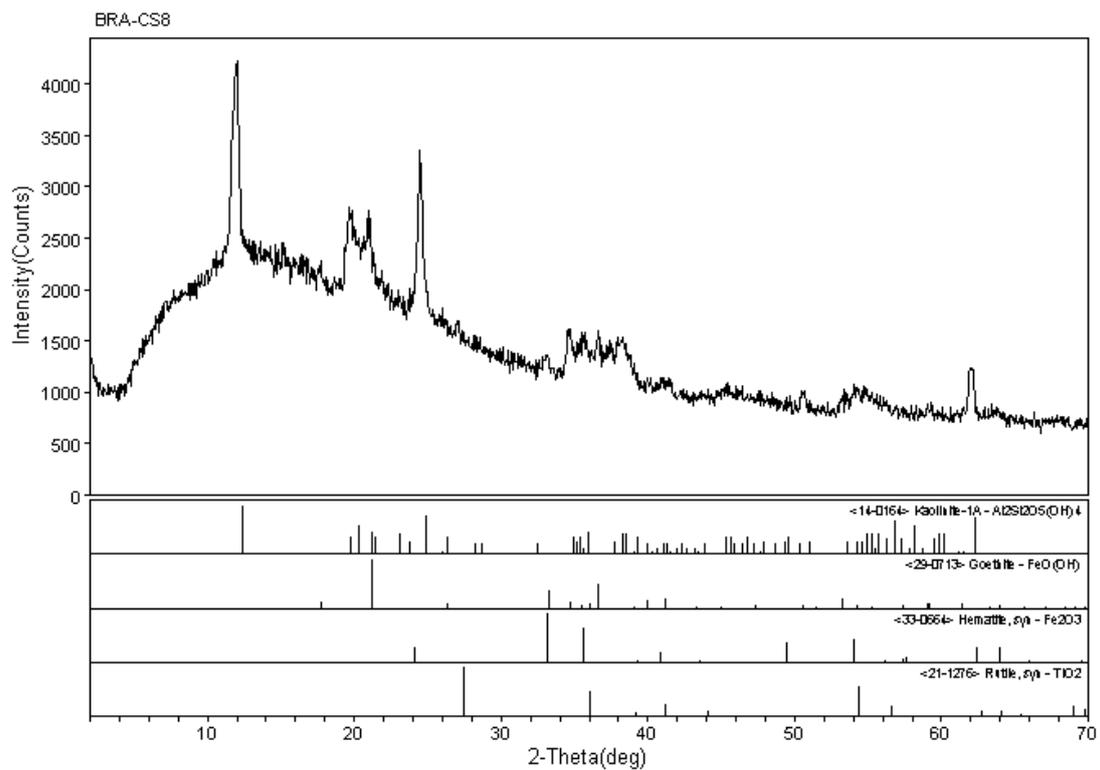


<?xml:space=preserve?>

Figura A2.5 – Difractogramas BRA-CS6 e BRA-CS5: Brazlândia.



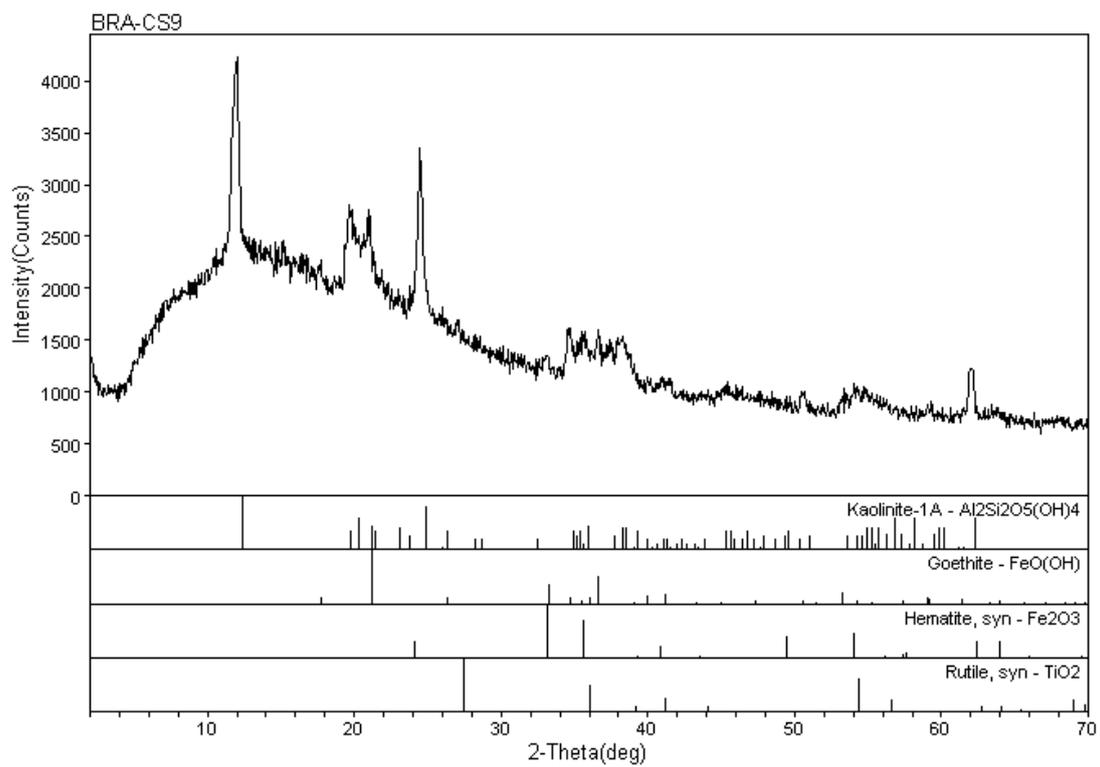
<0/dn/mz/vece-11/ko07>



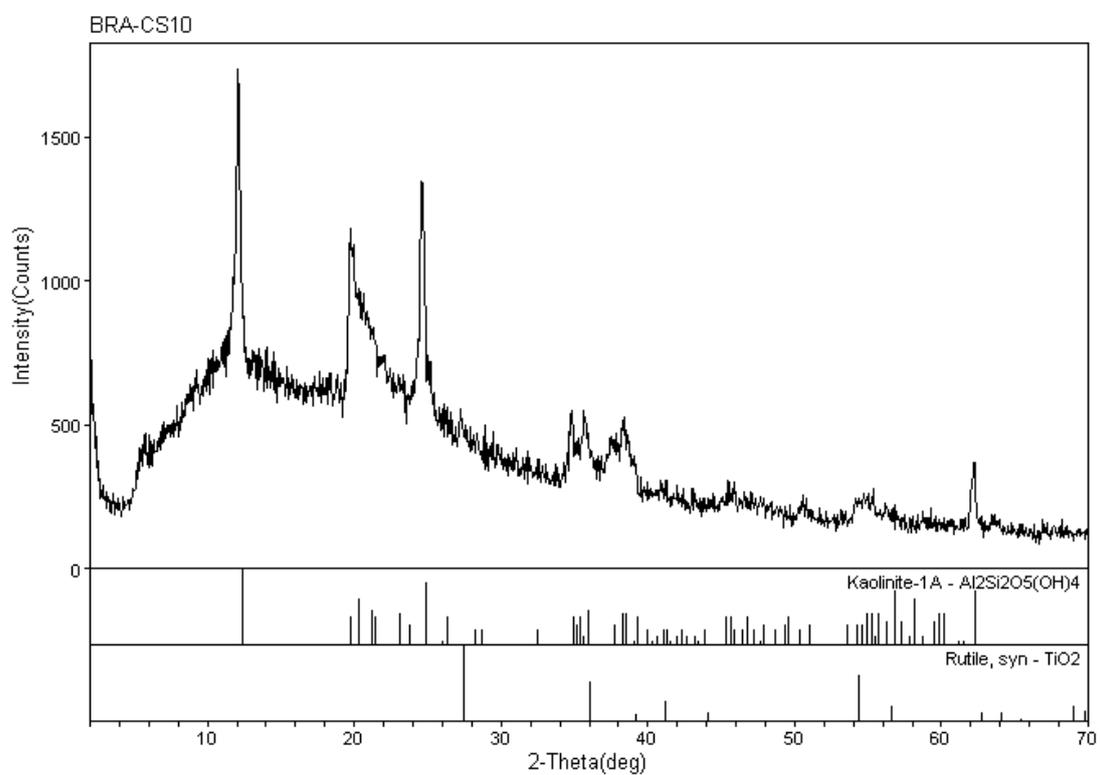
Laboratório de DRX - IG/UnB

<0/dn/mz/vece-11/ko07> Tuesday, Sep 01, 2009 @ 08:38a

Figura A2.6 – Difrátogramas BRA-CS8 e BRA-CS7: Brazlândia.



<\/div>



<\/div>

Figura A2.7 – Difratoqramas BRA-CS10 e BRA-CS9: Brazlândia.

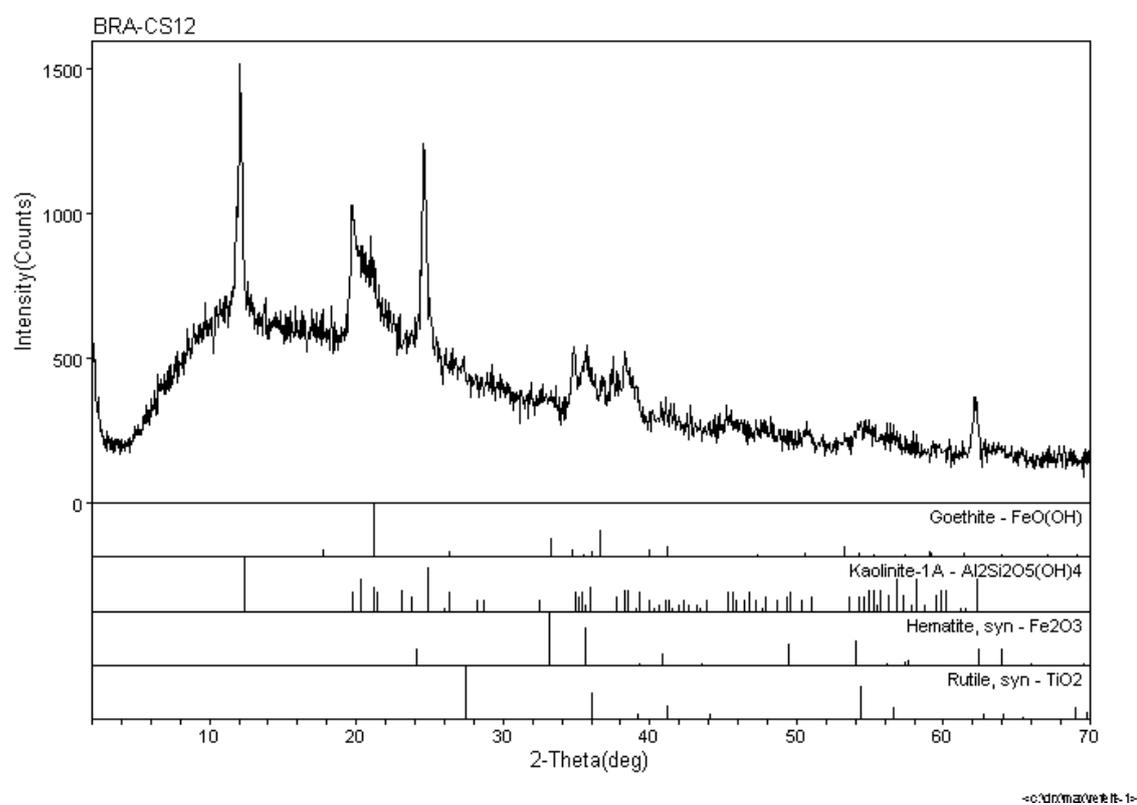
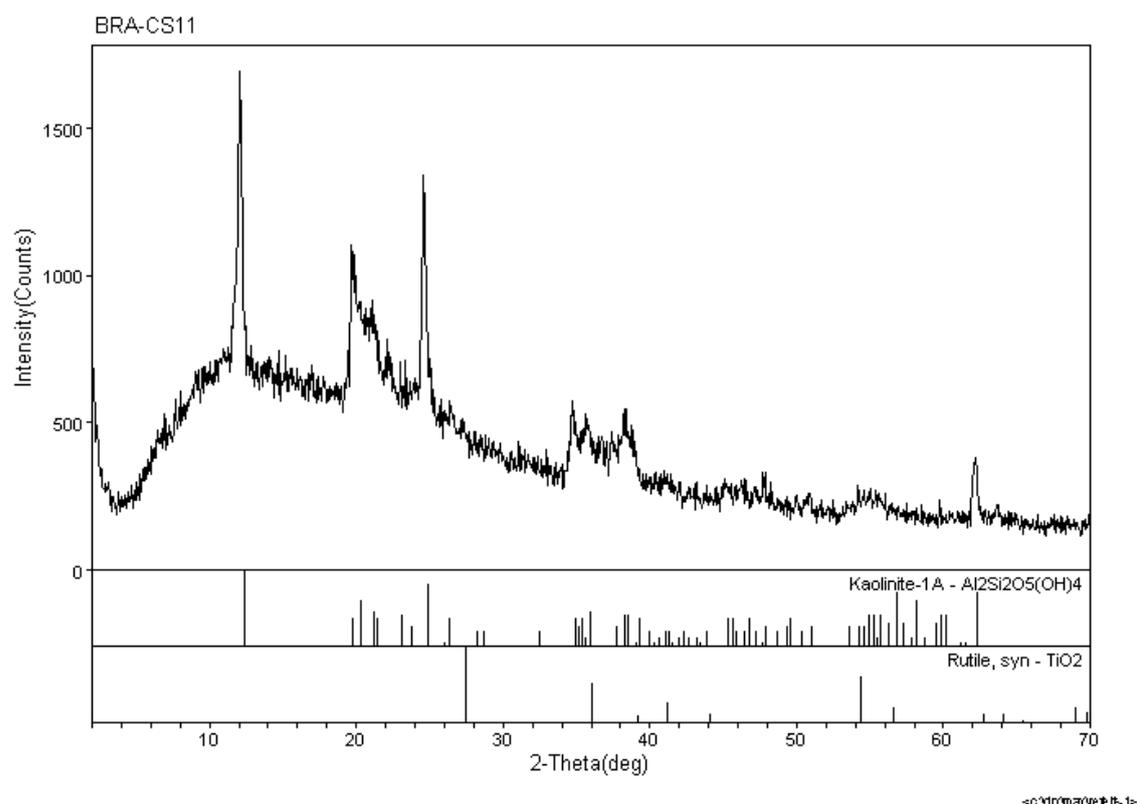


Figura A2.8 – Difratoqramas BRA-CS12 e BRA-CS11: Brazlândia.

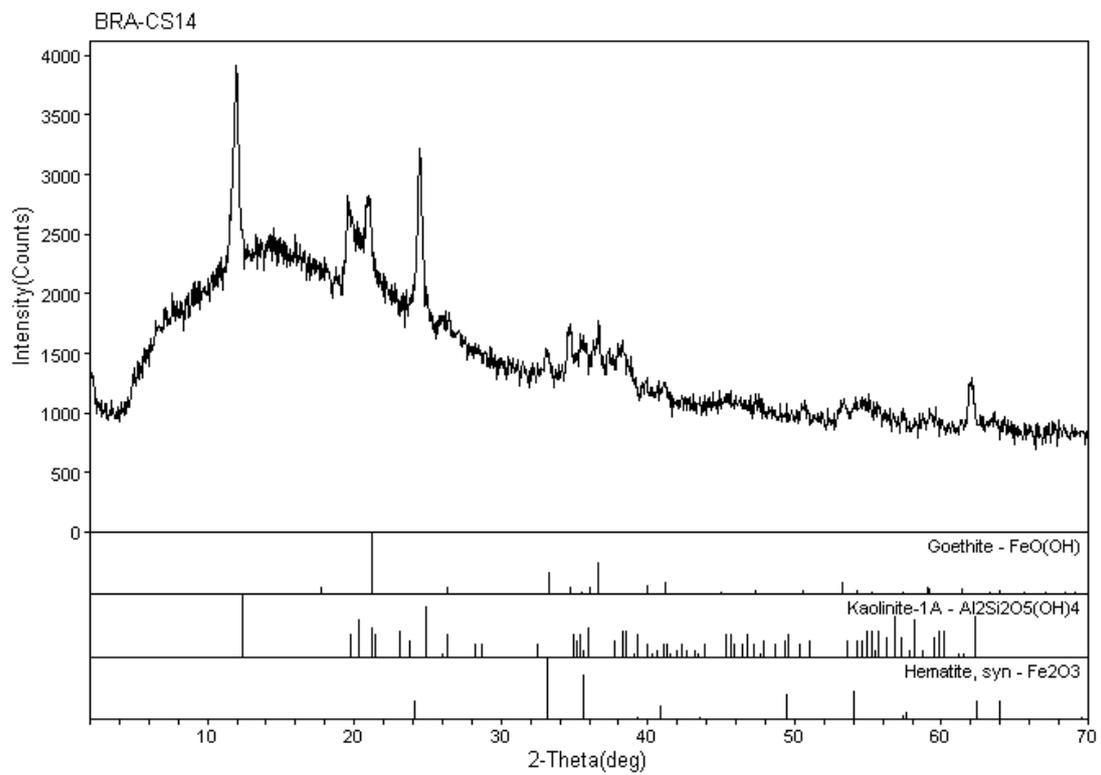
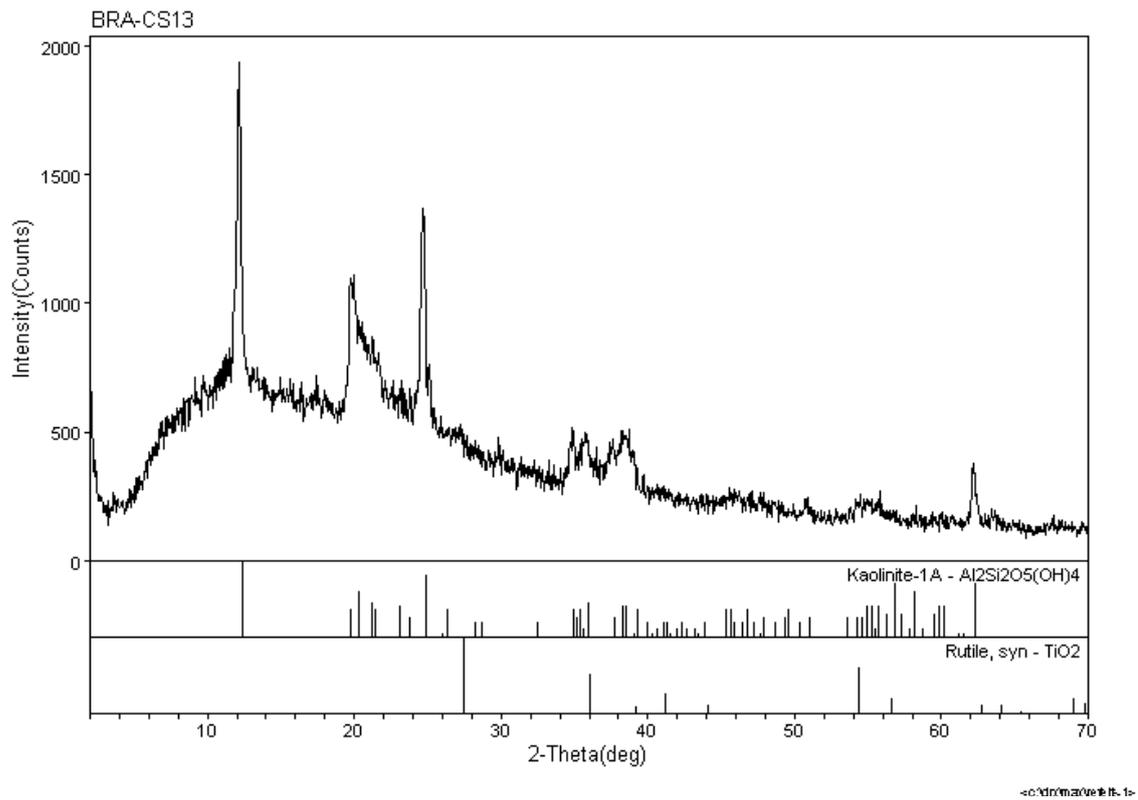
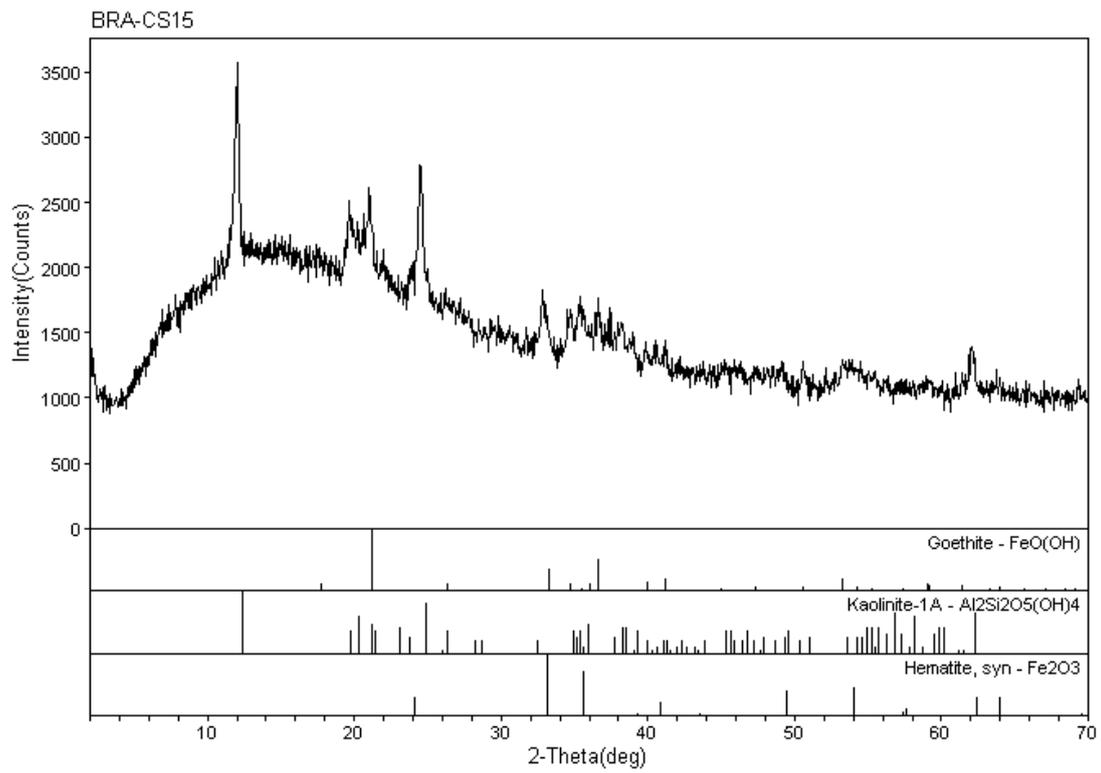
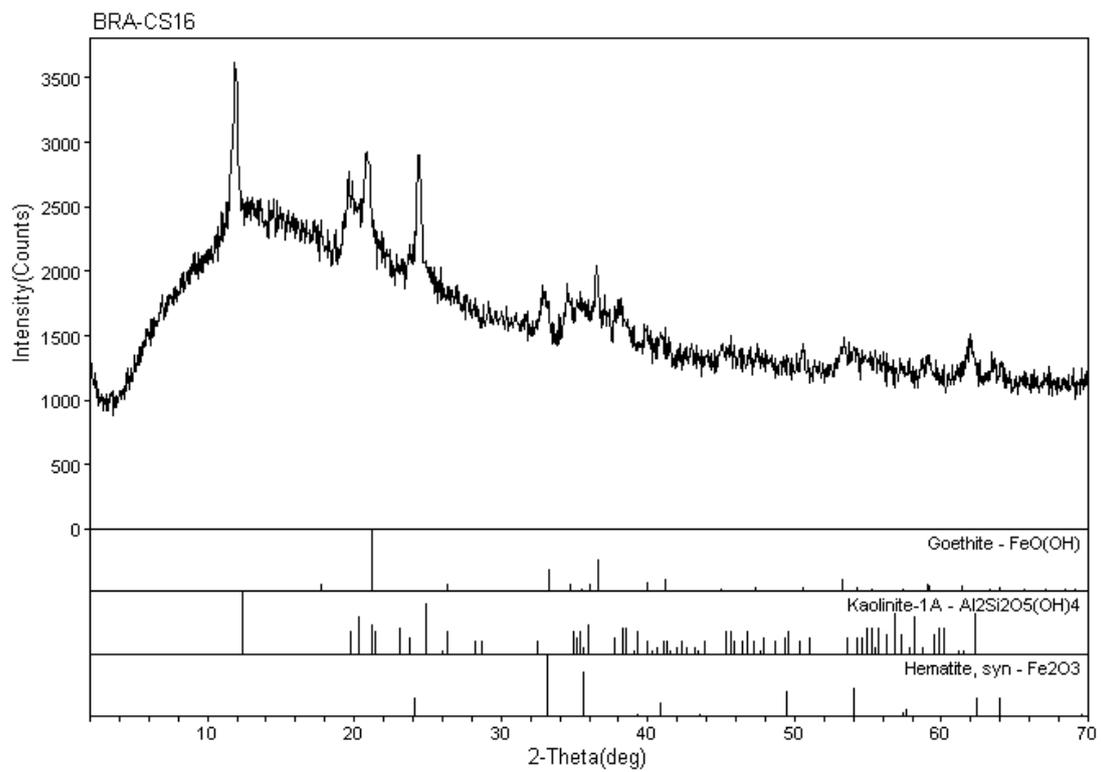


Figura A2.9 – Difratoqramas BRA-CS14 e BRA-CS13: Brazlândia.

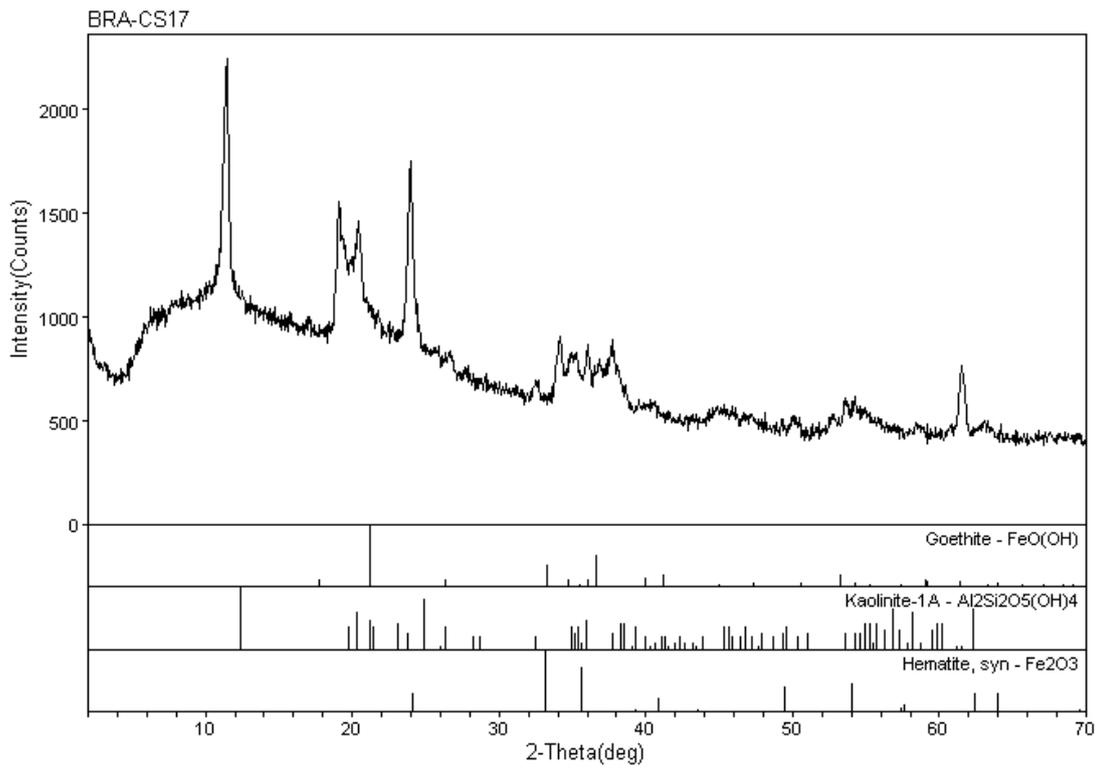


<01d/mz/veo1e-111k007>

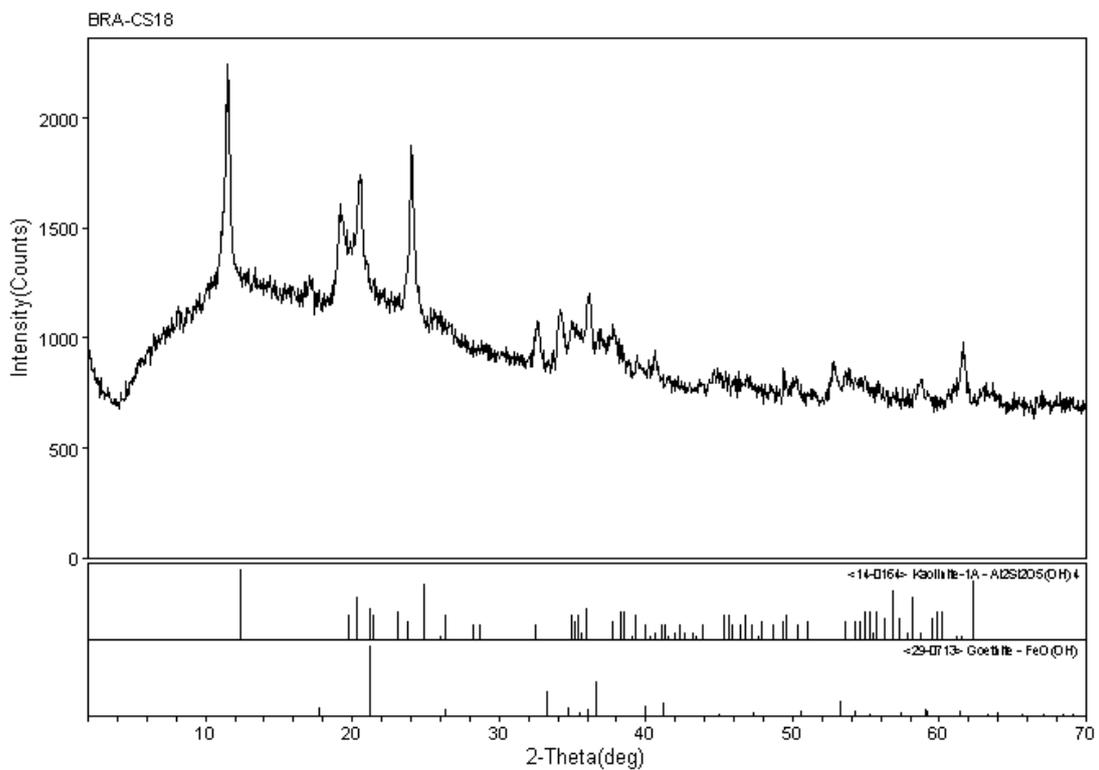


<01d/mz/veo1e-111k007>

Figura A2.10 – Difratomogramas BRA-CS16 e BRA-CS15: Brazlândia.



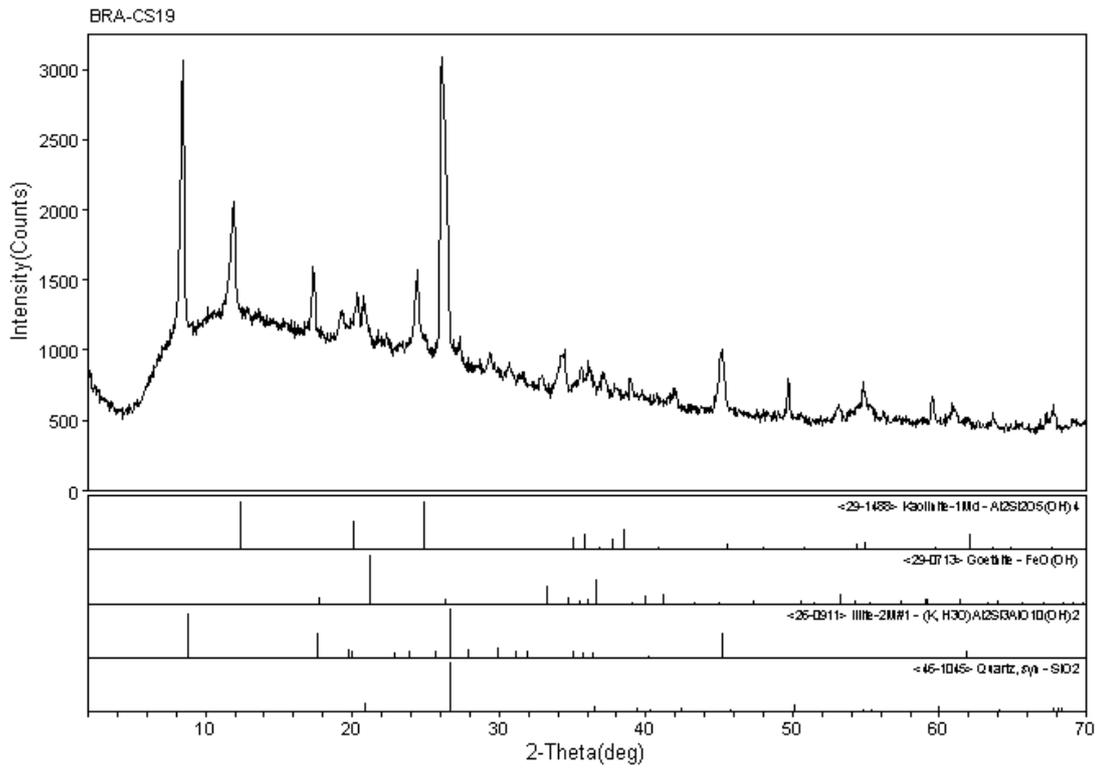
<0/dx/mx/vecode-1111007>



Laboratório de DRX - IG/UnB

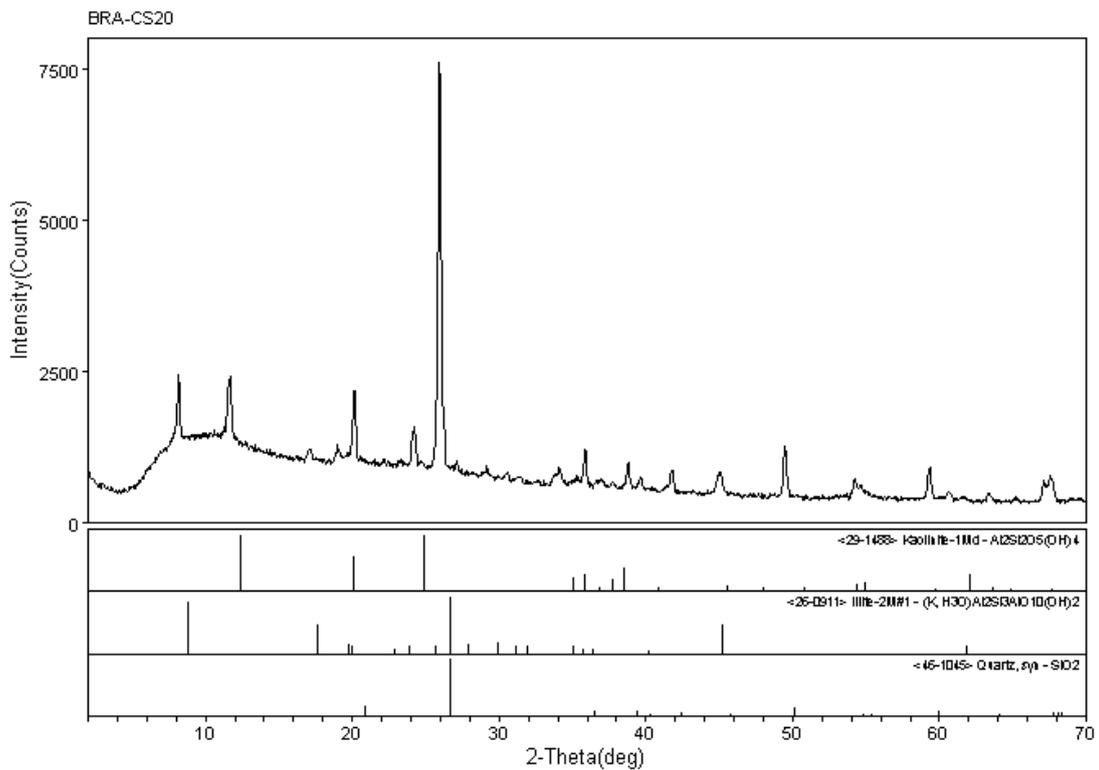
<0/dx/mx/vecode-1111007> Tuesday, Sep 01, 2009 08:52a

Figura A2.11 – Difractogramas BRA-CS18 e BRA-CS17: Brazlândia.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<01/03/2019 11:00:07> Tuesday, Sep 01, 2019 08:46a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<01/03/2019 11:00:07> Tuesday, Sep 01, 2019 08:47a

Figura A2.12 – Difractogramas BRA-CS20 e BRA-CS19: Brazlândia.

**Anexo 2 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem pontual
(caminhamento de superfície) de argila *in natura***

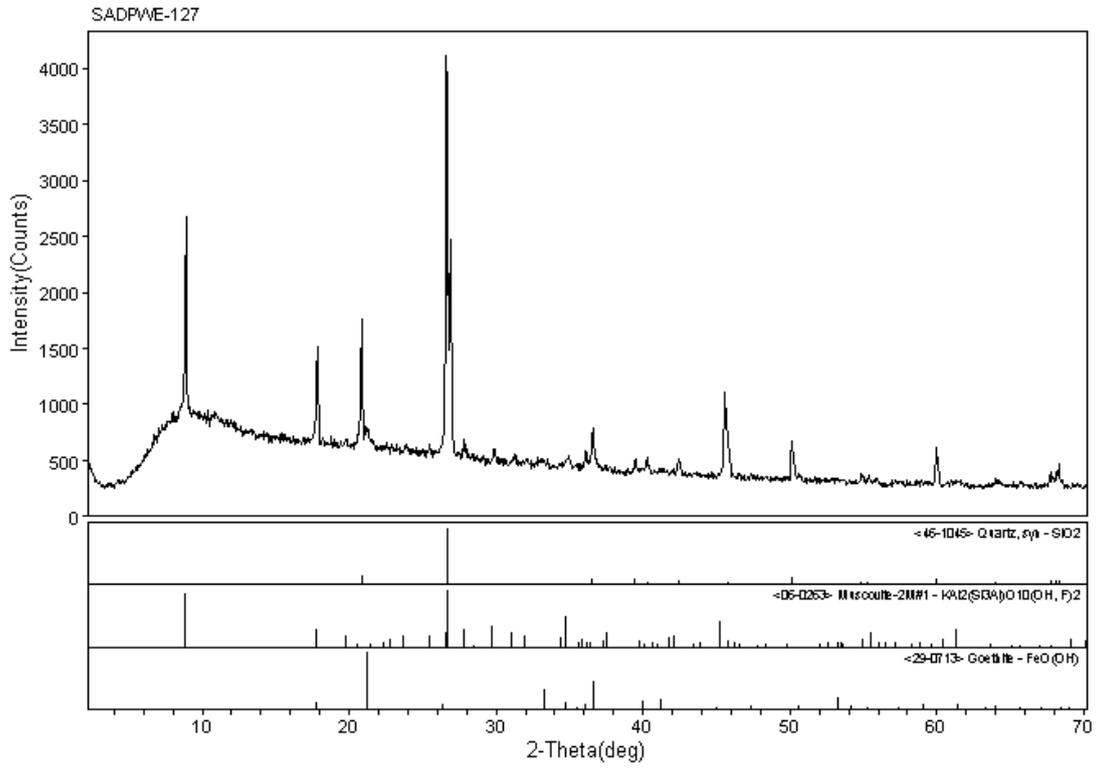
Área Santo Antônio do Descoberto

- Perfil W-E

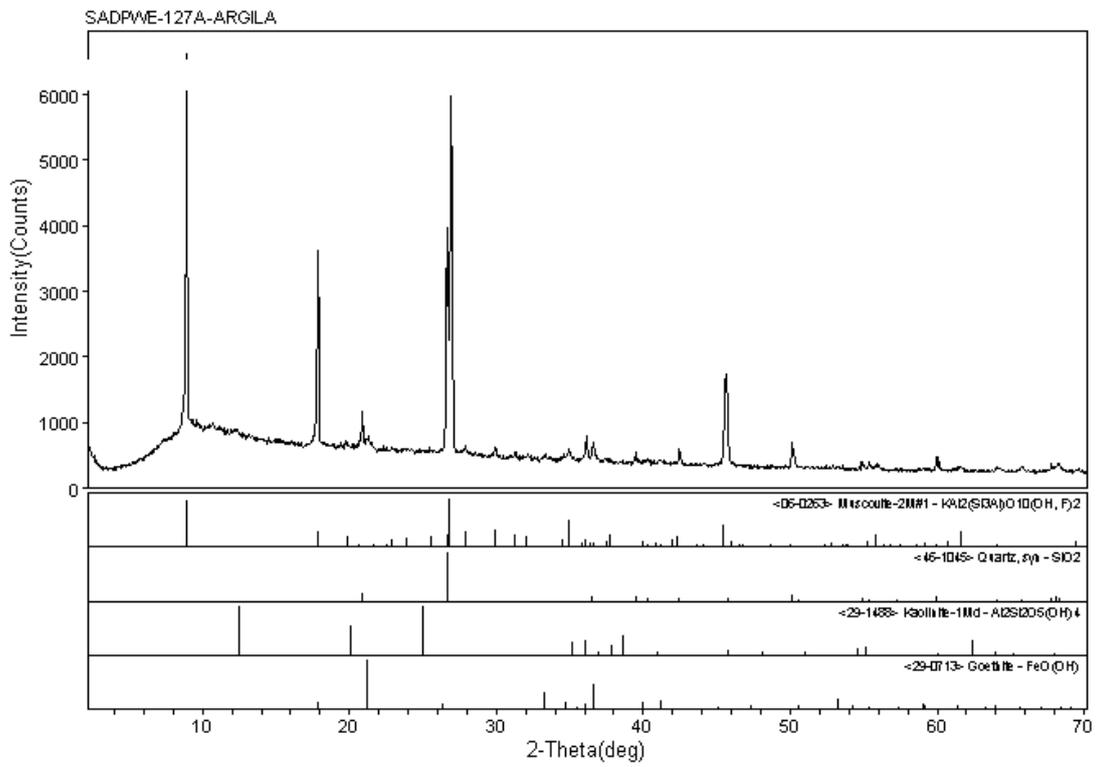
Figura A2.13 – Difractogramas SADPWE-127argila e SADPWE-127: Santo Antônio do Descoberto

Figura A2.14 – Difractogramas SADPWE-124 e SADPWE-127rocha: Santo Antônio do Descoberto

Figura A2.15 – Difractogramas SADPWE-119 e SADPWE-126aux: Santo Antônio do Descoberto

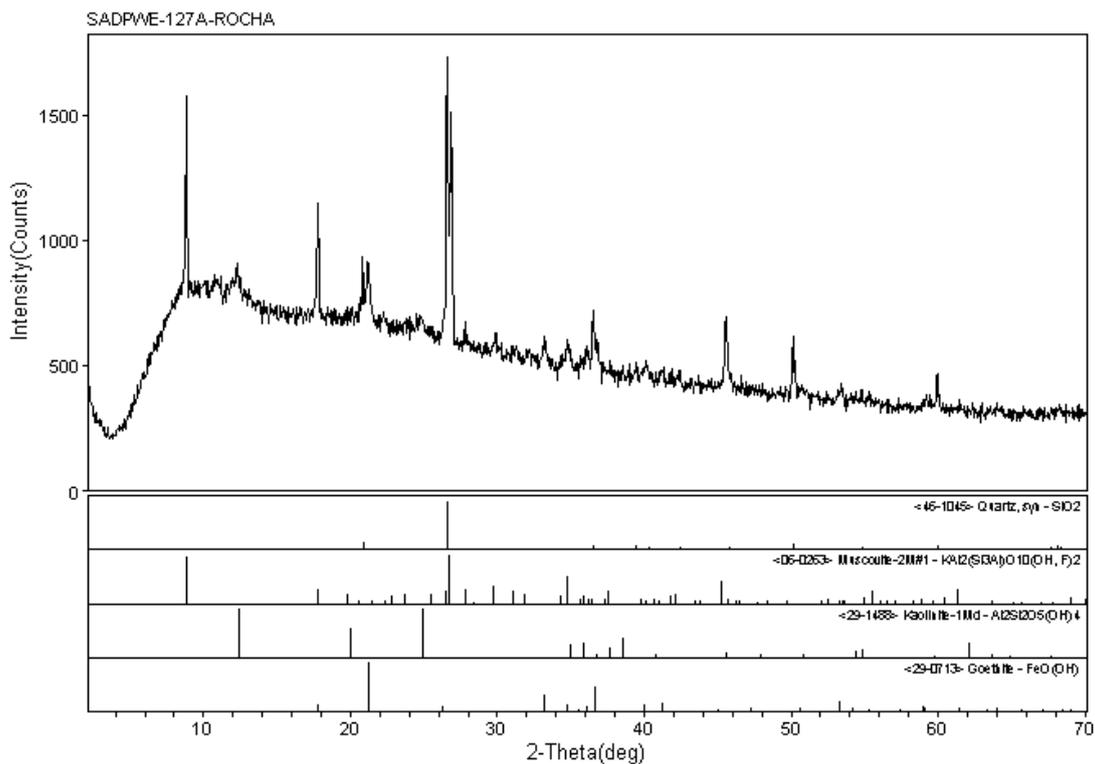


Laboratorio de DRX - IG/UInB

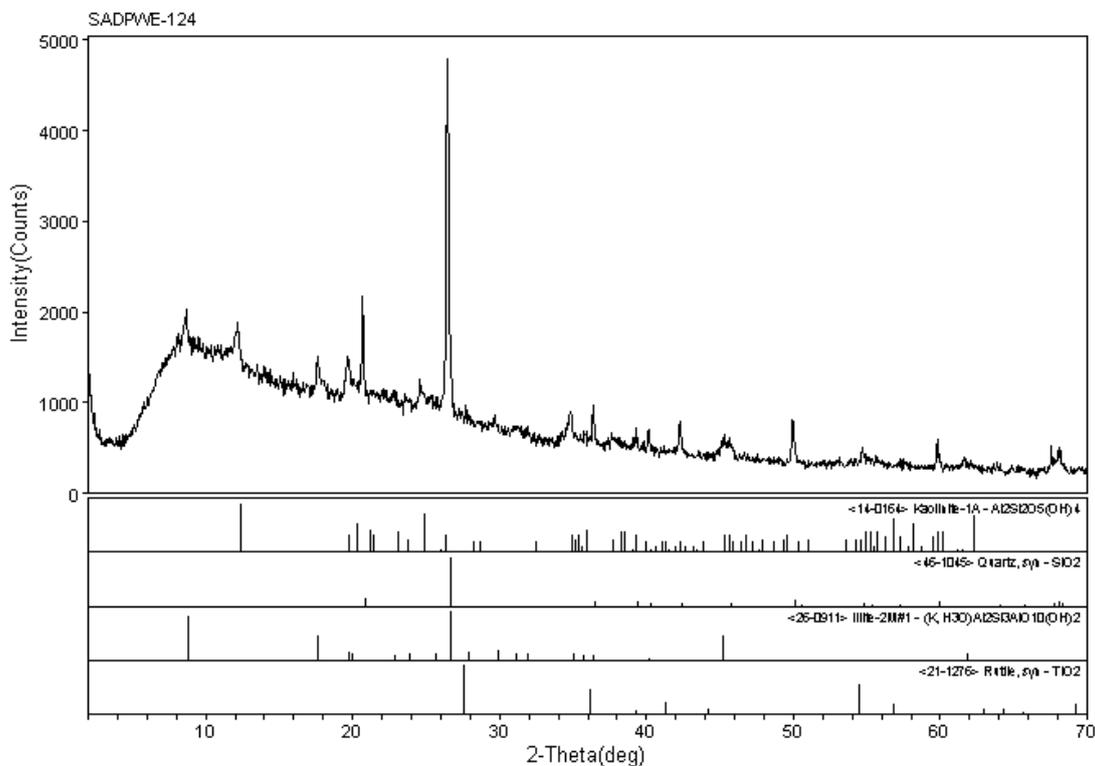


Laboratorio de DRX - IG/UInB

Figura A2.13 – Difractogramas SADPWE-127argila e SADPWE-127: Santo Antônio do Descoberto.



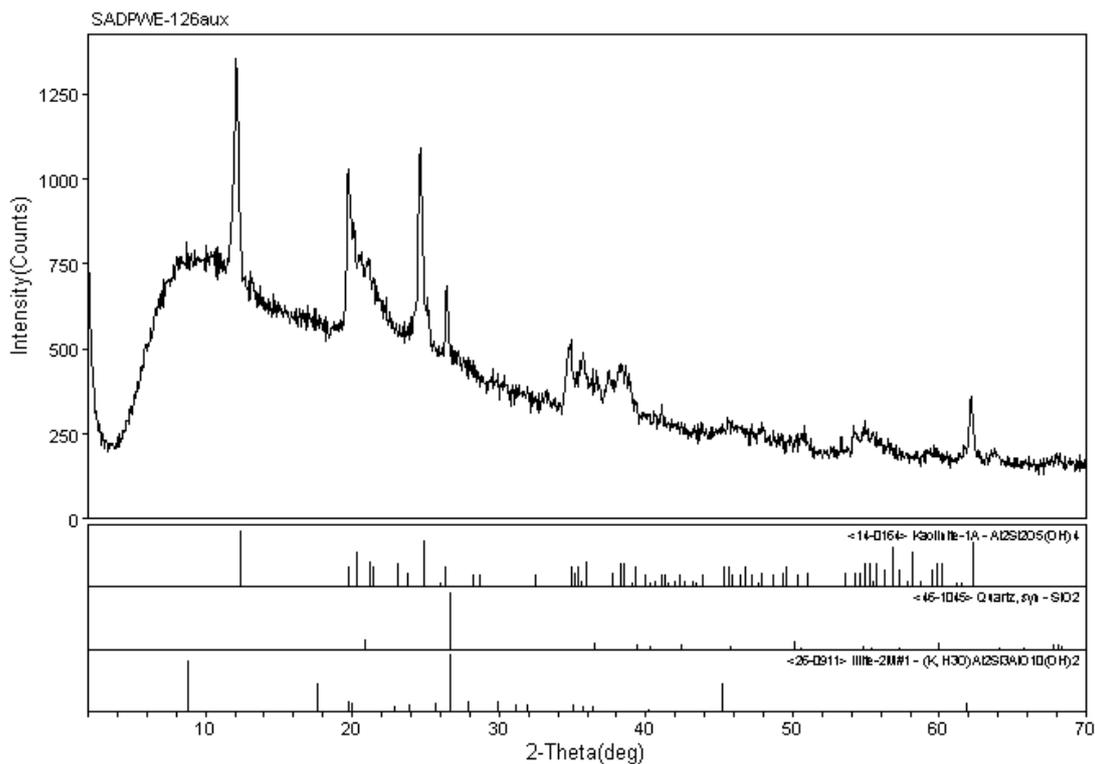
Laboratorio de DRX - IG/UnB



Laboratorio de DRX - IG/UnB

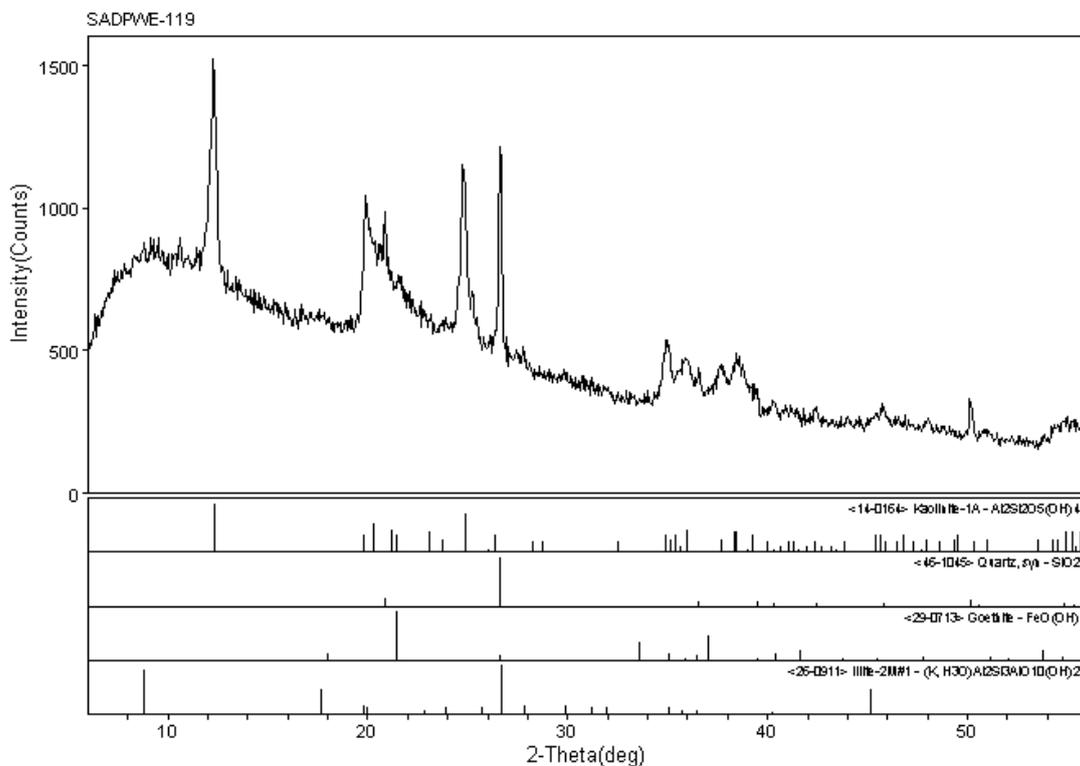
<0:dr\max\1111003> Friday, Sep 11, 2009 09:12h

Figura A2.14 – Difratogramas SADPWE-124 e SADPWE-127rocha: Santo Antônio do Descoberto.



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<0'dr\max\111019> Thursday, Sep 24, 2009 @ 11:04a



Laboratorio de DRX - IG/UnB

<0'dr\max\111019> Friday, Sep 11, 2009 @ 08:56a

Figura A2.15 – Difractogramas SADPWE-119 e SADPWE-126aux: Santo Antônio do Descoberto.

Anexo 2 – Difractogramas de Amostra Total: amostragem pontual (caminhamento de superfície) de argila *in natura*

Área Santo Antônio do Descoberto

- Perfil N-S

Figura A2.16 – Difractogramas SADH-9 e SADH-1: Santo Antônio do Descoberto

Figura A2.17 – Difractogramas SADPSN-65 e SADH-10: Santo Antônio do Descoberto

Figura A2.18 – Difractogramas SADPSN-69 e SADPSN-67: Santo Antônio do Descoberto

Figura A2.19 – Difractogramas SADPSN-70aux e SADPSN-70: Santo Antônio do Descoberto

Figura A2.20 – Difractograma SADPSN-70aux2: Santo Antônio do Descoberto

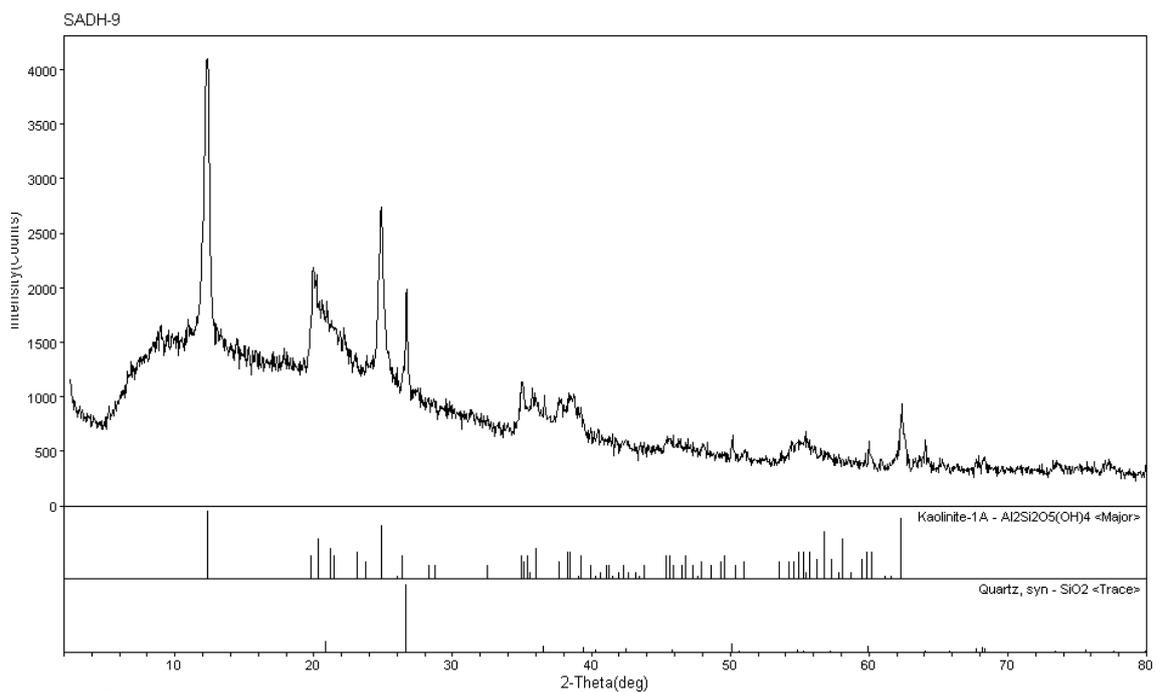
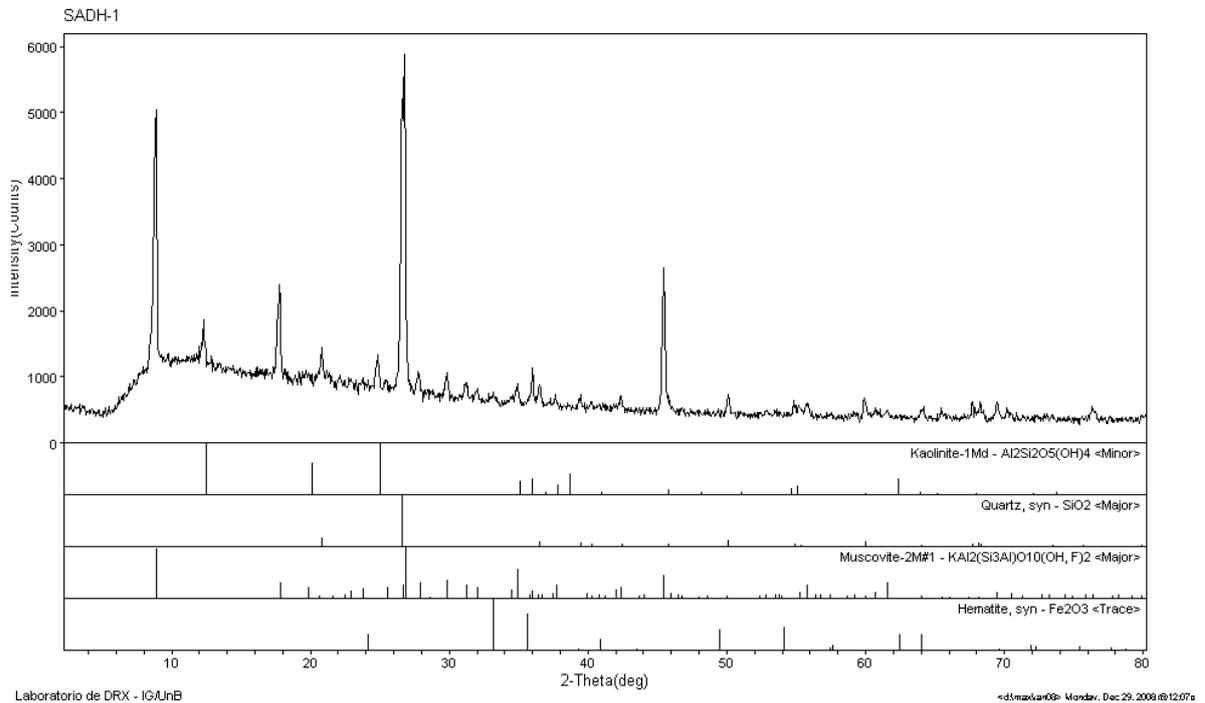


Figura A2.16 – Difratomogramas SADH-9 e SADH-1: Santo Antônio do Descoberto.

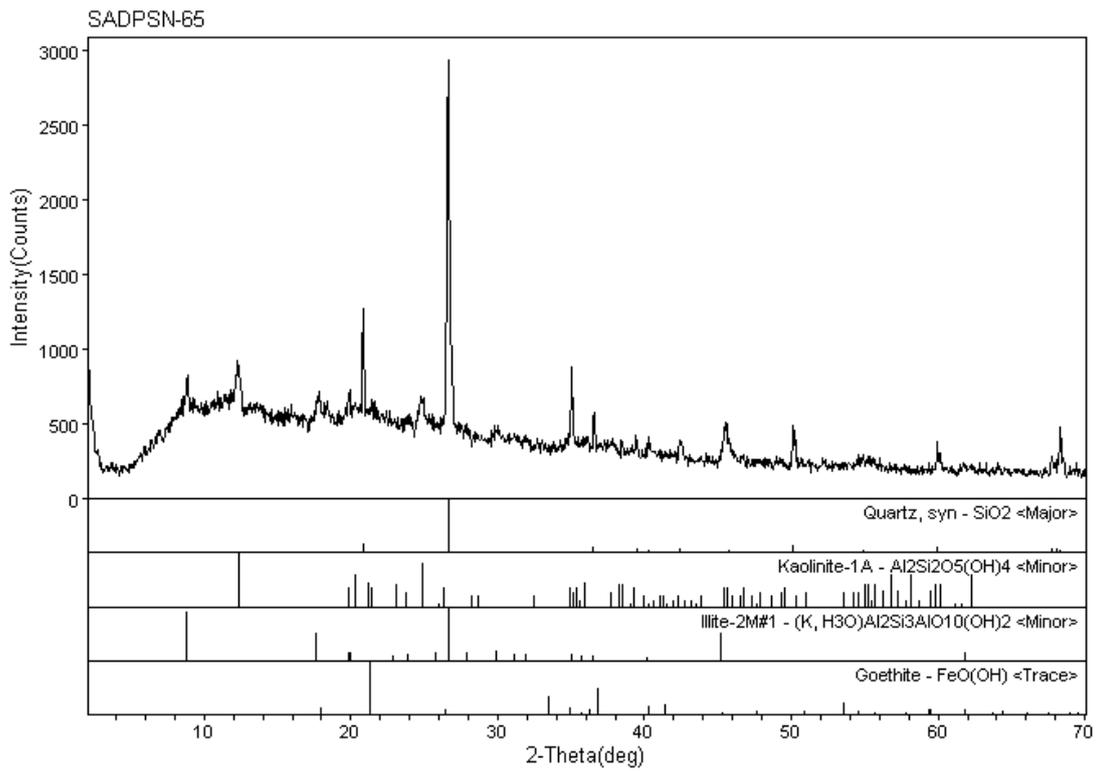
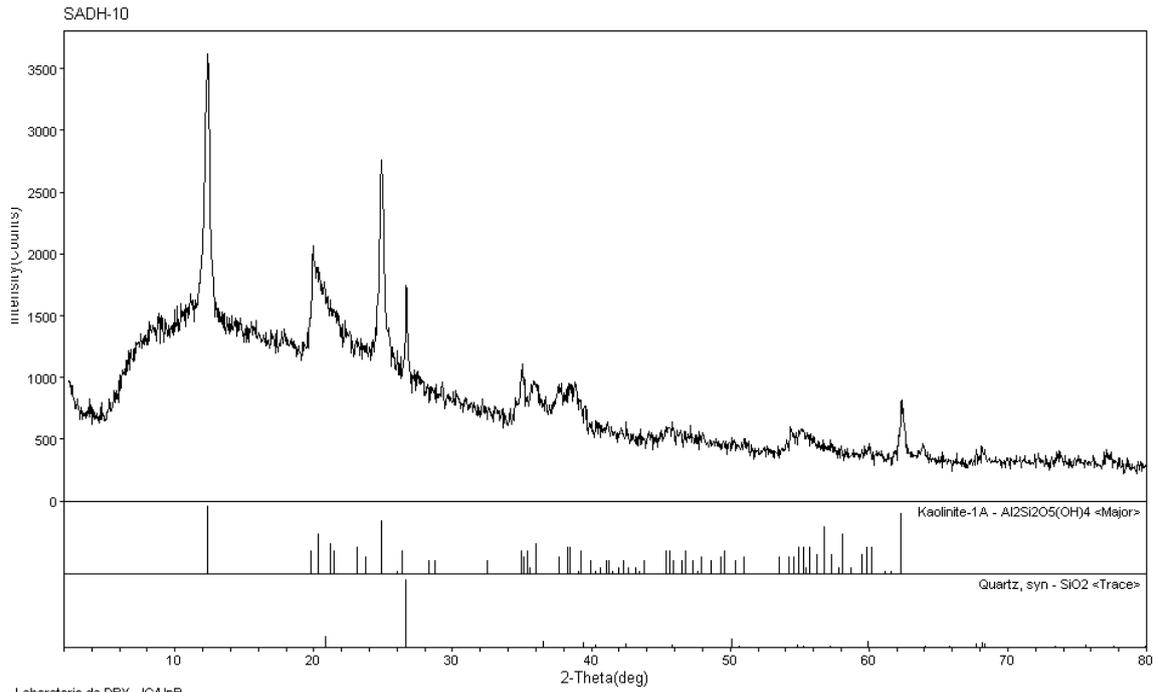
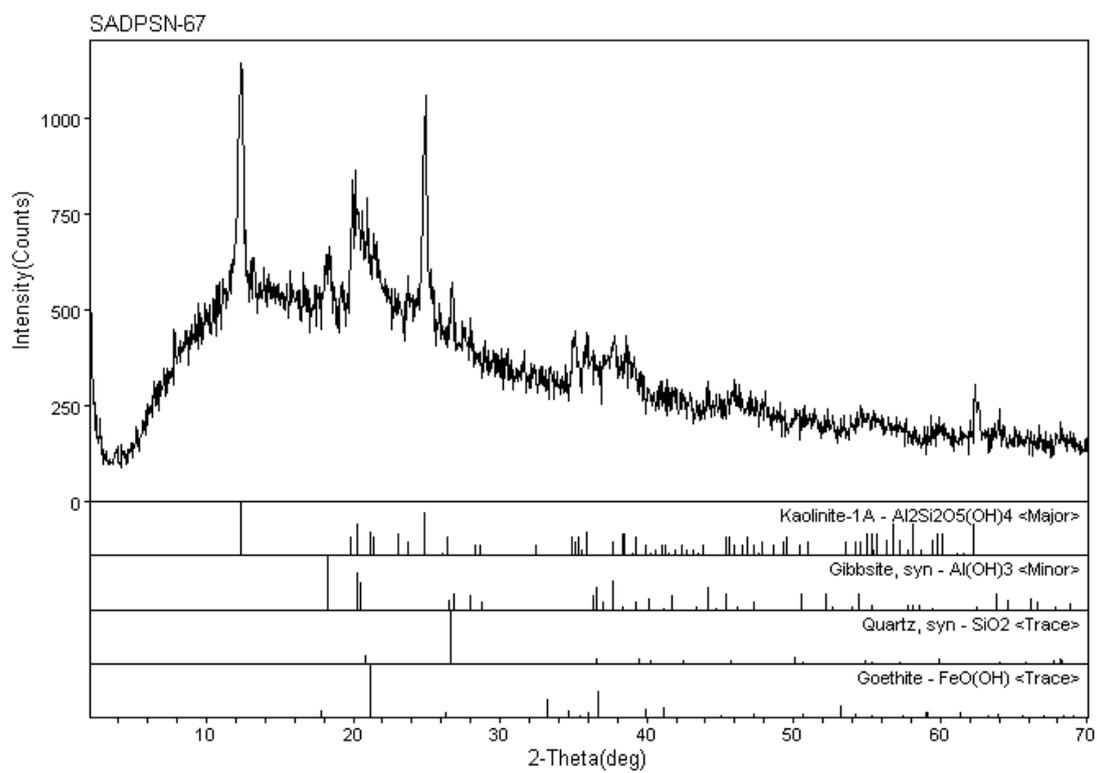
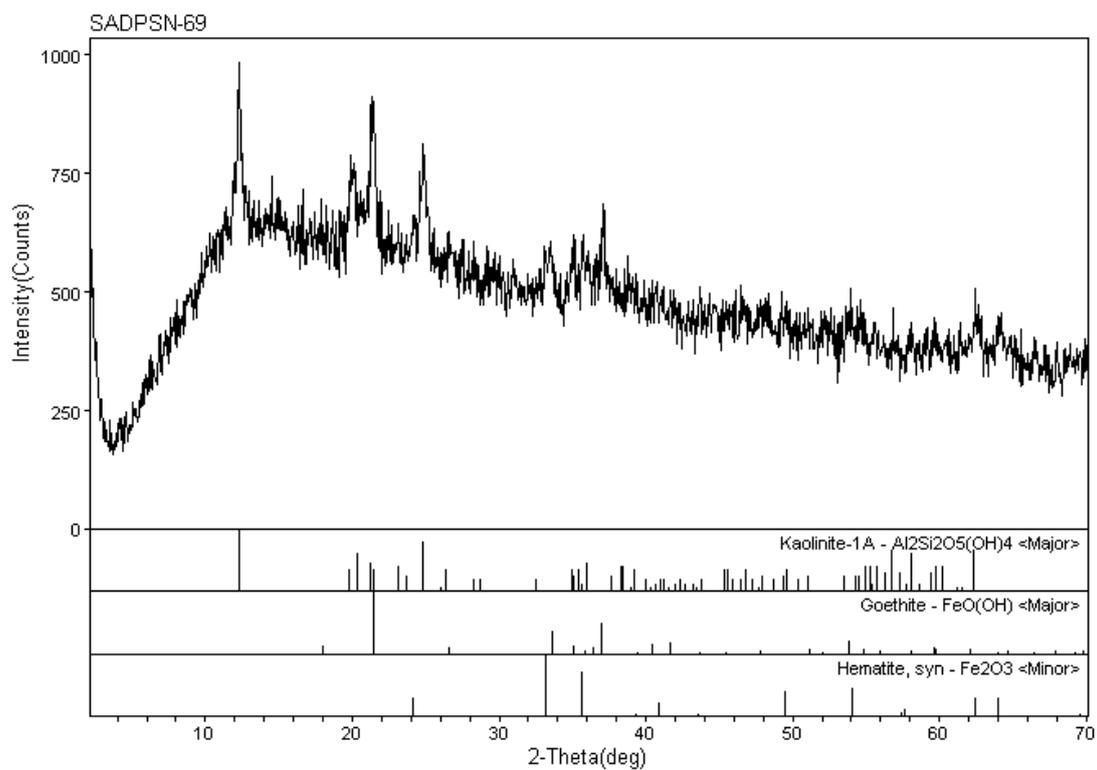


Figura A2.17 – Difractogramas SADPSN-65 e SADH-10: Santo Antônio do Descoberto.

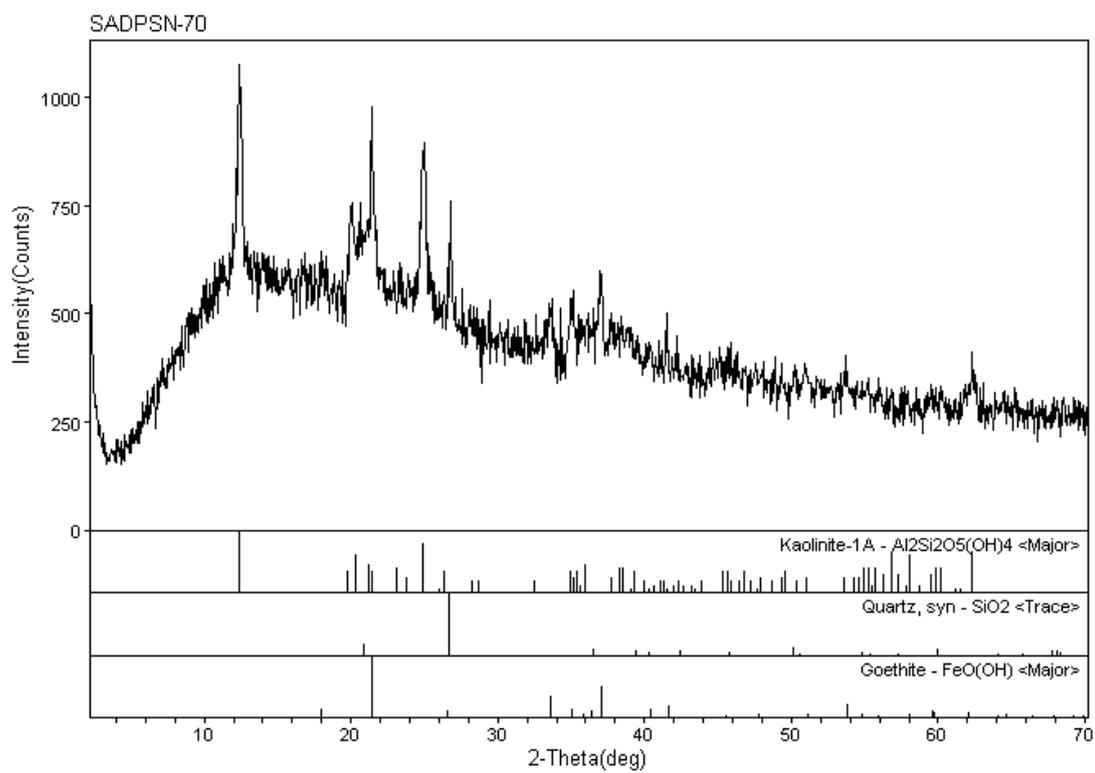


<cd/ra>

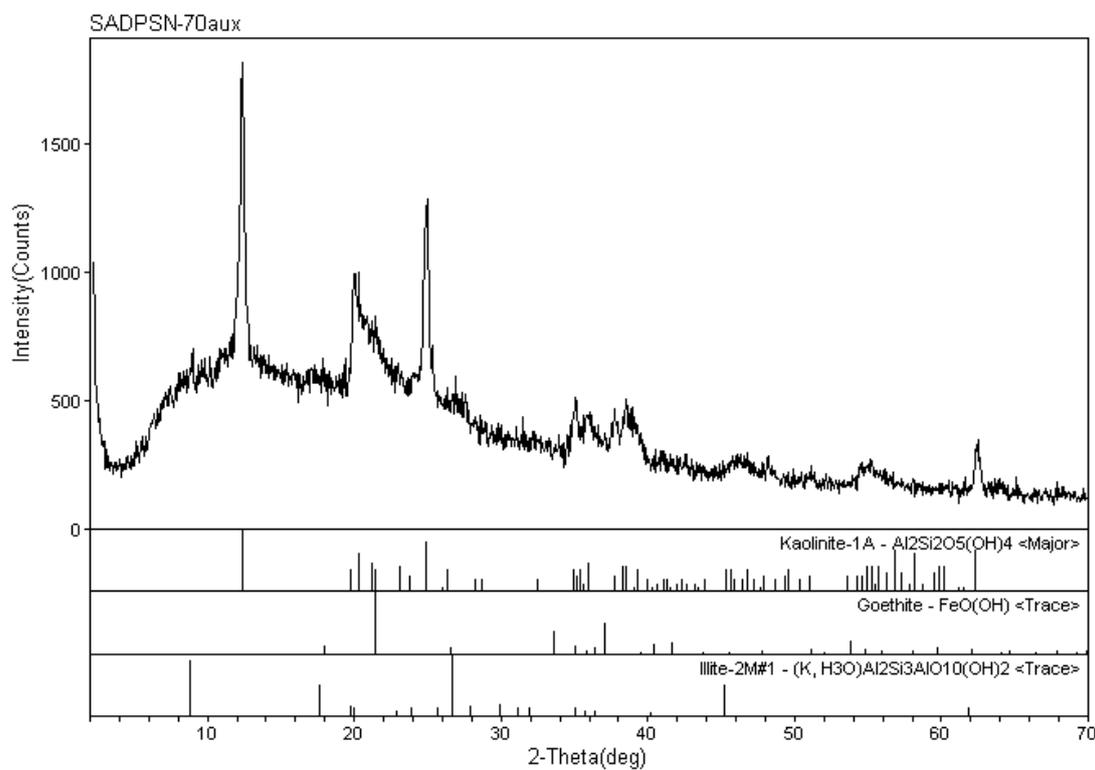


<cd/ra>

Figura A2.19 – Difractogramas SADPSN-69 e SADPSN-67: Santo Antônio do Descoberto.



<cd/mx/mak09>



<cd/mx/mak09>

Figura A2.19 – Difractogramas SADPSN-70aux e SADPSN-70: Santo Antônio do Descoberto.

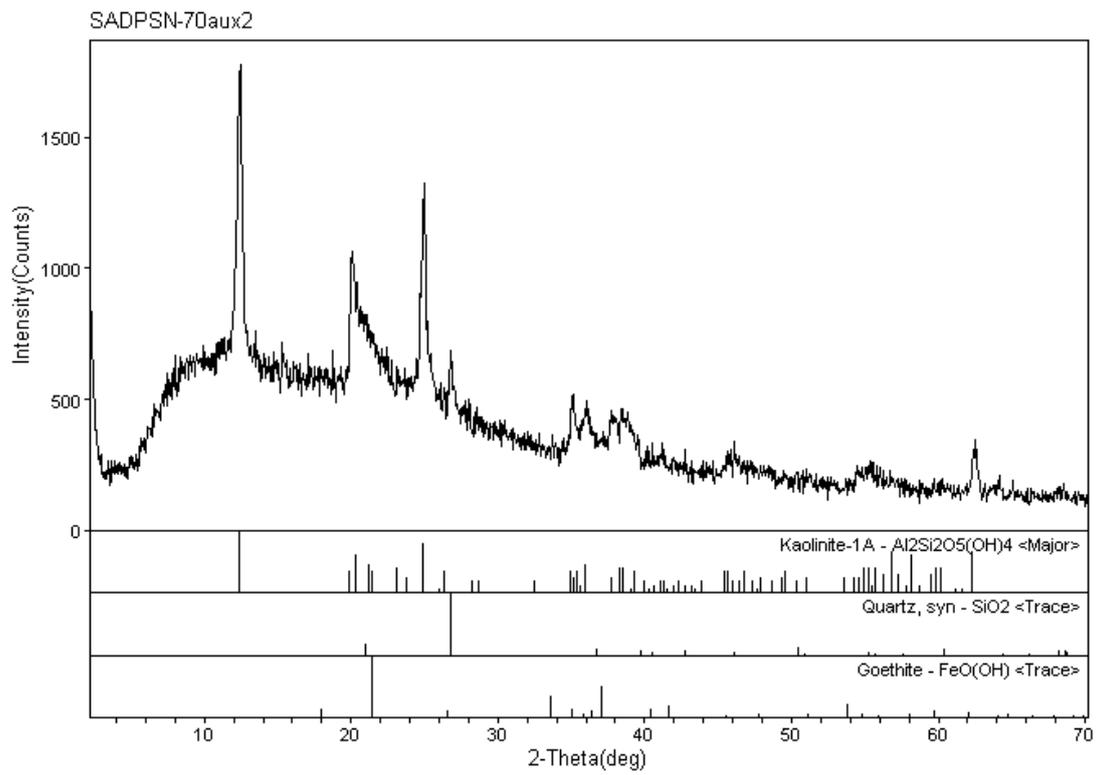


Figura A2.20 – Difratoograma SADPSN-70aux2: Santo Antônio do Descoberto.

Anexo 3 – Composição Química: amostragem contínua (perfil vertical)

Tabela A3.1 – Composição química do perfil de alteração BRAC/BRAT: Brazlândia

Tabela A3.2 - Composição química dos perfis de alteração SAD/SADS: Santo Antônio do Descoberto

Tabela A3.3 – Composição química do perfil de alteração SAD1: Santo Antônio do Descoberto

Tabela A3.4 – Composição química dos perfis de alteração STA e STA1: Santa Maria

Tabela A3.5 – Composição química dos perfis de alteração S e SA: Sobradinho

Tabela A3.6 – Composição química do perfil de alteração BONA/BONC: Bonsucesso

Amostra	Composição Química - Perfil BRAC/BRAT Brazlândia									
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%	
0m	BRAC-15	42,61	2,35	32,92	1,83	0,15	0,38	0,32	0,46	18,24
	BRAC-14	38,94	2,02	34,82	1,60	0,00	0,35	0,27	0,40	20,79
	BRAC-13	35,44	1,84	35,88	0,96	0,18	0,29	0,27	0,40	24,64
	BRAC-12	40,18	2,13	35,81	0,97	0,00	0,20	0,25	0,38	20,14
	BRAC-11	43,84	2,33	37,15	1,12	0,39	0,56	0,27	0,40	14,71
	BRAC-10	41,26	2,10	37,85	1,03	0,12	0,32	0,32	0,46	15,92
	BRAC-9	43,18	2,26	38,05	1,06	0,31	0,30	0,24	0,37	14,68
	BRAC-8	42,14	2,25	37,01	1,03	0,36	0,38	0,27	0,40	17,01
10m	BRAC-7	40,69	2,17	33,40	1,06	0,17	0,29	0,27	0,40	22,17
	BRAC-6	38,12	1,72	33,48	0,94	0,85	0,54	0,27	0,40	22,98
	BRAC-5	44,71	2,07	35,16	1,15	0,41	0,49	0,27	0,40	14,54
	BRAC-4	44,33	1,98	35,44	2,05	0,17	0,37	0,27	0,40	14,75
	BRAC-3	43,14	2,05	36,67	2,25	0,17	0,27	0,24	0,37	14,59
	BRAC-2	42,03	2,11	37,08	2,32	0,19	0,43	0,27	0,40	15,09
	BRAC-1	40,97	1,96	36,74	1,49	0,28	0,55	0,22	0,35	16,65
	BRAT-1	40,07	2,11	29,84	3,01	0,20	0,48	0,44	0,59	24,09
21,75m	BRAT-2	37,69	1,93	38,90	3,89	0,14	0,36	0,25	0,38	15,62
	BRAT-3	42,96	1,90	33,87	4,61	0,13	0,32	0,22	0,35	14,82
	BRAT-4	44,08	2,20	33,97	3,14	0,18	0,28	0,27	0,40	15,15
	BRAT-5	43,80	1,82	34,97	3,83	0,18	0,29	0,27	0,40	14,91
	Média	41,51	2,07	35,45	1,97	0,23	0,37	0,27	0,41	17,57
	Desvio Padrão	2,51	0,17	2,14	1,15	0,18	0,10	0,05	0,05	3,53

Tabela A3.1 – Composição química do perfil de alteração BRAC/BRAT: Brazlândia.

Amostra	Composição Química - Perfil SAD/SADS Santo Antônio do Descoberto									
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%	
0m	SAD-5	43,76	1,62	34,93	1,32	0,20	0,22	0,24	0,37	16,88
	SAD-4	46,39	1,72	34,33	1,45	0,57	0,22	0,32	0,46	14,18
	SAD-3	46,37	1,59	34,18	1,34	0,14	0,39	0,32	0,46	14,68
	SAD-2	45,95	1,75	33,38	1,10	0,36	0,99	0,32	0,46	15,16
	SAD-1	44,21	1,75	33,90	1,37	0,36	1,03	0,32	0,46	15,94
	Média SAD	45,34	1,68	34,14	1,31	0,33	0,57	0,30	0,44	15,37
	Desvio Padrão	1,26	0,07	0,57	0,13	0,17	0,41	0,04	0,04	1,07
	7m	SADS-1	42,85	1,69	32,93	0,92	0,12	0,29	0,32	0,46
SADS-2		45,02	1,85	32,03	0,97	0,35	0,34	0,37	0,51	19,08
SADS-3		44,30	1,79	31,45	0,95	0,29	0,32	0,30	0,46	20,61
SADS-4		44,04	1,72	31,94	0,92	0,21	0,30	0,27	0,40	21,14
SADS-5		46,83	1,54	27,90	0,93	0,19	0,67	0,32	0,46	20,89
SADS-6		46,56	1,89	27,64	1,01	0,13	0,30	0,37	0,51	20,80
SADS-7		50,25	1,81	28,88	2,33	0,17	0,25	0,32	0,46	14,89
SADS-8		42,12	2,28	34,32	1,49	0,13	0,44	0,30	0,44	18,80
13,5m	Média SADS	45,25	1,82	30,89	1,19	0,20	0,36	0,32	0,46	19,46
	Desvio Padrão	2,60	0,22	2,46	0,50	0,08	0,13	0,04	0,04	2,05
	Média SAD/SADS	45,28	1,77	32,14	1,24	0,23	0,45	0,31	0,45	17,88
	Desvio Padrão	2,11	0,18	2,52	0,39	0,09	0,27	0,04	0,04	2,67

Tabela A3.2 – Composição química dos perfis de alteração SAD/SADS: Santo Antônio do Descoberto.

Amostra	Composição Química - Perfil SAD1 Santo Antônio do Descoberto								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
<i>SADI-1</i>	40,29	1,55	32,63	1,39	0,04	0,23	0,32	0,46	22,52
<i>SADI-2</i>	44,01	2,01	30,36	1,39	0,21	0,40	0,41	0,55	21,07
<i>SADI-3</i>	46,16	1,97	34,34	1,42	0,20	0,48	0,35	0,50	14,17
<i>SADI-4</i>	44,11	1,73	32,82	1,12	0,19	0,27	0,35	0,50	18,05
<i>SADI-5</i>	43,31	1,57	32,55	1,17	0,00	0,14	0,34	0,48	19,69
<i>SADI-6</i>	43,59	1,69	32,86	1,66	0,20	0,23	0,35	0,50	18,04
<i>SADI-7</i>	42,90	1,58	30,36	1,45	0,23	0,33	0,35	0,50	21,39
<i>SADI-8</i>	43,19	1,68	31,66	1,77	0,15	0,25	0,32	0,46	20,79
Média	43,45	1,72	32,20	1,42	0,15	0,29	0,35	0,49	19,46
Desvio Padrão	1,63	0,18	1,35	0,22	0,09	0,11	0,03	0,03	2,66

Tabela A3.3 – Composição química do perfil de alteração SAD1: Santo Antônio do Descoberto.

Amostra	Composição Química - Perfil STA Santa Maria								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
<i>STA-1</i>	36,49	2,38	38,56	1,41	0,10	0,27	0,39	0,53	19,35
<i>STA-2</i>	35,57	2,35	38,09	1,53	0,08	0,24	0,28	0,42	20,93
<i>STA-3</i>	49,18	1,87	24,34	2,92	0,17	0,39	0,34	0,48	20,52
<i>STA-4</i>	49,43	2,28	25,69	2,27	0,15	0,27	0,32	0,46	20,12
<i>STA-5</i>	50,14	1,57	24,38	1,85	0,15	0,28	0,32	0,46	20,34
<i>STA-6</i>	54,93	1,40	20,97	1,96	0,09	0,24	0,27	0,40	20,57
<i>STA-7</i>	46,90	1,79	30,25	1,17	0,21	0,32	0,37	0,51	17,66
<i>STA-8</i>	62,62	1,33	23,03	1,58	0,14	0,22	0,30	0,44	9,58
Média	48,16	1,87	28,16	1,84	0,13	0,28	0,32	0,46	18,63
Desvio Padrão	8,93	0,43	6,81	0,56	0,05	0,05	0,04	0,04	3,80

Amostra	Composição Química - Perfil STA1 Santa Maria								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
<i>STA1-1</i>	62,98	1,23	21,78	2,49	1,08	0,36	0,35	0,50	8,90
<i>STA1-2</i>	63,63	1,18	21,16	2,59	0,97	0,30	0,35	0,50	8,82
<i>STA1-3</i>	62,18	1,38	24,63	2,68	1,27	0,30	0,39	0,53	6,44
<i>STA1-4</i>	69,83	0,79	17,31	2,33	0,63	0,26	0,32	0,46	7,19
<i>STA1-5</i>	70,07	0,48	19,28	1,63	0,38	0,28	0,30	0,44	6,83
<i>STA1-6</i>	67,95	0,86	18,91	2,09	0,77	0,62	0,28	0,42	8,73
Média	66,11	0,99	20,51	2,30	0,85	0,35	0,33	0,47	7,82
Desvio Padrão	3,59	0,33	2,58	0,39	0,32	0,14	0,04	0,04	1,12

Tabela A3.4 – Composição química dos perfis de alteração STA e STA1: Santa Maria.

Amostra	Composição Química - Perfil S Sobradinho								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
<i>0m</i> S-1	26,46	2,19	33,12	7,42	0,04	0,26	0,27	0,40	29,03
S-2	27,86	1,49	23,80	25,48	0,22	0,40	0,27	0,40	20,27
<i>2,5m</i> S-3	28,15	1,15	20,42	36,31	0,10	0,32	0,24	0,37	12,15
Média	27,49	1,61	25,78	23,07	0,12	0,32	0,26	0,39	20,48
Desvio Padrão	0,90	0,53	6,58	14,60	0,09	0,07	0,02	0,02	8,44

Amostra	Composição Química - Perfil SA Sobradinho								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
<i>0m</i> SA-1	34,73	2,12	32,81	1,73	0,18	0,42	0,32	0,46	28,07
SA-2	40,55	2,59	34,94	1,83	0,30	0,33	0,24	0,37	18,95
SA-3	41,20	1,92	29,89	4,97	0,13	0,26	0,27	0,40	20,56
SA-4	50,87	1,64	28,40	4,57	0,26	0,52	0,39	0,53	12,11
<i>4,3m</i> SA-5	50,84	1,91	28,48	3,97	0,23	0,30	0,27	0,40	12,79
Média	43,64	2,04	30,90	3,42	0,22	0,37	0,30	0,43	18,50
Desvio Padrão	7,05	0,35	2,88	1,53	0,07	0,10	0,06	0,07	6,51

Tabela A3.5 – Composição química dos perfis de alteração S e SA: Sobradinho.

Amostra	Composição Química - Perfil Bonsucesso									
	Bonsucesso									
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%	
0m	<i>BON-C16</i>	46,85	1,88	34,35	1,78	0,09	0,18	0,34	1,84	13,98
	<i>BON-C15</i>	48,50	1,91	34,41	1,44	0,10	0,10	0,22	0,22	13,43
	<i>BON-C14</i>	48,00	1,90	34,71	1,40	0,09	0,10	0,22	1,84	13,42
	<i>BON-C13</i>	48,07	1,86	34,53	1,54	0,08	0,12	0,21	0,22	13,32
	<i>BON-C12</i>	48,83	1,85	33,80	1,50	0,11	0,08	0,22	0,22	13,90
	<i>BON-C11</i>	49,02	1,87	34,24	1,37	0,09	0,14	0,19	0,21	13,21
	<i>BON-C10</i>	48,40	1,88	34,49	1,43	0,13	0,13	0,19	0,22	13,21
	<i>BON-C9</i>	48,00	1,87	35,38	1,42	0,11	0,14	0,19	0,28	13,25
	<i>BON-C8</i>	47,88	1,90	35,44	1,38	0,17	0,14	0,19	0,30	13,33
	<i>BON-C7</i>	47,87	1,90	35,38	1,53	0,20	0,14	0,19	0,36	13,38
11m	<i>BON-C6</i>	47,38	1,89	35,19	1,69	0,19	0,18	0,34	0,32	13,16
	<i>BON-C5</i>	48,63	1,71	33,29	1,36	0,16	0,11	0,30	0,38	13,36
	<i>BON-C4</i>	48,76	1,52	33,08	1,58	0,21	0,09	0,26	0,46	13,28
	<i>BON-C3</i>	48,12	1,60	33,23	2,53	0,65	0,33	0,32	1,08	12,35
	<i>BON-C2</i>	46,83	1,53	33,37	3,67	0,77	0,31	0,30	1,32	12,19
	Média C2-C16	48,08	1,80	34,33	1,71	0,21	0,15	0,25	0,62	13,25
	Desvio Padrão	0,66	0,14	0,82	0,62	0,21	0,07	0,06	0,59	0,46
	<i>BON-C1</i>	42,52	1,47	26,13	16,65	0,63	0,30	0,32	1,37	11,05
	<i>BON-A5</i>	50,87	0,98	23,89	12,23	1,30	0,17	0,22	2,87	8,99
	<i>BON-A6</i>	38,18	1,18	24,23	16,79	0,56	0,17	0,24	1,37	10,62
	<i>BON-A4</i>	33,28	0,68	15,53	39,86	0,58	0,17	0,22	1,42	9,90
	<i>BON-A3</i>	34,41	0,71	15,53	38,36	0,57	0,06	0,26	1,47	10,09
	<i>BON-A2</i>	43,82	0,95	22,73	18,15	1,20	0,14	0,30	2,69	9,30
22m	<i>BON-A1</i>	41,43	0,82	19,47	26,70	0,90	0,26	0,28	1,95	9,26
	Média A1-C1	40,64	0,97	21,07	24,11	0,82	0,18	0,26	1,88	9,89
	Desvio Padrão	6,03	0,28	4,29	11,13	0,32	0,08	0,04	0,65	0,76
	Média Total	45,71	1,54	30,11	8,83	0,40	0,16	0,25	1,02	12,18
	Desvio Padrão	4,82	0,44	6,75	12,23	0,38	0,07	0,05	0,85	1,70

Tabela A3.6 – Composição química do perfil de alteração BONA/BONC: Bonsucesso.

Anexo 4 – Composição Química: amostragem pontual (caminhamento de superfície)

Tabela A4.1 – Composição química caminhamento W-E: Brazlândia

Tabela A4.2 – Composição química caminhamento N-S: Santo Antônio do Descoberto

Tabela A4.3 – Composição química caminhamento W-E: Santo Antônio do Descoberto

Amostra	Composição Química: Amostragem Pontual Caminhamento W-E: Brazlândia								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
<i>BRA-CS1 (argilo-laterito total)</i>	37,90	1,68	29,81	15,89	0,40	0,50	0,28	0,42	12,66
<i>BRA-CS1A (vermelho)</i>	38,68	1,39	29,28	15,85	0,46	0,37	0,28	0,42	12,60
<i>BRA-CS1B (amarelo)</i>	30,64	1,44	25,57	27,30	0,58	0,29	0,28	0,42	12,78
<i>BRA-CS2 (laterito total)</i>	19,00	1,10	18,33	47,40	0,31	0,30	0,28	0,42	12,83
<i>BRA-CS2A (amarelo-vermelho)</i>	29,38	1,23	25,94	27,00	0,43	0,15	0,28	0,42	15,86
<i>BRA-CS2B (preto ferruginoso)</i>	13,85	0,83	14,23	57,09	0,27	0,24	0,28	0,42	12,77
<i>BRA-CS3 (laterito)</i>	33,78	1,79	30,08	17,39	0,23	0,31	0,35	0,50	14,57
<i>BRA-CS4 (argilo-laterito)</i>	34,38	1,78	30,03	17,44	0,18	0,36	0,35	0,50	14,34
<i>BRA-CS5 (argilo-laterito)</i>	34,97	1,56	30,46	16,26	0,16	0,35	0,35	0,50	14,82
<i>BRA-CS6 (argila vermelha)</i>	33,67	2,32	36,53	6,54	0,37	0,39	0,35	0,50	18,96
<i>BRA-CS7 (argila bege clara)</i>	42,32	1,99	35,49	3,12	0,00	0,20	0,37	0,51	15,43
<i>BRA-CS11 (argila mosqueada total)</i>	42,89	2,15	36,34	2,90	0,11	0,28	0,27	0,40	14,86
<i>BRA-CS8 (bege rósea)</i>	41,28	2,22	36,21	2,72	0,20	0,27	0,28	0,42	15,51
<i>BRA-CS9 (amarela)</i>	37,98	2,02	36,92	6,63	0,19	0,35	0,32	0,46	14,76
<i>BRA-CS10 (bege clara)</i>	43,03	2,27	38,07	1,29	0,40	0,20	0,24	0,37	14,12
<i>BRA-CS12 (bege clara e amarela)</i>	42,40	2,37	36,90	3,23	0,18	0,34	0,30	0,44	14,43
<i>BRA-CS13 (bege clara)</i>	42,63	2,21	37,32	1,97	0,22	0,62	0,30	0,44	14,23
<i>BRA-CS14 (amarela)</i>	37,51	1,90	34,29	8,53	0,10	0,18	0,27	0,40	15,96
<i>BRA-CS15 (vermelha)</i>	35,20	1,88	30,67	18,48	0,38	0,26	0,35	0,50	12,26
<i>BRA-CS16 (amarela e vermelha)</i>	34,50	1,57	31,80	16,44	0,08	0,35	0,42	0,57	14,09
<i>BRA-CS17 (amarela)</i>	34,87	1,42	31,23	16,66	0,09	0,28	0,30	0,44	14,32
<i>BRA-CS18 (vermelha)</i>	36,61	1,49	36,70	7,65	0,17	0,24	0,24	0,37	15,54
<i>BRA-CS19 (bege clara a branca)</i>	56,49	1,29	23,37	7,90	1,87	0,49	0,48	0,42	6,94
<i>BRA-CS20 (metalamito)</i>	70,10	1,07	15,43	4,93	1,76	0,50	0,49	0,55	4,18

Tabela A4.1 – Composição química caminhamento W-E: Brazlândia.

Amostra	Composição Química: Amostragem Pontual Caminhamento N-S: Santo Antônio do Descoberto								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
<i>SADH-1 (bege a cinza claro)</i>	56,61	1,02	22,97	7,95	1,82	0,59	0,54	0,69	7,07
<i>SADH-9 (bege claro)</i>	46,47	1,68	33,54	1,77	0,24	0,52	0,37	0,51	13,98
<i>SADH-10 (bege claro)</i>	48,32	1,56	33,00	1,59	0,27	0,44	0,35	0,50	13,96
<i>SADPSN-65 (bege-amarela)</i>	34,91	1,05	28,27	18,94	0,59	0,32	NA	NA	15,9
<i>SADPSN-67 (argilo-laterito vermelho-amarelo)</i>	45,14	2,14	38,54	1,52	0,45	0,15	NA	NA	11,48
<i>SADPSN-69 (laterito vermelho)</i>	32,61	1,22	26,97	25,99	0,15	1,06	NA	NA	11,97
<i>SADPSN-70 (amarela)</i>	41,59	1,59	34,51	8,01	0,38	0,08	NA	NA	12,99
<i>SADPSN-70aux (mosqueada bege, vermelho)</i>	44,95	1,64	35,11	4,32	0,30	LD	NA	NA	13,64
<i>SADPSN-70aux2 (mosqueada bege, vermelho)</i>	48,37	1,83	33,67	3,58	0,32	LD	NA	NA	12,17

Tabela A4.2 – Composição química caminhamento N-S: Santo Antônio do Descoberto; NA – não analisado; LD – limite de detecção do aparelho; LQ – limite de quantificação do método; LQ = 10xLD.

Amostra	Composição Química: Amostragem Pontual Caminhamento W-E: Santo Antônio do Descoberto								
	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
SADPWE-119 (bege)	50,05	1,92	30,07	7,37	0,52	LD	NA	NA	10,03
SADPWE-124 (bege escura)	45,67	3,79	11,75	14,46	4,82	8,34	NA	NA	11,10
SADPWE-126aux (amarela)	65,02	0,35	6,03	17,20	1,06	LQ	NA	NA	10,30
SADPWE-127 (amarela a marrom)	60,09	1,01	22,04	6,12	0,69	LQ	NA	NA	10,01
SADPWE-127rocha (marrom claro)	52,09	0,80	30,54	3,38	1,24	LQ	NA	NA	11,94
SADPWE-127argila (amarela clara)	52,22	1,78	32,21	2,30	0,41	LD	NA	NA	11,05

Tabela A4.3 – Composição química caminhamento W-E: Santo Antônio do Descoberto; NA – não analisado; LD – limite de detecção do aparelho; LQ – limite de quantificação do método; LQ = 10xLD.

Anexo 5 – Coloração do Cimento: amostragem contínua

Figura A5.1 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada: Brazlândia

Figura A5.2 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada: Santo Antônio do Descoberto

Figura A5.3 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada: Sobradinho

Figura A5.4 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada: Bonsucesso

Corpos-de-prova: Cimento com Argila Calcinada
 Brazlândia
 Perfil - BRAC/BRAT



BRAC1 a BRAC6



BRAC8 a BRAC15



Perfil - BRAT



Topo ←

Figura A5.1 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada. O corpo-de-prova referente a amostra BRA-C7 foi destruído.

Corpos-de-prova: Cimento com Argila Calcinada
 Santo Antônio do Descoberto
 Perfil - SAD/SADS



Perfil - SAD



Perfil - SADS



Perfil - SAD1



Topo ←

Figura A5.2 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada.



Figura A5.3 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada.

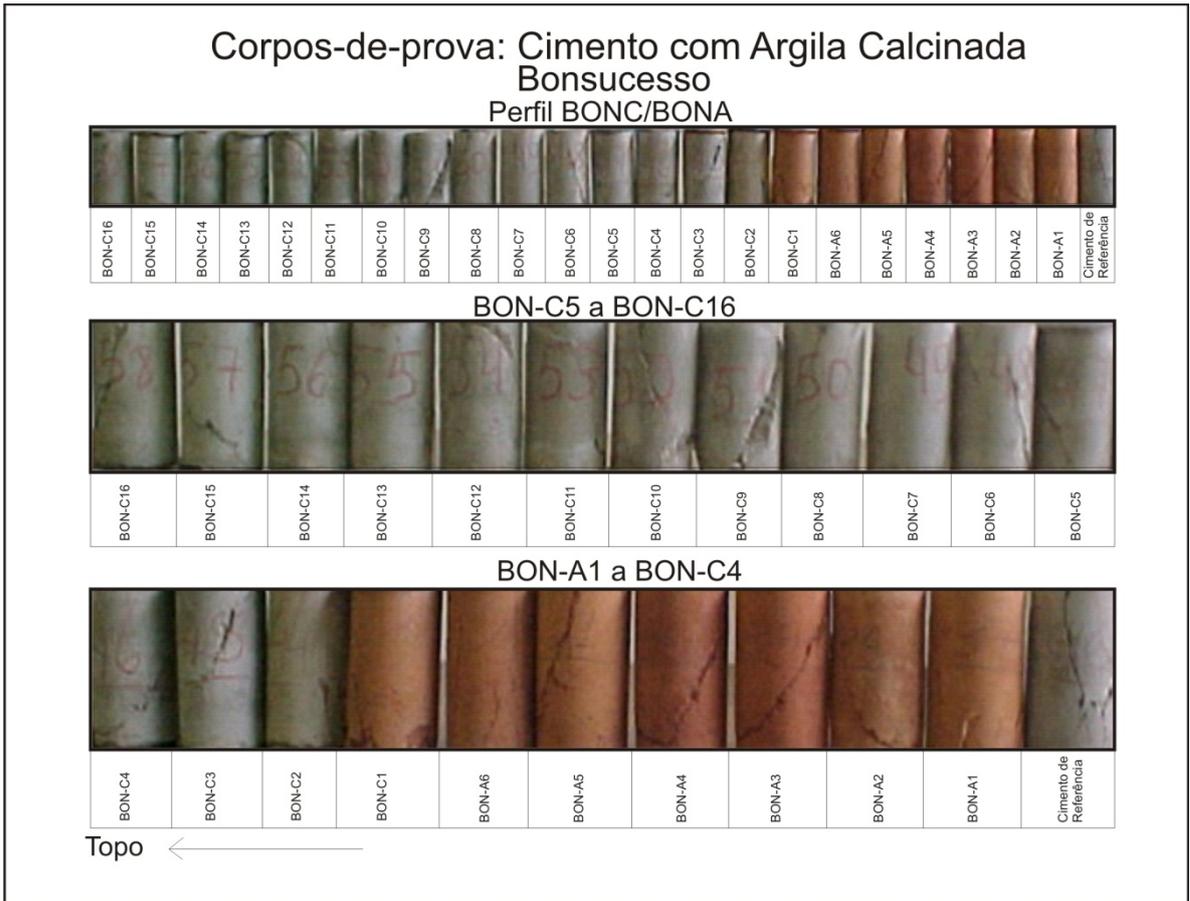


Figura A5.4 – Variação de cor entre corpos-de-prova moldados com cimento CP II-F-32 e 35% de argila calcinada.

Anexo 6 – Atividade Pozolânica: amostragem contínua

Tabela A6.1 – Atividade pozolânica no perfil BRAC/BRAT: Brazlândia

Tabela A6.2 – Atividade pozolânica no perfil SAD/SADS: Santo Antônio do Descoberto

Tabela A6.3 – Atividade pozolânica no perfil SAD1: Santo Antônio do Descoberto

Tabela A6.4 – Atividade pozolânica nos perfis S e AS: Sobradinho

Tabela A6.5 – Atividade pozolânica no perfil BONC/BONA: Bonsucesso

Atividade Pozolânica: Brazlândia – Perfil BRAC/BRAT					
Amostra	Ca(OH) ₂ + Argila		Cimento + Argila		
	<i>In natura</i>	Calcinação	Calcinação		
	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Índice de atividade pozolânica (IAP) (%)	
0m	BRA-C15	0,7	23,7	28,3	82,5
	BRA-C14	1,6	22,5	25,8	75,2
	BRA-C13	1,8	23,5	26,5	77,3
	BRA-C12	2,5	23,7	29,3	85,4
	BRA-C11	2,5	20,2	28,3	82,5
	BRA-C10	2,4	23,7	27,1	79,0
	BRA-C9	2,0	15,1	20,4	59,5
	BRA-C8	2,0	21,0	18,8	54,8
10m	BRA-C7	2,4	20,2	20,2	58,9
	BRA-C6	2,8	22,0	20,0	58,3
	BRA-C5	1,5	18,8	20,1	58,6
	BRA-C4	1,7	18,3	22,4	65,2
	BRA-C3	2,1	22,1	22,3	65,1
	BRA-C2	2,8	18,6	21,4	62,3
	BRA-C1	1,4	21,1	21,6	63,0
	BRA-T1	1,6	20,0	30,9	90,1
21,75m	BRA-T2	1,5	20,8	27,0	78,7
	BRA-T3	1,4	19,4	27,4	79,9
	BRA-T4	0,9	19,7	21,7	63,3
	BRA-T5	1,8	20,0	28,7	83,7
	Média	1,9	20,7	24,4	71,1
	Desvio Padrão	0,57	2,14	3,74	10,91

Tabela A6.1 – Atividade pozolânica no perfil BRAC/BRAT: Brazlândia. O IAP foi obtido aos 7 dias (Seção V.2.4.2). O valor de resistência mecânica à compressão do cimento de referência é de 34,3 MPa.

Atividade Pozolânica: Santo Antônio do Descoberto – Perfil SAD/SADS					
Amostra	Ca(OH) ₂ + Argila		Cimento + Argila		
	<i>In natura</i>	Calcinação	Calcinação		
	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Índice de atividade pozolânica (IAP) (%)	
0m	SAD-5	1,7	17,2	24,9	72,6
	SAD-4	0,8	15,3	26,6	77,6
	SAD-3	1,6	18,1	23,6	68,8
	SAD-2	1,9	14,0	26,0	75,8
	SAD-1	1,4	14,3	25,8	75,2
	Média SAD	1,5	15,8	25,4	74,1
	Desvio Padrão	0,41	1,80	1,17	3,40
7m	SADS-1	2,3	19,6	29,8	86,9
	SADS-2	1,4	20,0	31,6	92,1
	SADS-3	1,5	20,4	28,1	81,9
	SADS-4	1,5	20,1	29,4	85,7
	SADS-5	1,4	21,0	31,5	91,8
	SADS-6	2,2	20,3	31,1	90,7
	SADS-7	0,9	16,8	31,1	90,7
13,5m	SADS-8	2,4	19,7	32,1	93,6
	Média SADS	1,7	19,7	30,6	89,2
	Desvio Padrão	0,53	1,26	1,36	3,96
	Média SAD/SADS	1,6	18,2	28,6	83,4
	DP SAD/SADS	0,49	2,46	2,91	8,49

Tabela A6.2 – Atividade pozolânica no perfil SAD/SADS: Santo Antônio do Descoberto. O IAP foi obtido aos 7 dias (Seção V.2.4.2). O valor de resistência mecânica à compressão do cimento de referência é de 34,3 MPa.

Atividade Pozolânica: Santo Antônio do Descoberto – Perfil SAD1					
Amostra	Ca(OH) ₂ + Argila		Cimento + Argila		
	<i>In natura</i>	Calcinação	Calcinação		
	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Índice de atividade pozolânica (IAP) (%)	
0m	SAD1-1	1,5	22,1	25,5	74,3
	SAD1-2	3,1	20,5	25,8	75,2
	SAD1-3	3,5	20,1	23,7	69,1
	SAD1-4	3,4	21,4	21,4	62,4
	SAD1-5	3,6	16,6	28,0	81,6
	SAD1-6	3,6	18,3	27,0	78,7
	SAD1-7	2,9	16,6	27,7	80,8
7,6m	SAD1-8	3,5	20,1	29,2	85,1
	Média	3,1	19,5	26,0	75,8
	Desvio Padrão	0,66	1,95	2,37	6,90

Tabela A6.3 – Atividade pozolânica no perfil SAD1: Santo Antônio do Descoberto. O IAP foi obtido aos 7 dias (Seção V.2.4.2). O valor de resistência mecânica à compressão do cimento de referência é de 34,3 MPa.

Atividade Pozolânica: Sobradinho – Perfil S					
Amostra	Ca(OH) ₂ + Argila		Cimento + Argila		
	<i>In natura</i>	Calcinada	Calcinada		
	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Índice de atividade pozolânica (IAP) (%)	
0m	S-1	0,0	2,4	20,3	59,2
	S-2	0,2	8,2	28,3	82,5
2,5m	S-3	0,0	6,4	22,3	65,0
	Média	0,1	5,7	23,6	68,8
	Desvio Padrão	0,11	2,97	4,16	12,14

Atividade Pozolânica: Sobradinho – Perfil SA					
Amostra	Ca(OH) ₂ + Argila		Cimento + Argila		
	<i>In natura</i>	Calcinada	Calcinada		
	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Índice de atividade pozolânica (IAP) (%)	
0m	SA-1	0,0	19,1	33,6	98,0
	SA-2	0,2	18,1	30,1	87,8
	SA-3	0,0	16,2	28,7	83,7
	SA-4	1,1	21,3	30,2	88,0
4,3m	SA-5	0,8	20,6	30,8	89,8
	Média	0,4	19,1	30,7	89,5
	Desvio Padrão	0,49	2,03	1,80	5,26

Tabela A6.4 – Atividade pozolânica nos perfis S e SA: Sobradinho. O IAP foi obtido aos 7 dias (Seção V.2.4.2). O valor de resistência mecânica à compressão do cimento de referência é de 34,3 MPa.

Atividade Pozolânica: Bonsucesso – Perfil BONC/BONA					
Amostra	Ca(OH) ₂ + Argila		Cimento + Argila		
	<i>In natura</i>	Calcinada	Calcinada		
	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Resistência mecânica à compressão (RMC) (MPa)	Índice de atividade pozolânica (IAP) (%)	
0m	<i>BON-C16</i>	1,3	15,8	20,3	65,5
	<i>BON-C15</i>	1,8	18,9	20,5	66,1
	<i>BON-C14</i>	1,9	19,4	21,3	68,7
	<i>BON-C13</i>	1,7	16,7	21,3	68,7
	<i>BON-C12</i>	2,3	17,5	20,0	64,5
	<i>BON-C11</i>	2,0	16,2	20,9	67,4
	<i>BON-C10</i>	2,1	17,0	24,0	77,4
	<i>BON-C9</i>	1,7	17,7	24,2	78,1
	<i>BON-C8</i>	1,4	16,9	19,9	64,2
	<i>BON-C7</i>	1,6	14,5	20,2	65,2
11m	<i>BON-C6</i>	1,9	15,0	21,8	70,3
	<i>BON-C5</i>	1,8	13,9	20,1	64,8
	<i>BON-C4</i>	1,2	14,0	20,8	67,1
	<i>BON-C3</i>	0,9	14,7	22,2	71,6
	<i>BON-C2</i>	0,9	14,7	23,1	74,5
	Média C2-C16	1,6	16,0	21,4	69,0
	Desvio Padrão	0,48	1,82	1,38	4,47
	<i>BON-C1</i>	0,6	13,3	22,1	71,3
	<i>BON-A6</i>	0,6	9,8	19,1	61,6
	<i>BON-A5</i>	0,0	8,1	19,5	62,9
	<i>BON-A4</i>	0,3	5,9	21,0	67,7
	<i>BON-A3</i>	0,0	5,8	19,8	63,9
	<i>BON-A2</i>	0,0	8,4	24,5	79,0
22m	<i>BON-A1</i>	0,7	11,8	25,5	82,2
	Média A1-C1	0,3	8,3	21,6	69,7
	Desvio Padrão	0,32	2,30	2,75	8,86
	Média Total	1,2	13,9	21,5	69,4
	Desvio Padrão	0,74	4,00	1,78	5,74

Tabela A6.5 – Atividade pozolânica no perfil BONC/BONA: Bonsucesso. O IAP foi obtido aos 28 dias para Bonsucesso (Seção V.2.4.2). O valor de resistência mecânica à compressão do cimento de referência é de 31,0 MPa.

Anexo 7 – Artigo: Kaolinite polytype as a conditioner of the pozzolanic activity:
Bonsucesso mine, Central Brazil

Elsevier Editorial System(tm) for Applied Clay Science
Manuscript Draft

Manuscript Number:

Title: Kaolinite polytype as a conditioner of the pozzolanic activity: Bonsucesso mine, Central Brazil

Article Type: Research Paper

Corresponding Author: Mr. Max Lânio Lacerda, M.D.

Corresponding Author's Institution: Universidade de Brasília

First Author: Max Lânio Lacerda, POST GRADUATE

Order of Authors: Max Lânio Lacerda, POST GRADUATE; Carlos J ALVARENGA, PhD; EDI M GUIMARÃES, PhD

Abstract: Studies of mineralogical, geochemical and technological methods from the Bonsucesso mine show that the clay is the result of weathering processes in siliciclastic rocks. These clays typically occur in two separate layers: saprolite on bottom and solum on top. The loss of Mg, Ca, K, Na and Fe indicate that lixiviation is an active process. This process is responsible to change the profile color from red-yellow on saprolite to beige-white on solum. Concurrent studies of mineralogy and pozzolanic activity have shown that the pozzolanic activity is conditioned to the polytype. Under the same heating conditions, the kaolinite 1Md, in the bottom of the profile, does not transform into an amorphous phase as easily as the polytype 1A in the top of the profile. There are a strong inter-relationships between the geological, mineralogical, geochemical and calcinations methods. This inter-relationship between the different methodologies allowed the distinction between the pozzolan zone and the non-pozzolan zone.

Suggested Reviewers: DERMEVAL A DOCARMOS PhD
PROFESSOR, GEOLOGY, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
derme@unb.br

ELTON L DANTAS PhD
PROFESSOR, GEOLOGY, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
elton@unb.br

CLAUDINEI G OLIVEIRA PhD
PROFESSOR, GEOLOGY, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
gouveia@unb.br

CESAR F FERREIRA FILHO PhD
PROFESSOR, GEOLOGY, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
cesarf@unb.br

Kaolinite polytype as a conditioner of the pozzolanic activity:

Bonsucesso mine, Central Brazil

M.L. Lacerda¹, C.J.S. Alvarenga², E.M. Guimarães³

Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário, Asa Norte, CEP: 70.910-900, Brasília, DF, Brasil.

(1) E-mail: maxll@terra.com.br; (2) E-mail: alva1@unb.br; (3) E-mail: rxedi@unb.br

Abstract

Studies of mineralogical, geochemical and technological methods from the Bonsucesso mine show that the clay is the result of weathering processes in siliciclastic rocks. These clays typically occur in two separate layers: saprolite on bottom and *solum* on top. The loss of Mg, Ca, K, Na and Fe indicate that lixiviation is an active process. This process is responsible to change the profile color from red-yellow on saprolite to beige-white on *solum*. Concurrent studies of mineralogy and pozzolanic activity have shown that the pozzolanic activity is conditioned to the polytype. Under the same heating conditions, the kaolinite 1Md, in the bottom of the profile, does not transform into an amorphous phase as easily as the polytype 1A in the top of the profile. There are a strong inter-relationships between the geological, mineralogical, geochemical and calcinations methods. This inter-relationship between the different methodologies allowed the distinction between the pozzolan zone and the non-pozzolan zone.

Keywords: pozzolan, polytype, Bonsucesso, kaolinite.

1. Introduction

Kaolinite is the major mineral used for pozzolanic activity, and usually originates from weathering processes, hydrothermal alteration or as an autigenic sedimentary mineral from the alteration of silicates. (Millot, 1963; Chamley, 1989; Espejo, *et al.*, 1992). Even though volcanic (glass and ash) and acidic intrusive rocks are the main sources of clay pozzolanic activity, some severe weathering processes in meta-sediments produce clays minerals with pozzolanic activity (Lacerda, 2005). The raw materials from weathering of meta-sedimentary rocks have been used to supply pozzolanic clays for cement manufacturing.

43

44 In this paper, we report the study of clay minerals from the Bonsucesso
45 mine of, central Brazil. The kaolinite ore of Bonsucesso mine is interpreted
46 as a weathering product evolved from siltstone clay of the Paranoá Group
47 in the Neoproterozoic Brasília Fold Belt, located in the western edge of São
48 Francisco Craton (Dardenne, 1978 a, b; Strieder, 1990; Fuck, 1990; Faria,
49 1995; Faria *et al.*, 1995; Faria *et al.*, 1997; Dardenne, 2000; Pimentel *et al.*,
50 2004), (Fig. 1). The relationship between the pozzolanic activity and the
51 weathering maturation of the profile and the effect of calcinations is
52 emphasized here. The relationship between the pozzolanic activity and the
53 kaolinite polytypes has been analyzed by different methods and applied to
54 the evaluation of pozzolanic activity.

55

56 **2. Materials and experimental and analytical methods**

57

58 The Bonsucesso mine has weathering processes distinguished by two
59 separate intervals within profile: the *solum* and the saprolite (Fig. 2). The
60 first section shows no evidence of primary structure from the matrix rock
61 and is fifteen meters higher. The predominant color is beige with some red
62 pigmentation at the base of the profile, which becomes gradually clearer
63 towards the top of the profile.

64

65 The saprolite within the bottom interval was up to 7 m thick. The saprolite
66 horizon consists of clay, silt and a few fragments of claystones. The
67 weathering profile studied in the Bonsucesso mine shows yellow and red-
68 yellow materials within the firsts four meters, followed by yellow materials
69 in the upper part of the section (Fig. 2).

70

71 The samples along the Bonsucesso mine profile were obtained by two
72 different techniques. Sixteen samples were collected from outcrops in
73 channel slopes and six samples were collected using borer drilling motors
74 to a depth of six meters (Fig. 2). In both cases, the samples were collected
75 on a vertical profile with 1 m interval spacing, giving a total of 22 m of
76 sampled material. The preparation of the samples involved
77 homogenization, drying and grinding.

78

79 **2.1 Analytical and experimental methods**

80

81 In order to investigate the relationship between the pozzolanic activity,
82 weathering maturation of the profile and the kaolinite polytype, the clay
83 samples were examined by X-ray diffraction and geochemical analyses.
84 The samples underwent calcination and pozzolanic activity tests with lime
85 and cement.

86

87 The X-ray diffraction analysis was performed on a Rigaku-D/MAX – 2
88 A/C model, which was equipped with a Cu tube and Ni filter, and ran with
89 40 kv and 20 mA. The analysis was performed at the DRX laboratory of
90 the Institute of Geosciences, Brasília University. The analyses were carried
91 out for total sample and for a clay fraction smaller than 2 µm. The minerals
92 were identified using the JADE 3.0 software by MDI from the
93 mineralogical data of International Centre for Diffraction Data (ICDD).

94

95 The geochemistry analyses were done using Atomic Absorption
96 Spectrometry, (AAS) and Atomic Emission Spectrometry (ICP/AES) in the
97 geochemistry laboratory of the Institute of Geosciences, Brasília
98 University.

99

100 The calcinations was performed on 250 grams of sample, in a muffle
101 furnace at 800°C for 30 minutes in the concrete laboratories FURNAS –
102 Centrais elétricas S.A., Aparecida de Goiânia, Brazil. The calcined samples
103 were then returned for X-ray diffraction analysis.

104

105 The determination of the physical characteristics of the materials includes
106 the determination of compressive strength. The samples were shaped into
107 cylinders with a 50 mm in diameter and 100 mm height. The samples were
108 then broken in the vertical press after 7 days for lime tests and after 28 days
109 for cement experiments ((NBR 5751/92 and 5752/92). This was done in the
110 Concrete Laboratories of FURNAS – Centrais elétricas S.A., Aparecida de
111 Goiânia, Brazil.

112

113 **3. Results**

114

115 The results of the experiments demonstrate that material from the
116 Bonsucesso mine exhibits a variable pozzolanic activity, which depends on
117 the material's position within the alteration profile. It is also noted that,
118 despite having similar texture and coloration, there are compositional
119 variations within the material that may affect the pozzolanic activity of the
120 clay.

121

122 **3.1. Mineral composition**

123

124 Both calcined and non calcined clay have a similar mineralogical
125 composition. The major constituent of both clays is kaolinite, while some
126 quartz, illite, anatase, goethite and hematite are also found (Fig. 3). The
127 distribution of clay minerals along the Bonsucesso mine profile is

128 significantly different in the saprolite basal portion compared to intensely
129 weathered upper portion (Fig. 3).

130

131 In raw clays (not calcined) the basal portion of the profile (saprolite) (A1-
132 C1) has kaolinite and goethite as major minerals, while illite and quartz are
133 minor or trace constituents. The *solum* upper portion (C2-C16) essentially
134 consists of kaolinite and illite as main minerals, while quartz and anatase
135 appear as minor or trace minerals. The presence of illite gradually declines
136 towards the top of the profile, while the quartz shows no trend but is,
137 enriched on top (Fig 3).

138

139 The calcined clays present some mineralogical differences. Goethite forms
140 hematite by dehydration: $2\text{FeO}(\text{OH}) \Rightarrow \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ and the quartz is an
141 important mineral in the calcined material of the upper profile.

142

143 The kaolinite is present throughout the profile as two different polytypes
144 (Fig. 4). The 1Md polytype is well defined within the saprolite of the
145 bottom portion (A1-A5) and the 1A polytype is in the upper *solum* profile
146 (C2-C16). Between the bottom and the upper profiles (A6-C1), the
147 polytypes are not well defined (Fig. 3).

148

149 The samples containing different polytypes were heated to 490 °C and
150 analyzed by DRX, and exhibited different responses. The 1Md polytype
151 retains reflections characteristics of kaolinite, but the same thing does not
152 occur with the 1A polytype (Fig. 5). The disappearance of the reflections
153 shows that the structure of the 1A polytype is less resistant to increased
154 temperature and transforms into an amorphous phase.

155

156 3.2. Chemical composition

157

158 The chemical composition of natural raw clay is reported in Figure 6. SiO_2
159 and Al_2O_3 are the fundamental reagents of pozzolan, lime and the water
160 system. Contents greater than 70% are taken as a preliminary indicator of a
161 potential pozzolan kaolinite (Souza Santos, 1975; Chakchouk *et al.*, 2006).
162 The level of silica and alumina (75.87%) in the raw materials is quite
163 homogeneous throughout the whole profile, while the proportions between
164 SiO_2 and Al_2O_3 are different along the profile. While $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ratios for
165 the upper part of profile (*solum*) range between 1.3 and 1.5, the same ratios
166 for the lower profile (saprolite) are between 1.6 and 2.2 (Fig. 6a). The
167 titanium also showed significant changes in level along the profile,
168 showing a gradual increase from the saprolite towards the *solum* in the
169 upper portion of profile (Fig. 6b). Fe_2O_3 levels are significantly reduced
170 from the saprolite level towards the lighter colored *solum* in the upper

171 profile (Fig. 6a). The magnesium and potassium also showed a gradual
172 decrease in their levels from the saprolite to the *solum* (Fig. 6b).

174 3.3. Calcination experiments

175
176 The goal of the burning experiments was to simulate the thermal conditions
177 of an industrial cement kiln that burns pozzolan. A thermal treatment was
178 performed on each 250 g of clay at 800°C for 30 minutes. It was noticed
179 that the color changed during this treatment, which allowed the profile to
180 be split into two parts: bottom and top (Fig. 7).

182 3.4. Determination of pozzolanic activity

183
184 In this paper, all clay that has a compressive strength greater than 6 MPa, at
185 an age of 7 days for lime experiments, is considered to be pozzolan (Fig.
186 8A).

187
188 For a reference value, this paper considers good quality pozzolan clays to
189 be those that have a pozzolan activity index (PAI) greater than 75% for
190 cement experiments at an age of 28 days, and according to the equation:
191 $PAI = CERC/CECC * 100$, where CERC= compressive strength of reference
192 cement, and CECC= compressive strength of cement and clay (Lacerda,
193 2005) (Fig. 8B).

194
195 In the lime experiments, the crude clay from the Bonsuccesso mine all have
196 compressive strength under 6 MPa, and are therefore classified as non-
197 pozzolan clay (Fig. 8AII). The results of the experiments with cement
198 confirm previous results with lime (Fig.8BIV).

199
200 Secondly, the results of the compressive strength tests with calcined clay
201 and lime higher than the minimum limit of 6 MPa, excepting the interval
202 between 18 and 20 m depth (A3-A4) (Fig. 8AI). The same behavior was
203 observed in the cement experiments with calcined clay (Fig. 8BIII).
204 Therefore, the Bonsuccesso clay was labeled as a good pozzolan.

206 3.5. Relationship between pozzolanic activity and polytype

207
208 The slight increase in the compression strength of raw clay plus lime (Fig.
209 8AII) from the base to the top of the profile can be linked to the polytype
210 changes identified by X-ray diffraction. There should be a greater increase
211 in the compressive strength values of the 1A polytype compared to the
212 1Md polytype. This interpretation is strengthened by the experiments done
213 with calcined clay and lime (Fig 8AI). Accompanying this observation is

214 the trend of increasing the proportions of kaolinite toward the top of the
215 profile.

216

217 The analysis of the pozzolanic activity index values of raw and calcined
218 clay plus cement does not show the same tendency as previous discussions
219 (Fig 8B). This discrepancy has been attributed to the compatibility of
220 cement with pozzolan. Other chemical compounds exist in the cement than
221 do not exist in the lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). In this way, many combinations can
222 take place during the reactions of cement and pozzolan. Depending on the
223 cement, the results should be quite different for the same pozzolan. In
224 others words, the potential of reactivity of a pozzolan depends on the
225 cement characteristics (Zampieri, 1989).

226

227 3.6. Inter-relationship between applied methods

228

229 Figure 9 compares the study methods: geological, mineralogical,
230 geochemical, calcining (color) and pozzolanic activity. Except for
231 pozzolanic activity, there is very good agreement between these methods
232 that shows a well-defined division of the profile: bottom and top. All
233 methods agree on the highest level of Fe_2O_3 (A3-A4), including the strong
234 tone of red of the calcined clay.

235

236 The method used to define pozzolanic activity was the PAI, because it
237 gives direct and reliable results. But, other methods should be considered
238 for each phase of a project. In the initial steps of the preliminary
239 prospecting phase, the mineralogical method is preferred, while during the
240 mining control, the geochemical analysis should be used as an initial
241 control.

242

243 4. Conclusions

244

245 The clay material in the Bonsucesso mine is the result of weathering
246 processes on siliciclastic rocks of the Paranoá Group, which generates a
247 mantle of saprolite and *solum* above the bedrock. It results from the
248 continuum lixiviation process toward the top, which generates kaolinite
249 from illite particles. In the bottom portion, kaolinite (1Md polytype) that
250 coexisting with detritic illite is the principal mineral phase while in the
251 upper part the principal mineral phase is purely kaolinite (1A polytype).

252

253 The profile is well segregated according to chemical. Weathering processes
254 involve the loss of Mg, Ca, K, Na and Fe toward profile the top of the
255 profile. The loss of Fe and the kaolinite concentration is responsible to

256 change the profile color from red-yellow on saprolite to beige-white on
257 *solum*.

258

259 The kaolinite polytypes in the studied profile show different responses
260 under heating to 490 °C. Under the same heating conditions, the 1Md
261 polytype from bottom part of the profile is stronger than the 1A polytype in
262 the upper part. This affected the compressive strength of the cement. The
263 1A polytype will increase the pozzolanic activity more than the 1Md
264 polytype.

265

266 Burning the clays at 800°C for 30 minutes destroyed the mineralogical
267 structure of kaolinite, transforming it into an amorphous phase, and the
268 goethite (FeO(OH)) was transformed into hematite (Fe₂O₃), changing the
269 color from yellow to red.

270

271 The geological, mineralogical and geochemical methods and the
272 calcinations experiments showed a strong relationship between them. This
273 inter-relationship between the different methodologies allowed the
274 distinction between the pozzolan zone (ore) and the non-pozzolan zone
275 (reject).

276

277 In the Bonsucesso mine, the ore along the upper 15 m of the profile, with
278 lime, had a compressive strength of 16 MPa and a pozzolanic activity index
279 of 69%. The bottom part, below the ore, was classified as a reject because
280 of the red color of the burnt clay.

281

282 The evaluation of the pozzolan activity should be conclusive following the
283 measurement of the mechanical compressive strength. Due to its
284 acceptance in the market, its color control should be considered.

285

286 During the prospect phase, the mineralogical and geochemical methods
287 could be used as preliminary controls. For mining control, however, the
288 geochemical method is adequate as a first control.

289

290 **Acknowledgements**

291

292 The authors are grateful to CNPq and Laboratório de Concreto de
293 FURNAS – Centrais elétricas S.A. for important support.

294

295 **References**

296

- 297 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5751/92:
298 Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com
299 cal – Índice de atividade pozolânica com cal, 3p.
- 300 Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) 1992. NBR 5752/92:
301 Materiais pozolânicos – Determinação da atividade pozolânica com
302 cimento Portland – Índice de atividade pozolânica com o cimento, 3p.
- 303 Chakchouk, A. Samet, B. & Mnif, T. 2006. Study on the potential use of
304 Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Sci.* 33: 79-88.
- 305 Chamley, H. 1989. *Clay Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin, 623pp.
- 306 Dardenne, M. A. 1978a. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do
307 São Francisco. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife,*
308 *SBG, 1: 299-308*
- 309 Dardenne, M. A. 1978b. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no
310 Brasil Central. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife,*
311 *SBG, 2: 597-610*
- 312 Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, V. G.; Milani,
313 C. J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (Eds). *Tectonic Evolution of*
314 *South América. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro,*
315 *pp. 231-263.*
- 316 Espejo, M. A.; Vicente, E.; Molina, E. & Barragan, E. 1992. Kaolinite
317 Formation from Feldspars: Study of a Weathering Profile in Gneiss
318 from the Iberian Hercynian Massif. In: *Mineralogica et Petrographica*
319 *Acta. Mediterranean Clay Meeting, Vol. XXXV-A. p.209-216.*
- 320 Faria, A., 1995. Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Paranoá
321 nas Áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D’Aliança – Alto
322 Paraíso de Goiás. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências,
323 Univ. de Brasília. 199p.
- 324 Faria, A. & Dardenne, M. A.;1995. Estratigrafia do Grupo Paranoá na
325 região de Alto Paraíso - São João D’Aliança – GO. *Anais V Simpósio*
326 *de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia – GO. SBG/NCO, p. 75-77.*
- 327 Faria, A. & Guimarães, E M. & Figueiredo, A. N., 1997. Mapa Geológico
328 do Distrito Federal. Escala 1:100.000. Programa Cartas de Síntese e
329 Estudos de Integração Geológica. DNPM-UnB.
- 330 Fuck, R. A. 1990. Dobramentos neoproterozóicos da margem ocidental do
331 Cráton do São Francisco. *Congresso Brasileiro de Geologia 33, SBG,*
332 *Bol. Resumo, P. 288-289.*
- 333 Fuck, R. A., Jardim de Sá, Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., Pedrosa
334 Soares, A. C., 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do
335 São Francisco: síntese de conhecimentos. In: *O Cráton do São*
336 *Francisco. J. M. L. Dominguez & A. Misi (editores). SBG, SBG/BA,*
337 *CNPq. p. 161-185.*
- 338 Fuck, R. A., Pimentel, M. M. & Del-Rey, J. L. H., 1994.
339 *Compartimentação Tectônica da Porção Oriental da Província*

- 340 Tocantins. Cong. Bras. Geol. 38 – Camboriú. Bol. De Resumos
341 Expandidos. Vol. I p. 215-216.
- 342 Lacerda, M. L. 2005. Estudo da Argila Pozolânica Utilizada na Produção
343 de Cimento: Área Bonsucesso – Região Planaltina-DF. Dissertação de
344 Mestrado. Instituto de Geociências, Univ. de Brasília. 167p
- 345 Millot, G. 1963. Géologie des Argiles: Altération, Sédimentologie,
346 Géochimie. Ed. Masson et Cie, Paris, 499 pp.
- 347 Pimentel, M. M., Jost, H. & Fuck, R. A. 2004. O Embasamento da Faixa
348 Brasília e o Arco Magmático de Goiás. In Mantesso-Neto, V. et al.
349 (ed) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de
350 Fernand Flávio Marques de Almeida. p. 355-368.
- 351 Sabir, B. B., Wild, S., Bai, J. 2001. Metakaolin and calcined clays as
352 pozzolans for concrete: a review. Cement & Concrete Composites
353 23:441- 54.
- 354 Souza Santos, P. 1975. Tecnologia de argilas. São Paulo, Edgard Blucher.
355 2v.
- 356 Strieder, A. J. 1990. Análise estrutural da região de Abadiânia (GO), Rev.
357 Bras. Geoc., 20:239-57.
- 358 Valeriano, M. C., Dardenne, M. A., Fonseca, M. A., Simões, L. S. A. &
359 Seer, H. J. 2004. A Evolução Tectônica da Faixa Brasília. In
360 Mantesso-Neto, V., et al. (ed) Geologia do Continente Sul-Americano:
361 Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. p. 576-
362 592.
- 363 Zampieri, V. A. 1989. Mineralogia e mecanismos de ativação e reação das
364 pozolanas de argilas calcinadas. Dissertação de Mestrado, Instituto de
365 Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 191 p.

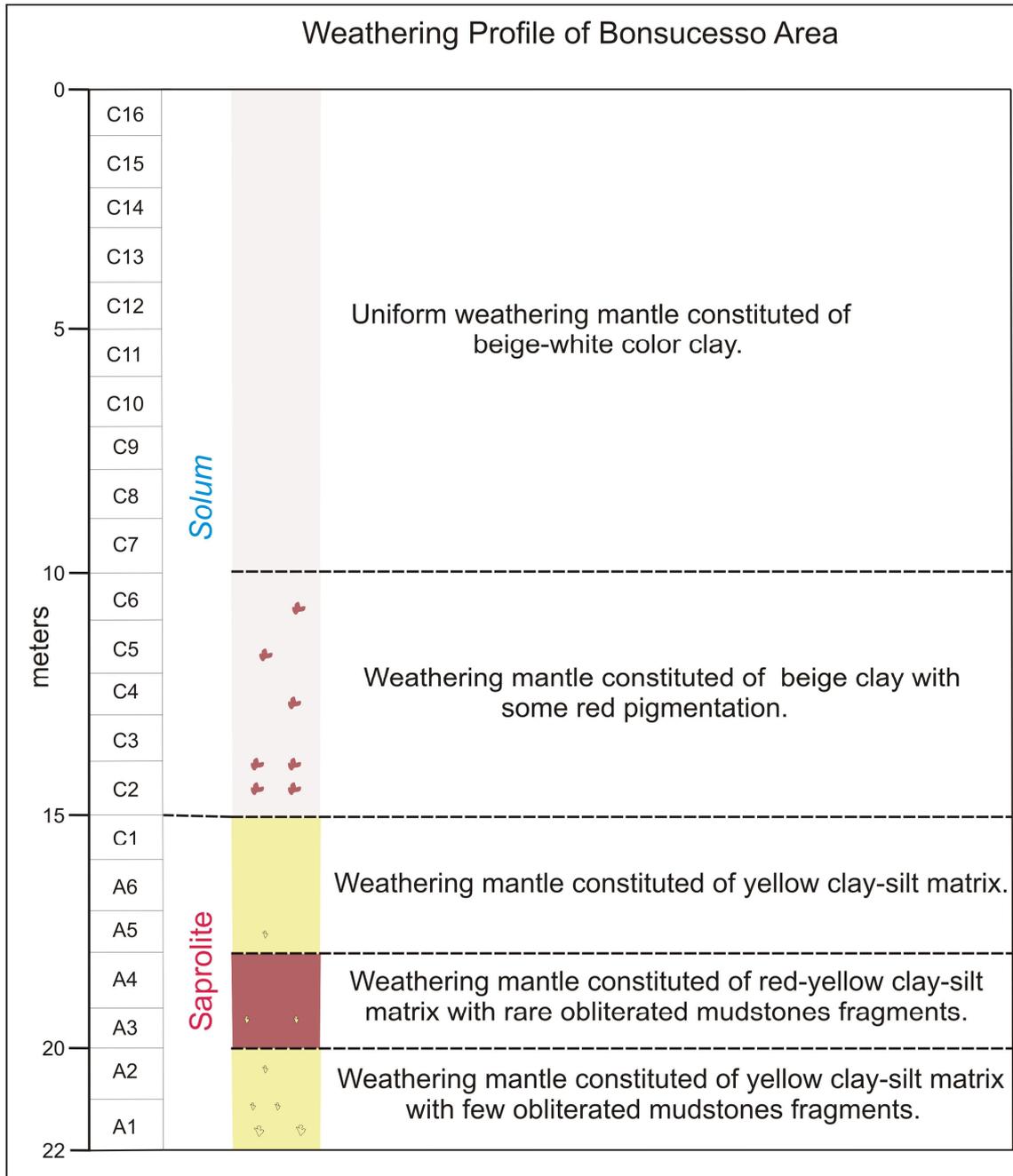


Fig. 2 – Weathering Bonsuccesso profile. A1-A6: samples using borer drilling motors; C1-C16 samples from outcrop channel slopes.

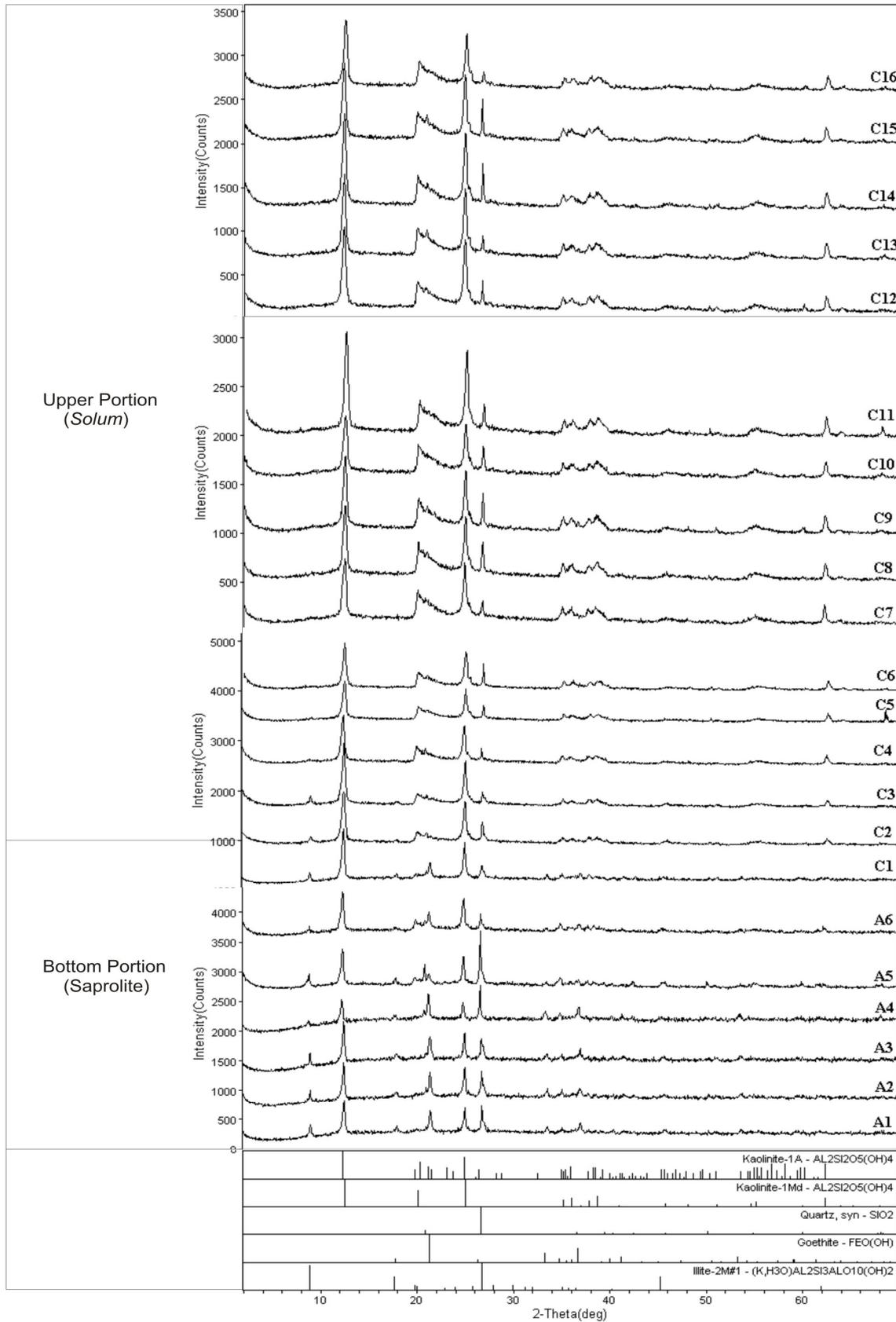
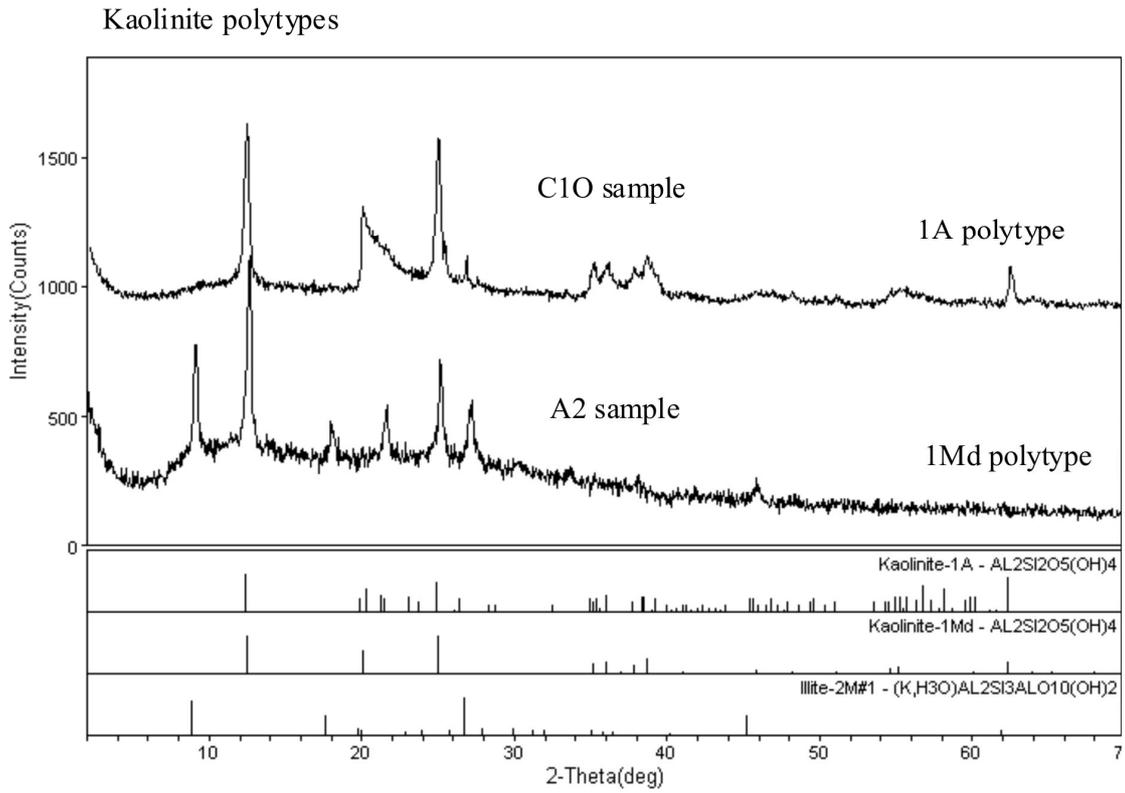


Fig. 3 – XRD patterns of Bonsuccesso mine. 1Md polytype (A1-A5). 1A (C2-C16). The polytype are not well defined (A6-C1).



Laboratorio de DRX - IGM InR

ed44mzalesomb-11aguer-15-Waterbury, Nov 21, 2005

Fig. 4 – XRD patterns of kaolinite polytypes of Bonsuccesso mine.

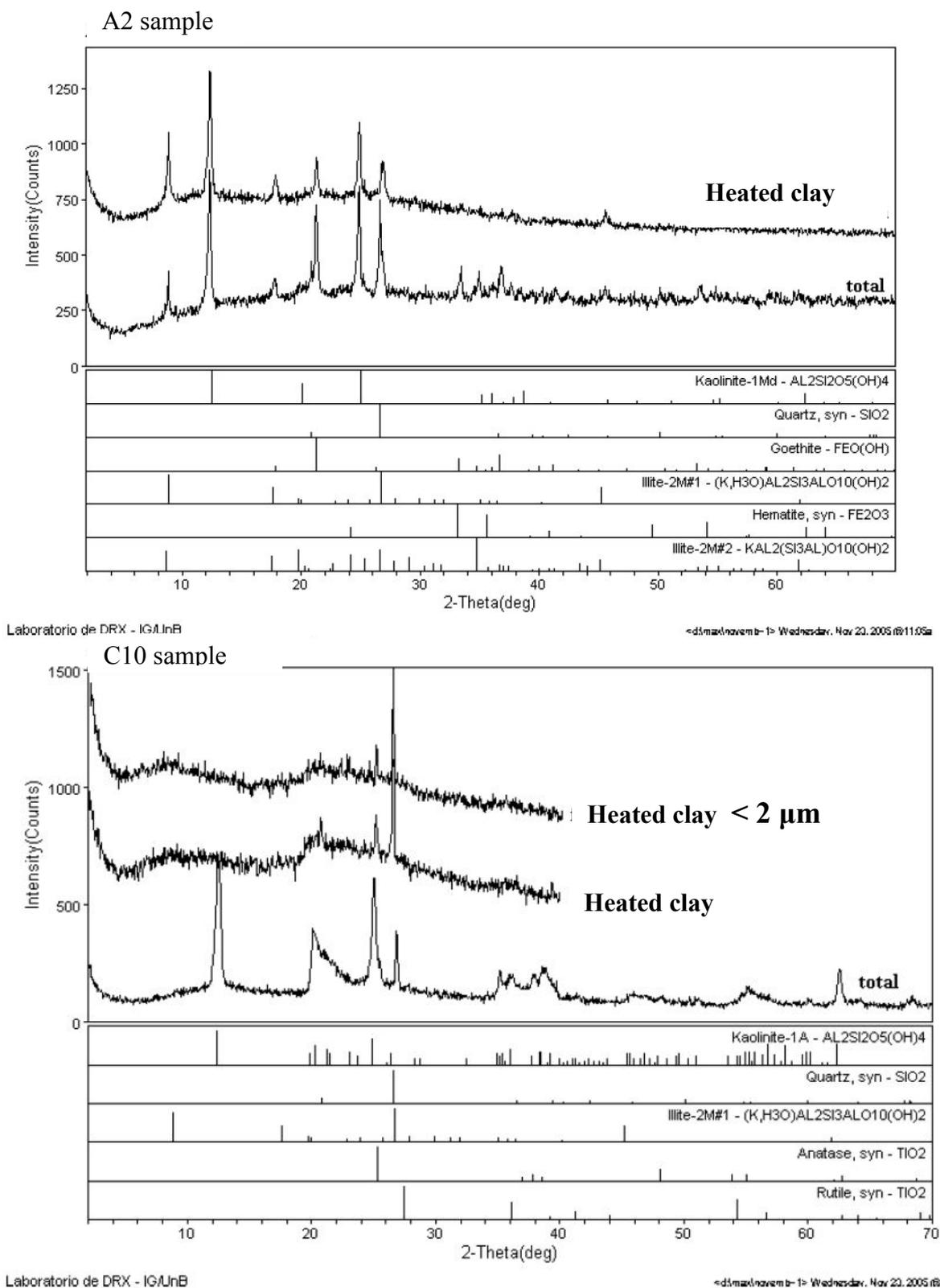


Fig. 5 – XRD patterns: kaolinite response to heating of 490 °C. The 1Md polytype (A2) retains reflections characteristics of kaolinite.

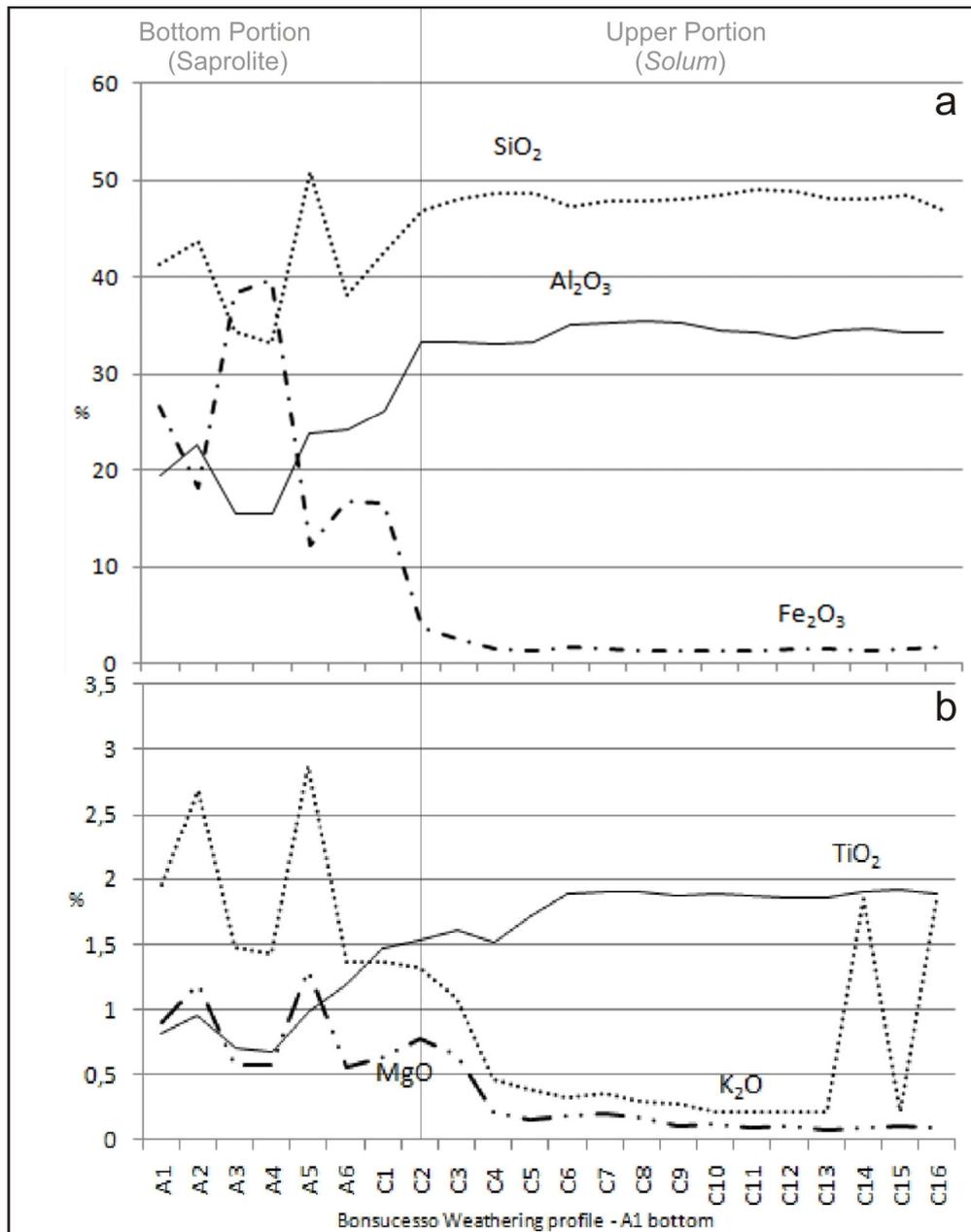


Fig. 6 – Chemical composition. The configuration of the curves allowed the profile to be split into two parts: saprolite and *solum*.

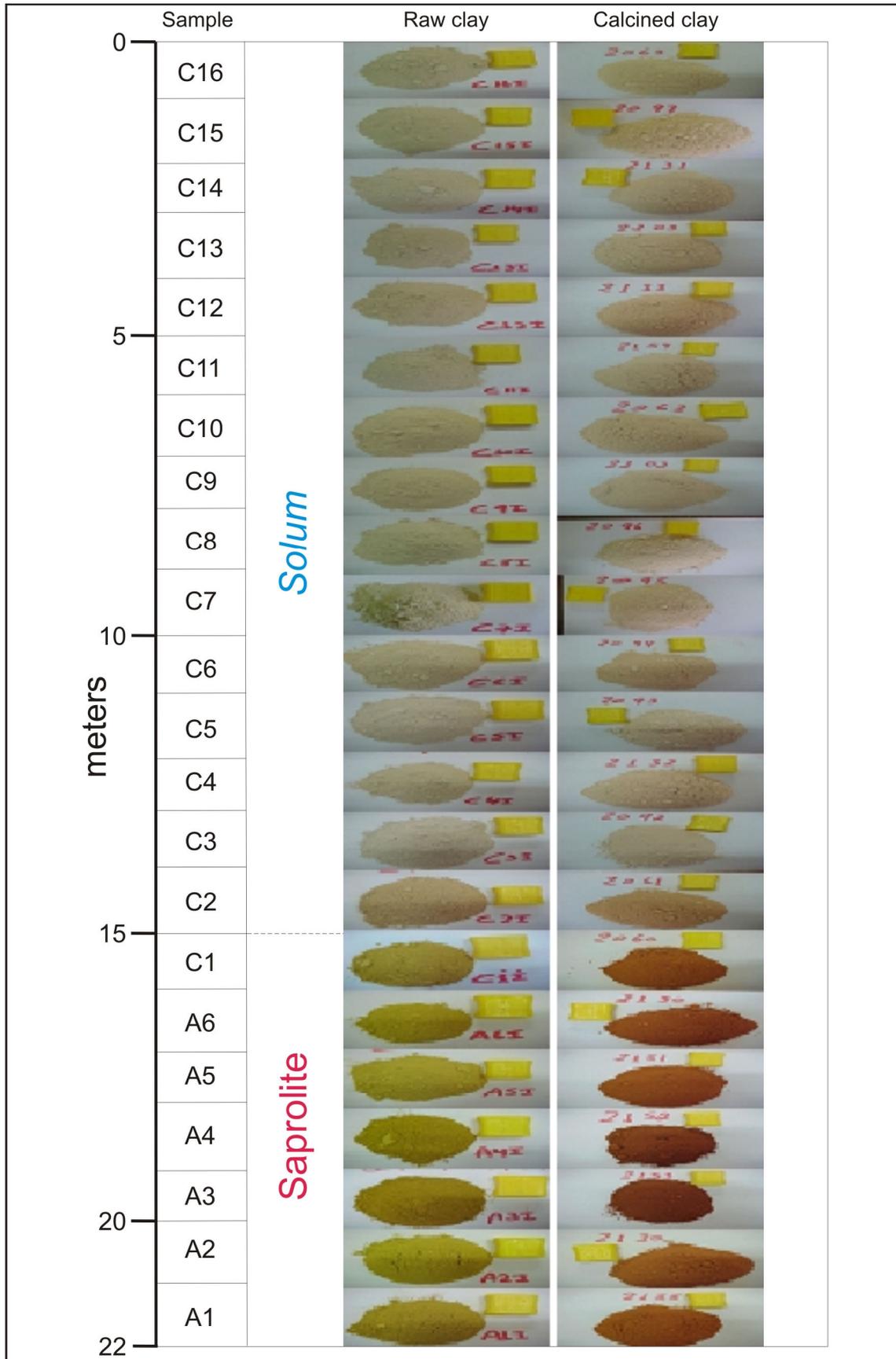


Fig. 7 – Color comparison between raw and calcined (800 °C for 30 minutes) clay.

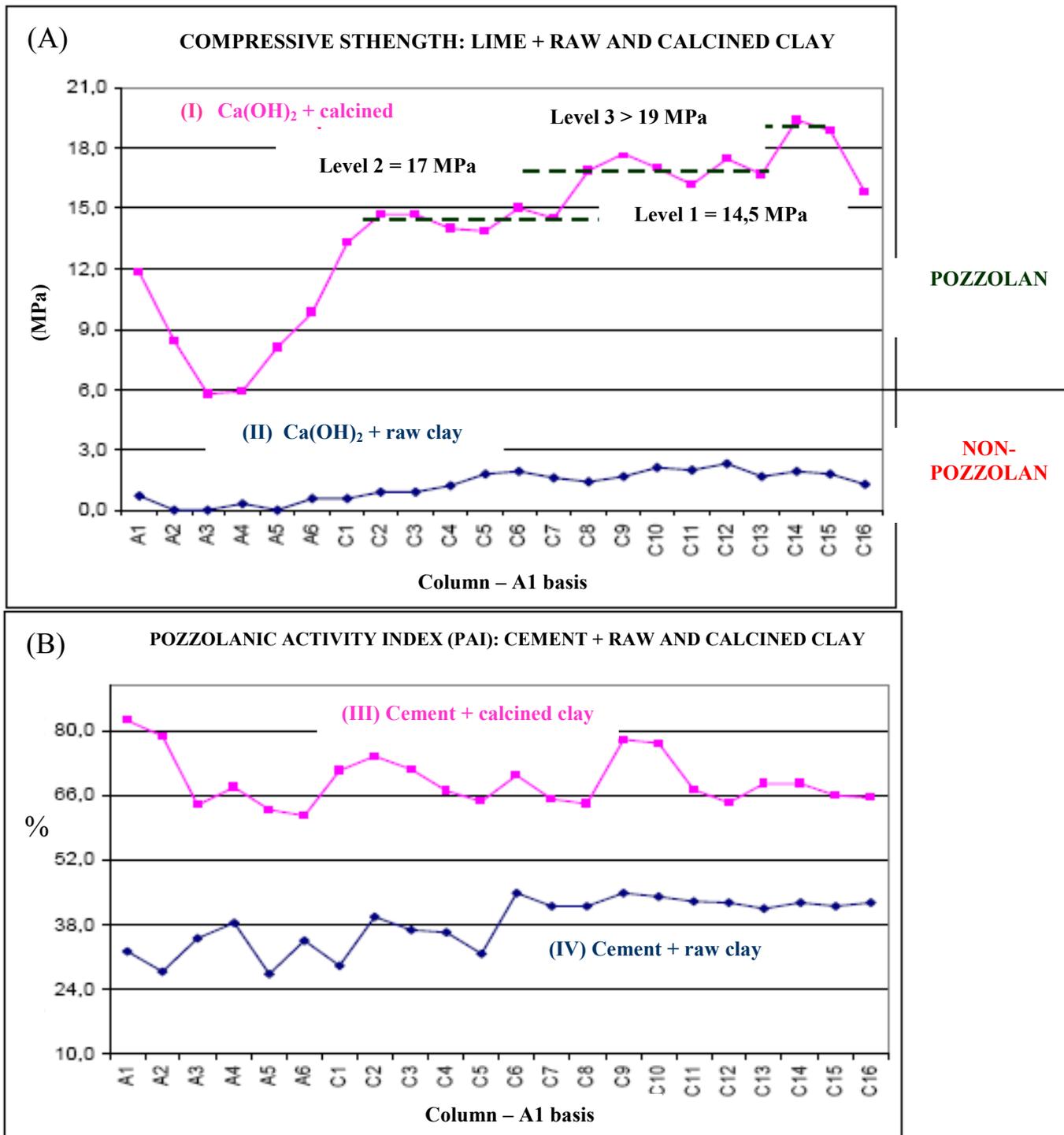


Fig. 8 – Pozzolanic activity. (A) Lime plus: calcined clay (I) and raw clay (II). (B) Cement plus: calcined clay (III) and raw clay (IV).

INVESTIGATION METHODS OF THE BONSUCESSO MINE								
Sample	RAW CLAY			CALCINED CLAY				
	Geological	Mineralogical	Chemical (%)	Clay color	Paste color	Pozzolanic activity	FINAL RESULT	
0	Solum	1A Kaolinite, Quartz, Anatase, Illite, Goethite	(Average) SiO₂ = 48,16 Al₂O₃ = 34,32	Beige clay	Gray cement paste	Pozzolan Clay (PC)	POZZOLAN	
C16								
C15								
C14								
C13								
5								C12
C11								
C10								
C9								
C8								
10								C7
C6								
C5								
C4								
C3								
15								Saprolite
C2								
C1								
A6								
A5								
A4								
20	A3							
A2								
22	A1							

Fig. 9 - Inter-relationship between the studied methods. Tr – transition; NP – non-pozzolan clay.

Anexo 8 – Artigo: Kaolinitic pozzolan originated from weathering of muscovite-quartz-schist: Santo Antônio do Descoberto mine, Central Brazil

1 **Kaolinitic pozzolan originated from weathering of muscovite-**
2 **quartz-schist: Santo Antônio do Descoberto mine, Central**
3 **Brazil**

4 M.L. Lacerda¹, C.J.S. Alvarenga², E.M. Guimarães³

5 Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Campus Universitário, Asa Norte, CEP: 70.910-900, Brasília, DF, Brasil.

6
7 (1) E-mail: maxll@terra.com.br; (2) E-mail: alva1@unb.br; (3) E-mail: rxedi@unb.br
8
9

10
11
12 **Abstract**

13
14 Studies of mineralogical, geochemical and technological methods from the
15 Santo Antônio do Descoberto mine show that the pozzolanic clay is the
16 result of weathering process of muscovite-quartz-schist. The weathering
17 mantle is typically formed by saprolite on bottom covering the parental
18 rock and the *solum* on top. The loss of Na, K, Ca, Mg and Fe indicate that
19 the lixiviation is an active process responsible to form kaolinite 1Md
20 polytype from muscovite in the saprolite and kaolinite 1A polytype from
21 muscovite in the *solum*. The kaolinite is responsible for the pozzolanic
22 activity and is concentrated in the *solum*. The pozzolanic clay from Santo
23 Antônio do Descoberto shows good efficacy in compatibility clay/cement.
24

25
26 **1. Introduction**

27
28 Kaolinite is the major mineral used for pozzolanic activity, and usually
29 originates from weathering processes, hydrothermal alteration or as an
30 autigenic sedimentary mineral (Millot, 1963; Chamley, 1989; Espejo, *et al.*,
31 1992). The weathering of micas has been object of study from many
32 authors (Meunier and Velde, 1979; Suddhiprakarn and Gilkes, 1979, Ahn
33 and Peacor, 1987, Banfield and Eggleton, 1988). Many studies showed that
34 the weathering process in muscovite produces kaolinite. Stock e Sikora
35 (1976) observed the formation of kaolinite from muscovite of granites and
36 gneisses from Poland. Singh and Gilkes (1991) investigated the weathering
37 of muscovite containing chromium and observed their transformation to
38 kaolinite and halloysite. Raj (1993) observed that the weathering of
39 muscovite and sericite-quartz-muscovite schist of Malaysia produces illite,
40 followed by interstratified illite-montmorillonite and kaolinite by
41 weathering of illite. Costa Junior (1997) studied carbonaceous phyllites

42 from Paracatu, central Brazil and observed immature weathering profile
43 where illite is formed from muscovite with incipient generation of
44 kaolinite.

45

46 Although it is well known the formation of kaolinite from various
47 processes of weathering, we were not found in the literature reports of
48 pozzolanic clays deposits generated by direct weathering of muscovite.
49 This way, in this paper, we report the study of weathering process from
50 Santo Antônio do Descoberto kaolinitic pozzolan mine of central Brazil,
51 interpreted as a weathering product evolved from muscovite-quartz-schist.
52 The pozzolanic activity of clays is emphasized here, as well.

53

54 The Santo Antônio do Descoberto mine belongs to the Canastra Group
55 located in the Neoproterozoic Brasília Folded Belt, located in the western
56 edge of the São Francisco Craton (Dardenne, 1978 a, b; Strieder, 1990;
57 Fuck, 1990; Faria, 1995; Faria *et al.*, 1995; Faria *et al.*, 1997; Dardenne,
58 2000; Pimentel *et al.*, 2004) (Fig. 1).

59

60 **2. Materials and experimental and analytical methods**

61

62 The Santo Antônio do Descoberto mine is distinguished by three separate
63 intervals within weathering mantle: parent rock, saprolite and *solum*. These
64 3 portions were identified in the exposed surface (Fig. 2, 3). The *solum*
65 portion was studied in vertical profile of 6 m (Fig. 2, 4). The exposed
66 surface is represented by 2 samples and the vertical profile consists of 5
67 samples. The predominant color of the clays is beige.

68

69 The samples were obtained by two different techniques. The surface
70 samples were collected directly from the soil. The vertical profile samples
71 were collected from outcrops in channel slopes with 1 to 1.6 m interval
72 spacing between samples (Fig. 4). The preparation of the samples involved
73 homogenization, drying and grinding.

74

75 **2.1 Analytical and experimental methods**

76

77 In order to investigate the genesis of kaolinite from muscovite and
78 pozzolanic activity of pozzolan, the clay samples were examined by X-ray
79 diffraction and geochemical analyses in the laboratories of the Institute of
80 Geosciences, University of Brasilia. The samples from the profile, *solum*,
81 underwent calcination and pozzolanic activity with lime ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) and
82 cement in the laboratories of the Tocantins Cement Company, Brasília,
83 Brazil.

84

85 The X-ray diffraction analysis was performed on a Rigaku-D/MAX-2 A/C
86 model, which was equipped with a Cu tube and Ni filter, and ran with 40
87 kv and 20 Ma. The analyses were carried out for total sample. The minerals
88 were indentified using the JADE 3.0 software by MDI form the
89 mineralogical data of International Centre for Diffraction Data (ICDD).

90

91 The geochemistry analyses were done using Atomic Absorption
92 Spectrometry (AAS) and Atomic Emission Spectrometry (ICP/AES).

93

94 The calcination was performed on 250 grams of sample, in a muffle
95 furnace at 800°C for 30 minutes. The calcined samples were returned for
96 X-ray diffraction and for pozzolanic activity tests.

97

98 The determination of the physical characteristics of the materials includes
99 the determination of compressive strength. The samples were shaped into
100 cylinders with a 50 mm in diameter and 100 mm height. The samples were
101 then broken in the vertical press after 7 days for both: lime and cement
102 (NBR 5751/92 and NBR 5752/92).

103

104 **3. Results**

105

106 The results of the experiments demonstrate that the clay of the *solum* from
107 Santo Antônio do Descoberto mine has pozzolanic activity, labeled as a
108 good pozzolan.

109

110 **3.1. Mineral composition**

111

112 The *solum* vertical profile essentially consists of kaolinite polytype 1A as
113 main mineral. Muscovite appears as second mineral, while quartz, rutile
114 and hematite appear as minor or trace minerals. The presence of muscovite
115 gradually declines towards the top of the profile, while the quartz shows no
116 trend (Fig. 5).

117

118 The SADH-1 surface samples of saprolite consists of muscovite as major
119 constituent, while kaolinite polytype 1Md and quartz appear as minor
120 constituents and hematite as trace constituent (Fig. 6). The SADH-10
121 sample of *solum* essentially consists of kaolinite 1A as main mineral, while
122 quartz appears as trace constituent (Fig. 6).

123

124 **3.2. Chemical composition**

125

126 The chemical composition of *solum* vertical profile is reported in Figure 7.
127 SiO₂ and Al₂O₃ are the fundamental reagents of pozzolan, lime and the

128 water system. Contents greater than 70% ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$) are taken as
129 preliminary indicator of a potential pozzolan kaolinite (Souza Santos, 1975;
130 Chakchouk *et al.*, 2006). The level of silica and aluminum (79.48%) is
131 quite homogeneous throughout Santo Antônio do Descoberto profile. The
132 magnesium (0.33%) and potassium (0.44%) also showed homogeneous
133 distribution throughout mine. The titanium (1.68%) are reduced from the
134 bottom portion towards the upper profile, while Fe_2O_3 (1.31%) level is
135 variable throughout Santo Antônio do Descoberto profile (Fig. 7).

136

137 The chemical composition of the surface samples is quite different. The
138 saprolite sample (SADH-1) has SiO_2 , Fe_2O_3 , MgO , CaO , Na_2O and K_2O
139 levels higher than the solum sample (SADH-10). Moreover, the Al_2O_3 and
140 TiO_2 levels of SADH-10 *solum* sample are higher than the saprolite sample
141 (Fig. 8).

142

143 3.3. Calcination experiments

144

145 The goal of the burning experiments was to simulate the thermal conditions
146 of an industrial cement kiln that burns pozzolan. A thermal treatment was
147 performed on each 250 grams of clay at 800°C for 30 minutes (vertical
148 profile samples). There was no significant change color of non calcined
149 clay compared to calcined clay (Fig. 9).

150

151 3.4. Determination of pozzolanic activity

152

153 In this paper, all Clay that has a compressive strength greater than 6 MPa,
154 at an age of 7 days for lime experiments, is considered to be pozzolan

155

156 For a reference value, this paper considers good quality pozzolan clays to
157 be those that have a pozzolan activity index (PAI) around 75% for cement
158 experiments at an age of 7 days, and according to the equation:
159 $\text{PAI} = \text{CERC} / \text{CECC} * 100$, where CERC= compressive strength of reference
160 cement, and CECC= compressive strength of cement and clay (Lacerda,
161 2005).

162

163 In the lime experiments, the crude clay from the Santo Antônio do
164 Descoberto mine have compressive strength of 1.5 MPa, and are therefore
165 classified as non-pozzolan clay (Fig. 8A).

166

167 The calcined clay showed results of the compressive strength tests with
168 calcined clay and lime higher than the minimum limit (15.8 MPa). The
169 same behavior was observed in the cement experiments with calcined clay

170 (74.1%) (Fig. 8B, 8C). Therefore, the Santo Antônio do Descoberto clay
171 was labeled as a good pozzolan.

172

173 There is growth of pozzolanic activity from bottom portion to upper portion
174 of the Santo Antônio do Descoberto profile (Fig. 8C).

175

176 **4. Conclusions**

177

178 The clay in the Santo Antônio do Descoberto Mine is the result of
179 weathering process on muscovite-quartz-schist of the Canastra Group,
180 which generates a mantle of saprolite and *solum* above the bedrock. It
181 results from the continuum lixiviation process, which generates kaolinite
182 (1Md polytype) from muscovite in the saprolite and kaolinite (1A
183 polytype) from muscovite in the *solum*.

184

185 Weathering process involves the loss of Na, K, Ca, Mg and Fe and Al and
186 Ti concentration in top of the profile.

187

188 The kaolinite (1A polytype) concentration in the *solum*, probably cause the
189 pozzolanic activity growth of Santo Antônio do Descoberto mine.

190

191 Burning the clays at 800°C for 30 minutes causes no significant change
192 color of non calcined clay, which can be attributed to the lack of goethite
193 mineral and the low iron content.

194

195 There is good effectiveness in clay/cement compatibility in Santo Antônio
196 do Descoberto mine, indicating that the reaction between the clinker
197 compounds and calcium hydroxide were effective.

198

199 In the Santo Antônio do Descoberto mine, the *solum* clay had a
200 compressive strength of 15.8 MPa and a pozzolanic activity index of 74.1%
201 and is therefore classified as a good pozzolan.

202

203 **Acknowledgements**

204 The authors are grateful to CNPq and Cimento Tocantins S.A. for
205 important support.

206

207 **References**

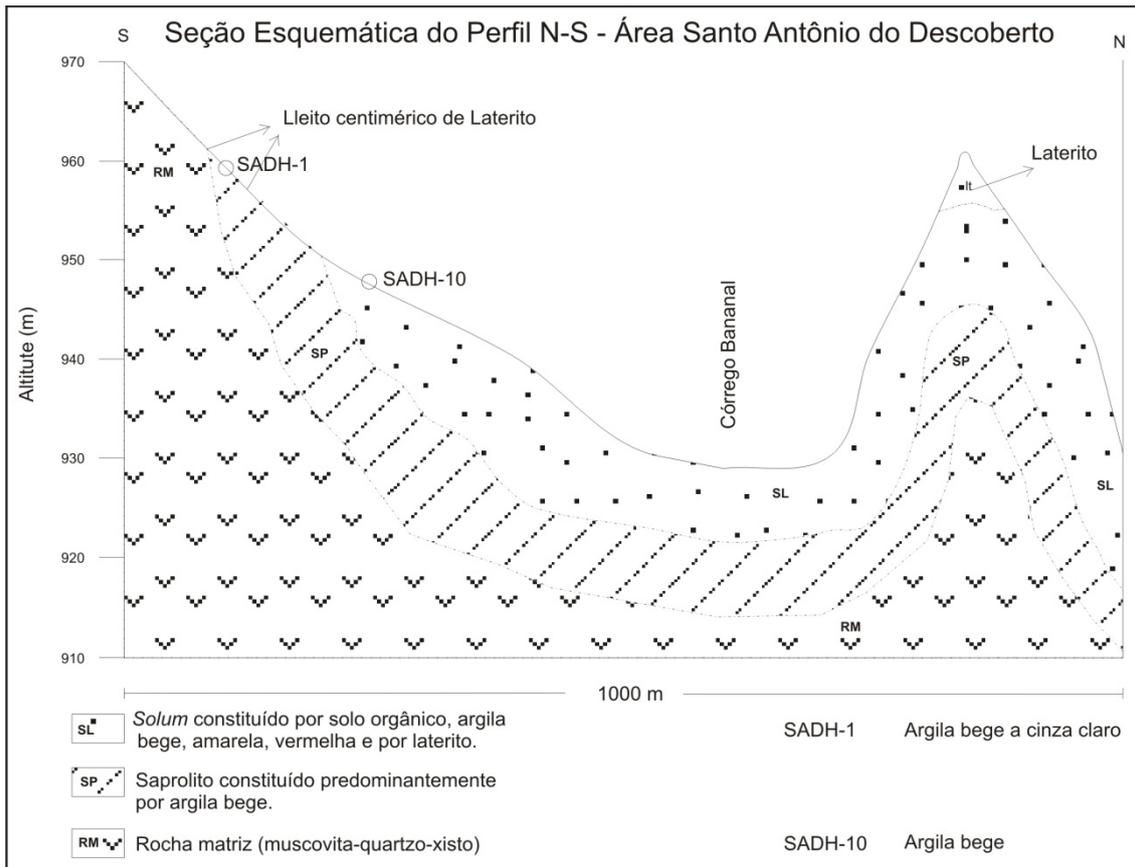
208

209 Ahn, J. H. and Peacor, D.R. 1987. Kaolinization of biotite: TEM data and
210 implications for an alteration mechanism: Amer. Mineral 72, 353-
211 356.

212 Banfield, J. F. and Eggleton, R. A. 1988. Transmission electron microscope

- 213 study of biotite weathering: *Clays & Clay Minerals* 36, 47-60.
- 214 Chakchouk, A. Samet, B. & Mnif, T. 2006. Study on the potential use of
215 Tunisian clays as pozzolanic material. *Applied Clay Sci.* 33: 79-88.
- 216 Chamley, H. 1989. *Clay Sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin, 623pp.
- 217 Costa Júnior, C. N. 1997. Caracterização mineralógica dos diferentes tipos
218 de minérios e concentrado de flotação da mina morro do ouro,
219 Paracatú-MG. Dissertação de mestrado. Instituto de Geociências,
220 Univ. de Brasília. ???p.
- 221 Dardenne, M. A. 1978a. Zonação tectônica na borda ocidental do Cráton do
222 São Francisco. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife,*
223 *SBG, 1: 299-308*
- 224 Dardenne, M. A. 1978b. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no
225 Brasil Central. *Anais 30º Congresso Brasileiro de Geologia, Recife,*
226 *SBG, 2: 597-610*
- 227 Dardenne, M. A. 2000. The Brasília Fold Belt. In: Cordani, V. G.; Milani,
228 C. J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D. A. (Eds). *Tectonic Evolution of*
229 *South América. 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro,*
230 *pp. 231-263.*
- 231 Espejo, M. A.; Vicente, E.; Molina, E. & Barragan, E. 1992. Kaolinite
232 Formation from Feldspars: Study of a Weathering Profile in Gneiss
233 from the Iberian Hercynian Massif. In: *Mineralogica et Petrographica*
234 *Acta. Mediterranean Clay Meeting, Vol. XXXV-A. p.209-216.*
- 235 Faria, A., 1995. Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Paranoá
236 nas Áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D'Aliança – Alto
237 Paraíso de Goiás. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências,
238 Univ. de Brasília. 199p.
- 239 Faria, A. & Dardenne, M. A.;1995. Estratigrafia do Grupo Paranoá na
240 região de Alto Paraíso - São João D'Aliança – GO. *Anais V Simpósio*
241 *de Geologia do Centro-Oeste, Goiânia – GO. SBG/NCO, p. 75-77.*
- 242 Faria, A. & Guimarães, E M. & Figueiredo, A. N., 1997. Mapa Geológico
243 do Distrito Federal. Escala 1:100.000. Programa Cartas de Síntese e
244 Estudos de Integração Geológica. DNPM-UnB.
- 245 Fuck, R. A. 1990. Dobramentos neoproterozóicos da margem ocidental do
246 Cráton do São Francisco. *Congresso Brasileiro de Geologia 33, SBG,*
247 *Bol. Resumo, P. 288-289.*
- 248 Fuck, R. A., Jardim de Sá, Pimentel, M. M., Dardenne, M. A., Pedrosa
249 Soares, A. C., 1993. As faixas de dobramentos marginais do Cráton do
250 São Francisco: síntese de conhecimentos. In: *O Cráton do São*
251 *Francisco. J. M. L. Dominguez & A. Misi (editores). SBG, SBG/BA,*
252 *CNPq. p. 161-185.*
- 253 Fuck, R. A., Pimentel, M. M. & Del-Rey, J. L. H., 1994.
254 *Compartimentação Tectônica da Porção Oriental da Província*

- 255 Tocantins. Cong. Bras. Geol. 38 – Camboriú. Bol. De Resumos
256 Expandidos. Vol. I p. 215-216.
- 257 Gilkes, R. J. and Suddhiprakarn, A. 1979. Biotite alteration in deeply
258 weathered granite. II. The oriented growth of secondary minerals:
259 Clays & Clay Minerals 27, 361-367.
- 260 Lacerda, M. L. 2005. Estudo da Argila Pozolânica Utilizada na Produção
261 de Cimento: Área Bonsucesso – Região Planaltina-DF. Dissertação de
262 Mestrado. Instituto de Geociências, Univ. de Brasília. 167p
- 263 Meunier, A. and Velde, B. 1979. Weathering mineral facies in altered
264 granites: the importance of local small-scale equilibria: Mineral Mag.
265 43, 261-268.
- 266 Millot, G. 1963. Géologie des Argiles: Altération, Sédimentologie,
267 Géochimie. Ed. Masson et Cie, Paris, 499 pp.
- 268 Pimentel, M. M., Jost, H. & Fuck, R. A. 2004. O Embasamento da Faixa
269 Brasília e o Arco Magmático de Goiás. In Mantesso-Neto, V. et al.
270 (ed) Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de
271 Fernand Flávio Marques de Almeida. p. 355-368.
- 272 Raj, J. K. 1993. Clay minerals in the weathering profile of a quartz-
273 muscovite schist in the Seremban area, Negeri Sembilan PertanikaJ.
274 Trap. Agric. Sci., 16 (2): 129-136.
- 275 Souza Santos, P. 1975. Tecnologia de argilas. São Paulo, Edgard Blucher.
276 2v.
- 277 Strieder, A. J. 1990. Análise estrutural da região de Abadiânia (GO), Rev.
278 Bras. Geoc., 20:239-57.
- 279 Stoch, L. and Sikora W. 1976. Transformations of micas in the process of
280 kaolinitization of granites and gneisses. Clays and Clay Minerals, Vol
281 24, pp. 156 162.
- 282
- 283



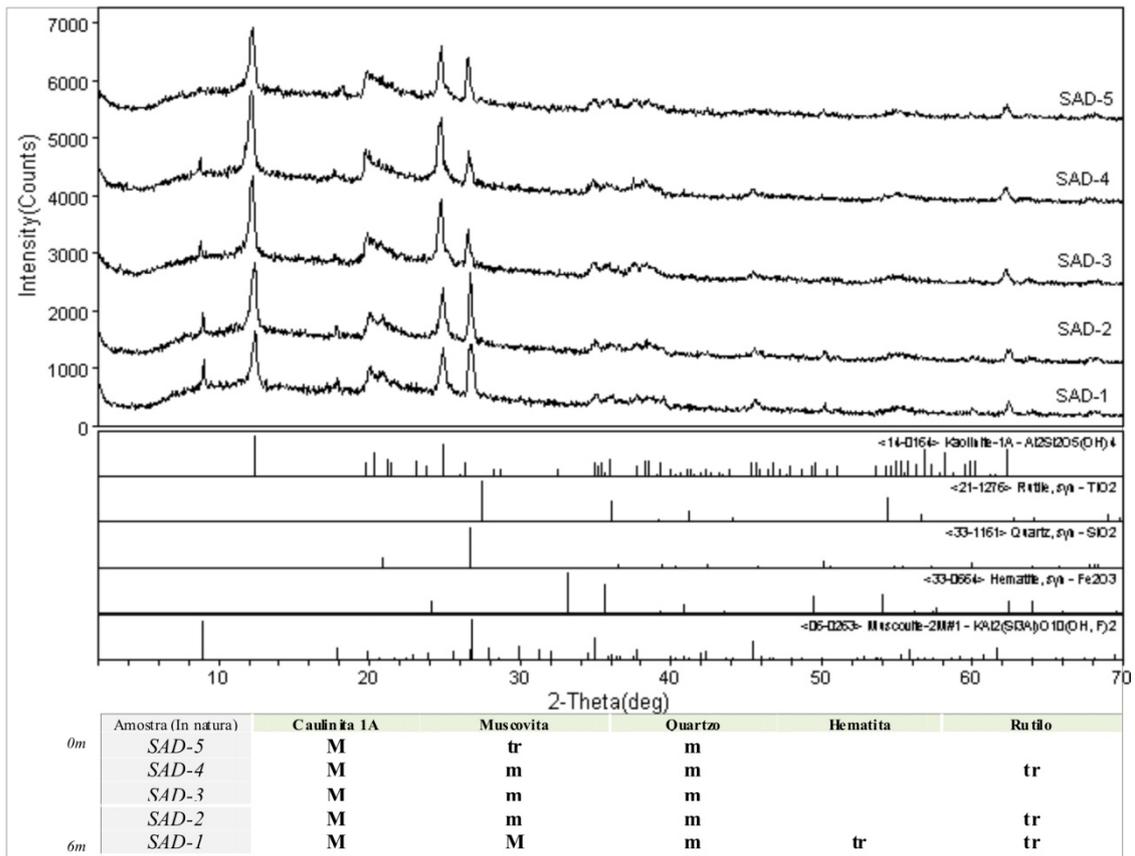
292
293
294
295

Fig. 3 – Schematic section constructed from the NS profile, showing the likely model of maturity weathering of Santo Antônio do Descoberto area.

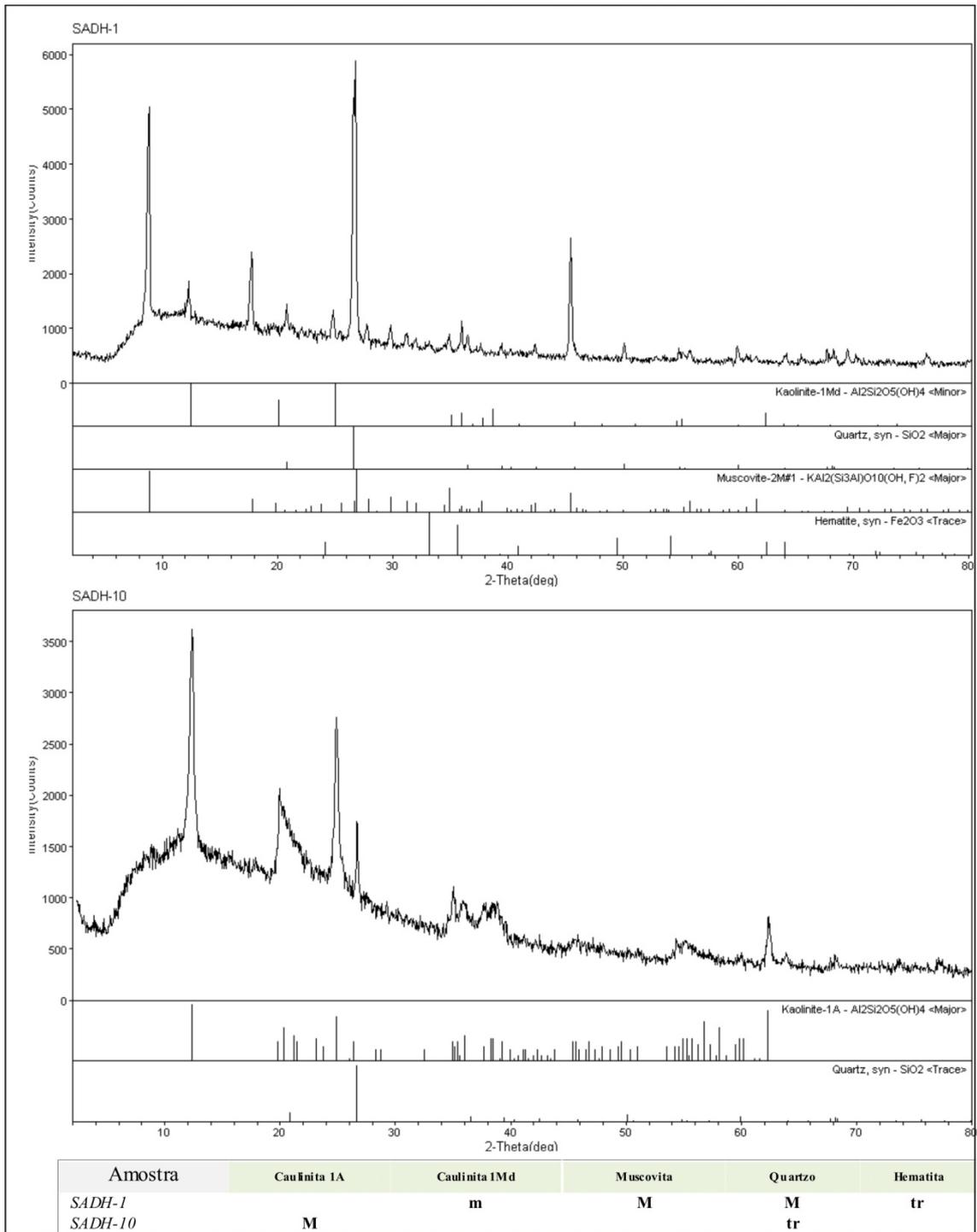


296
297
298

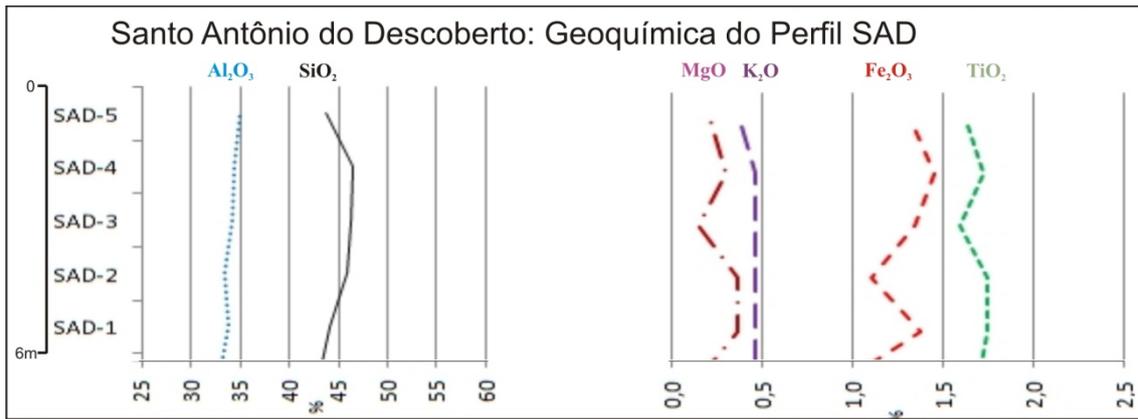
Fig. 4 – Weathering profile from the Santo Antônio do Descoberto mine.



299
 300 Fig 5 – Mineralogical composition from the SAD profile, showing mineral
 301 phases identified by X-ray diffraction for total sample of natural raw clay.
 302 **M** major; **m** minor; **tr** trace.



303
 304 Fig 6 – Mineralogical composition from the SADH-1 and SADH-10
 305 samples, showing mineral phases identified by X-ray diffraction for total
 306 sample of natural raw clay. **M** major; **m** minor; **tr** trace.
 307



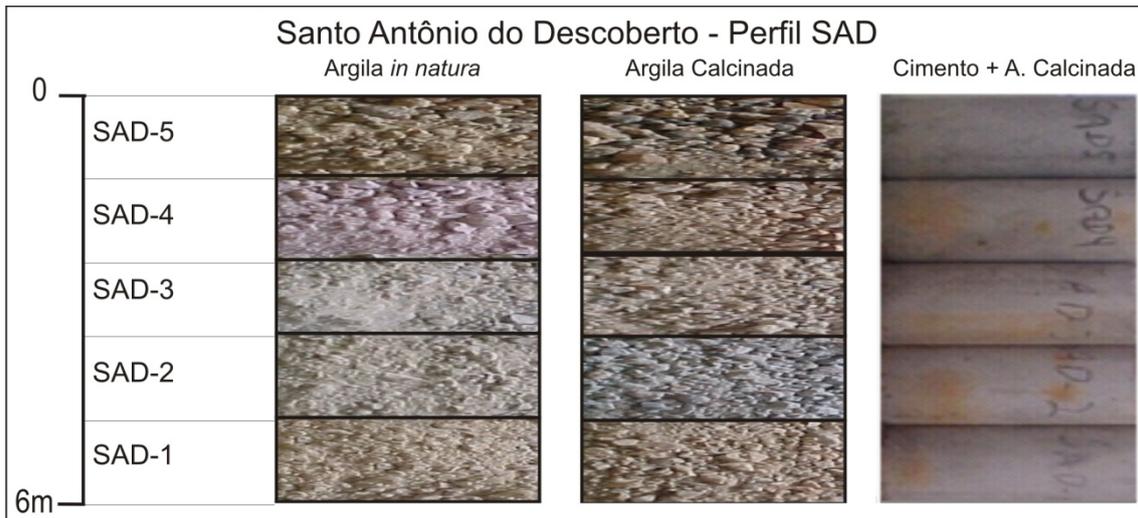
308
309
310

Fig. 7 – Geochemistry distribution along SAD weathering profile.

Amostra	SiO ₂ %	TiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	MgO%	CaO%	Na ₂ O%	K ₂ O%	PF%
SADH-1	56,61	1,02	22,97	7,95	1,82	0,59	0,54	0,69	7,07
SADH-10	48,32	1,56	33,00	1,59	0,27	0,44	0,35	0,50	13,96

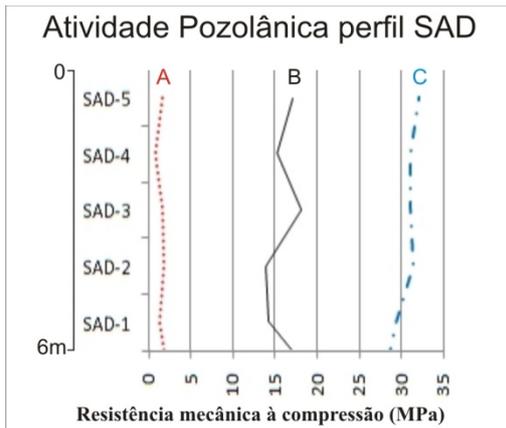
311
312

Fig. 8 – Chemical composition from the SADH-1 and SADH-10 samples.



313
314
315
316
317
318
319

Fig. 9 – Color comparison between raw clay and calcined clay (800°C for 30 minutes) and calcined clay with cement CP II-F-32.



320

321

322

323

324

Fig. 10 – Pozzolanic activity distribution along the SAD profile. A: Ca(OH)_2 + non calcined clay; B: Ca(OH)_2 + calcined clay; C: Cement + calcined clay. There is significant growth of compressive strength from raw clay (A) after calcination at 800°C for 30 minutes (B).