



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA, MINERALÓGICA, QUÍMICA E FÍSICA DO CAULIM DA MINA DA RCC – RIO CAPIM CAULIM (PA)

TESE APRESENTADA POR

DANIEL JOSÉ LIMA DE SOUSA

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

Data de Aprovação: 24.07.2000

Comitê de Tese:

Rômulo Simões Angélica

.....
RÔMULO SIMÕES ANGÉLICA (Orientador)

Marcondes Lima da Costa

.....
MARCONDES LIMA DA COSTA

Herbert Josef Pöllmann

.....
HERBERT JOSEF PÖLLMANN

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa, coordenador do Projeto "Mineralogia e Geoquímica de Sistemas Supergênicos da Amazônia - Processo 520041/95-0" que foi o idealizador das linhas gerais dessa dissertação e ao Prof. Dr. Rômulo Simões Angélica que não poupou esforços na orientação deste trabalho;

Ao gerente de operações da Rio Capim Caulim - RCC, Dr. Milton Costantin, que nos deu o aval e acreditou em nossa capacidade, dando-nos incentivo para a realização deste trabalho. Ao ex-gerente da Mina, Dr. Claus Mangold (*in memoriam*), que muito contribuiu, fornecendo informações, alojamento, e incentivos deste trabalho, além dos meios necessários para sua investigação; ao Eng^o de Minas Leonardo Duarte Fonseca pela troca de idéias, conhecimentos e amizade;

Ao prof. Dr. Thomas Scheller, amigo sempre presente, exemplo de humildade e simplicidade, dedicação, inspirador intelectual e modelo de vida. Aos técnicos: Natalino Siqueira, Walmeire Alves e Lopes pela ajuda prestigiosa. Ao prof. Dr. Walter Klaus Schuckmann (*in memoriam*) pelo conhecimento, competência e amizade.

Meus sinceros agradecimentos ao Eng^o. Químico Anselmo Duarte Pereira, chefe do Laboratório de Análises Físicas da RCC em Barcarena, pelas correções do capítulo - Caracterização física do caulim, pela acolhida e incentivos. Ao químico José Herculano Neto, que me acompanhou em todas as etapas das análises quando da minha estadia no laboratório da RCC. Às senhoras Rita e Raquel Conde pela atenção, ao assessor fiscal Alcimar Amorim, pelo encorajamento e aos demais técnicos, que de alguma forma colaboraram com este trabalho;

Aos colegas Helmut Höhn, uma experiência de vida; Oscar Fernandez, brasileiro andino; e a todos os demais colegas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho;

À minha mãe Lucimar Lima, pela vida e orações incansáveis; Ao cunhado Grimoaldo Bandeira de Matos e à irmã Lucilda Sousa de Matos pela acolhida de muitos anos; à namorada Ana Creuza pelo incentivo nas horas difíceis e à amiga Maria das Neves.

Aos amigos anônimos que estão sempre ao meu lado, o Maior dEles se chama Jesus Cristo, Filho de Deus, Princípio de Tudo, que me Ampara, Protege e Conduz.

*“O futuro depende do que fazemos agora.
O que fazemos determina o resultado.”*

Michael Drosnin

SUMÁRIO

	p.
AGRADECIMENTOS	I
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	V
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 – INTRODUÇÃO	5
1.1 OBJETIVOS	6
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	7
1.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS	7
1.3.1 Relevo e hidrografia.....	7
1.3.2 Clima, vegetação e solo	9
1.4 GEOLOGIA REGIONAL.....	11
1.4.1 Arenito Guamá	11
1.4.2 Formação Itapecuru	11
1.4.3 Formação Ipixuna.....	14
1.4.4 Formação Pirabas.....	15
1.4.5 Grupo Barreiras	16
2 – METODOLOGIA DE TRABALHO	18
2.1 ATIVIDADES PRÉ-CAMPO.....	18
2.2 ATIVIDADES DE CAMPO	18
2.3 ATIVIDADES DE LABORATÓRIO.....	19
2.3.1 Preparação das amostras.....	19
2.3.2 Métodos Analíticos.....	20
2.3.2.1 Microscopia Óptica.....	20
2.3.2.2 Difractometria de raios X (DRX)	21
2.3.2.3 Análise química.....	21
2.3.2.4 Espectroscopia de Absorção no Infravermelho (EIV).....	21
2.3.2.5 Análises Termogravimétricas (TG) e Termodiferencial (ATD).....	22
2.3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	23
2.3.2.7 Quantificação do Resíduo, Granulometria, Medição da Alvura e Viscosidade.....	23
2.3.2.8 Análise Granulométrica	25
3 – O CAULIM	27
3.1 - ASPECTOS MINERALÓGICOS	27
3.2 - TIPOS DE DEPÓSITOS	29
3.3 - APLICAÇÕES	31
3.4 - RESERVAS	33

4 – GEOLOGIA DA MINA.....	35
4.1 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA UNIDADE INFERIOR	36
4.1.1 Caulim <i>Soft</i> (ROM).....	36
4.1.2 Caulim <i>Flint</i>	44
4.2 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA UNIDADE SUPERIOR	46
4.2.1 Horizonte saprolítico	46
4.2.2 Horizonte ferruginoso concrecionário.....	49
4.2.3 Horizonte latossolo amarelo	49
5 – ASPECTOS MINERALÓGICOS DO CAULIM.....	51
5.1 INTRODUÇÃO.....	51
5.1.1 Constituintes Minerais.....	51
5.1.2 Descrição dos Minerais Pesados Transparentes.....	55
6 – ANÁLISE MINERALÓGICA.....	61
6.1 INTRODUÇÃO.....	61
6.1.1 Por difração de raios x (DRX)	61
6.1.2 Por Análise Térmica (ATD / ATG).....	66
6.1.3 Por Infravermelho (IV).....	71
6.1.4 Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	75
6.1.5 Análise por MEV com Sistema de Energia Dispersiva (SED).....	78
7 – GEOQUÍMICA	79
7.1 INTRODUÇÃO.....	79
7.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	80
7.3 DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DOS ELEMENTOS NOS PERFIS	85
8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CAULIM DA RCC	89
8.1 INTRODUÇÃO.....	89
8.1.1 Percentagem de sólidos.....	89
8.1.2 Granulometria	90
8.1.3 Viscosidade	94
8.1.4 Alvura e índice de amarelamento (<i>yellowness</i>).....	95
8.2 DISCUSSÃO.....	96
9 – EVOLUÇÃO SUPERGÊNICA DA ÁREA.....	99
10 – CONCLUSÕES	104
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS	p.
FIGURA 1 - MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA MINA DA RIO CAPIM CAULIM. FONTE: RCC MODIFICADO	8
FIGURA 2 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DA PORÇÃO NE DO ESTADO DO PARÁ. FONTE: CPRM, NO PRELO.	12
FIGURA 3 - ESTRUTURA CRISTALINA DA CAULINITA (FOLHAS TIPO T-O).....	28
FIGURA 4 - ARRANJO ESPACIAL DA CAMADA TETRAÉDRICA (T) E OCTAÉDRICA (O) DA CAULINITA.....	29
FIGURA 5 - CAULIM ARENOSO SOTOPOSTO AO CAULIM SOFT	37
FIGURA 6 - CAULIM <i>SOFT</i> EXIBINDO ACAMAMENTO RELIQUIAR RESSALTADO POR LENTES DE OXI-HIDRÓXIDO DE FERRO.	38
FIGURA 7 - TEXTURA EM MOSAICO DESENHADA POR FRAGMENTOS DE CAULIM EM MEIO A UMA MATRIZ CAULÍNICA ARENOSA.	38
FIGURA 8 - CONCREÇÕES SUBESFÉRICAS (PSEUDO-OÓLITOS) PREENCHIDAS POR MATERIAL ARGILO-ARENOSO. A CROSTA É FORMADA POR GRÃOS DE MINERAIS PESADOS ENCRAVADOS EM UMA MATRIZ GOETHÍTICA.....	39
FIGURA 9 - CAULINITA BEM DESENVOLVIDA (<i>BOOKLETS</i>) COM ASPECTO VERMIFORME, VISTA AO MICROSCÓPIO PETROGRÁFICO.	40
FIGURA 10 - GRÃO DE QUARTZO MONOCRISTALINO APRESENTANDO CONTORNO INDICATIVO DE DISSOLUÇÃO.	40
FIGURA 11 - ACAMAMENTO RELIQUIAR EVIDENCIADO PELA ORIENTAÇÃO DE MINERAIS PESADOS NO CAULIM.	42
FIGURA 12 - ALTERAÇÃO DE ILMENORUTILITO PARA HEMATITA (CASTANHO) E GOETHITA (AMARELO) E FORMAÇÃO DE BORDAS DE DIFUSÃO DE OXI-HIDRÓXIDOS DE FERRO.....	42
FIGURA 13 - PERFIL ESQUEMÁTICO DA SEÇÃO LONGITUDINAL N-S, MOSTRANDO O CAULIM (ROM), O <i>FLINT</i> E AS CAMADAS SOBREPOSTAS.	43
FIGURA 14 - LENTE DE CAULIM <i>FLINT</i> , DE CONTATO GRADACIONAL NA BASE E DESCONTINUIDADE EROSIONAL NO TOPO.	44
FIGURA 15 - CONTATO SUPERIOR DO CAULIM <i>FLINT</i> COM OS SEDIMENTOS ARENO-ARGILOSOS (UNIDADE SUPERIOR). 45	45
FIGURA 16 - HORIZONTE ARENO-ARGILOSO APRESENTANDO ESTRATIFICAÇÃO CRUZADA ACANALADA, SIGMOIDAL E TANGENCIAL.....	46
FIGURA 17 - ESTRATIFICAÇÃO CRUZADA TANGENCIAL COM <i>TOP SETS</i> MILIMÉTRICOS A CENTIMÉTRICOS.	47
FIGURA 18 - ESTRATIFICAÇÃO PLANO PARALELA FORMADA POR SEDIMENTOS ARENO-ARGILOSOS.	48
FIGURA 19 - HORIZONTE FERRUGINOSO CONCRECIONÁRIO, COM ARCABOUÇO ABERTO.....	49
FIGURA 20 - HORIZONTE AMARELADO, SOBREPOSTO DE FORMA GRADATIVA AO HORIZONTE FERRUGINOSO CONCRECIONÁRIO.	50
FIGURA 21 - PSEUDO-OÓLITOS APRESENTANDO FORMAS FECHADAS E ABERTAS COM OS MINERAIS "SATÉLITES"	52
FIGURA 22 - CRISTAIS BEM DESENVOLVIDOS DE CAULINITA (<i>BOOKLETS</i> - SANFONAS).....	53
FIGURA 23 - PREDOMÍNIO DA FORMA SUB-ANGULOSA NOS CRISTAIS DE QUARTZO DO CAULIM DA RCC.	54
FIGURA 24 - MINERAIS PESADOS ENCONTRADOS NO CAULIM <i>SOFT</i> DA RCC (ÊNFASE À HEMATITA DE COR PRETA)	55
FIGURA 25 - VARIEDADE TIPOLÓGICA DOS ZIRCÕES ENCONTRADOS NO CAULIM DA RCC.	56

FIGURA 26 – DIFRATOGRAMA DE RAIO-X POR MICROPREPARAÇÃO DOS ZIRCÕES, ANATÁSIO E RUTILO DO CAULIM DA RCC.....	56
FIGURA 27 – HÁBITOS DISTINTO DE RUTILO (FORMAS PRISMÁTICAS E GRÃOS IRREGULARES).....	57
FIGURA 28 - HÁBITO PLACÓIDE DO ANATÁSIO.....	58
FIGURA 29 – FREQUÊNCIA ACUMULADA DOS MINERAIS PESADOS DA FRAÇÃO AREIA GROSSA EM QUATRO AMOSTRAS DO CAULIM <i>SOFT</i> DA RCC.....	60
FIGURA 30 - FREQUÊNCIA ACUMULADA DOS MINERAIS PESADOS DA FRAÇÃO AREIA FINA EM QUATRO AMOSTRAS DO CAULIM <i>SOFT</i> DA RCC.....	60
FIGURA 31 – COMPORTAMENTO DO CAULIM POR DRX NO PERFIL 5 AO LONGO DO HORIZONTE CAULÍNICO <i>SOFT</i> E <i>FLINT</i>	62
FIGURA 32 - COMPORTAMENTO DO CAULIM POR DRX NO PERFIL 6 AO LONGO DO HORIZONTE CAULÍNICO <i>SOFT</i> E <i>FLINT</i>	63
FIGURA 33 – DIFRATOGRAMA DE UMA AMOSTRA DE CAULIM (P6-3) TRATADOS PELA TÉCNICA ORIENTADA, GLICOLIZADA E AQUECIDA.	64
FIGURA 34 – OS PARÂMETROS E A FÓRMULA USADA NO MÉTODO EMPÍRICO DE HINCKLEY.....	65
FIGURA 35 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E TERMODIFERENCIAL DO CAULIM <i>SOFT</i> (DISPOSIÇÃO LATERAL).....	69
FIGURA 36 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E TERMODIFERENCIAL DO PONTO C1 (<i>SOFT</i>) (DISPOSIÇÃO VERTICAL). .	69
FIGURA 37 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E TERMODIFERENCIAL DO PERFIL 6 NO HORIZONTE CAULÍNICO.....	70
FIGURA 38 – ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA E TERMODIFERENCIAL DO PERFIL 5 NO HORIZONTE CAULÍNICO.....	70
FIGURA 39 – ESPECTRO INFRAVERMELHO DO CAULIM <i>SOFT</i> COM ÊNFASE À DISTRIBUIÇÃO LATERAL.	73
FIGURA 40 – ESPECTRO INFRAVERMELHO DO CAULIM <i>SOFT</i> COM ÊNFASE À DISTRIBUIÇÃO VERTICAL NO PERFIL 5.....	73
FIGURA 41 - ESPECTRO INFRAVERMELHO DO CAULIM <i>SOFT</i> COM ÊNFASE À DISTRIBUIÇÃO VERTICAL NO PERFIL 6.	74
FIGURA 42 - ESPECTRO INFRAVERMELHO DO CAULIM <i>SOFT</i> , BOOKLETS E DOIS PRODUTOS FINAIS DA RCC.....	74
FIGURA 43 – SANFONAS DE CAULINITA MOSTRANDO O EMPILHAMENTO DOS CRISTALITOS NO CAULIM DA RCC.....	75
FIGURA 44 – SANFONAS (<i>BOOKLETS</i> OU <i>STACKS</i>) BEM DESENVOLVIDOS DE CAULINITA NO CAULIM DA RCC.	76
FIGURA 45 – CRISTALITOS PSEUDO-HEXAGONAIS (MÉDIA 2 μm). PILHA VERMICULAR DE CAULINITA (10 μm DE DIÂMETRO).....	77
FIGURA 46 - DISPOSIÇÃO DOS QUATRO PERFIS ANALISADOS QUIMICAMENTE AO LONGO DAS TIRAS 2 E 3 DA MINA DA RCC.....	79
FIGURA 47 - DIAGRAMA TRIANGULAR SiO_2 vs. Al_2O_3 vs. Fe_2O_3 , DO CAULIM DA RCC E DE OUTROS CAULINS DA AMAZÔNIA, DOS EUA E INGLATERRA.	83
FIGURA 48 - COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO DOS ELEMENTOS MAIORES E TRAÇO AO LONGO DO PERFIL P5.....	87
FIGURA 49 – COMPORTAMENTO GEOQUÍMICO DOS ELEMENTOS MAIORES E TRAÇO AO LONGO DO PERFIL P6/P14.	88
FIGURA 50 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS AMOSTRAS (C'S) AO LONGO DO HORIZONTE DE CAULIM <i>SOFT</i>	92
FIGURA 51 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CAULIM <i>SOFT</i> AO LONGO DO PERFIL 6.....	92
FIGURA 52 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO CAULIM <i>SOFT</i> AO LONGO DO PERFIL 5.....	93

FIGURA 53 - CURVAS DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS TRÊS AMOSTRAS DE CAULIM <i>SOFT</i> ANALISADAS (P6, C E P5) E AS REGIÕES COM CARACTERÍSTICAS DE PREENCHIMENTO (<i>FILLER</i>) E COBERTURA (<i>COATING</i>).....	93
FIGURA 54 - CURVA DE DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA (PERCENTAGEM DE PARTÍCULAS VS. TEMPO DE MOAGEM) OBTIDA A PARTIR DE DELAMINAÇÃO DO CAULIM DA RCC.....	98
FIGURA 55 - MODELO EVOLUTIVO DOS EVENTOS DE LATERITIZAÇÃO COMO CONTRIBUIDORES NA GÊNESE DO CAULIM DO RIO CAPIM (MODIFICADO DE COSTA, 1991).....	103

TABELAS

TABELA 1 - COLUNA ESTRATIGRÁFICA REGIONAL DO NE DO ESTADO DO PARÁ (*).	14
TABELA 2 - PROCEDIMENTOS DE SEGREGAÇÃO DE MINERAIS PESADOS POR SEPARADOR MAGNÉTICO FRANTZ.	26
TABELA 3 - DISTRIBUIÇÃO DOS MINERAIS PESADOS (EM %) NO CAULIM DA RCC (FRAÇÃO AREIA FINA).	59
TABELA 4 - DISTRIBUIÇÃO DOS MINERAIS PESADOS (EM %) NO CAULIM DA RCC (FRAÇÃO AREIA MUITO FINA).	59
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS DE DIFERENCIAÇÃO POR DRX DE CAULINITA <i>SENSU STRICTO</i> E DESORDENADA.	64
TABELA 6 - ÍNDICE DE CRISTALINIDADE DE HINCKLEY PARA AS AMOSTRAS DO CAULIM DA RCC.	66
TABELA 7 - ANÁLISES QUÍMICAS (% PESO) POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV-SED) DO CAULIM.	78
TABELA 8 - COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DOS ELEMENTOS MAIORES DAS AMOSTRAS DOS PERFIS DA MINA DA RCC.....	81
TABELA 9 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ALGUNS ELEMENTOS MAIORES E TRAÇO (EM PPM) DOS PERFIS DA MINA DA RCC.	82
TABELA 10 - COMPARAÇÕES DE COMPOSIÇÕES QUÍMICAS DE CAULINS DA AMAZÔNIA (INCLUSIVE RCC), USA E UK.	85
TABELA 11 - ANÁLISE DOS PARÂMETROS FÍSICOS DE QUINZE AMOSTRAS DE CAULIM DA RCC.....	90
TABELA 12 - ANÁLISE DA PERCENTAGEM DE SÓLIDOS E GRANULOMETRIA ABAIXO DE 2µm DE TRÊS AMOSTRAS ROM DISPERSAS DA RCC.....	91
TABELA 13 - ANÁLISES DAS VISCOSIDADE (BROOKFIELD OU BAIXO CISALHAMENTO E HERCULES OU ALTO CISALHAMENTO) DE AMOSTRAS PADRONIZADAS E TRATADAS COM DISPERSANTE	94
TABELA 14 - TIPOS DE PRODUTO FINAL DA RCC COM AS RESPECTIVAS PROPRIEDADES FÍSICAS MAIS IMPORTANTES USADAS NA INDÚSTRIA PARA A COBERTURA DE PAPEL.	94
TABELA 15 - MEDIDAS DE ALVURAS, WHITENESS E YELLOWNESS (DESAREIADO, ANTES DO SEPARADOR MAGNÉTICO E QUÍMICO) DE TRÊS AMOSTRAS DA MINA DA RCC.....	95
TABELA 16 - DETERMINAÇÃO DO PONTO ÓTIMO DE DISPERSÃO DE TRÊS AMOSTRAS PADRONIZADAS (70 % DE SÓLIDOS) DA MINA DA RCC.	96

RESUMO

A região do Capim está localizada a NE do Estado do Pará, entre a rodovia Belém-Brasília (trecho entre Ipixuna do Pará e Mãe do Rio) e o médio curso do Rio Capim. O Distrito Caulínico do Capim é atualmente o mais importante distrito caulínico da Amazônia, com as maiores reservas de caulim de alta brancura do país. São apresentados estudos de detalhe da jazida de caulim da empresa Rio Capim Caulim S.A. (RCC) e que apresenta excelentes exposições geológicas.

A mina da RCC situa-se à margem esquerda do Rio Capim, no município de Ipixuna do Pará - PA. A exploração foi iniciada em 1996, com sistema de lavra a céu aberto, utilizando o método em tiras (*strip mining*). Foram descritos diferentes horizontes de caulim e perfis lateríticos com amostragem que favoreceram o reconhecimento e caracterização dos seguintes horizontes: saprolítico (incluindo caulim *soft* e *flint*), ferruginoso concrecionário e latossolo amarelo.

Foi possível distinguir duas grandes unidades estratigráficas, separadas entre si por uma superfície discordante erosiva, denunciada pela presença de uma paleosuperfície.

A **unidade inferior** é formada principalmente por diferentes tipos de caulim. Na base, observa-se o caulim *soft* (minério da jazida) que grada para o topo para o caulim *flint*. Apresenta coloração que vai do branco ao creme e porções amareladas e castanho avermelhada. Estruturas como acamamento são freqüentes e demonstram a natureza sedimentar da unidade. Feições como mosqueamento, concreções ferruginosas isoladas e colunamento ferruginoso, embora localizados, mostram que a unidade foi afetada pela lateritização. As características sedimentares dessa unidade permite correlacioná-la com a Formação Itapecuru/Ipixuna (Cretáceo) e a sua alteração laterítica com a fase Madura do Eoceno-Oligoceno.

A **unidade superior** é formada por sedimentos arenosos na parte inferior, com sedimentos siltosos e argilosos na porção mediana e arenosos no topo. Na base geralmente ocorrem conglomerados/brechas basais constituídos por fragmentos de caulim *flint*. Toda a unidade encontra-se fortemente alterada por lateritos superimpostos, com latossolos no topo, sobrepostos a horizonte ferruginoso concrecionário. O horizonte mosqueado está parcialmente representado sobre o nível arenoso. Essa unidade é litologicamente correlacionável com a Formação Barreiras e o perfil laterítico sobreposto com os lateritos Imaturos de idade Plio-Pleistocênica.

Análises mineralógicas foram feitas por difração de raios-x (DRX), auxiliados por análise térmica diferencial e gravimétrica (ATD-ATG), espectroscopia no infravermelho (EIV), análise

petrográfica em seções polidas e lâminas de minerais pesados, além de estudos sedimentológicos. Também foram feitas análises micromorfológicas por microscopia eletrônica de varredura (MEV).

Resultados por DRX indicam que o caulim é constituído essencialmente por caulinita (mineral dominante) e quartzo; subordinadamente por hematita, ilmenorutilo, goethita, zircão, turmalina, rutilo, estauroлита, cianita, anatásio e raramente topázio, além de muscovita. O grau de cristalinidade analisadas por DRX (índice de Hinckley) e por espectroscopia no infravermelho, apresentam índices de cristalinidade alta no caulim *soft* e moderada a baixa no caulim *flint*. Análises por MEV revelaram que os diâmetros médios dos cristais de caulinita variam de 0,5 a 2 μ m. Foram descritas sanfonas bem desenvolvidas de cristais de caulinitas que alcançam até 300 μ m de comprimento.

Composições químicas de 12 amostras de caulim *soft* indicam valores de SiO₂ (44,72%), Al₂O₃ (38,16%), Fe₂O₃ (1,03%), TiO₂ (1,33%) e perda ao fogo (13,65%), Na₂O (0,05%), K₂O (0,06%), MgO (0,02%) e CaO (<0,04%).

Análises físicas foram feitas no Laboratório da RCC em Barcarena e envolveram: análise de resíduo, alvura, análise granulométrica e viscosidade. Os resultados mostram uma heterogeneidade em termos de granulometria nos dois tipos de caulim, com bimodalidade no caulim *soft* e unimodalidade no caulim *flint*. O tamanho das partículas diminuem em direção ao topo e os cristais de caulinita são criptocristalino no caulim *flint*. Nas porções superiores e medianas os teores de resíduo menores que 325 mesh variam de 2,4 a 9,0%, enquanto na porção basal variam de 20 a 47%. Os valores das alvuras variam de 75 a 89 pontos (padrão ISO) e a percentagem da granulometria inferior a 2 μ m das amostras analisadas encontra-se na faixa de 41 a 58% no minério (ROM).

Admite-se que esses caulins tenham se formado "*in situ*" a partir de sedimentos da Fm. Ipixuna. O perfil Maturo completo foi desenvolvido e posteriormente erodido com a exposição da parte inferior do perfil (saprólito). Uma das características dessa fase de erosão é a paleosuperfície gerada e que sobre ela aparecem brechas de caulim *flint* retrabalhados. Possíveis condições redutoras (pântanos) prevaleceram sobre a superfície e favoreceram a remobilização do ferro que melhorou a alvura desse caulim. Sobre a superfície de discordância gerada no caulim *flint*, depositaram-se os sedimentos continentais do Grupo Barreiras, e toda a seqüência foi submetida a outro ciclo de lateritização (lateritos Imaturos).

ABSTRACT

The Capim region is located in the NE area of Pará state, in the Belém-Brasília highway (between Ipixuna do Pará and Mãe do Rio municipalities) and encompass the Rio Capim Kaolin District. This is the most important kaolin district in the Amazon Region, with the largest Brazilian reserves of high whiteness kaolin. Detail studies are presented about the kaolin mine of the Rio Capim Caulim Company (RCC) that exhibits excellent outcrops.

The RCC mine is located in the left margin of the Capim River in the district of Ipixuna of Pará - PA. The exploitation has been carried out since 1996 as open mining pit using the strip mining method. The different horizons of the kaolin and supergene/lateritic profile were described and several samples were collected from the pit, which favored the recognition and characterization of the main following horizons: saprolite (including *soft* and hard kaolin), ferruginous concretionary and yellow latosols.

Two main stratigraphic units were distinguished, which are separated by an erosion surface.

The **lower unit** is made up mainly by different kinds of kaolin. At the base, one observes a *soft* kaolin (the main ore) that progress to the top as a hard - *flint* type. The ore color ranges from white to cream, and from yellowish to red-brown. Primary structures such as bedding, are frequent, and demonstrate the sedimentary nature of the unit. Other textures and structures like mottling, isolated iron concretions and ferruginous columns, indicate that the unit was affected by laterization process. Sedimentary features in this unit allow us to correlate it with the Cretaceous-Tertiary Itapecuru/Ipixuna Formations. Lateritic alteration is associated to an Eocene-Oligocene Mature phase.

The **upper unit** is mainly composed by coarse-sandy grained sediments at the base, clayey and silty material at the middle part, which evolves to somewhat sandy at the top. Conglomerates and breccias are usually present in the basal portion and contain flint type kaolin fragments. The unit is deeply altered by superimposed laterite, represented by yellow loose-clay latosol at the top overlying concretionary horizons. The mottled horizon is partially represented over the sand level. This upper unit is correlated with the Barreiras Formation, and the lateritic cover associated with an Immature Lateritization Phase of Plio-Pleistocene age.

Mineralogical analyses were carried out in almost all the collected samples using X-ray Diffraction Analysis (XRD), Differential Thermal-Gravimetric analysis (DTA-DTG) and Infrared

Spectrometry, besides petrography of Heavy Mineral grains and sedimentological-granulometric studies. Scanning Electron Microscopy (SEM) analyses were also done in order to achieve a better micromorphological understanding of the kaolinite crystals.

XDR results of the *soft* kaolin indicate the dominance of kaolinite and quartz, with subordinate hematite, ilmenorutile, goethite, zircon, tourmaline, rutile, staurolite, kyanite and anatase, besides muscovite and rare topaz. The kaolinite crystallinity index was evaluated through XRD (Hinckley method) and infrared spectroscopy, which indicated a high degree for the *soft* kaolin and a moderate to low degree for the *flint* one. SEM micrographs revealed that mean diameter of kaolinite crystal ranged from 0.5 to 2 μ m. Booklets of well-developed kaolinite crystals were also described that reach up to 300 μ m long.

Chemical analyses for 12 samples from the soft kaolin horizon indicate the follow mean composition: SiO₂ (44.72%), Al₂O₃ (38.16%), Fe₂O₃ (1.03%), TiO₂ (1.33%) and LOI (13.65%), Na₂O (0.05%), K₂O (0.06%), MgO (0.02%) and CaO (<0.04%).

Physical analyses were also performed at RCC's Laboratory in Barcarena and involved: residue analysis, whiteness, laser granulometry (Sedigraph) and viscosity. The results show a heterogeneous behavior in terms of granulometry among the two different kaolin types, i.e. bimodality in the soft kaolin and unimodality in the flint kaolin. Grain size diminishes upward and kaolinite crystals are almost criptocrystalline in the *flint* kaolin. In the upper and middle portions of the *soft* kaolin, solid phases smaller than 325 mesh range from 2.4 to 9.0 %, whereas in the basal portion they range from 20.0 to 47.0 %. The whiteness values range from 75 to 89 points (ISO) and the percentage of the minus 2 μ m is situated in the 41 to 58% interval of the ROM.

The results obtained lead to the assumption that these kaolins were formed "in situ" through weathering of the Ipixuna Formation. A complete mature profile should have been developed and further eroded with consequent exposure of the lower part (kaolin - saprolite) of the profile. The main feature of this erosion phase is the extensive paleosurface that developed kaolin-bearing breccias. Reducing conditions may have prevailed above this surface (e.g. swamps) that favored iron remobilization and improvement of the kaolin quality (whiteness) The continental sediments of the Barreiras Group deposited above the kaolins in a discordant contact and the whole sequence was submitted to another lateritization cycle (Immature laterites).

1 – INTRODUÇÃO

A região sudeste do Pará, entre a rodovia Belém-Brasília (trecho Ipixuna e Mãe do Rio) e o médio curso do Rio Capim, constitui, atualmente, o mais importante distrito Caulínico da Amazônia e do Brasil, que engloba ainda vários depósitos e jazidas de bauxitas. Aí estão as maiores reservas de caulim de alta brancura do País. As reservas de caulim da Amazônia correspondem a mais de 90% das reservas brasileiras, que superam 1,3 bilhões de toneladas (Moraes et al., 1994).

O caulim do Capim foi descoberto na década de 60 pela CPRM (Krebs & Arantes, 1973) e foi motivo de avaliação por várias empresas de mineração, entre elas a própria CPRM, a Mendes Júnior, CADAM e CVRD.

Esse caulim também despertou o interesse de pesquisas técnico-científicas realizadas por pesquisadores brasileiros e estrangeiros, destacando-se Krebs & Arantes (1973), Hurst & Bosio (1975), Monteiro (1977), Murray & Partridge (1981), Costa & Moraes (1992), Moraes & Costa (1993), Moraes (1994), Kotschoubey et al. (1996), Costa & Moraes (1997). Esses trabalhos apresentam descrições geológicas gerais, alguns descrevem em maior detalhe aspectos mineralógicos e geoquímicos de depósitos isolados e muitos fazem considerações de ordem genética. Muitos autores consideram o caulim do Capim como de origem tipicamente sedimentar (Krebs & Arantes, 1973; Monteiro, 1977; Coura et al., 1986; Silva & Duarte, 1983). Outros admitem que seja de origem intempérica, a partir da Formação Barreiras (Murray & Partridge, 1981; Hurst & Bosio, 1975). Por outro lado, Costa (1991), Costa & Moraes (1992), Moraes (1994) e Costa & Moraes (1997) concluem que o caulim é de origem intempérica a partir da formação Itapecuru e não da Barreiras. A definição da origem e dos processos evolutivos pelos quais passaram o caulim do Distrito do Capim, é de grande importância para avaliar o potencial de reservas, a distribuição e até mesmo a qualidade do minério.

Segundo Krebs & Arantes, (1973), foi a partir de 1971 que a CPRM intensificou trabalhos na busca por depósitos de caulim, pois naquela época este bem mineral apresentava alta cotação e grande demanda no mercado internacional. Trabalhos detalhados passaram a ser feitos em áreas promissoras, auxiliados com topografia. Os alvos pesquisados abrangeram uma superfície de aproximadamente 10.000 hectares, localizados à margem direita do Rio Capim.

Contemporaneamente, a empresa Mendes Júnior também tinha sua participação na busca por este bem mineral em área próxima a da CPRM. Previamente, foram escavados poços com um metro de diâmetro, com profundidades que variavam em torno de 20 metros e com espaçamento de 100 metros de distância, visando a cubagem da reserva. A partir de 1996, com o consórcio de cinco empresas entre elas a Sumitomo Corporation (japonês – 2,71%), Companhia Brasileira de Participações (brasileira – 9,23%), Amberger Kaolinwerke Eduard Kick GmbH & Co. - AKW (alemã – 38,39%), Dry Branch Minerals INC. - DBK (americana) subsidiária do Grupo IMETAL (francesa – 49,67%) passaram a explorar o caulim da Mina da RCC.

Quando entrou em operação em 1996, a RCC tinha uma capacidade produtora de 280 mil toneladas. Em 1999 essa capacidade aumentou para 400 mil toneladas e a meta é chegar a 600 mil toneladas/ano até janeiro de 2001.

A produção é exportada para os Estados Unidos, Canadá, países da Europa e do sudeste asiático, especialmente o Japão e que tem como finalidade a cobertura (*coating*) de papel.

A RCC prevê uma produção de 374 mil toneladas neste ano, assegurando mais uma vez a posição de segunda maior produtora de caulim do Brasil.

A partir de março deste ano, a empresa será rebatizada, e passará a se chamar **IMERYS RIO CAPIM CAULIM S/A**. A mudança faz parte de uma estratégia internacional do grupo francês IMETAL, atual controladora, de tornar conhecida suas empresas.

1.1 OBJETIVOS

A presente dissertação tem como objetivo principal o estudo do caulim da mina da empresa *RCC – Rio Capim Caulim*, do ponto de vista geológico, mineralógico, geoquímico e físico (aplicações tecnológicas).

Na área da RCC, há excelentes exposições geológicas, além de testemunhos de sondagem, o que favorece a confecção de perfis e seções-tipo, que serão comparadas entre si, procurando-se o entendimento da evolução geológica da mina e arredores, e do caulim em especial.

Pretende-se caracterizar o minério da mina da RCC e os sedimentos e rochas associadas, abordando, portanto, além de estudos genéticos e evolutivos, as relações com o processo de lateritização na Amazônia.

Verificar o comportamento do grau de cristalinidade da caulinita através dos métodos de análises como difração de raios-x e espectroscopia no infravermelho, ao longo do horizonte caulínico soft e flint e encontrar recursos para tal comportamento de segregação.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A mina da RCC está localizada à margem esquerda do médio curso do Rio Capim, entre os Igarapés Santo Antônio e Cajueiro, pertencendo politicamente ao Município de Ipixuna do Pará, e ao Distrito Caulínico do Rio Capim. A mina está inserida na carta planialtimétrica de Mãe do Rio, folha SA.23-Y-A-I, escala 1:100.000, da Diretoria do Serviço Geográfico do Ministério do Exército (Brasil, 1985).

O acesso a partir de Belém é feito através da rodovia BR-316 até a cidade de Santa Isabel do Pará. A partir desta, toma-se a rodovia estadual (PA-140) até a margem direita do Rio Guamá, onde a travessia deste rio é feito por balsa até a cidade de Bujaru e continua-se o trajeto em direção a sul até o cruzamento com a PA-252 em direção a Concórdia do Pará; Desta, segue-se até a cidade de Tomé-Açu, e para se chegar a mina utiliza-se uma estrada secundária a leste (23 km). O acesso por via fluvial, inicia-se pelo Rio Guamá, até a cidade de S. Domingos do Capim, a partir daí, segue-se a sul pelo Rio Capim até o porto da mina (Figura 1).

As coordenadas geográficas do corpo D, motivo deste trabalho, e no centro da tira 3 é: 2° 24' 23" S e 47° 50' 21" W.

1.3 ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

1.3.1 Relevo e hidrografia

A área investigada situa-sedentro de uma região de baixas altitudes, com cotas máximas em torno de 90 metros, apresentando um relevo suave e uniformemente ondulado, caracterizado por baixos platôs, com patamares rebaixados e terraços escalonados (CPRM, 1973).

Barbosa & Pinto (1973) identificaram através de análises das feições particulares das formas de relevo existente na Folha SA.23, duas unidades de relevo: Planalto Rebaixado Setentrional Pará-Maranhão e Planalto Rebaixado da Amazônia (Zona Bragantina):

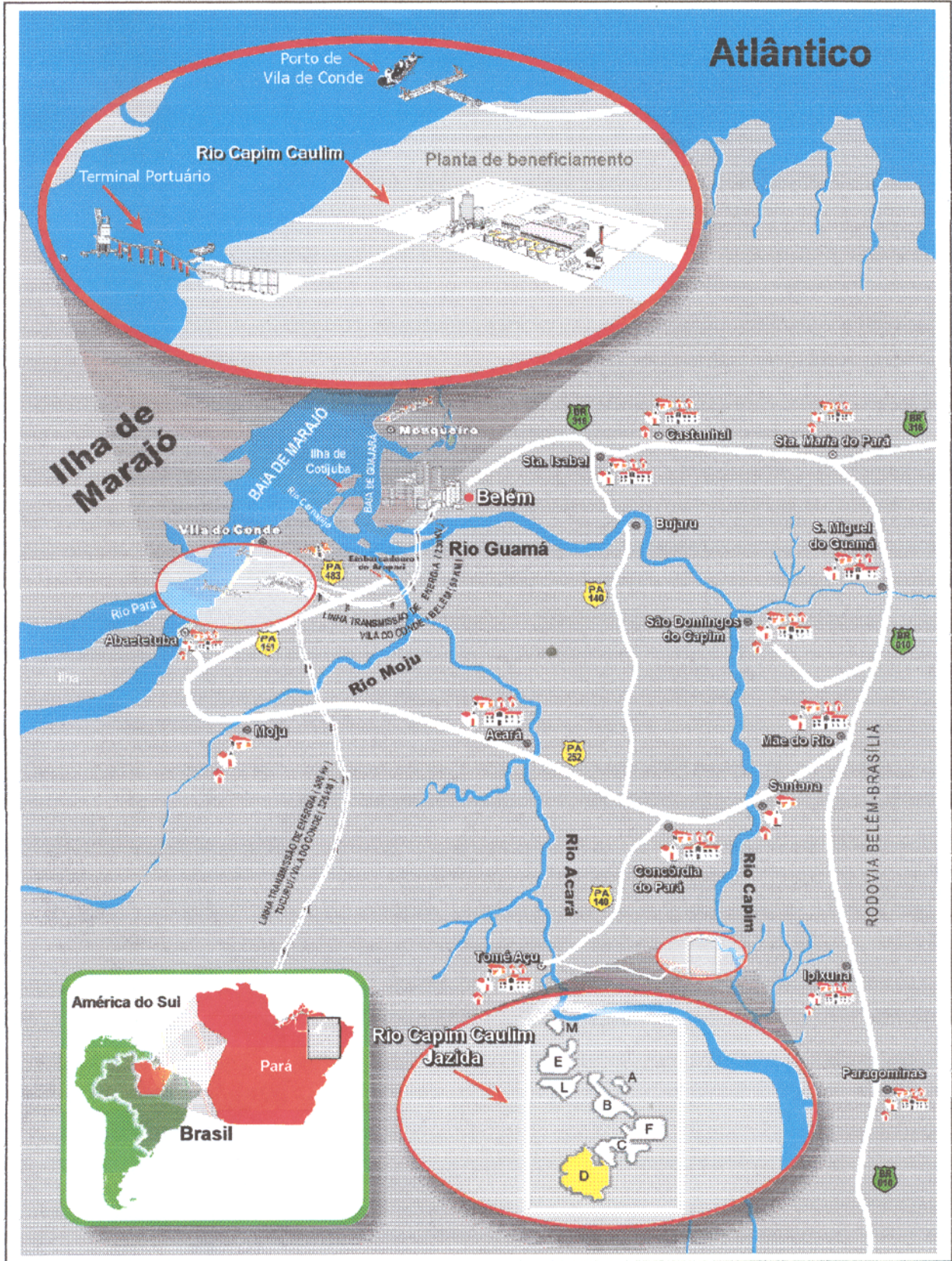


Figura 1 - Mapa de localização da Mina da Rio Capim Caulim. Fonte: RCC modificado.

O *Planalto Rebaixado Setentrional Pará-Maranhão* é definido por formas muito dissecadas, apresentando superfícies com rebordos erosivos que se inclinam para norte em direção ao litoral e para noroeste em direção ao golfo amazônico e que desenvolveu-se sobre os sedimentos Barreiras e Itapecuru. Encontra-se entalhada por vales de rios que seguem a direção NE (Gurupi) e N-NW (Guamá e Capim).

O *Planalto Rebaixado da Amazônia* é originado pela dissecação da Formação Barreiras, o que causou o rebaixamento das altitudes e manteve relevos tabulares por efeitos erosivos. Encontra-se distribuída na região limítrofe entre Pará-Maranhão.

O sistema hídrico da região do Distrito Caulínico do Capim é comandado pelo Rio Capim, que nasce no sudeste do estado do Pará, percorrendo aproximadamente 450 km até desembocar no Rio Guamá. Os principais afluentes do Rio Capim, próximos da mina, estão inseridos na folha Mãe do Rio (SA.23-Y-A-I) e os principais são: os Igarapés Cajueiro (a sudeste) e Santo Antônio (a noroeste) entre eles localiza-se a mina da RCC; a norte os Igarapés Candiru-Miri, Pantógenes, Cipoteua, São Caetano, Maracaxi, Cedeua e o Rio Jabutir Maior; a sul, os Rios Ipixuna, Candiru-Açu, Paraquequara e os Igarapés Ananaí ou Goiabal e o Tracajá, pertencentes à folha de Candiru-Açu (SA.23-Y-A-IV).*

A presença de meandros de grande raio e não existência de cachoeiras e corredeiras conferem ao Rio Capim um estágio evolutivo que pode ser considerado como senil ou em fase de senilização. Ao cortar somente formações sedimentares jovens, pouco consolidadas e constituídos de material predominantemente argiloso e arenoso, o rio Capim é na verdade, apesar do seu estágio evolutivo, o principal elemento erosivo e modelador do relevo da região das áreas investigadas. O arcabouço geológico dos terrenos em que esse rio encravou seu leito é refletido perfeitamente por uma navegabilidade, em toda a sua extensão, por embarcações de pequeno e médio porte (CPRM, 1973).

1.3.2 Clima, vegetação e solo

A mina da RCC está localizada em região de clima equatorial-tropical, no qual predominam períodos mais chuvosos entre os meses de dezembro e maio, e períodos de relativa estiagem entre junho e novembro. A precipitação anual é bastante elevada, em média 2500 mm.

A temperatura é quase sempre alta e uniforme, atingindo as máximas anuais de 33°C e as

mínimas de 23°C. A umidade relativa do ar apresenta altos valores, quase sempre oscilando por volta dos 90%. Conclui-se daí ser possível enquadrar o clima da região no tipo *Afi* de Köppen (alta pluviosidade com boa distribuição e umidade do ar e temperaturas médias elevadas (Costa et al., 1977; CPRM, 1973).

O elevado índice pluviométrico regional é o principal responsável pela existência de exuberante vegetação natural, sempre verde, encontrada na região do Rio Capim. Essa vegetação corresponde ao tipo floresta Latifoliada Equatorial, constituída por matas de Terra Firme e Matas de Várzea, e foram descritas por CPRM (1973) a seguir:

As *matas de Terra Firme*, mais abundantes, são caracterizadas por espécies de grande porte, com mais de 20 metros de altura, com destacado valor na indústria madeireira, como, por exemplo, a maçaranduba (*Mimusop sp*), angelim (*Himenolobium sp*), o pau amarelo (*Euxilophora sp*), o mogno (*Swietenia sp*), o piuiá (*Cariocar villosum*), o pau d'arco (*Tecoma sp*), a samaúma (*Ceiba petendra*), o uxi (*Uxi umbrosis-sima*), etc.

As *matas de várzea*, compostas por árvores de menor porte, herbáceas, arbustivas e subarbustivas, predominas nas partes baixas e alagadas, localizadas às margens dos rios e igarapés da região, como por exemplo o açazeiro* (*Euterpe edulis*), a mamorana (*Bombaz aquatiam*), o maruré (*Brosimopsis acutifolia*), a embaúba (*Cecrópia palmata*), o taxi (*Triplaris surinamensis*), a sapucaia (*Lecythis paraensis*), a jacarandeuca (*pithecolobium latifolium*), o jauari (*Astrocaryum jauari*).

Vieira & Santos (1987) diferenciaram 15 tipos de solos na Amazônia, entre os quais na área da mina da RCC são descritos dois tipos, o latossolo amarelo e o concrecionário laterítico:

Latossolo amarelo - é formado a partir da Formação Barreiras, com relevo plano a ondulado; apresentam cores variando de cinza escuro no horizonte A e amarelo nos horizontes inferiores, são profundos, bastante envelhecidos, são portanto distróficos e normalmente apresentam alta saturação em alumínio.

Concrecionário Laterítico - consiste na presença de concreções de arenito ferruginoso intercaladas às partículas minerais finas, normalmente apresenta-se argiloso ou argilo-arenoso no horizonte A e argilosos no horizonte B, são medianamente profundos e pobres em base trocáveis.

1.4 GEOLOGIA REGIONAL

A geologia regional da área em enfoque restringe-se a litotipos que afloram ao longo da estrada Belém-Brasília, desde São Miguel do Guamá até às proximidades da cidade de Ipixuna. São descritos os Arenitos Guamá (Paleozóico), Formação Itapecuru (Cretáceo), Formação Ipixuna (Cretáceo), Formação Pirabas (Mioceno Inferior) e o Grupo Barreiras (Mioceno Superior).

1.4.1 Arenito Guamá

Segundo Igreja (1985) e Costa et al. (1988), os sedimentos atribuídos ao Arenito Guamá, que afloram no leito do Rio Guamá, foram depositados no Neoproterozóico /Eopaleozóico em bacias estreitas e alongadas na direção NW-SE. Truckenbrodt & Alves (1982), admitem o Arenito Guamá como sendo Paleozóico (Figura 2), devido a presença de Ichnofósseis "Skolithos" e a sua deposição em um ambiente tipo *foreshore*, mostrando uma relação de caráter discordante com a Formação Itapecuru, sobreposta.

1.4.2 Formação Itapecuru

Lisboa (1914), trabalhando em sedimentos aflorantes nos vales dos rios Itapecuru e Alpargatas, a norte da cidade de Pastos Bons, Estado do Maranhão, denominou-os de Camadas Itapecuru.

Campbell¹ apud Santos et al. (1984) foi o primeiro autor a definir esta unidade, representada pelo conjunto sedimentar do Cretáceo, e denominando-a de Formação Serra Negra. Posteriormente, o mesmo autor passou a utilizar o termo Itapecuru para os sedimentos ocorrentes nas costas oriental do estado do Pará e ocidental do Maranhão, posicionando-a entre as Formações Codó (sotoposta) e Piranhas (sobreposta). Vários autores como, Barbosa et al. (1966), Molnar & Urdinéa (1966), Aguiar (1971), Costa et al. (1977), Lima & Leite (1978), Petri & Fúlfaro (1983), teceram comentários em seus trabalhos, sobre as litologias desta formação e suas relações de contato com as unidades adjacentes.

¹ CAMPBELL, D. F. 1946. Quartz crystal deposits in the state of Goiás - Brasil. *Economic Geology*, Lancaster - Pa. v.41. n.8. p.773-799.

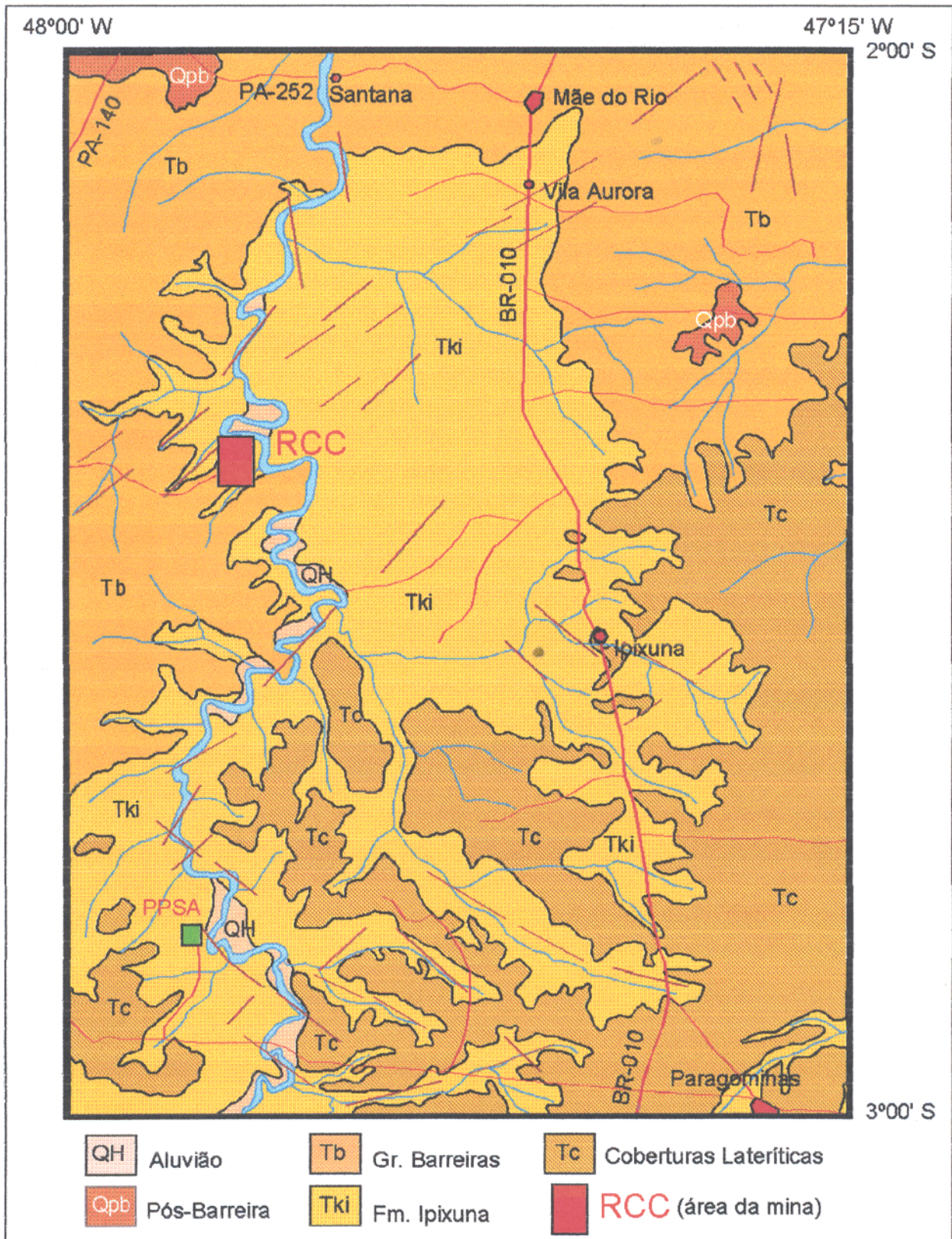


Figura 2 - Mapa Geológico simplificado da porção NE do Estado do Pará. Fonte: CPRM, no prelo.

A Formação Itapecuru é constituída por arenitos argilosos avermelhados médios a grosseiros com faixas conglomeráticas, estratificação plano paralela incipiente e cruzada. Ocorrem intercalações de argilitos e siltitos argilosos de coloração variegada, além de arenitos caulínicos avermelhados e esbranquiçados, finos a médios com estratificação cruzada de grande porte (Góes, 1981; Santos et al., 1984; Cunha & Del'arco, 1988; Colares & Cavalcanti, 1990).

Góes (1981) descreveu os sedimentos Itapecuru como sendo constituídos por arenitos médios, localmente feldspáticos, conglomeráticos e siltitos subordinados, ricos em estratificação cruzada tangencial e acanalada, o que está concordante com outros autores (Petri, 1977; Lima et al., 1979).

Em termos do ambiente geológico, Lima et al. (1979) consideram que os sedimentos da Formação Itapecuru foram depositados em ambiente fluvial, com faixas lacustrinas e planícies de inundação sob condições de um clima semi-árido, por apresentar um caráter fortemente oxidante dos seus sedimentos. Francisco et al. (1971) e Góes (1981) sugerem um ambiente flúvio-lacustre para a deposição destes sedimentos. Já para Almeida et al. (1995), o paleoambiente deposicional dessa formação relaciona-se predominantemente a um sistema fluvial de rios entrelaçados, com variação de energia, depósitos de lagos na planície de inundação e eólicos provenientes do retrabalhamento dos depósitos fluviais em porção proximal a mediana.

Em relação a idade, Price (1947), encontrou na Ilha de Livramento, próximo à cidade de Alcântara, uma vértebra de dinossauro e outros fragmentos de ossos que indicam idades posteriores ao Triássico e anterior ao Terciário, atribuindo aos depósitos sedimentares, flúvio-lacustre, a idade cretácea. Mesner & Wooldridge (1964) definiram esta formação como sendo de idade albiana baseados em registros palinológicos, estabelecendo sua correlação com a Formação Tutóia, da Bacia de Barreirinhas. Klein & Ferreira (1979) na área de ocorrência da Fm. Itapecuru, na região de São Luís, baseado na assembléia fossilífera existentes naqueles sedimentos, constataram que os mesmos são de ambiente estuarino, e sugerem idade cenomaniana para esse conjunto. Colares & Araújo (1987) estudaram raros moldes internos de foraminíferos e crustáceos (?), dentes e escamas de peixes mal preservadas, supostamente colocados no Eo-Cretáceo (Tabela 1).

1.4.3 Formação Ipixuna

O termo Formação Ipixuna foi definido por Francisco et al. (1971) para caracterizar os sedimentos que afloram desde 60 km a sul de São Miguel do Guamá (PA) até 31 km a norte de Imperatriz (MA). São sedimentos arenosos caulínicos intercalados por argilitos vermelhos subordinados que possuem estratificação cruzada em abundância. Esta formação posiciona-se de forma discordante, tanto sotoposta (Formação Itapecuru) quanto sobrepostamente (Formação Barreiras). Os mesmos autores sugeriram deposição em ambiente flúvio-lacustre e idade provável no Terciário Inferior.

Tabela 1 - Coluna Estratigráfica Regional do NE do Estado do Pará (*).

ERA	PERÍODO	ÉPOCA		ESTRATIGRAFIA
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	HOLOCENO		Depósitos Recentes
		PLEISTOCENO		Aluviões
	TERCIÁRIO	MIOCENO	SUPERIOR	Fm. Barreiras
			INFERIOR	Fm. Pirabas
MESOZÓICO	CRETÁCEO			Fm. Ipixuna Fm. Itapecuru
PALEOZÓICO			Arenito Guamá	

* segundo Truckenbrodt & Kotschoubey (1981), Truckenbrodt & Alves (1982); Petri & Fúlfaro (1983); Arai et al. (1988); Rossetti et al. (1989).

Góes (1981) adotou o termo Fácies Ipixuna, para os sedimentos em questão. Propôs a divisão desta unidade em dois conjuntos litológicos, A e B, sem no entanto, definir suas relações estratigráficas. O primeiro fácies, constituído por arenitos brancos (caulínicos) com estratificação cruzada tangencial, sendo restritos siltitos e argilitos vermelhos. O segundo, corresponde a ritmitos de argilitos e arenitos brancos, finos, caulínicos, possuindo estratificação cruzada e lentes de caulim.

Os sedimentos Ipixuna, sotopostos aos sedimentos Barreiras em discordância erosiva (Francisco et al., 1971) são bastante similares aos da Fm. Itapecuru e portanto interpretados por Góes (1981) como um fácies desta formação. Esses dois autores sugerem um ambiente flúvio-lacustre para a deposição destes sedimentos.

Segundo Kotschoubey et al. (1996) esta formação consiste de arenitos caulinizados, fortemente desferrificados e argilitos caulínicos intercalados. Os arenitos, que exibem geralmente estratificação cruzada ou plano-paralela, são compostos, além de quartzo, de pseudomorfos de caulinita bem cristalizada a partir de feldspato e de menores quantidades de anatásio, mica e fosfato de alumínio da série goyazita-crandallita.

1.4.4 Formação Pirabas

Os calcários desta formação foram mencionados pela primeira vez por Penna² apud Santos et al. (1984) na localidade de Ilha da Fazenda, distrito de São João de Pirabas, hoje Salinópolis, e originalmente descritos por White³ apud Ferreira & Francisco (1988) e datadas como sendo do Cretáceo. Ackermann (1964) que correlacionou-os com os calcários das bacias cretáceas da costa de Pernambuco e Sergipe. Maury⁴ apud Costa et al. (1977) observou grande semelhança da fauna de Pirabas com as encontradas na Flórida e na República Dominicana; propôs que estes calcários fossem denominados de Formação Pirabas e posicionados no Mioceno Inferior.

Outros afloramentos foram encontrados em Capanema e Peixe-Boi. Só a partir de 1955 é que se realizaram estudos sistemáticos desses calcários, com objetivos econômicos, como matéria prima na fabricação de cimento. Ackermann (1964, 1969) com base em dados químicos e litológicos, dividiu esta formação em três fácies: Capanema, Olaria e Fortaleza, o que posteriormente foram elevados à categoria de membros.

A litologia se caracteriza por leitos de calcário, ricamente fossilíferos, de coloração amarelada ou acinzentada, alternados com argilas e areias. Às vezes são calcários duros, de

² PENA, D.S. F. 1876. *Breve Notícia Sobre os Sambaquis do Pará*. Arquivos do Museu Nacional, Rio de Janeiro, 1: 85-89.

³ WHITE. 1877. *Contribuição à paleontologia do Brasil*. Arquivo do Museu Nacional. Rio de Janeiro. 7:1-273.

⁴ MAURY, C.J. 1925. *Fósseis Terciários do Brasil com descrição de novas formas Cretáceas*. Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, Monografia n.4., 665p.

coloração cinza, intercalados com camadas de argila calcífera, em leitos sucessivos, que formam a base dos sedimentos da formação. Na parte superior o calcário é duro, compacto, disposto em camadas horizontais, muito fossilífero. A fauna fóssil não teve uma distribuição uniforme, sendo muito rica em brachiópodos, cefalópodos, e mais comumente, foraminíferos (CPRM, 1976).

A origem e a evolução da Formação Pirabas é atribuída a grandes períodos de transgressão e regressão, com deposição de carbonatos de cálcio em ambientes marinhos, sucessivamente retrabalhados, seguindo-se de novas deposições.

1.4.5 Grupo Barreiras

O termo Barreiras foi primeiro empregado por Moraes Rego⁵ apud Santos et al. (1984) para caracterizar a semelhança entre os sedimentos terciários que compõem os baixos platôs amazônicos e os tabuleiros do litoral norte, nordeste e leste brasileiro, denominados Série Barreiras.

Os sedimentos denominados “Barreiras” tem suscitado inúmeras dúvidas e discussões quanto a sua caracterização e posicionamento estratigráfico. Matoso & Robertson (1959), usou a denominação “Formações Cenozóicas Indiferenciadas”. Bigarella & Andrade (1964), adotaram a designação Grupo Barreiras, criticando ao mesmo tempo o uso do nome Série ou Formação.

Ackermann (1964, 1969) descartou a possibilidade de haver correlação entre a Série Barreiras do Baixo Amazonas com as da região Bragantina, devido a ausência de horizontes coloridos e a abundância de sedimentos arenosos, sendo o fator importante de reconhecimento, a presença de solos lateritizados e o “Grês do Pará”.

Góes (1981) adotou o termo Grupo Barreiras de Bigarella & Andrade (1964) para os sedimentos aflorantes na região Bragantina e Salgado, com exceção dos sedimentos holocênicos. Propôs a subdivisão em três litofácies: Fácies Conglomeráticas (basal); Fácies Argilo-arenosa (intermediária) e Fácies Arenosa, sendo que as duas últimas fácies são correlacionáveis às Formações Guararapes e Riacho Morno, respectivamente, aflorantes no nordeste brasileiro.

Para Rossetti (1988) os sedimentos do Grupo Barreiras no nordeste do Pará, depositaram-se através de um sistema de leques aluviais – planícies de areia e planície de lama, com possível

⁵ MORAES REGO, L. F. 1930. *Notas sobre a geologia dos territórios do Acre e da Bacia do Javari*. Manaus. C. Cavalcante. 45p.

influência de marés nas regiões mais distais do sistema. A mesma autora em 1989, definiu como sendo de idade Plio-Pleistocênica ou mesmo Miocênica, sendo constituída por conglomerados com intercalações de sedimentos arenosos e argilosos, de ambiente de maré a flúvio-lacustres.

Arai et al. (1988) com base em dados palinológicos (esporo de Crassoretitiletes vanraadshooveni), consideraram que a deposição desta unidade deu-se em parte, no Mioceno. A presença de dinoflagelados e restos de microforaminíferos, consideram a possibilidade de certa contribuição marinha na deposição do Grupo Barreiras em sua porção mais costeira.

Martins et al. (1991) constataram em arenitos finos a médios estratificados a presença de icnofósseis Ophiomorpha, no município de Castanhal (NE do Pará). A presença desse icnofóssil nos sedimentos do Grupo Barreiras comprova a influência marinha nesta unidade e associada à presença de lâminas de argila recobrando os *sets* e *foresets* de estratificações cruzadas, definiram tratar-se de um ambiente transicional flúvio-marinho associado provavelmente à planície de maré.

2 – METODOLOGIA DE TRABALHO

As etapas de trabalho foram basicamente desenvolvidas sob três aspectos: as *atividades pré-campo*, *atividades de campo* e *atividades de laboratório*.

Algumas etapas dos procedimentos laboratoriais não puderam ser descritas na sua totalidade devido serem rotinas de laboratório e por se acharem a disposição de qualquer usuário nos laboratórios mencionados; no caso das análises de caracterização física realizadas no laboratório da Rio Capim Caulim, em Barcarena, são procedimentos com cópias controladas e portanto, não serão descritos na sua íntegra.

2.1 ATIVIDADES PRÉ-CAMPO

Foram realizadas pesquisas bibliográficas sobre ocorrências de caulim na Amazônia, fixando-se inicialmente nos estudos já realizados na região do Rio Capim, além de outros depósitos ou ocorrências de caulim no país e no mundo. Também foram pesquisados trabalhos de caráter tecnológico.

Utilizou-se mapa planialtimétrico, escala 1:100.000, do Serviço Geográfico do Exército (Folha de Mãe do Rio e Candiru-Açu) onde foram localizados as demais ocorrências e minas de caulim do Rio Capim. Foi confeccionado mapa de localização com ênfase as principais cidades e ao local da mina em questão.

2.2 ATIVIDADES DE CAMPO

Foram realizadas duas viagens de campo: a primeira realizada no período de 18 a 20 de novembro de 1997, como reconhecimento da área, além de selecionar os alvos a serem investigados e os possíveis problemas a serem resolvidos. Utilizou-se GPS (Magellan 3000) para verificação das coordenadas da cava da mina.

Uma segunda viagem de campo foi realizada no período de 22 de julho a 02 de agosto de 1998. Nesta, foram confeccionados perfis e seções geológicas, com ênfase aos horizontes caulínicos, bem como os sedimentos arenosos superpostos e o perfil de intemperismo, além da influência do papel da lateritização. Foram coletadas amostras em diversas profundidades, dentro da cava e nas bancadas laterais da mina (especificamente do corpo "D") com confecções de perfis

representativos e descrições dos diversos litotipos e suas variações, além das formas de contato, a cor, a geometria, as estruturas e o arranjo textural presente e suas inter-relações. Foram coletadas um total de 92 amostras com cerca de 2 kg cada. As amostras coletadas, bem como testemunhos de sondagem, produção da mina e mapa de localização foram fornecidos pela RCC.

2.3 ATIVIDADES DE LABORATÓRIO

Nesta etapa, as amostras coletadas foram analisadas em laboratório, as quais envolveram tratamento ou preparação das mesmas e utilização de diferentes técnicas instrumentais de análises, tais como análises químicas por via úmida, espectrometria de absorção atômica, difratometria de raios X (DRX), microscopia ótica, análises termodiferencial (ATD) e termogravimétrica (ATG), espectroscopia de absorção no infravermelho (EIV), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análises de caracterização físicas como: percentagem de resíduo em malha de 325 mesh, percentagem do tamanho da partícula abaixo de $2\mu\text{m}$, alvura, índice de amarelidez e viscosidades pelos métodos "Brookfield" e "Hercules".

2.3.1 Preparação das amostras

A preparação das amostras consistiu em secagem ao ar e desagregação manual seguida de quarteamento sistemático. Parte da amostra é arquivada e o restante dividido entre análises pelos métodos químicos e caracterização físicas.

Foram confeccionadas 10 lâminas polidas de caulim por impregnação no laboratório de geologia (Geolab) da Petrobrás. Também foram confeccionadas 18 lâminas de minerais pesados, no Laboratório de Sedimentologia do CG/UFPa, sendo a metade representativo da fração grossa que compreende o intervalo granulométrico de $<250\mu\text{m}$ a $>125\mu\text{m}$ e a fração fina, com intervalo de $<125\mu\text{m}$ a $>62\mu\text{m}$. A identificação e quantificação da assembléia dos minerais pesados, com ênfase na comparação dos minerais oriundos do caulim *soft* (ROM) e caulins descritos por outros autores na Amazônia.

Foram necessárias algumas centenas de miligramas de amostras pulverizadas (granulometria 325 mesh) para as análises por difração de raios X pelo método do pó; na preparação das lâminas orientadas foram necessárias aproximadamente 150 gramas de amostra de caulim (ROM) que foram desagregadas e homogeneizadas em água destilada, seguido de

peneiramento em malha 230 mesh (o passante representa a fração silte mais argila), foi necessário 30 a 40% em volume de defloculante (pirofosfato de sódio). A mistura foi levada à centrífuga por 2 minutos a 1000 rpm e o decantado foi rejeitado; o material em suspensão é recolocado na centrífuga por 10 minutos e 2000 rpm; o decantado é reaproveitado e lavado com água destilada por duas vezes, nas mesmas condições, para total remoção do defloculante. Os argilominerais que precipitam representam frações abaixo de 2 μ m e em seguida é pipetado em lâmina de vidro e seco ao ar, para posterior leitura ao difratograma de raios X, etapa esta conhecida como leitura normal.

As lâminas orientadas foram glicolizadas por 8 horas em dissecador com ar saturado em etilenoglicol e novamente submetidas a DRX. Este procedimento serve para verificar a presença de picos de outros argilominerais expansíveis que possam estar superpostos pelos picos da caulinita. Finalmente aquecidas em mufla a 550 °C por 2 horas e resfriadas lentamente, para posterior análise por DRX, o que nessa temperatura a caulinita perde suas características estruturais e conseqüentemente seu picos, expondo caso haja, outros argilominerais no difratograma. A faixa de exposição à DRX das três etapas: normal, glicolizada e aquecida foi de 3 a 33° 2 θ .

2.3.2 Métodos Analíticos

2.3.2.1 Microscopia Óptica

Nas análises microscópicas foram utilizados microscópio da CARL ZEISS, modelo AXIOLAB POL, com luz transmitida e refletida, ocular de 10X e objetivas de 2,5X, 10X e 50X, acoplado com máquina fotográfica MC200 CHIP, o trabalho consistiu basicamente da descrição textural e mineralógica das lâminas polidas de caulim impregnado e identificação e quantificação da assembléia de minerais pesados. Também foi utilizado uma lupa da marca ZEISS, modelo STEMI SV 11, com ocular de 10X e zoom de 0,6 a 6,6X acoplado com equipamento fotográfico para descrição das amostras de mão. Estes equipamentos pertencem ao Laboratório de Gemologia do Grupo de Mineralogia Aplicada da Amazônia.

2.3.2.2 Difractometria de raios X (DRX)

As amostras foram submetidas a análises por DRX por dois métodos de preparação: o primeiro pelo *método do pó* (amostra total), para identificar os minerais existentes, e *lâmina orientada* (tratamento normal, glicolizadas e aquecidas) para os argilominerais. Neste, além da obtenção de parâmetros cristaloquímicos, é possível a determinação do índice de cristalinidade da caulinita, conhecido como Índice de Hinckley (IH), obtido através da distância interplanar na faixa de 18° a 26° (2Θ), com destaque aos planos $\{110\}$ e $\{11\bar{1}\}$ da caulinita.

As análises foram feitas utilizando difratômetro da marca PHILIPS, modelo PW 3710 BASED, equipado com ânodo de cobre ($\lambda_{CuK\alpha_1} = 1,54060\text{\AA}$), com monocromador e gerador de tensão e corrente ajustados para 45 kV e 40 mA, respectivamente. Os registros foram realizados no intervalo de exposição de 5° a 65° 2Θ para o método do pó e de 3° a 33° Θ para as amostras orientadas. Para o método do pó, utilizou-se o software APD (PHILIPS) para tratamento digital dos registros obtidos e o software MINERVA, como banco de dados das fichas dos picos dos minerais encontrados (baseados no ICDD – International Center for Diffraction Data). O equipamento pertence ao Laboratório de Difração de Raios X do Centro de Geociências da UFPa e está sob a responsabilidade do Grupo de Mineralogia Aplicada.

2.3.2.3 Análise química

As análises químicas foram feitas por via úmida, sendo os elementos maiores como SiO_2 por gravimetria (e PF), Al_2O_3 por compleximetria (EDTA), Fe_{total} , TiO_2 por colorimetria e Ca, Mg, Na, K, foram analisados por espectrometria de absorção atômica. Os elementos traços: Zn, Cu, Ni, Co, Cr e Mn, também foram analisados pelo método citado anteriormente. Estas análises foram feitas no Laboratório de Análises Químicas do Centro de Geociências da UFPa.

2.3.2.4 Espectroscopia de Absorção no Infravermelho (EIV)

Os aparelhos de infravermelho medem o espectro vibracional de uma amostra passando radiação infravermelha através dela e registrando quais comprimentos de onda são absorvidas. Como a quantidade de energia absorvida é uma função do número de moléculas presente, o aparelho de infravermelho fornece informação qualitativa e quantitativa. O espectro registrado é o gráfico da transmitância da amostra em função da frequência (ou do comprimento de onda) da

radiação. Este espectro é uma propriedade fundamental da molécula que pode ser usado tanto para caracterizar a amostra quanto para determinar sua concentração.

Este é um método qualitativo, não destrutivo e que pode fornecer dados importantes a respeito da composição e da estrutura interna dos cristais. Foi utilizado 0,7mg de amostra pulverizada e misturado com 200mg de brometo de potássio (KBr) como dispersante, formando uma matriz homogênea. Com esta mistura confecciona-se pequenas pastilhas em uma prensa, aplicado-se uma pressão de 700 kg/m^2 , que serão submetido a análise e que tem a propriedade de ser invisível aos raios infravermelhos.

O equipamento utilizado é um espectrofotômetro *Perkin-Elmer*, modelo *1760 X FT-IR*, acoplado a um microcomputador, com registros da faixa espectral de 4000 a 400 cm^{-1} , com medições a cada 4 cm^{-1} , os dados foram transformados em arquivos numéricos tipo *XY* (ascii) pelo *software Infra*, desenvolvido pelo prof. Thomas Scheller e plotados no *software Origin 4.1*. Este equipamento pertence ao Centro de Geociências (CG) e está sob responsabilidade do Grupo de Mineralogia da Amazônia (GMA).

Foram analisadas 18 amostras de caulim por este método visando a identificação das bandas de absorção dos determinados grupos funcionais desse mineral, além de caracterizar o grau de cristalinidade da caulinita.

2.3.2.5 Análises Termogravimétricas (TG) e Termodiferencial (ATD)

O equipamento utilizado para as análises conjugadas TG e ATD foi o modelo PL Thermal Sciences com analisador térmico simultâneo STA 1000/1500, da Stanton Redcroft Ltd, que tem forno cilíndrico vertical, com conversor digital acoplado a um microcomputador. Cadinho de platina, peso da amostra entre 10 a 14mg, com registros normalizados para 10mg, o que facilita a comparação das diversas análises, aquecimento de $20^\circ \text{ C/minuto}$, temperatura inicial e final variando de 35° a 1100° C respectivamente, e correção de linha base via *software Termoplot*, desenvolvido pelo prof. Thomas Scheller. Foram analisados um total de 18 amostras e tratados graficamente no *software Origin 4.1*. Este equipamento está sob responsabilidade do Grupo de Mineralogia da Amazônia (GMA).

2.3.2.6 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As análises consistiram em colocar pequenos fragmentos e seções polidas de caulim e minerais pesados como anatásio num porta amostra e que recebeu pulverização (metalização) em ouro para obtenção de imagens. Os objetivos destas análises são visualizar os aspectos micromorfológicos, tamanho dos cristais, além das análises semi-quantitativas.

As imagens por MEV foram realizadas nos laboratórios da Universität Halle-Wittenberg, em Halle (Alemanha), pela equipe do prof. Dr. Herbert Pöllmann, através do equipamento JEOL JXA-6300 e no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Departamento de Minas da UFMG, pelo colega doutorando Oscar Choque Fernandez, usando o microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL modelo JSM-5410, acoplado Sistema de Energia Dispersiva (SED) da NORAN.

As microanálises químicas efetuadas em duas seções polidas e quatro partículas de caulinita (*booklets*), assim como as imagens de dez minerais pesados.

2.3.2.7 Quantificação do Resíduo, Granulometria, Medição da Alvura e Viscosidade

As principais etapas serão descritas de modo resumido, tentando-se ao máximo expressar a idéia ou finalidade do método, sem portanto, dar muita ênfase as etapas analíticas.

Foram utilizadas para essa caracterização os seguintes equipamentos: agitador/misturador (Warring blender), peneiras com malhas 325 e 100 mesh, estufa FANEM (110 ± 10 °C), centrífuga FANEM (modelo GF-8), densímetro de vidro e cilíndrico de metal, medidor de pH Toledo (Mettler 320), sedígrafo da Micrometrics (modelo sedigraph 5100), medidor de alvura da Technibrite (TB-1C), viscosímetro de Brookfield (modelo RVD VI+), viscosímetro de alto cisalhamento Hercules (modelo DV-10), separador magnético CARPCO (5T/75), banho térmico (temperatura de 26,1 °C), além de vidrarias e acessórios de laboratório. Os reagentes usados são: solução dispersante com concentração de 15% (poliacrilato de sódio - 40% + barrilha, nome comercial do Na_2CO_3 - 60%), floculante (H_2SO_4 - 10%), alvejante ditionito de sódio, mais conhecido como hidrossulfito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) grau comercial, tetrapirofosfato de sódio (TSPP - 0,01%).

Na primeira etapa do processo de caracterização física, a determinação da **percentagem de sólido**, pesa-se 200 gramas de amostra de caulim bruto (ROM), previamente seco em estufa, e desagregado em equipamento Waring Blender, numa suspensão aquosa com 1,6 % de dispersante

(40% poliacrilato de sódio + 60% carbonato de sódio - "barrilha") e relação amostra / água de 1:1, agitado em *blender* a 1500 rpm por 3 minutos e passa-se em peneira de 325 mesh, sendo que o retido corresponde a **percentagem de resíduos** encontrados nesta amostra (este parâmetro físico vai indicar o teor de minério existente). A utilização de dispersante é para evitar que a caulinita forme flocos. Essa característica é uma função da atração entre as partículas, causadas pelas cargas elétricas opostas, que segundo Hosking (1986) existem na superfície da caulinita, dificultando a sua precipitação e de certo modo processo de peneiramento.

O que passou pela peneira de 325 mesh foi então centrifugado por 22 segundos a 2750 RPM, portanto, padronizado para obter granulometria do produto DG. O decantado é rejeitado e do sobrenadante, mede-se a densidade da polpa (densímetro de vidro), calcula-se a **percentagem de sólidos das partículas com diâmetro inferior a 2 μ m**. Para se certificar deste procedimento, padroniza-se uma alíquota de 21,85 gramas da polpa (o que corresponderia a 6 gramas de amostra seca, com base na percentagem de sólidos) com 53,15g de tetrapirofosfato de sódio (TSPP 0,01%) e leva-se ao sedígrafo para medir o percentual de massa cumulativa com diâmetro inferior a 2 μ m.

A granulometria é determinada com o equipamento *Sedigraph 5100* da *Micrometrics*, que vai indicar a percentagem das partículas a 2 μ m, parâmetro fundamental para indústria de processamento de caulim.

Na determinação da **alvura** utilizou-se o equipamento *Technibrite Micro TB-1C*, calibrado com um padrão de óxido de magnésio (MgO) ou sulfato de bário (BaSO₄), e feixe de luz com comprimento de onda de 457nm, o valor da alvura é expresso em percentagem de reflexão em relação ao padrão MgO puro na escala GE (padrão *General Electric*) e ao padrão de sulfato de bário, na escala ISO (padrão de normalização internacional).

Pesa-se 300 gramas de amostra seca (amostra tratada após a medida de alvura) acrescenta-se 128 gramas de água (padrão DG - 70% de sólidos), mistura-se por 15 minutos a 7000 RPM, após, leva-se ao banho-maria a 26,1 °C. Passa-se em peneira de malha 100 mesh, para a retirada de bolhas de ar, caso a amostra ultrapasse o valor de 70 % de sólidos requeridos, faz-se a correção acrescentado-se água. Mede-se as **viscosidades**.

Na separação magnética, foi usado o equipamento da planta piloto, que tem como base de funcionamento a criogenia (hélio líquido) com temperatura próxima do zero absoluto, e que remove impurezas como óxidos de ferro e titânio.

Em seguida, uma alíquota da polpa é pesada, e acrescenta-se o alvejante químico ditionito de sódio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$) também conhecido como hidrossulfito de sódio, na proporção de 0,8 grama para 400 gramas de caulim seco, ou seja, 2 kg/ ton. Deixa-se repousar por 5 minutos e corrige-se o pH para que fique na faixa de 2,5 e 3 com 0,5 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4) a 10%. É retirado a umidade em kitassato. A seguir, procede-se as etapas de redispersão, recolhe-se a amostra em becker e adiciona-se 5 ml de dispersante e faz-se a mistura. A cada etapa mede-se a viscosidade (100 RPM por 1 minuto) com as alíquotas de 1 ml a cada etapa, anotando-se os valores. Como os valores da viscosidade tendem a diminuir com o acréscimo de dispersante, nas primeiras etapas, seguido da estabilização ou aumento, ter-se-á conseguido o valor correspondente da quantidade ideal de dispersante ou “ponto ótimo” de dispersão. Leva-se a amostra à estufa para secar (100 °C) para posterior etapa de viscosidade de baixo e alto cisalhamento.

Parte desses procedimentos são, em muitos casos, uma variação das normas TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry) ou adequação às exigências dos compradores.

Estas análises foram realizadas no Laboratório de Caracterização Física da RCC, em Barcarena, nos períodos de 10 a 14 de maio e de 17 a 20 de agosto de 1999, em estágio realizado pelo autor deste trabalho e muitas etapas desses procedimentos são de cópias controladas, portanto, de divulgação restrita ao laboratório da empresa.

2.3.2.8 Análise Granulométrica

Análise sedimentológica convencional foi realizada em 8 amostras de sedimentos arenosos com o objetivo de caracterizar a distribuição granulométrica (% em peso). As amostras foram previamente lavadas para a retirada da fração argila, secas em estufa e passadas em um conjunto de 11 peneiras (# 2mm/ 1,41mm/ 1mm/ 0,71mm/ 0,50mm/ 0,35mm/ 0,25mm/ 0,177mm/ 0,125mm/ 0,088mm/ 0,062mm). Separadas em duas frações (grossa: $\leq 0,25\text{mm}$ a $>0,125\text{mm}$ e fina $\leq 0,125\text{mm}$ a $>0,062\text{mm}$) e passadas em líquido pesado (bromofórmio, densidade $2,85 \text{ g/cm}^3$) e confeccionado lâminas de minerais pesados com a finalidade de se identificar e

quantificar a assembléia de minerais pesados e compará-los com as lâminas oriundas dos pesados do minério de caulim.

2.3.2.9 Separação da fase de minerais pesados por DRX.

Durante a coleta das amostras, em campo, procedeu-se a pré-concentração sistemática dos minerais pesados do horizonte caulínico, visto que são visíveis estruturas reliquiares tipo laminação plano paralela ricas nesses minerais. A seguir, esse material foi lavado com água e desagregado com auxílio do ultra som até a total remoção da caulinita e passado em peneira 0,25mm. A separação dos minerais pesados, bem como dos cristais de zircão obedeceu a sistemática utilizada pelo Laboratório de Geocronologia (Paraiso) do CG/UFPa, que consiste em utilizar o separador magnético de Frantz, com suas etapas e de separação e posterior passagem em líquido pesado (bromofórmio, densidade 2,85 g/cm³), ver Tabela 2.

Tabela 2 – Procedimentos de segregação de minerais pesados por separador magnético Frantz.

Etapa	Ângulo lateral	Ângulo Frontal	Amperagem	observação
1	30°	25°	0,5A	repassar os não magnéticos
2	25°	25°	0,5A	Idem
3	20°	25°	1 A	Idem
4	15°	25°	1,5A	Idem
5	10°	25°	1,5A	Idem
Separação com líquido pesado – Bromofórmio				segue com o decantado próxima etapa
6	5°	20°	1,5A	repassar os não magnéticos
7	4°	20°	1,5A	Idem e preconcentração
8	3°	20°	1,5A	Idem
9	2°	20°	1,5A	Idem
10	1°	20°	1,5A	Idem
11	0°	20°	1,5A	Idem
12	0°	20°	1,5A	Preconcentração de minerais

Na etapa número 1, após passar no Frantz, os minerais magnéticos são descartados, passando as etapas seguintes os minerais não magnéticos; ao término da 5ª etapa, são passados em bromofórmio, e seguidas as etapas posteriores até a separação dos minerais 0° não magnéticos. Essa técnica é utilizada para se obter uma preconcentração de determinados minerais ou grupo de minerais com características magnéticas similares, para posterior análise por DRX.

3 – O CAULIM

3.1 - ASPECTOS MINERALÓGICOS

Os termos “kaolin” e “kaolinite” tiveram origem na pequena localidade conhecida como Kau-ling (que significa colina alta) e se referia a uma colina perto da cidade de Jau Chun Fa pertencente à província Jiangxi, ao norte da República Popular da China, local onde se extraía uma argila branca usada na produção de porcelana (Branco, 1982; Murray, 1988a; Klein & Hurlbut, 1993; Chen et al., 1997).

Caulinita é o nome dado ao argilomineral, silicato de alumínio hidratado, de fórmula mínima $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, enquanto o termo caulim designa o produto composto principalmente de caulinita (ou outro mineral pertencente ao grupo da caulinita) além de quartzo, mica, feldspato, óxido de Fe, Al e Ti como impurezas de maior ocorrência. A caulinita é o mineral mais importante e mais comum do grupo da caulinita. Esse grupo é composto pelos minerais: caulinita, halloysita, dickita e nacrita (Murray & Keller, 1993).

A caulinita é um argilomineral branco e o termo caulim é usado para denominar tanto a rocha que contém a caulinita quanto o produto resultante do beneficiamento da mesma. O termo “China Clay” é frequentemente usado na língua inglesa, e muitas vezes na literatura em português como sinônimo de caulim.

Mineralogicamente, a caulinita possui uma estrutura em camada do tipo 1:1 (T-O), sendo constituída por duas folhas superpostas: uma composta por tetraedros (Si-O) e outra por octaedros tipo gibbsita ($AlOOH$) (Giese, 1988) ver Figuras 3 e 4 feitas no software *Atoms* v.3.2. A ligação entre as camadas é feita por ligações de H^+ entre átomos de O^{2-} e grupamentos de OH (com este, as forças são do tipo Van der Waals, por pontes de hidrogênio) ligações estas consideradas fracas, embora os íons dentro das folhas estejam ligados fortemente. A ligação entre as folhas T-O ocorre através do oxigênio comum. Na folha octaédrica os íons alumínio ocupam duas das três posições octaédricas, daí a razão da caulinita ser dioctaédrica (Santos, 1992).

A composição química iônica da caulinita é: $Al_2O_3=39,50\%$, $SiO_2=46,54\%$ e $H_2O=13,96\%$. Apresenta uma clivagem perfeita {001} e simetria triclinica - $P\bar{1}$, dureza 2, densidade 2,6. Usualmente untoso e plástico, sinal óptico negativo, índice de refração variando de 1,553 a 1,570, $2V$ varia de 24° a 50° . A distância interplanar basal (d_{001}) varia de 7,1 a 7,3 Å.

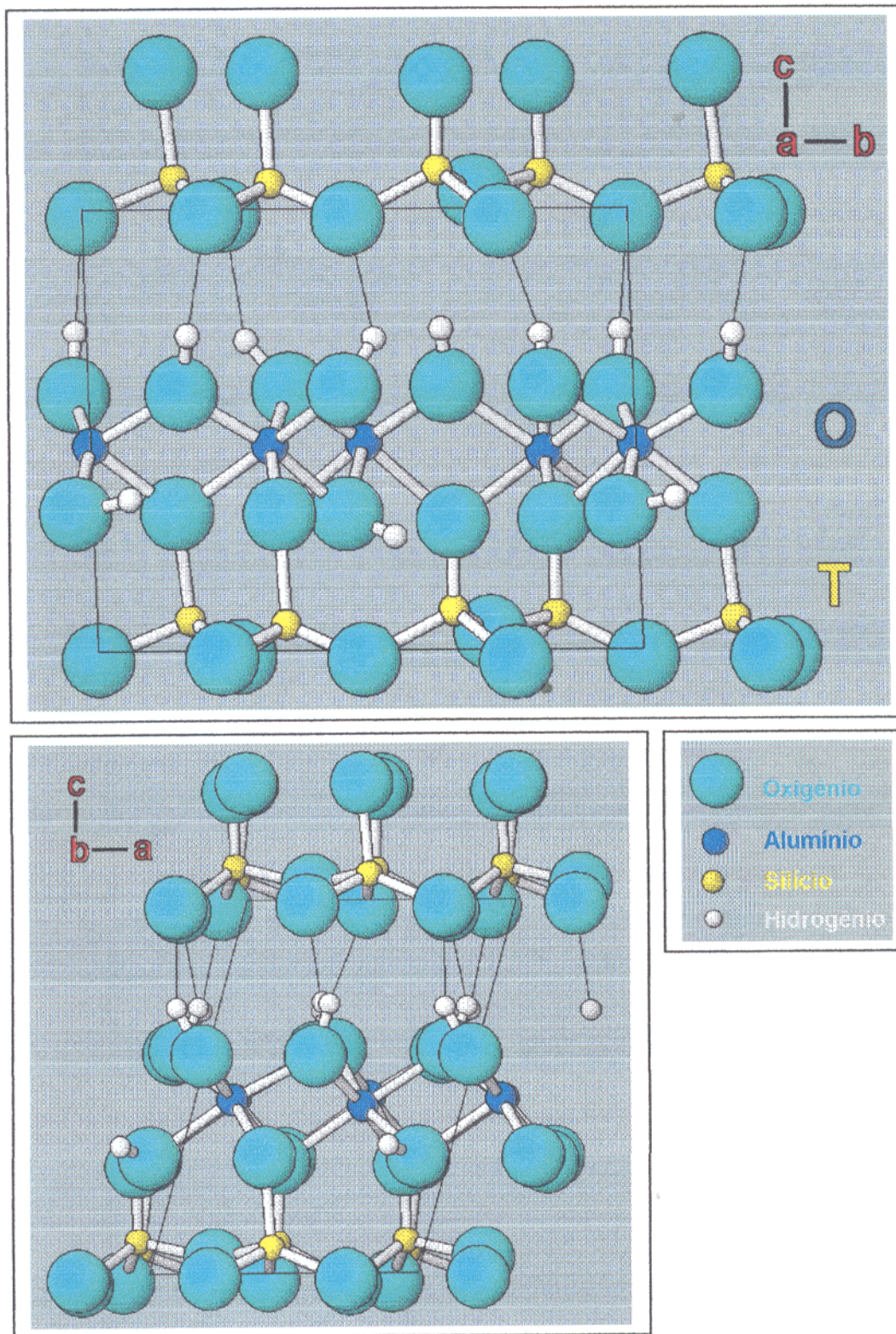


Figura 3 - Estrutura cristalina da caulinita (folhas tipo T-O).

As principais distâncias interplanares difratadas são: 7.15(10), 3.57(10), 2.55(8), 2.49(9), 2.33(10) (Klein & Hurlbut, 1993). Os seguintes parâmetros de cela unitária foram definidos por Bish & Von Dreele⁶ apud Giese (1988):

$$a = 5,15560 \pm 0,00010 \text{ \AA}, b = 8,94460 \pm 0,00017 \text{ \AA}, c = 7,40485 \pm 0,00017 \text{ \AA}$$

$$\alpha = 91,697 \pm 0,002^\circ, \beta = 104,862 \pm 0,002^\circ, \gamma = 89,823 \pm 0,002^\circ$$

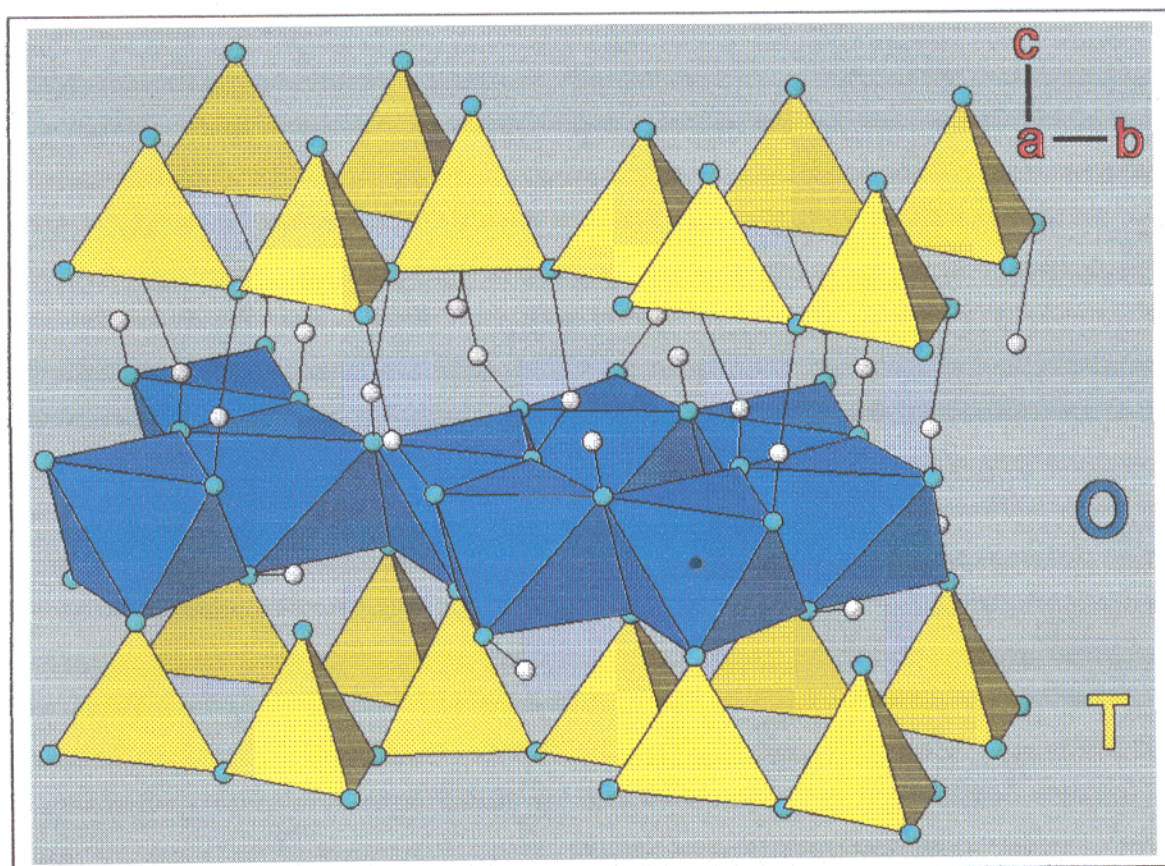


Figura 4 - Arranjo espacial da camada tetraédrica (T) e octaédrica (O) da caulinita.

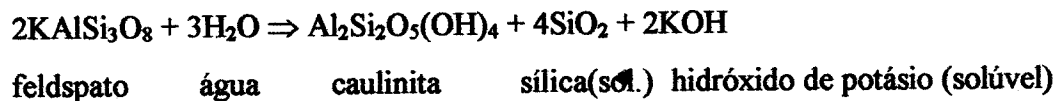
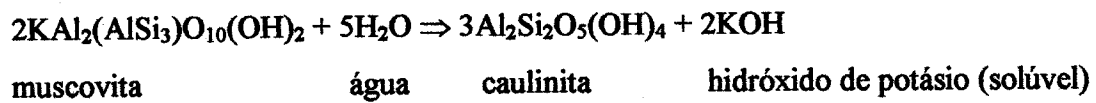
3.2 - TIPOS DE DEPÓSITOS

Os caulins são resultantes da alteração de silicatos de alumínio, particularmente dos feldspatos, podendo ocorrer em dois tipos de depósitos: primário ou residual e secundário. Os depósitos de caulins primários podem ser divididos em intempérico, hidrotermal e solfataras.

⁶ BISH, D. L. & VON DREELE, R. 1988. Rietveld refinement of the crystal structure of kaolinite: Annual Meeting of the Clay Minerals Society, East Lansing, Michigan. (*Abst.*).

Os caulins primários são resultantes da alteração de rochas "in situ". A alteração pode ser decorrente da circulação de fluidos quentes provenientes do interior da crosta, da ação de emanções vulcânicas ácidas ou da hidratação de um silicato anidro de alumínio, seguido de remoção de álcalis. A caulinização é um processo que se desenvolve a máxima intensidade sob clima tropical quente e úmido além de estabilidade tectônica e o fator tempo (Bristow, 1987).

Os caulins de origem intempérica, que além de ocorrer em regiões de clima tropical (quente e úmido) nas quais essas condições físico-químicas favorecem a decomposição dos feldspatos e outros alumino-silicatos presentes em granitos, rochas metamórficas e folhelhos. As condições favoráveis à caulinização são principalmente precipitações excedendo a evaporação, alta permeabilidade da rocha matriz rica em alumínio, favorecendo a percolação da água (Keller, 1970). O processo se dá por hidrólise dos alumino-silicatos e remoção dos elementos alcalinos e alcalinos terrosos, conforme a reação:



Os caulins de origem hidrotermal ocorrem pela alteração de rochas por circulação de fluidos quentes, provenientes do interior da crosta (ou água juvenil). Para que haja circulação desse fluido é necessário que a rocha tenha porosidade e permeabilidade adequada. Os granitos são as "rochas-mãe" mais comum na formação desses depósitos e o exemplo clássico desse tipo de depósito é o de St. Austell, no sul da Inglaterra (Luz & Damasceno, 1994).

Nos depósitos de caulim do tipo solfatara, as rochas são alteradas pela ação de emanções vulcânicas ácidas, constituídos de vapores ou água, ricos em enxofre. Nas rochas vulcânicas o quartzo se encontra em granulometria fina, comparável à da caulinita, tornando difícil a sua remoção, o que o torna abrasivo. O principal uso desse tipo de caulim é na fabricação de cimento branco, onde a presença de sílica e sulfato favorecem as características do produto (Luz & Costa, 1995).

Os caulins secundários são formados pela deposição de materiais transportados do seu local de origem por efeito de ventos, correntes de água, para em seguida serem depositados em lagos, depressões, rios de baixa correnteza e pântanos. Possuem teores muitas vezes superiores a

90%. Possuem via de regra, teores de Ti e Fe mais elevados que os caulins residuais. São exemplos os depósitos da Georgia e Carolina do Sul, e os depósitos do Jari e do Rio Capim, na Amazônia, responsável por 10% das reservas mundiais e 90% das reservas brasileiras (Moraes, 1994).

3.3 - APLICAÇÕES

O caulim é um mineral industrial, no qual a caulinita predominante deve possuir uma granulometria extremamente fina, boa inércia química (faixa considerável de pH entre 3 e 9), ser praticamente branco, possuir alvura elevada e baixa condutividade térmica e elétrica, ser macio e pouco abrasivo. É facilmente disperso em água, e é compatível com quase todos os adesivos (proteína, caseína) devido à sua insolubilidade. Em função dessas e outras características, além do preço competitivo quando comparado com outros materiais alternativos, constitui matéria prima de inúmeros produtos, como carga mineral (ou *filler*) e cobertura (ou *coating*) na indústria papelreira, em cerâmicas, refratários, tintas, fibras de vidro, plásticos, borrachas, pigmentos, adesivos, catalisadores, inseticidas, couros, produtos farmacêuticos e cosméticos, além de dezenas de outras aplicações (Murray, 1986; Murray, 1988b; Prasada et al. 1991; Moreira, 1994; Luz & Costa, 1995; Carvalho & Almeida, 1997).

Os caulins tem duas aplicações distintas na indústria de papel: (a) como cobertura e (b) como carga ou enchimento. O caulim para cobertura (ou *coating*) é adicionado a um adesivo (resina), amido ou caseína e espalhados como uma película que torna a superfície menos absorvente, menos rugosa, mais branca e brilhante. Como cobertura, o caulim deve preencher poros superficiais, com diâmetros que variam de 1 a 5 μ , além de proporcionar ao papel boa receptividade à tinta, opacidade, alvura, brilho e maciez. Caulins para carga (ou *filler*) servem para aumentar a massa específica ou gramatura, encher os vazios com dimensões que variam de 5 a 300 μ e assim economizar celulose (ingrediente básico do papel), reduzindo o custo, além de incorporar ao produto resistência mecânica e ao fogo, impermeabilidade, textura e distribuição superficial, e secundariamente as propriedades citadas nos caulins para cobertura (Hinson, 1972; Moreira, 1994).

As especificações dos caulins dependem do uso a que se destinam, por exemplo, na indústria de papel, requerem-se especificações rígidas quanto à granulometria, alvura e

viscosidade. Para a indústria de cimento as especificações são menos rígidas, sendo a composição química importante. Para as aplicações em cerâmica, são requeridas plasticidade, cor, ponto de vitrificação, retração linear e resistência mecânica à deformação (Murray⁷ apud Luz & Damasceno, 1994).

Os caulins utilizados pela indústria de papel podem ser classificados em quatro categorias: *Premium*, *Standard*, Especiais e Carga. Os caulins do tipo *Premium* são utilizados em impressões de elevada qualidade, alta definição de cores e alto brilho, como em capas de revistas de circulação mais restrita, *folders* de empresas e outros. Para o caulim do tipo *Standard*, as propriedades são menos críticas, no entanto ainda é necessária uma boa superfície de impressão. Existe o tipo de papel LWC (*Lightweight coated paper*) utilizado nas revistas de grande circulação, com menor gramatura, devido aos custos de postagens. O caulim deve ser ainda capaz de produzir um revestimento mais fino, com poder de cobertura e boa suavidade, além de gerar boa qualidade de impressão a um baixo custo (Trivedi & Hagemeyer, 1994).

Caulins Especiais podem ser delaminados e calcinados. Os delaminados são resultantes do cisalhamento de partículas agrupadas na forma de pilhas, separadas através de moagem a úmido com esferas de sílica, este tipo apresenta uma melhor capacidade de cobertura. O caulim calcinado pode ser parcial ou completo. O primeiro, é obtido após tratamento térmico entre 650-700° C, removendo apenas os grupos estruturais de hidroxila, provocando um aumento da opacidade, melhora a absorção de tinta e a impressão final. O segundo, é obtido entre 1000-1050° C, nesta temperatura a caulinita se transforma em uma mistura de mulita, cristobalita e sílica-alumina, essa mudança provoca um aumento no índice de refração (de 1,56 para 1,62), na opacidade e alvura do caulim. Ambos elevam a viscosidade, enquanto que o calcinado, também eleva a abrasividade, o que limita a sua aplicação (Carvalho & Almeida, 1997).

Caulins para carga apresentam melhoria das propriedades óticas do papel como alvura e opacidade, além da redução do custo de fabricação do papel.

⁷ MURRAY, H. H. 1980. Diagnostic test for evaluation of physical properties. *Acta Mineralogica Petrographica*, v.24, 66-77p.

3.4 - RESERVAS

As reservas mundiais de caulim estão concentradas principalmente em cinco países: Estados Unidos (Estado da Geórgia e Carolina do Sul), Brasil, Inglaterra, Austrália e CEI (ex-União Soviética). A produção mundial de caulim destinado à indústria de papel, em 1994, foi da ordem de 23 milhões de toneladas. A recessão global e a mudança do processo de fabricação do papel, de ácido para neutro ou alcalino, foram as principais razões para a redução do crescimento da produção (Kendall⁸ apud Carvalho & Almeida, 1997).

A posição do Brasil é de segundo colocado em termos de reservas mundiais, chegando a atingir 12,7% do total. As reservas brasileiras estão localizadas principalmente nos estados do Amapá (Morro do Felipe), Pará (região do Rio Capim), São Paulo, Bahia, Minas Gerais e Amazonas, representando cerca de 6,7% da produção mundial, e portanto, terceiro maior produtor. As projeções indicam que até o ano 2000 o Brasil se torne o segundo maior produtor de caulim, ficando atrás apenas dos Estados Unidos. Ainda segundo dados fornecido pelo DNPM (Sumário Mineral 1998) a produção brasileira de caulim beneficiado no ano de 1997 ficou em torno de 1,280 milhões de toneladas, contra 1,058 milhões de toneladas em 1996, o que representou um crescimento de cerca de 21% em relação ao ano anterior. A participação do caulim na produção mineral brasileira, em 1998, ficou em 2,02% (Brasil Mineral, 1999).

As reservas de caulim do tipo "carga" estão localizadas principalmente nos estados de São Paulo e Minas Gerais, enquanto no Amapá e Pará encontram-se as reservas do tipo "cobertura". A partir de 1997, com a produção de caulim do Distrito Caulínico do Capim, oriundo do surgimento de dois novos produtores: a Pará Pigmentos (PPSA) com reservas de 70 milhões de toneladas, e Rio Capim Caulim S.A. (RCC), enfoque deste trabalho, com reservas de 120 milhões de toneladas, e somados à produção da CADAM, no Rio Jari, representam cerca de 80% da produção brasileira (Andrade et al., 1994).

Os principais produtores de caulim no Brasil são: CADAM (Morro do Felipe – AP) com 55,3% da produção nacional, RCC com 11,8% (Rio Capim – PA), PPSA com 10,9% (Rio Capim – PA), ECC do Brasil com 8,3% (Mogi das Cruzes - SP) assim como a DBK, majoritária da RCC, ambas são subsidiárias do Grupo IMETAL, Empresa de Caolim com 4,6% (Ubatuba - MG),

⁸ KENDALL, T. 1995. Kaolin, competition intensifying. Raw materials for pigments, fillers and extenders. *Industrial Minerals*.

Mineração Hórii com 3,3% (Mogi das Cruzes – São Paulo). Além dessas, merecem destaque a Mineração Monte Pascoal (Prado – BA), Caulim Azzi (Mar de Espanha – MG), Caulisa, UBM e Talco Ouro Branco (PB), Mineração Tabatinga (Tijucas do Sul - PR), Empresa de Mineração Vanessa e Vânia Ltda (São José dos Pinhais - PR), Irmãos Guilhermino Ltda (Brás Pires - MG), Olivério A. Ribeiro & Cia Ltda (Pântano Grande - RS), Cerâmica Industrial Hardman (Suzano - SP) e Mineração Aruana Ltda (Campo Alegre - SC) Loughbrough, 1993 e Minérios & Minerales, 1999.

A RCC (Rio Capim Caulim) em 1998, obteve uma produção bruta de 398 mil ton. contra 184 mil ton. beneficiada, correspondendo a 0,2527% da participação total na produção mineral brasileira e 11,78% da participação no valor do bem, gerando um faturamento no referido ano, de R\$ 27,755 milhões, sendo que as exportações atingiram o patamar de 173 mil ton., e receita de R\$ 24,4 milhões.

Com a usina de beneficiamento localizada em Barcarena e produzindo caulim para revestimento de papel (são dois tipos de produto final: DG *Delta glossy* e NP *Naturally Platted*), quer na forma de polpa (*slurry*) como a seco, sendo exportado exclusivamente para Europa, EUA, Ásia e América Latina. Planta com capacidade*de alimentação de 440 mil tpa (toneladas por ano) e capacidade de produção de 300 mil tpa, com etapas de processo de dispersão, desareamento (etapas processadas na mina), separação magnética, centrifugação, alvejamento, filtragem e secagem.

Investimentos realizados em 1998 de R\$ 7,8 milhões, e perspectivas de 13,9 milhões para 1999. Possui um contingente de 24 empregados na área administrativa e 111 na área operacional (Brasil Mineral, 1999).

4 – GEOLOGIA DA MINA

A área da mina da RCC constitui-se em uma lavra a céu aberto, sendo utilizado o método de lavra em tiras (*strip mining*). Na época do último trabalho de campo estava sendo lavrada a TIRA-3, correspondente a área de um retângulo, com aproximadamente 700 metros de comprimento por 75 metros de largura. Desde o início de suas atividades, até junho de 1998, a empresa tem enviado o minério bruto (ROM) para a sua unidade de beneficiamento em Barcarena (aproximadamente 590 mil toneladas), onde o minério atravessa por várias etapas, a saber: desareamento (retirada da areia), separação magnética (remoção dos óxidos de ferro e titânio), branqueamento químico (aumento de alvura), filtragem e secagem.

Devido ser uma mina em operação, a mesma oferece importantes facilidades logísticas, tanto do ponto de vista de deslocamento, alojamento, como também de exposição geológica das unidades estudadas causadas pelo decapeamento do minério.

Foi possível distinguir duas grandes unidades estratigráficas (Unidade Inferior e Unidade Superior) separadas entre si por uma superfície discordante erosiva. Esta é caracterizada pela presença de uma paleosuperfície e sobre ela conglomerados, brechas de caulim endurecidos, além de sedimentos argilosos e arenosos.

A **unidade inferior** é formada principalmente de caulim, o minério da jazida. Na base aparente dessa unidade, o caulim é do tipo *soft* e no topo *flint*. Estruturas como acamamento são freqüentes e demonstram a natureza sedimentar da unidade. Feições como concreções ferruginosas (pseudo-óolitos) embora localizados nos filmes de minerais pesados, mostram que a unidade foi afetada pela lateritização. As características sedimentares dessa unidade permitem correlacioná-la com a Formação Itapecuru/Ipixuna e a sua alteração laterítica com a fase Madura, de Costa (1991), mais especificamente com a base dos perfis lateríticos maduros (horizonte argiloso ou saprólito) de Costa op cit., portanto, truncados erosivamente.

A **unidade superior** é formada por sedimentos arenosos na sua porção inferior, com sedimentos siltosos e argilosos na porção mediana e francamente arenosos no topo. Na base, geralmente ocorrem conglomerados/brechas basais constituídos por fragmentos da unidade inferior (caulim *flint*, principalmente). Toda a unidade encontra-se fortemente lateritizada, onde os principais horizontes foram identificados da base para o topo: Horizonte argilo-arenoso intercalados, que apesar de serem restritos na área, são representados por estratificação plano

paralela; sobreposto, ocorre de forma gradativa o horizonte arenoso, com granodecrescência ascendente ao longo do perfil, onde se desenvolvem estruturas do tipo estratificação cruzada acanalada, estratificação cruzada sigmoidal e tangencial. O contato com o horizonte argiloso sotoposto é gradativo, representado por feições típicas de mosqueamento. Sotoposto de forma gradativa, ocorre o horizonte ferruginoso concrecionário, que por sua vez grada para o latosolo amarelo. Por último, o solo. Essas unidades são litologicamente correlacionáveis com a Formação Barreiras e o perfil laterítico sobreposto com os lateritos imaturos de Costa (1991).

4.1 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA UNIDADE INFERIOR

4.1.1 Caulim *Soft* (ROM)

Na base do caulim mineralizado (ROM), correspondente a porção aflorante mais inferior da cava da mina, ocorre uma variação em termos composicionais, com o conteúdo de areia chegando a alcançar cerca de 50% em peso, podendo-se dizer que se trata de um caulim arenoso (Figura 5). Apesar desse caulim da base apresentar boa qualidade em termos de alvura e granulometria, torna-se antieconômica a sua extração devido a grande quantidade de areia associada.

Na base do caulim soft, os grãos de quartzo são do tipo hialino, em granulação areia grossa a fina, com grãos angulosos a sub-angulosos, e raramente arredondados a sub-arredondados. São mal selecionados, com freqüentes grãos com feições de dissolução. São comuns feições ou estruturas relacionadas a percolações de óxidos-hidróxidos de ferro e titânio em quase todo o horizonte caulínico, com formas que vão desde anéis de *liesegang* (feições ou estruturas de difusão e segregação do ferro na forma de auréolas zonadas, com dimensões milimétricas a centimétricas) até a forma mais comum que são os níveis horizontalizados, às vezes descontínuos e que se desenvolveram as custas do acamamento reliquiar. Os grãos de quartzo exibem feições de granodecrescência ascendente, o que vem a delimitar a linha de corte do minério de caulim, dentro dos limites exploráveis economicamente, gradando para o horizonte de caulim *soft*.



Figura 5 – Caulim arenoso sotoposto ao caulim soft

O horizonte caulínico (*caulim soft*) com espessura média em torno de 8 metros, apresenta-se, de um modo geral, compacto, friável, aspectos de fratura conchoidal, além de faixas milimétricas a decimétricas ressaltadas pela alternância de cores marrom (ricas em minerais pesados) e branca (Figura 6).

Em direção ao topo do *caulim soft*, há um aumento nas concentrações de oxi-hidróxido de ferro e titânio, chegando em alguns casos a formar uma fina crosta ferruginosa. Dentro desse horizonte ocorrem lentes de caulim creme, de forma descontínua, com aproximadamente 10 centímetros de espessura, o qual apresenta alternância milimétrica de concentração de minerais pesados e caulim. Também apresentam textura em forma de mosaico ou brecha, com fragmentos de caulim em arcabouço aberto, com contato pontual em meio a uma matriz caulínica (Figura 7).

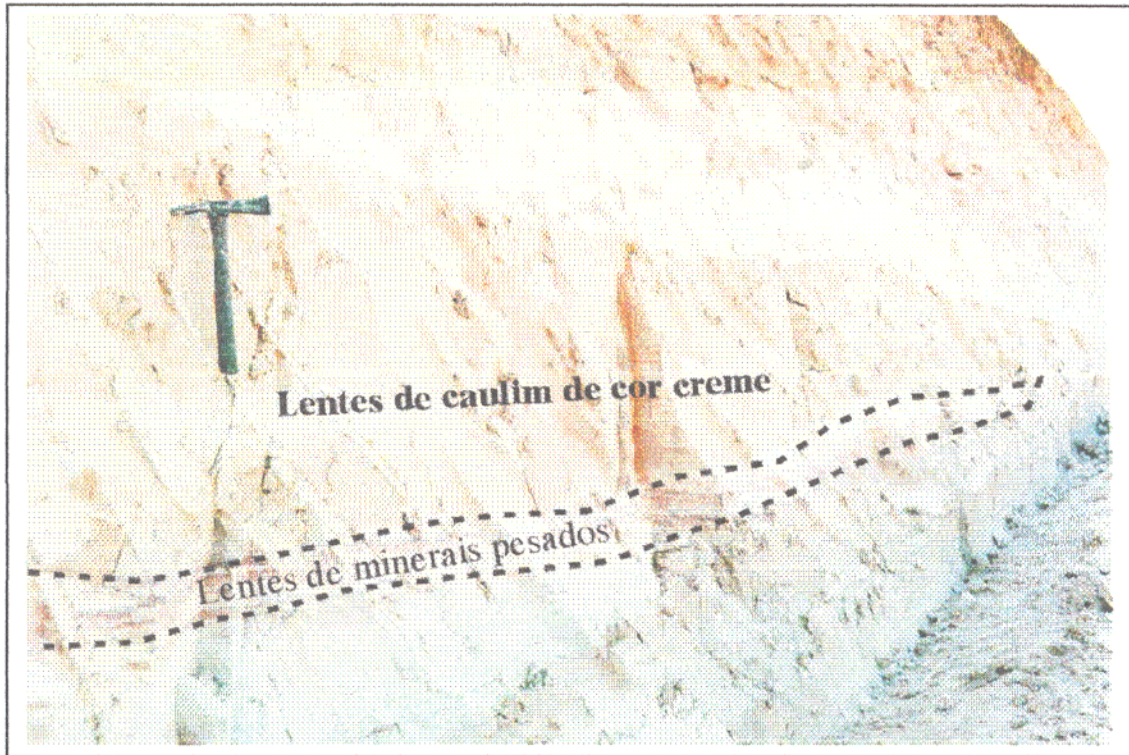


Figura 6 – Caulim *soft* exibindo acamamento reliquiar ressaltado por lentes de oxi-hidróxido de ferro.

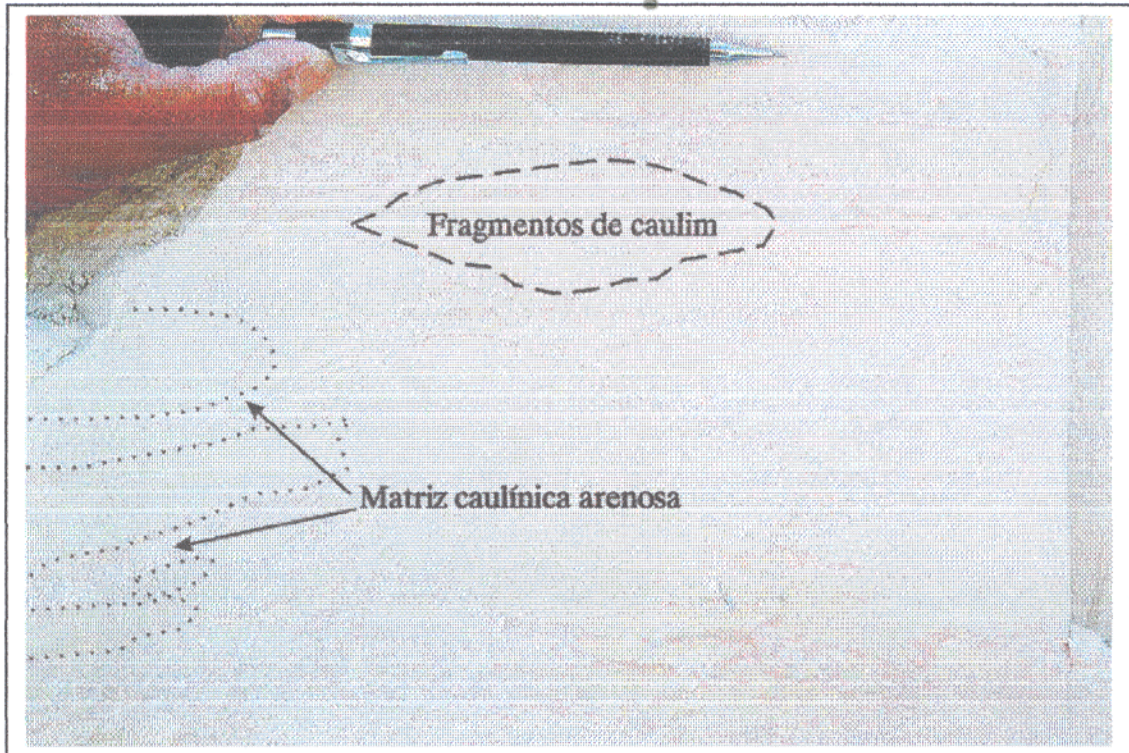


Figura 7 – Textura em mosaico desenhada por fragmentos de caulim em meio a uma matriz caulínica arenosa.

Em quase todo o caulim *soft* observa-se acamamentos reliquiais finamente laminados (milimétricos) e acentuados pela deposição dos minerais pesados. É importante notar que nestes níveis foram descritos concreções subsféricas (pseudo-óólitos) milimétricas preenchidas por material argilo-arenoso, de cor avermelhado a marron pálido no centro (núcleo) a esbranquiçado na borda interna. A película externa ferruginizada é formada por grãos de minerais pesados (principalmente hematita, ilmenorutilo e zircão) encravados em uma matriz goethítica (Figura 8).

Ao microscópio petrográfico, o caulim *soft* apresenta-se, na base (interface do caulim arenoso), com concentrações de grãos de quartzo que vão de um arcabouço com contato pontual a aberto em meio a uma matriz caulínica até criptocristalina. Nesta há o desenvolvimento de grandes placas de caulinita (*booklets*), chegando a atingir 300 μm de comprimento, com aspecto vermiforme e sanfonado (Figura 9). Em alguns locais observa-se grãos de quartzo com aspectos de dissolução, como reentrâncias e fraturas. Em direção ao topo, os grãos de quartzo aparecem em menor proporção, bem como as concentrações de *booklets* de caulinita (Figura 10).

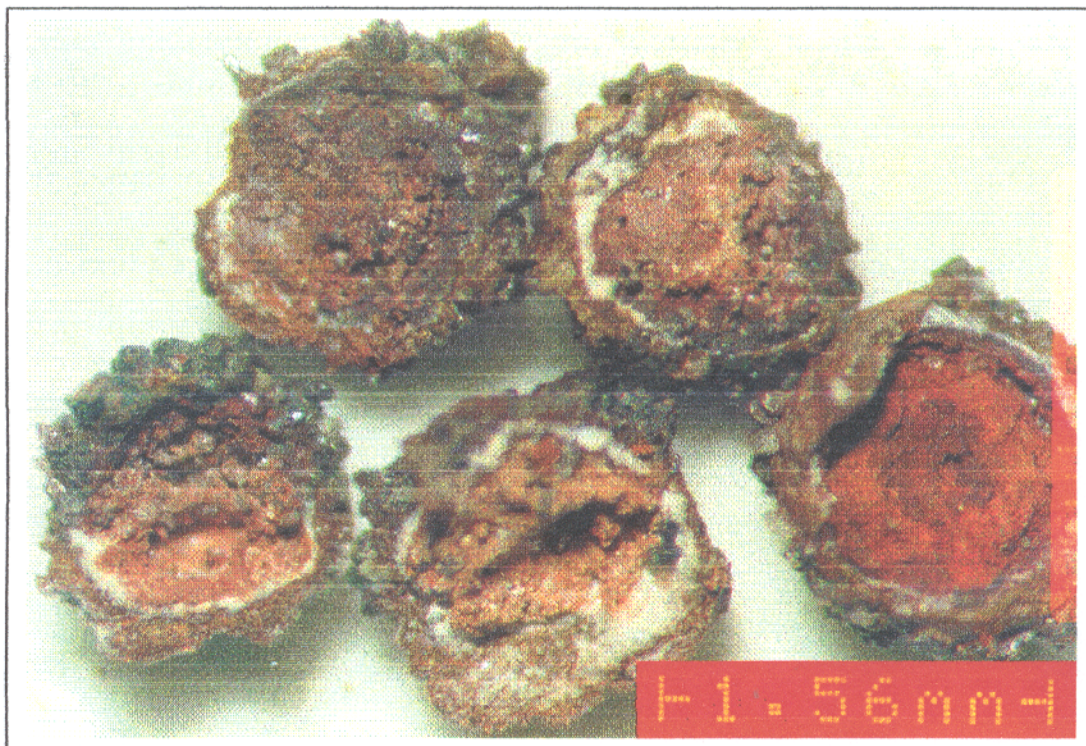


Figura 8 - Concreções subsféricas (pseudo-óólitos) preenchidas por material argilo-arenoso. A crosta é formada por grãos de minerais pesados encravados em uma matriz goethítica.



Figura 9 – Caulinita bem desenvolvida (*booklets*) com aspecto vermiforme, vista ao microscópio petrográfico.



Figura 10 – Grão de quartzo monocristalino apresentando contorno indicativo de dissolução.

Os grãos de quartzo variam desde areia fina a grossa, são do tipo hialino e mais raramente leitoso, mal selecionados, angulosos, alguns frequentemente exibem terminações romboédricas e mais raramente faces prismáticas, arredondados, no qual apresentam superfícies arredondadas, decorrente do transporte.

O acamamento reliquiar continua perceptível em escala micrométrica, podendo ser identificados os diversos minerais pesados existentes, porém, em direção ao topo do horizonte de caulim *soft*, tornam-se incipiente e por vezes ausente (Figura 11).

Além de caulinita e quartzo, os minerais dominantes, observa-se à lupa binocular cristais placosos de muscovita, encurvados e quebrados, alterando para caulinita, ilmenorutilo alterando-se para goethita, zircão, turmalina, rutilo, cianita, anatásio, estauroлита, berilo e plasma de oxi-hidróxido de ferro.

Nas porções superiores deste horizonte é nítido uma faixa de transição de caulim de coloração rosada, onde nas fraturas observa-se feições de percolação de oxi-hidróxidos de ferro e titânio, produtos de alteração de minerais opacos como ilmenorutilo, muitas vezes formando bordas de difusão (Figura 12).

Segundo informações dos técnicos da RCC, furos de sondagem não tem revelado outros níveis de caulim abaixo deste nível citado. A Figura 13 apresenta o perfil esquemático da seção longitudinal N-S, mostrando o comportamento do caulim (ROM), *flint* e as camadas sobrepostas.

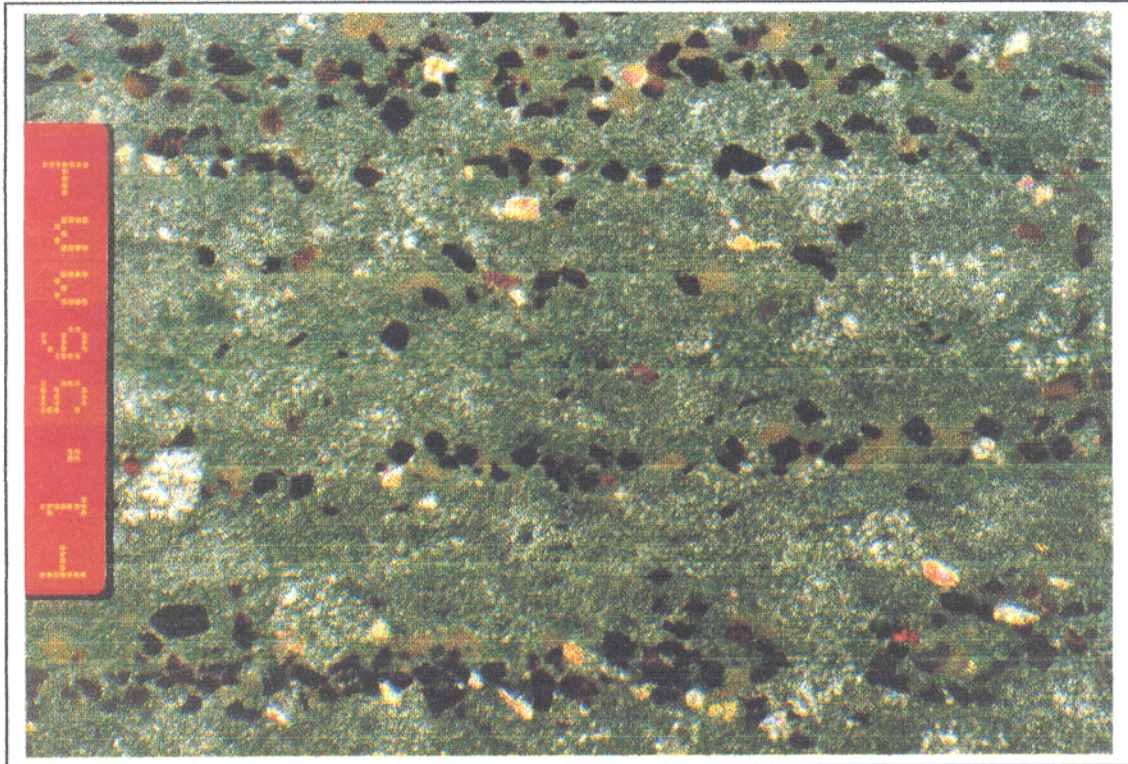


Figura 11 – Acamamento reliquiar evidenciado pela orientação de minerais pesados no caulim.

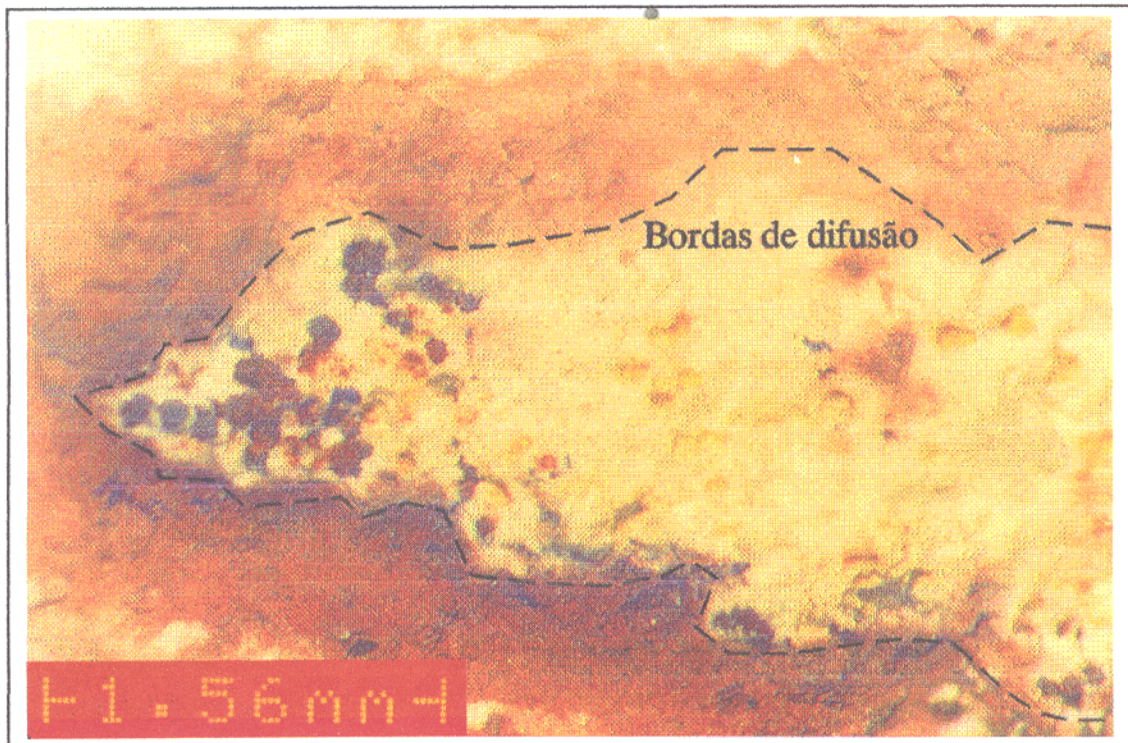


Figura 12 – Alteração de ilmenorutilo para hematita (castanho) e goethita (amarelo) e formação de bordas de difusão de oxi-hidróxidos de ferro.

TIRA 3 - SEÇÃO LONGITUDINAL

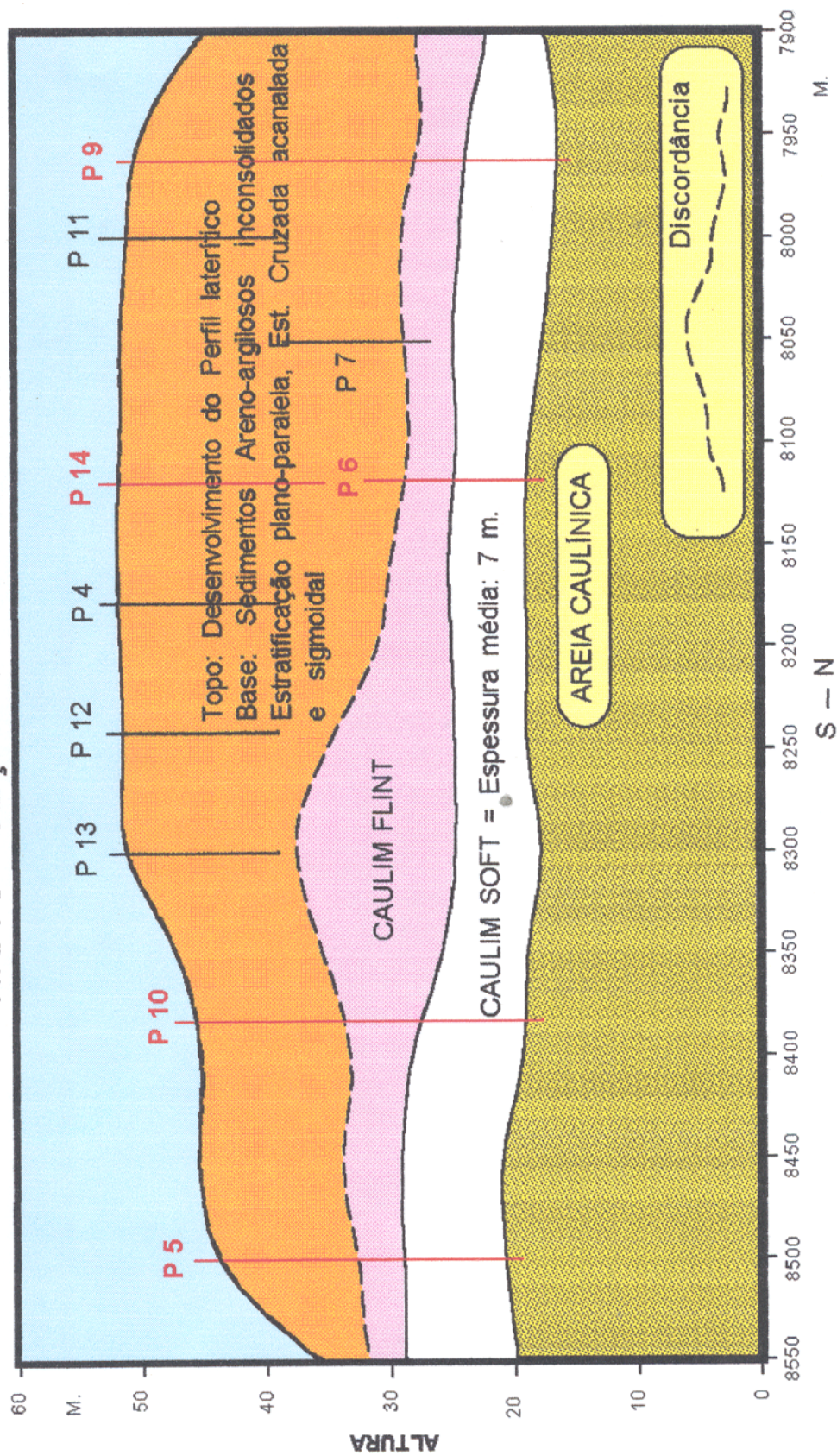


Figura 13 – Perfil esquemático da seção longitudinal N-S, mostrando o caulim (ROM), o *flint* e as camadas sobrepostas.

4.1.2 Caulim *Flint*

O contato superior do caulim *soft* ocorre de forma gradacional, variando para um horizonte de caulim compacto, aqui denominado como caulim *flint*. Kotschoubey et al., (1996) utilizou o termo *semi-flint* para um material de natureza similar, que ocorre em uma grande faixa de extensão ao longo da rodovia Belém-Brasília. Trata-se de um caulim duro, que não se desmancha na água, de cor creme, e que apresenta pequenas cavidades milimétricas, típico de um padrão com textura esponjosa. Esta camada chega a ter no máximo 6 metros de espessura e apresenta o formato de uma lente irregular, ao longo do corpo-D (Figura 14).

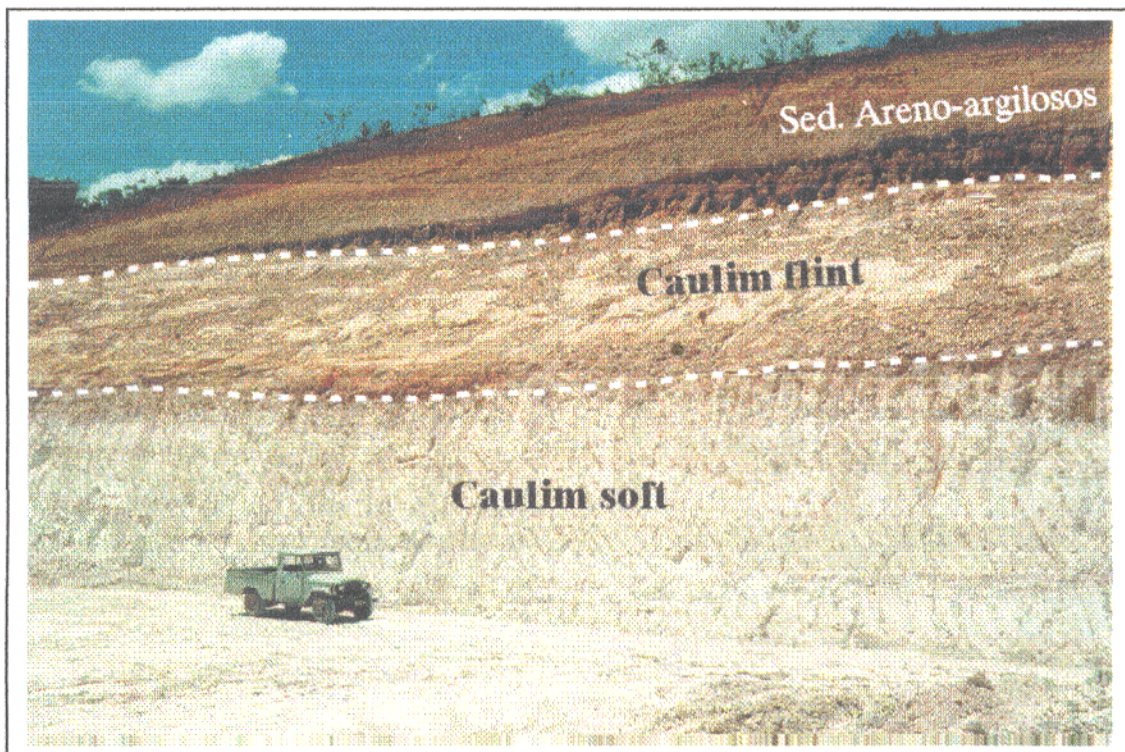


Figura 14 – Lente de caulim flint, de contato gradacional na base e descontinuidade erosional no topo.

Além da resistência ao impacto em não se deformar, característico deste horizonte, outra feição peculiar é a porosidade em forma de canais (ou microcanais, se observados ao microscópio) centimétricos a micrométricos, que na maioria das vezes se conectam e tendem a ter um arranjo verticalizado.

Microscopicamente, observa-se que parte desses dutos estão com as paredes internas preenchidas por uma fina camada de hematita. Por apresentar uma coloração que vai de creme a

marron avermelhado, em seção polida, é visível na maior parte da sua extensão um plasma hematítico percolando a massa caulínica criptocristalina.

O topo do horizonte do caulim *flint* no contato com o horizonte sobrejacente é caracterizado por apresentar uma superfície discordante (Figura 15). Nessa superfície, são observadas reentrâncias, por vezes configurando um aspecto enrugado, causados pela abrasão de sedimentos nas reentrâncias da superfície. É nessa interface onde a coloração se torna mais intensa (marron avermelhada). Fraturas são comuns nesta interface. A suavidade do contorno da paleosuperfície apresenta-se por enfatizar a linha de descontinuidade regional, que poderia corresponder ao limite superior do Perfil Laterítico Maduro de Costa (1991).



Figura 15 – Contato superior do caulim *flint* com os sedimentos areno-argilosos (Unidade Superior).

4.2 DESCRIÇÃO GEOLÓGICA DA UNIDADE SUPERIOR

Sobreposto ao *caulim flint*, limitado por um contato erosional, o horizonte areno-argiloso e que na porção mais espessa chega a atingir 20 metros (Figura 16). Neste trabalho, esta unidade foi subdividida em três principais horizontes, levando-se em conta os aspectos sedimentológicos e da lateritização sobreposta, descritos a seguir:

4.2.1 Horizonte saprolítico

É composto por sedimentos areno-argilosos, na maioria das vezes friáveis e, no geral, há uma tendência arenosa na base. Estes sedimentos inconsolidados, caracterizam-se por apresentar estratificação cruzada tangencial, sigmoidal e acanalada (Figura 17) com *topsets* centimétricos a decimétricos. Em porções mais restritas, ocorrem estratificação plano paralela, dadas pela alternância de camadas argilosas e silticas (Figura 18) a argilo-arenosa para o topo.



Figura 16 – Horizonte areno-argiloso apresentando estratificação cruzada acanalada, sigmoidal e tangencial.

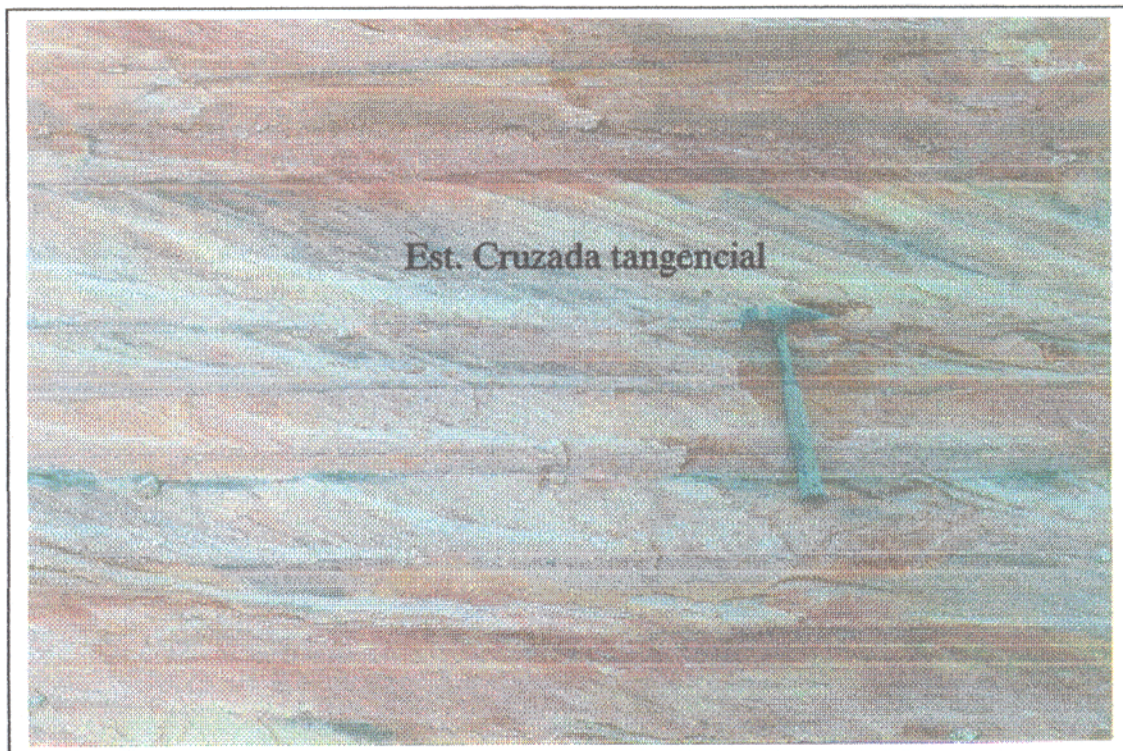


Figura 17 – Estratificação cruzada tangencial com *top sets* milimétricos a centimétricos.

Na maior parte do perfil estudado o contato do caulim *flint* é feito discordantemente com areias de coloração avermelhada, friáveis, exibindo estratificação cruzada sigmoidal com topsets milimétricos a centimétricos e estratificação cruzada acanalada com *sets* que variam de 25 a 50 centímetros e largura entre 2,5 e 3,5 metros.

Nas estratificações cruzadas acanaladas os topsets são ressaltados por uma alternância de areia fina com lentes descontínuas de material mais grosseiro formado por seixos angulosos a sub-arredondados de caulim retrabalhados.

Ao longo deste horizonte é comum ocorrer lentes milimétricas a decimétricas de níveis descontínuos de argila de cor creme a avermelhada. Na porções superiores deste horizonte, ocorre um aumento na granulometria, chegando em alguns locais a areia grossa.

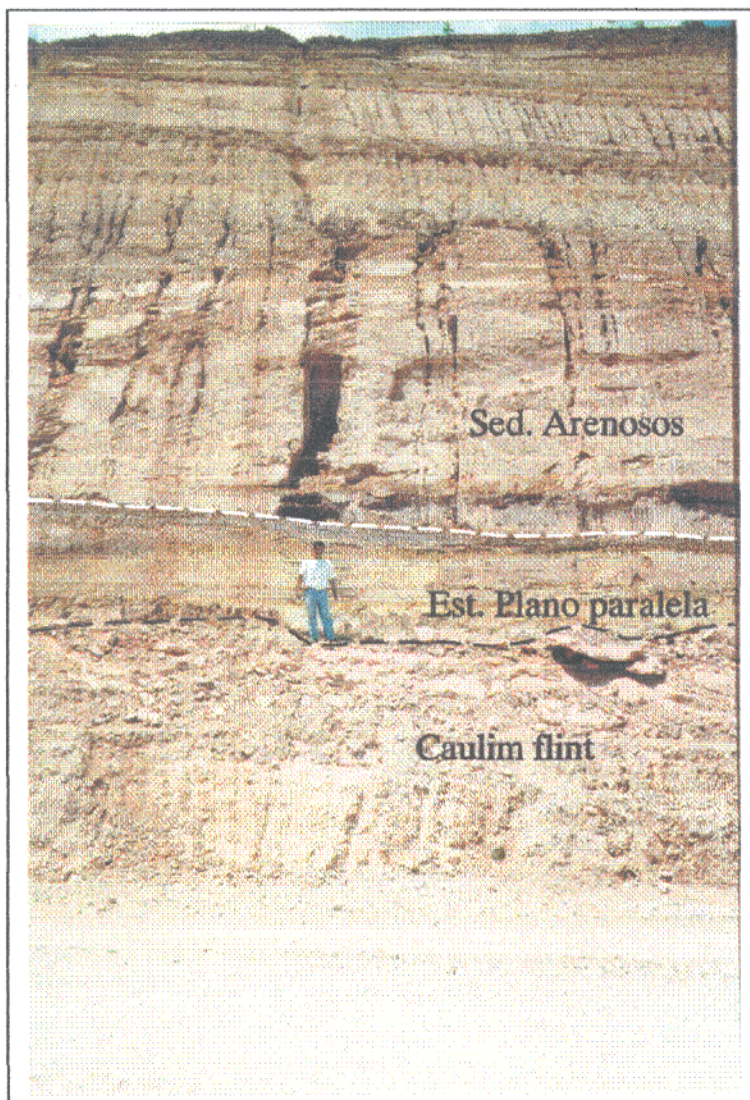


Figura 18 - Estratificação plano paralela formada por sedimentos areno-argilosos.

Localmente, ocorre um nível brechóide com 2 metros de espessura, não tendo portanto, uma continuidade lateral ao longo de todo o perfil. Os fragmentos são de caulim de cor creme, raramente ultrapassando 10 centímetros de diâmetro em meio a uma matriz siltico-arenosa de cor castanho claro. Sobreposto a estas, ocorre uma argila de cor creme-amarelada, com feições típicas de mosqueamento. Em direção ao topo, essa feição deixa de existir, gradando para o horizonte concrecionário.

4.2.2 Horizonte ferruginoso concrecionário

O contato do horizonte saprolítico com o horizonte ferruginoso concrecionário sobreposto é gradativo, contudo sua transição é bem evidente devido a presença de concreções decimétricas a centimétricas. Essas concreções apresentam um padrão de distribuição aleatório, sendo incipiente o aspecto colunar, e mostram uma redução no tamanho das concreções da base para o topo. Enquanto na base essas concreções parecem mais contínuas e interligadas, no topo elas apresentam um arcabouço aberto formado por uma matriz argilosa de coloração vermelha. Este horizonte apresenta-se com espessura média de 1 a 1,5 metros e chega a atingir excepcionalmente até 3 metros de espessura (Figura 19).

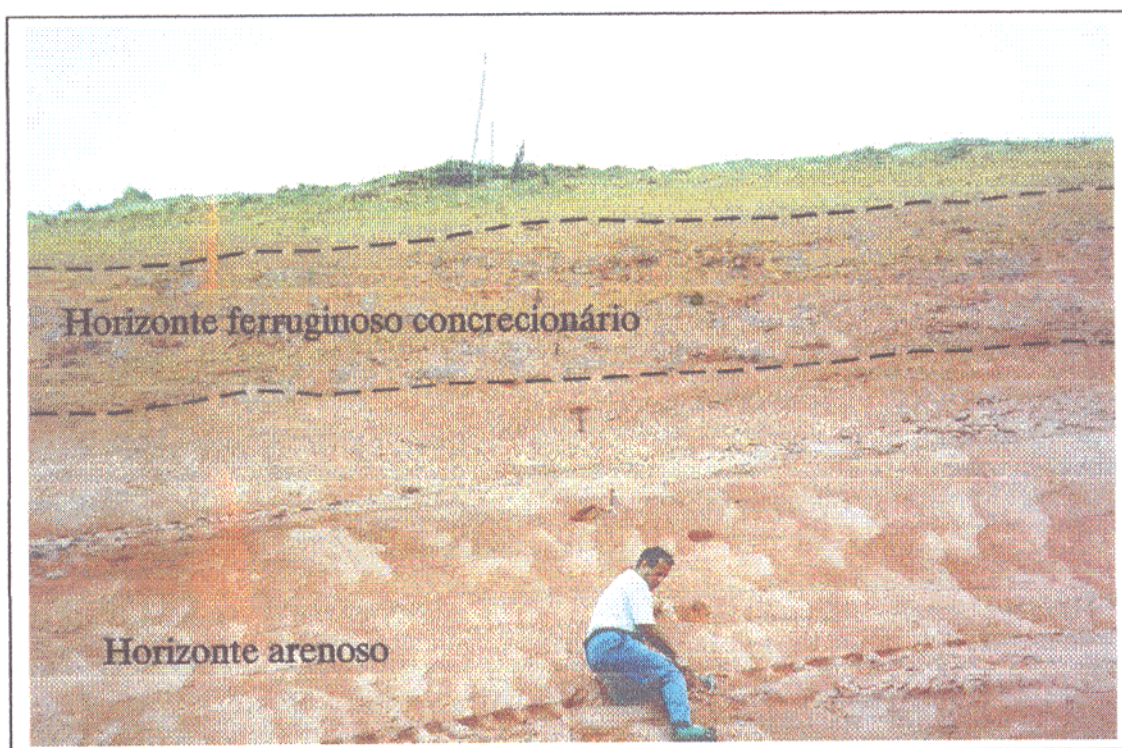


Figura 19 - Horizonte ferruginoso concrecionário, com arcabouço aberto.

4.2.3 Horizonte latossolo amarelo

Recoberto o horizonte ferruginoso concrecionário ocorre de forma gradual, o horizonte latossolo amarelo, argilo-arenoso, homogêneo, por vezes apresenta uma textura microagregado, de cor amarelo e que pode alcançar cerca de 1,20 metro de espessura (Figura 20).

Por último, a camada de solo, e que apresenta uma espessura média em torno de 20 centímetros, cor variando em tons de cinza a preto. A matriz, de cor preta é tipicamente areno-argilosa e apresenta-se rica em matéria orgânica.



Figura 20 - Horizonte amarelado, sobreposto de forma gradativa ao horizonte ferruginoso concrecionário.

5 – ASPECTOS MINERALÓGICOS DO CAULIM

5.1 INTRODUÇÃO

O minério e seus constituintes foram caracterizados mineralogicamente, por meio de lupa binocular, difração de raios-x, e auxiliados por análise térmica diferencial e gravimétrica, espectroscopia por infra-vermelho além de microscopia eletrônica de varredura acoplado com sistema de energia dispersiva (semi-quantitativo).

A análise mineralógica, com ênfase ao horizonte caulínico, deu-se especificamente pela separação de duas frações, baseadas na classificação de Wentworth⁹ apud Suguio (1980): a primeira, com intervalo compreendido entre $0,250 \geq \varnothing > 0,125\text{mm}$ (fração areia fina, 60 a 120 mesh) e a segunda, com intervalo entre $0,125 \geq \varnothing > 0,062\text{mm}$, representativo da fração areia muito fina (120 a 230 mesh).

Uma terceira fração granulométrica foi aqui separada, além das duas citadas anteriormente e que corresponde a fração $\varnothing > 0,25\text{mm}$ e que apresentou fragmentos de quartzo (é comum ocorrer lentes de areia, por vezes grosseira inseridos no caulim) e pseudo-pisólitos (também presentes em menor quantidade na fração areia fina), citados no capítulo anterior.

5.1.1 Constituintes Minerais

Os pseudo-pisólitos encontram-se principalmente nos filmes de minerais pesados configurado pelo acamamento reliquiar, e se apresentam nas formas fechadas e semi-abertas. As formas fechadas preservam um núcleo argiloso de cor castanho a avermelhado no centro e caulínico (esbranquiçado) para a borda. O invólucro, formando um cimento é composto de hematita e goethita, e nele encontram-se minerais de zircão, anatásio, rutilo, turmalina encravados como “satélites” na parte hemisférica superior. Os semi-abertos, assim chamados, por apresentarem um pequeno furo na parte inferior e são desprovidos de preenchimento, além de apresentam os mesmos minerais “satélites” citados anteriormente (Figura 21).

As análises por microscopia ótica e difração de raios-x, indicam que o caulim é constituído essencialmente por caulinita (mineral dominante) e quartzo; acessoriamente por hematita, ilmenorutilo, goethita, zircão, turmalina, rutilo, estauroлита, cianita, anatásio, e mica

⁹ WENTWORTH, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology*, v.30. p.377-392.

branca (muscovita). Topázio e fosfatos da série crandalita-goyazita, este último, possivelmente disseminado no caulim, já que não foram vistos, mas detectados alguns picos no difratograma de raio-x, são raros.

A lupa binocular e ao microscópio (seção polida) a caulinita apresenta-se como uma massa criptocristalina de cor branca a creme até acinzentada. Em porções localizadas, especialmente no horizonte de caulim *soft*, são visíveis cristais de caulinita bem desenvolvidos (*booklets*) com aspecto vermiforme, podendo alcançar até 400 μ m de comprimento (Figura 22).



Figura 21 – Pseudo-óólitos apresentando formas fechadas e abertas com os minerais “satélites”.

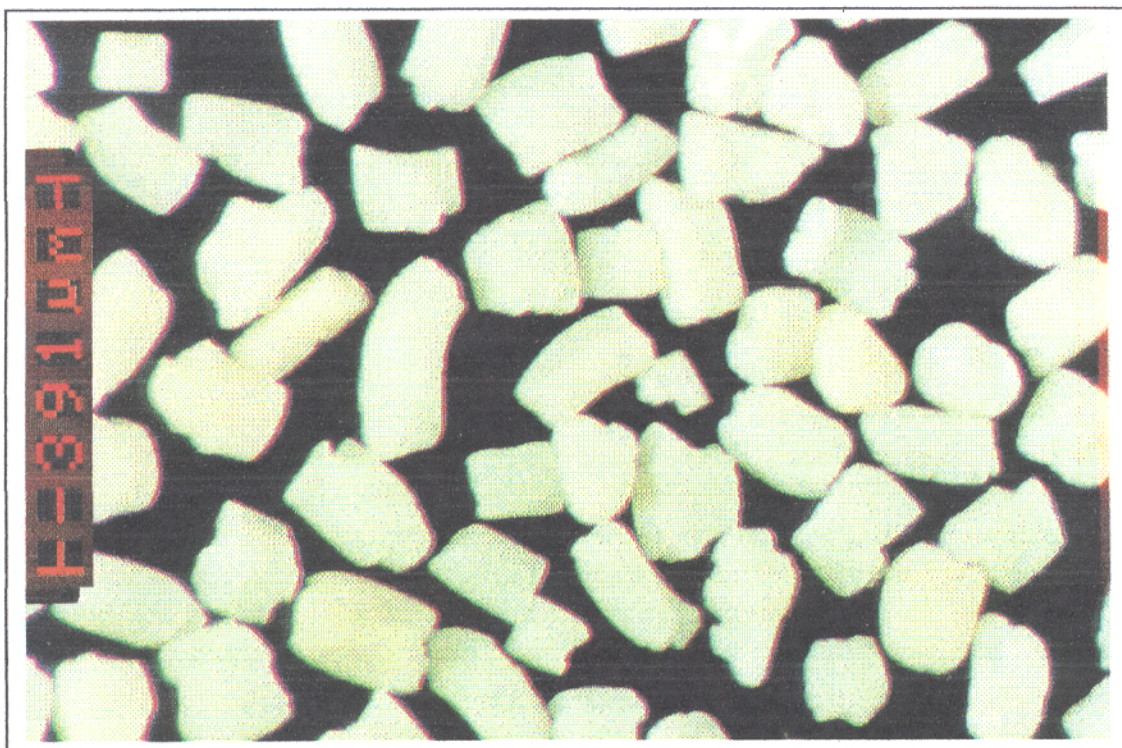


Figura 22 – Cristais bem desenvolvidos de caulinita (*booklets - sanfonas*).

Os grãos de quartzo apresentam-se dispersos em meio à massa caulínica, por vezes formando filmes desenvolvidos pelo acamamento reliquiar ainda preservado. Na base do caulim *soft*, ocorrem grãos maiores, monocristalino, fraturados e apresentando feições de dissolução, enquanto que em direção ao topo, e se estendendo ao horizonte de caulim *flint*, há uma tendência na granodecrescência ascendente. Ao longo do perfil predominam os grãos do tipo hialino (incolores e lípidos) e raramente leitoso. Quanto ao grau de arredondamento, predomina os grãos angulosos a sub-angulosos e em menor proporção os sub-arredondados a arredondados, com superfície fosca e brilho pouco intenso, há uma tendência de tamanhos equidimensionais. Mais raramente, alguns grãos ainda preservam as arestas do prisma como também terminações romboédricas (Figura 23).

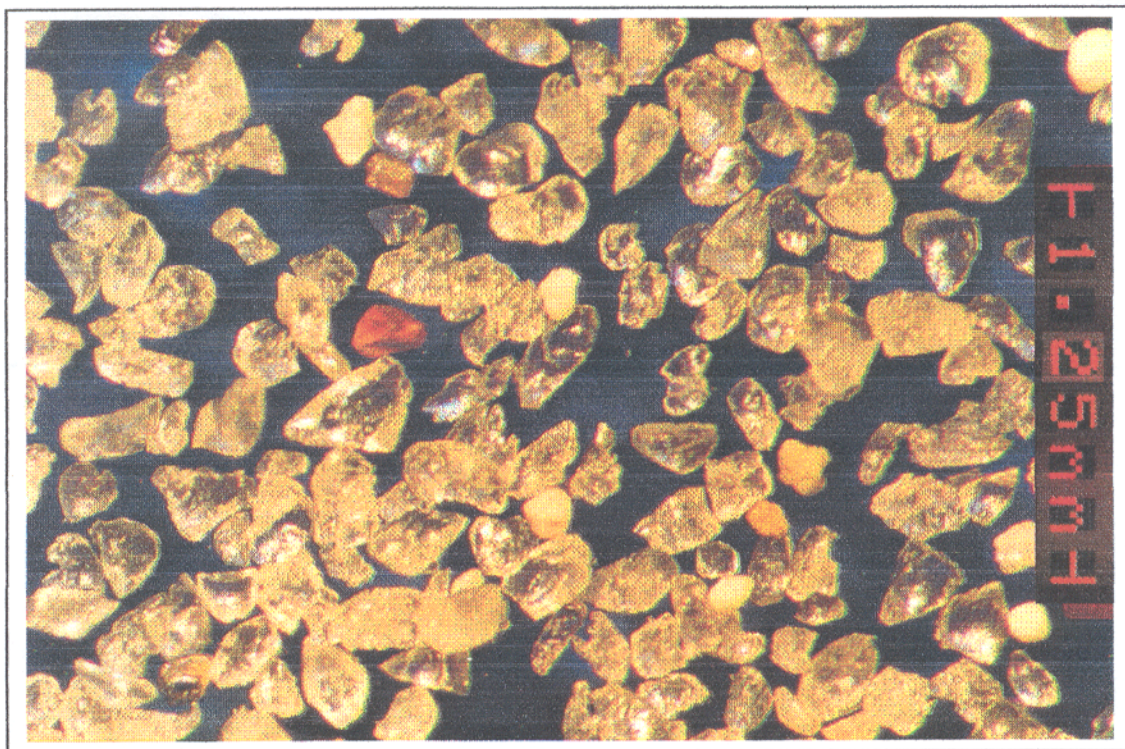


Figura 23 – Predomínio da forma sub-angulosa nos cristais de quartzo do caulim da RCC.

Hematita, ilmenorutilo e goethita são os principais minerais pesados opacos e perfazem 92% da fração grossa e 94% da fração fina, portanto, em proporções de 11,5:1 a 15,6:1 nas frações grossa e fina respectivamente, entre opacos e transparentes.

A hematita apresenta-se de cor preta a castanho amarronzado, desenvolvendo hábito tipicamente tabular, com as faces exibindo brilho metálico até foscas, as arestas apresentam-se desde sub-angulosos até sub-arredondadas e por vezes com feições de corrosão (Figura 24).

A goethita ocorre como produto de alteração da hematita, exibindo cor que vai desde amarelo ocre até laranja acastanhado, exibindo brilho adamantino a opaco e aspecto sedoso.

A muscovita, de cor branca, formando pequenas concentrações de palhetas em meio à massa caulínica, ao microscópio, aparece dobradas e quebradas. Em alguns locais encontra-se parcialmente alterada para caulinita.

5.1.2 Descrição dos Minerais Pesados Transparentes

A quantificação dos minerais pesados consistiu em contagem cumulativa a cada 100 minerais, no final é tirada uma média e recalculada a 100%. Este modo de contagem com blocos acumulados é usado para visualizar a distribuição dos minerais ao longo da lâmina, sendo que em cada lâmina foi feita uma contagem média de 300 minerais (ou 3 blocos).

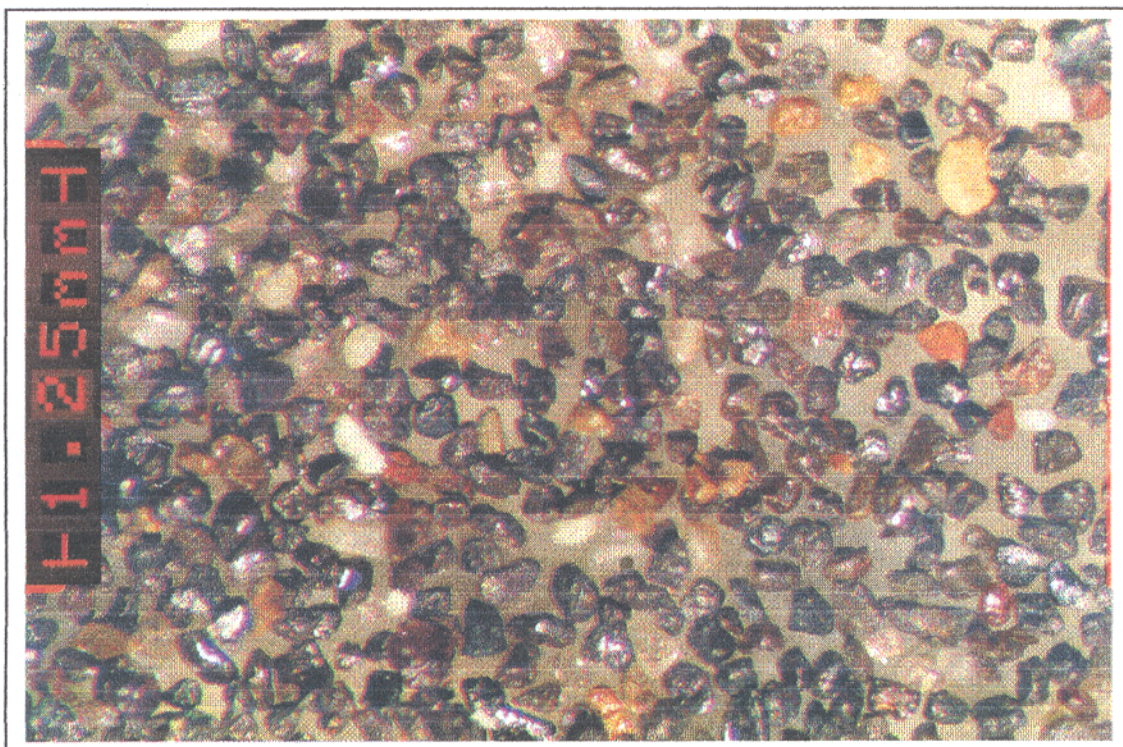


Figura 24 – Minerais pesados encontrados no caulim *soft* da RCC (ênfase à hematita de cor preta)

Foram identificados e quantificados cerca de seis minerais pesados não opacos. Na separação utilizou-se o separador magnético de Frantz.

Zircão $Zr[SiO_4]$. Encontra-se nas formas desde prismático longo, com razão alongação (razão comprimento vs. largura) $> 3,5$; zircões médio, com alongação situando-se entre 1,5 e 3,5 e para zircões curto, com alongação inferior a 1,5 até zircões bem arredondados, passando por sub-arredondados e ovalados. São transparentes, translúcidos a opacos, muitos são metamíticos, apresentando zoneamento interno, estrias e muitos apresentam inclusões fluidas e até sólidas. As cores são amarelo citrino, mais comum, mas variam de marron pardo até incolor (raro). Ocorrem cristais euédricos e também como fragmentos (Figura 25 e 26).

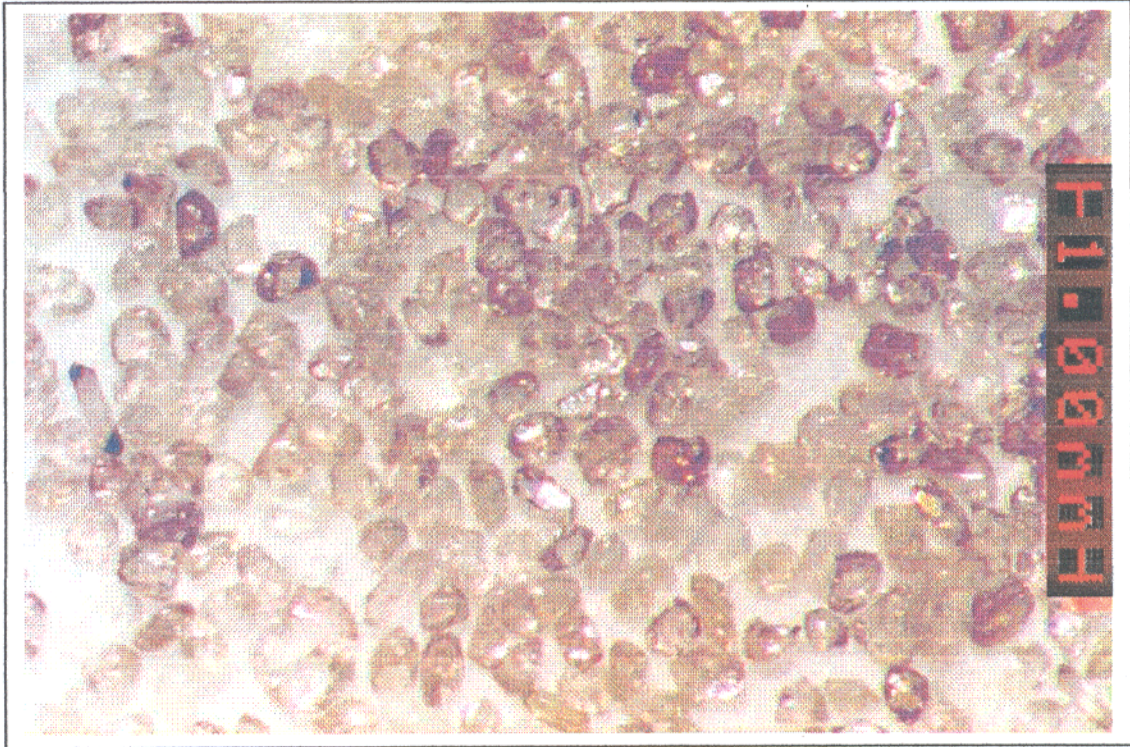


Figura 25 – Variedade tipológica dos zircões encontrados no caulim da RCC.

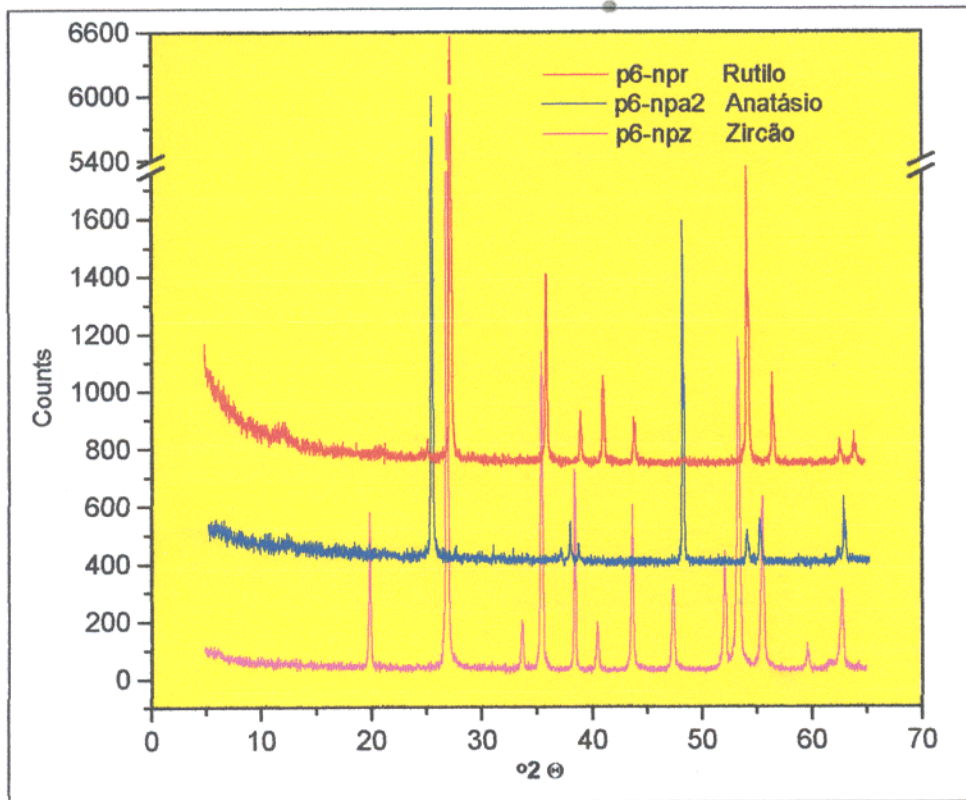


Figura 26 – Difratoograma de raio-x por micropreparação dos zircões, anatásio e rutilo do caulim da RCC.

Turmalina $\text{Na}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Al}_6[(\text{OH})_4/(\text{BO}_3)/\text{Si}_6\text{O}_{18}]$. Ocorre em pequenos prismas alongados e fragmentos irregulares até grãos sub-arredondados a arredondados (raros). Apresenta-se nas cores verde oliva a marron (os pequenos prismas) e preto (os grãos irregulares maiores).

Rutilo TiO_2 . Ocorre em grãos prismáticos subédricos e sendo mais comum grãos irregulares (angulosos a sub-arredondados) nas cores vermelho sangue a alaranjado, brilho adamantino e relevo muito alto. É freqüente geminação em forma de joelho ou cotovelo (Figura 27).

Estauroлита $\text{Al}_4\text{Fe}^{2+}[\text{O}/\text{OH}/\text{SiO}_4]_2$. Ocorre de cor amarelado a esverdeado pálido (pleocroísmo nítido) com grãos de forma variada e contornos irregulares, com bordas sinuosas ou salientes, exibem estrutura tipo “crista de galo”, alguns grãos aparecem fraturados.

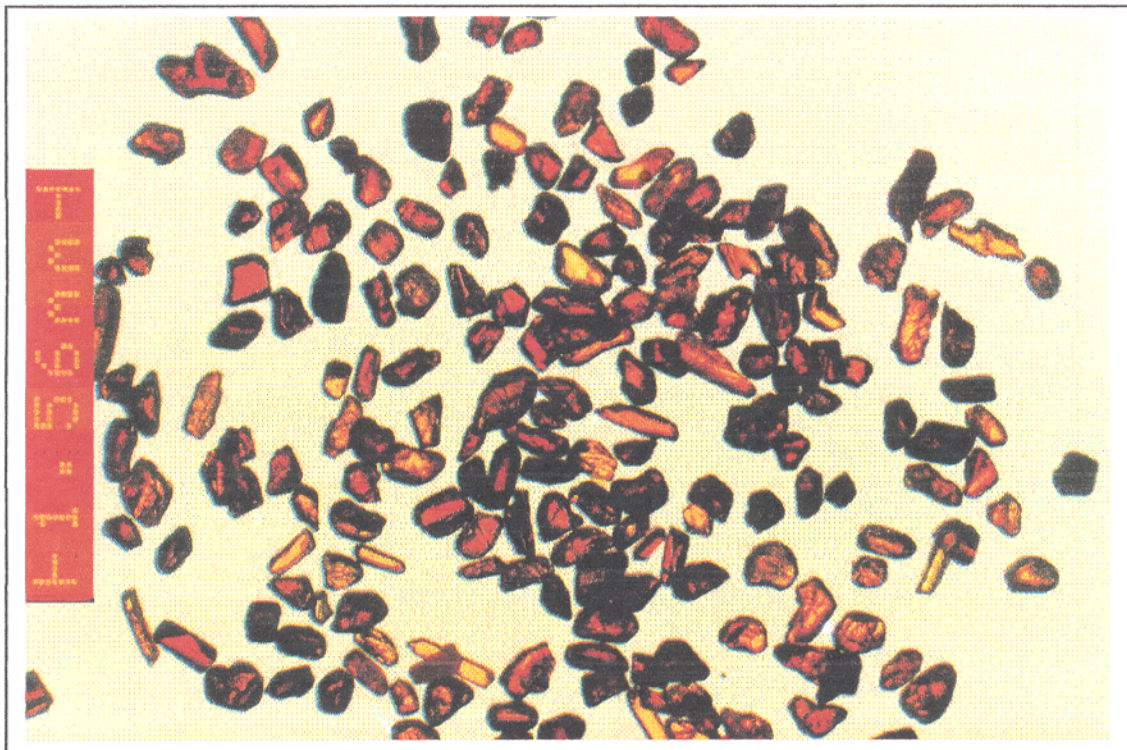


Figura 27 – Hábitos distinto de rutilo (formas prismáticas e grãos irregulares).

Cianita $[Al_2^{VI}[O/SiO_4]]$. Encontra-se como grãos coluno-tabulares, e contornos irregulares ou bordas ligeiramente denteadas. Apresenta-se incolor, clivagem retangulares e extinção oblíqua. Por vezes encontra-se com aspecto “sujo” (impregnações).

Anatásio TiO_2 . Aparece com hábito predominantemente tabular, incolor, azulado a azul metálico, translúcido a opaco. Alguns cristais se apresentam com aspecto fosco, o que lhes confere opacidade (Figura 28).

A distribuição das percentagens dos minerais pesados encontrados no horizonte de caulim *soft*, tanto na fração areia fina, quanto na areia muito fina, está apresenta nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.



Figura 28 - Hábito placóide do anatásio.

Tabela 3 – Distribuição dos minerais pesados (em %) no caulim da RCC (fração areia fina).

Mineral	P6-1a	P6-1b	P6-1c	P6-1d	Média
Zircão	40,00	42,00	41,00	44,00	41,75
Turmalina	22,50	25,00	27,00	26,00	25,13
Rutilo	15,00	15,00	17,00	14,50	15,38
Cianita	8,13	5,00	2,00	4,00	4,78
Anatásio	5,00	6,00	7,00	5,00	5,75
Estauroлита	9,38	7,00	6,00	6,50	7,22
$\Sigma=$	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Tabela 4 - Distribuição dos minerais pesados (em %) no caulim da RCC (fração areia muito fina).

Mineral	P6-1a	P6-1b	P6-1c	P6-1d	Média
Zircão	85,00	81,00	81,33	80,75	82,02
Turmalina	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Rutilo	4,00	6,00	6,00	6,75	5,69
Cianita	3,00	3,00	3,33	3,00	3,08
Anatásio	1,00	2,00	2,67	2,50	2,04
Estauroлита	5,00	6,00	4,67	5,00	5,17
$\Sigma=$	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

As figuras de comparação do conteúdo de minerais pesados, mostram que na fração areia fina a turmalina representa em média 25%, enquanto que na fração areia muito fina não passou dos 2%, indicando que este mineral encontra-se preferencialmente na fração grossa, comportamento parecido tem o rutilo, que na fração areia fina apresentava-se em torno de 15%, na fração areia muito fina, passou a um terço desse valor, mostrando sua preferência pela fração grossa; processo inverso ocorre com o zircão, que relativamente apresentava 41%, na fração areia fina, praticamente dobrou, passando a 82%, na fração areia muito fina, mostrando a sua tendência em ocorrer na fração fina. Diante dessa situação os minerais de cianita, anatásio e estauroлита, tiveram um leve decréscimo nos seus percentuais, conforme Figuras 29 e 30.

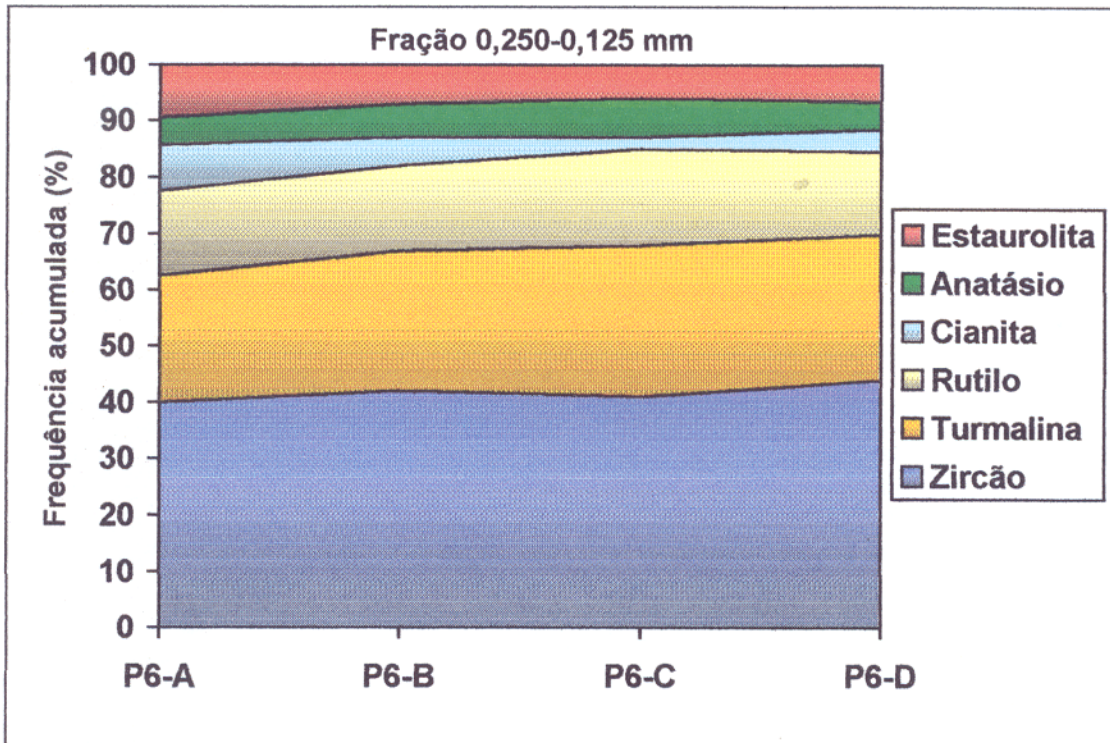


Figura 29 – Frequência acumulada dos minerais pesados da fração areia grossa em quatro amostras do caulim *soft* da RCC.

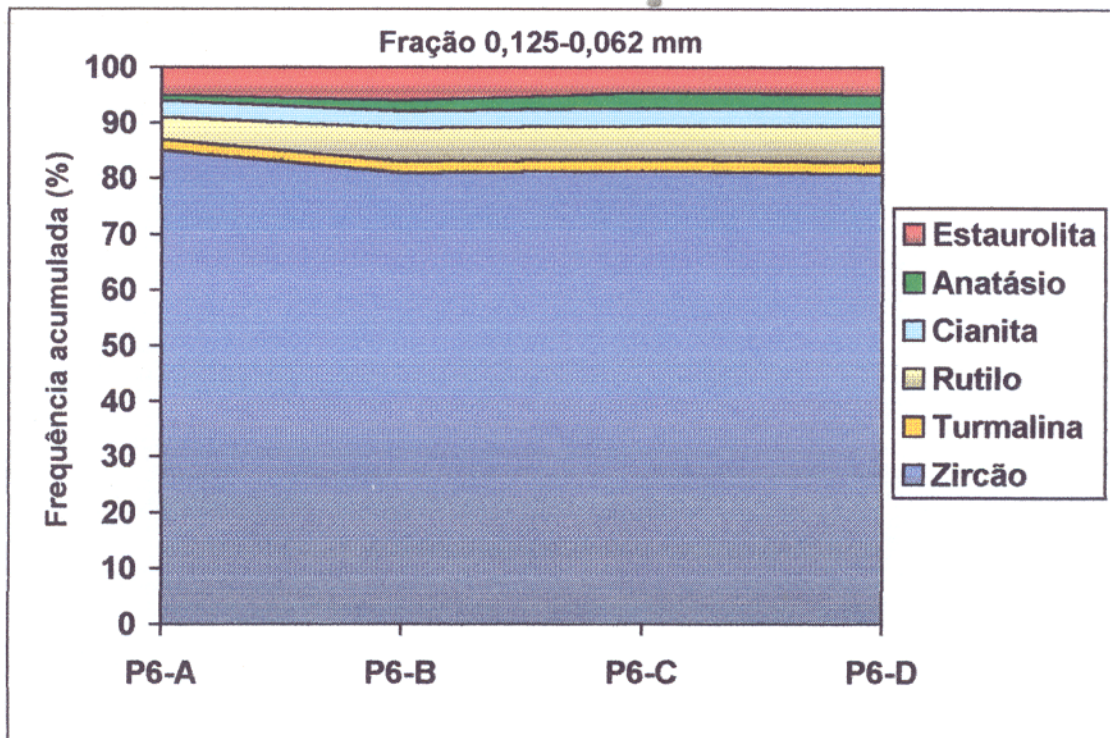


Figura 30 - Frequência acumulada dos minerais pesados da fração areia fina em quatro amostras do caulim *soft* da RCC.

6 – ANÁLISE MINERALÓGICA

6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão abordados os estudos mineralógicos da caulinita por difratometria de raio x, pelo método do pó, lâmina orientada, glicolizada e aquecida; análises abordando o grau de cristalinidade pelo método de Hinckley (1963). Análises complementares como análise térmica diferencial (ATD), termogravimétrica (TG), infravermelho (IV) além da morfologia e análise por microscopia eletrônica de varredura com sistema de energia dispersiva (MEV-SED).

6.1.1 Por difração de raios x (DRX)

Análises por DRX tem mostrado que os horizontes caulínicos (*soft* e *flint*) apresentam uma variação na cristalinidade da caulinita, diminuindo da base para o topo. As Figuras 31 e 32, mostram os perfis 5 e 6, na qual o tripletes desenvolvido pela seqüência de reflexões situadas entre 4,45 e 3,73Å (19,9° a 23,8° 2 Θ) sendo transformados gradativamente em um único pico (4,45Å). O mesmo corre com os outros dois tripletes, situados entre 35° e 40° (2 Θ) onde passam a ter uma menor intensidade e sendo portanto, menos definidos, em direção ao topo. Essa alteração de tripletes para dupletes nos padrões típicos da caulinita é condizente com a crescente desordem ao longo do eixo b, gerando uma caulinita desordenada e portanto, mal cristalizada. A Tabela 5 apresenta as variações dos picos entre a caulinita ordenada (*sensu stricto*) e a caulinita desordenada ou mal cristalizada (Thorez, 1976).

No caulim *flint*, o pico principal da caulinita (001), apresenta-se alargado na base, evidenciando a sua baixa cristalinidade neste horizonte. Em termos relativos, a quantidade de quartzo presente no minério é visível por DRX, onde na base, quer representativo do caulim arenoso ou caulim pouco arenoso, são bem evidentes os picos do quartzo, tornando-se incipiente a ausente em direção ao topo do caulim *flint* (Figura 31 e 32).

Em lâminas orientadas, glicolizadas e aquecidas, não foram identificados outros argilominerais, a não ser o da espécie caulinita. A Figura 33, apresenta um difratograma de uma amostra submetida aos três procedimentos clássicos, notando-se que na orientada e posterior glicolização não há indícios da presença de minerais expansivos, e sendo que após aquecida, a 550°C por 2horas, todos os picos da caulinita desaparecem, não aparecendo portanto, nenhum pico de um outro argilomineral a não ser apenas um tênue pico do quartzo (Q).

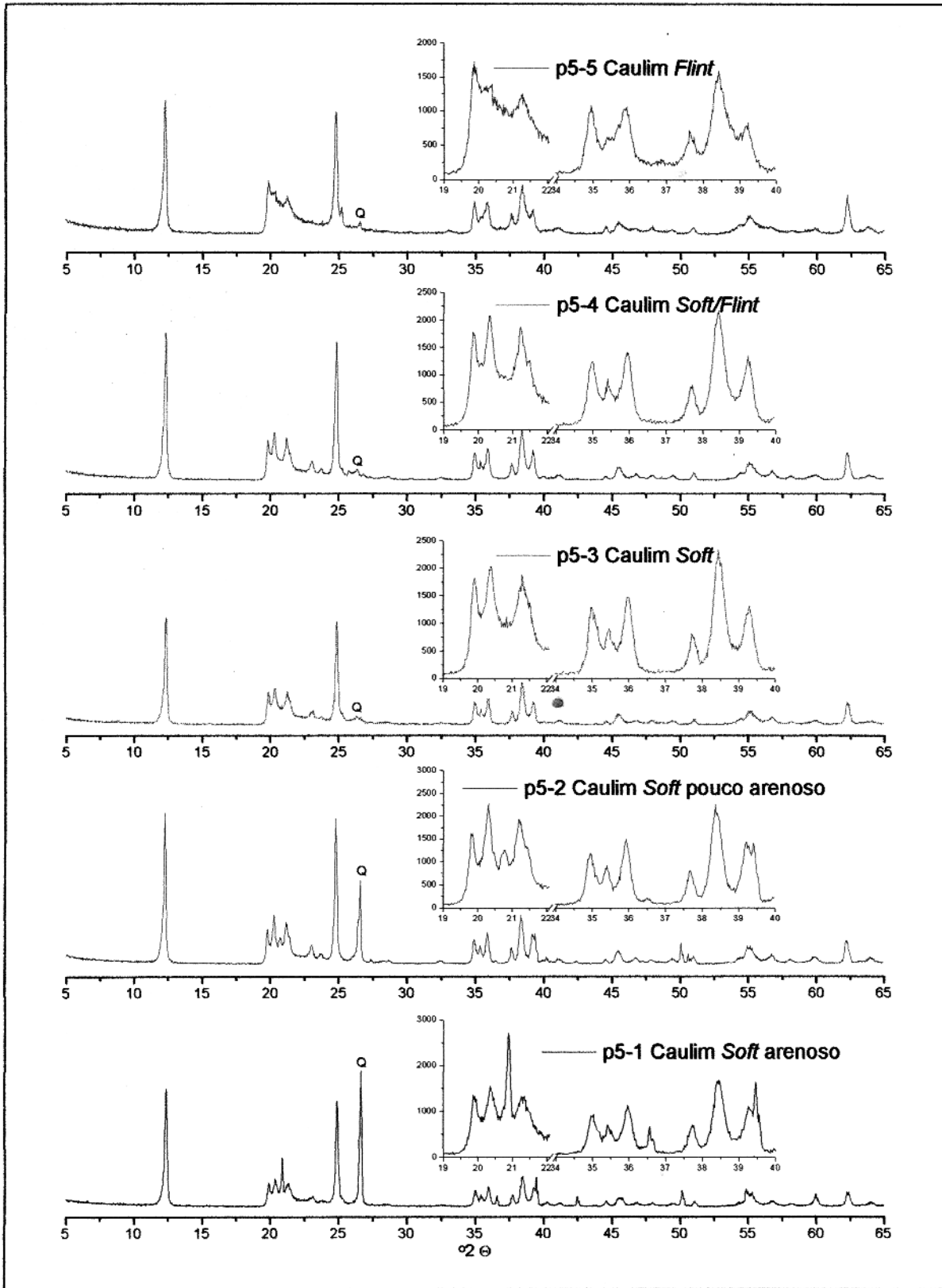


Figura 31 – Comportamento do caulim por DRX no perfil 5 ao longo do horizonte caulínico *soft* e *flint*.

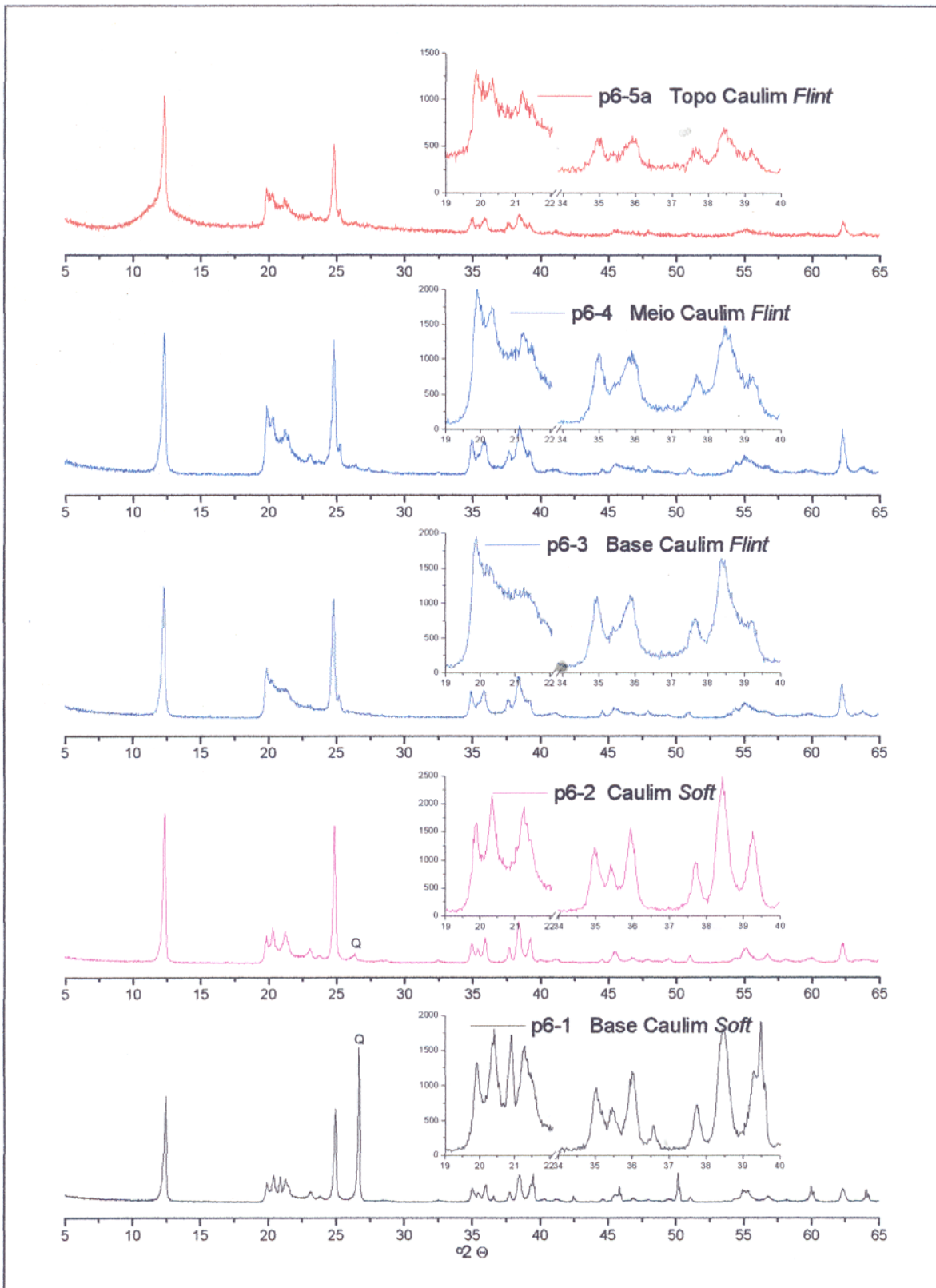


Figura 32 - Comportamento do caulim por DRX no perfil 6 ao longo do horizonte caulínico *soft* e *flint*.

Tabela 5 – Características de diferenciação por DRX de caulinita *sensu stricto* e desordenada.

Espaçamento Å	Ângulo 2θ	Caulinita (<i>sensu stricto</i> – SS)	Caulinita desordenada
7,15	12,36	Reflexão bem aguda e muito forte	Reflexão bem marcada, intensidade inferior à S.S.
4,43	20,02	Reflexões distintas e fortes porém de intensidade inferior aos picos 7,15 e 3,5	Frequente bandas englobando 2 ou 3 reflexões cf. cristalinidade
4,35	20,39		
4,15	21,39		
3,50-3,60	25,42-24,71	3,56 – reflexão muito forte	3,56 – intensidade inferior à caulinita <i>sensu stricto</i>
3,36-3,13	26,50-28,49	Reflexões fracas	Reflexões fracas e às vezes ausentes
3,09-2,74	28,87-32,65		
2,55	35,16	Reflexões bem individualizadas	Duplete – 2,55 e 2,50
2,52	35,59	Triplete	
2,48	36,19		
2,38	37,76	Reflexões bem individualizadas	Duplete – 2,37 e 2,33
2,34	38,44	Triplete	
2,28	39,49		

Fonte: Thorez, 1976.

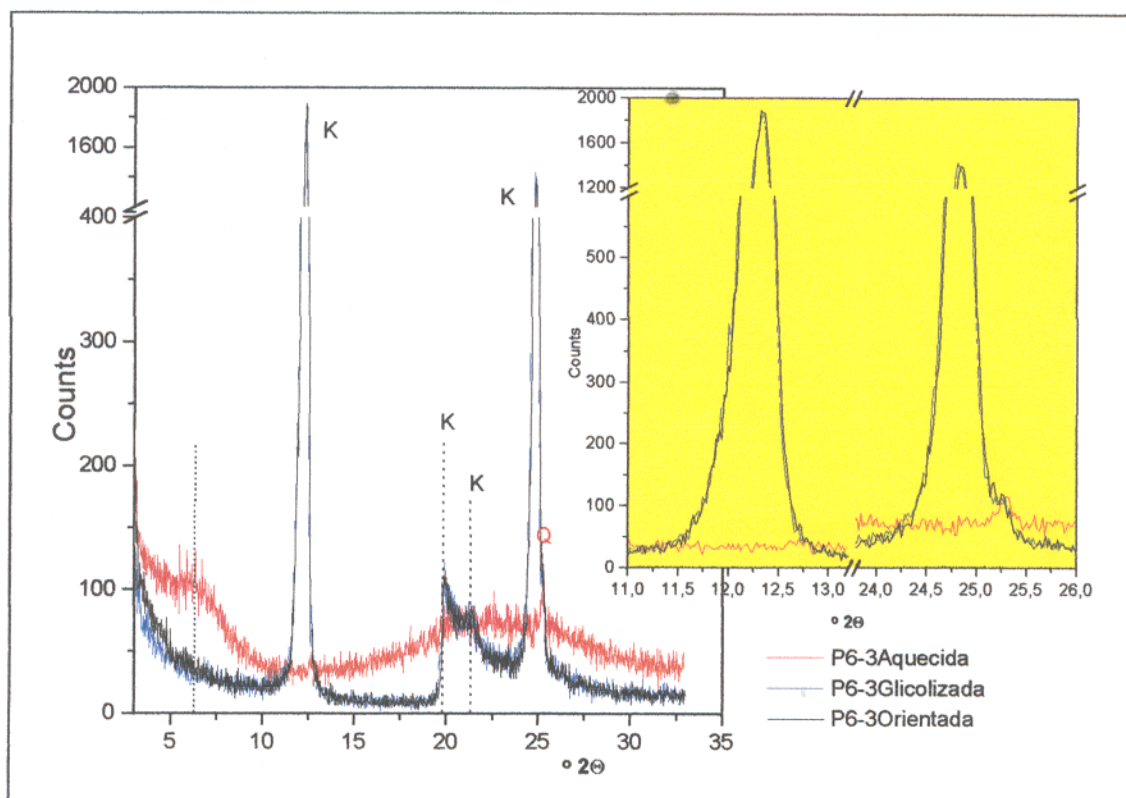


Figura 33 – Difratograma de uma amostra de caulim (P6-3) tratada pela técnica orientada, glicolizada e aquecida.

Para quantificar o grau de cristalinidade da caulinita, usou-se o método de Hinckley (1963) conhecido como “índice de cristalinidade de Hinckley”, o qual baseia-se na intensidade dos dois últimos picos do triplete (020, $0\bar{1}0$ e $1\bar{1}1$) compreendido entre 19 e 22° (2θ) da caulinita. Apesar de ser um método empírico, tem se mostrado eficiente entre os diversos existentes, como Range & Weiss (1969) que em vez de usar a meia altura dos dois últimos picos citados anteriormente, usa a área compreendida entre os dois primeiros picos; os métodos usados por Lietard (1977) e Hughes & Brown (1979) são menos conhecidos.

A Figura 34, apresenta os parâmetros usados pelo método de Hinckley, na amostra C1-1 da Rio Capim Caulim (RCC).

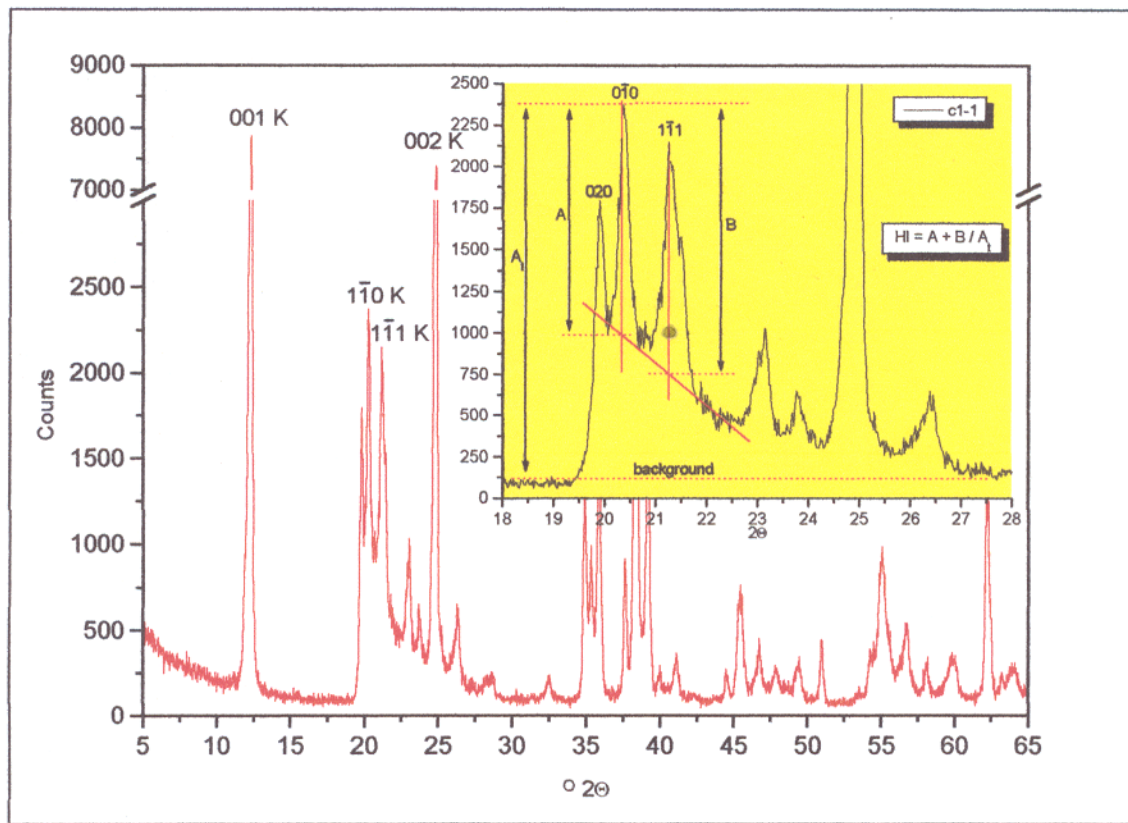


Figura 34 – Os parâmetros e a fórmula usada no método empírico de Hinckley.

A Tabela 6 apresenta os valores dos índices de cristalinidade de Hinckley de dezoito amostras coletadas na mina da RCC, com informações de posicionamento ao longo do horizonte de caulim *soft* e *flint*. Quanto ao grau de cristalinidade (baixa, moderada e alta) são classificações adaptadas segundo Delgado et al. (1994).

Tabela 6 – Índice de cristalinidade de Hinckley para as amostras do caulim da RCC.

Amostra	Índice de Hinckley	Cristalinidade *	Minério
C1-1	1,21	alta	<i>Soft</i>
C1-2	1,01	alta	<i>Soft</i>
C1-3	1,22	alta	<i>Soft</i>
C2-1	1,00	alta	<i>Soft</i>
C3-1	1,27	alta	<i>Soft</i>
C4-1	1,03	alta	<i>Soft</i>
P5-5	0,50	moderada baixa	Intermediário <i>flint</i>
P5-4	1,00	alta	<i>Soft</i>
P5-3	1,03	alta	<i>Soft</i>
P5-2	1,17	alta	<i>Soft</i>
P5-1	0,90	moderada alta	Base do <i>soft</i>
P6-5B	0,40	baixa	Topo do <i>flint</i>
P6-5A	0,45	baixa	Topo do <i>flint</i>
P6-4	0,46	baixa	Intermediário <i>flint</i>
P6-3	0,33	baixa	Base do <i>flint</i>
P6-2	1,13	alta	<i>Soft</i>
P6-1A	1,08	alta	<i>Soft</i>
P6-1	1,18	alta	Intermediário <i>soft</i>

* Intervalos de cristalinidade segundo Delgado et al. (1994).

6.1.2 Por Análise Térmica (ATD / ATG)

A análise termogravimétrica (TG) é um método que permite avaliar e quantificar a perda de massa da caulinita durante o seu aquecimento, causado pela saída de água intersticial (adsorvida) e estrutural. Já a análise termodiferencial (ATD) registra a emissão ou a absorção de calor pela caulinita durante o seu aquecimento, essas reações são chamadas de exotérmicas (indicam mudanças na estrutura do mineral) e endotérmicas (indicam perdas de água, tanto adsorvida – desidratação, como estrutural - desidroxilação) respectivamente.

As reações que ocorrem em um mineral ou outra substância química durante tratamento térmico (aquecimento ou resfriamento), bem como as mudanças de peso e energia podem ser identificadas e medidas com bastante precisão. Perda de peso, por exemplo, que ocorre durante desidratação ou perda de CO₂, SO₃, etc., pode ser determinado com uma termobalança e registrado vs. temperatura ou tempo (termogravimetria ou TG). Para uma série de compostos contendo H₂O, OH e CO₂, a termogravimetria fornece feições características para a identificação, e se fizer uso de curvas de calibração é também possível fazer determinações quantitativas de

H₂O e CO₂. Os resultados de TG podem ser afetados pelos seguintes parâmetros utilizados no instrumento, como a velocidade de aquecimento da amostra, atmosfera do forno, geometria do cadinho e, também pelas características da amostra como peso, tamanho das partículas e até modo de preparação (Vogel, 1981).

Em ATD (Análise Térmica Diferencial), as diferenças de temperatura (ΔT) relativas a um material termicamente inerte são medidas durante o aquecimento ou resfriamento da amostra. A curva ATD registra estas diferenças durante reações na amostra, mostrando efeitos termais como desvios da linha zero. Coordenadas dos diagramas resultantes de ATD são ΔT (ordenada) e temperatura da amostra (abscissa), ambas dadas em graus centígrados. Consequentemente, quando a reação exige calor (reação endotérmica) ou perde calor (reação exotérmica) a curva desvia para um lado ou outro da linha zero.

Reações endotérmicas - reações que consomem calor, incluem: desidratação (liberando água adsorvida e água confinada na estrutura como H₂O ou OH), decomposição estrutural, fusão, evaporação e reações de sublimação, transformações estruturais (aquecimento), transformações magnéticas (desmagnetização de uma substância ferromagnética) e redução.

Reações exotérmicas - reações que liberam calor, incluem: oxidação, incluindo combustão, processos de consolidação, reconstrução de uma estrutura cristalina, transformações estruturais (resfriamento).

A perda de massa que a caulinita sofre com o aquecimento até 100°C está relacionada com a água adsorvida, enquanto que a reação endotérmica ocorrida entre 450° e 660°C compreende reação de desidroxilação, formando-se a partir daí a metacaulinita. Entre 970° e 1020°C, ocorre um pico exotérmico estando associado a nucleação da mulita (3Al₂O₃.2SiO₂).

A Figura 35 mostra um gráfico conjugado de ATD/TG, na qual amostras de caulim *soft* são analisadas levando-se em conta a disposição lateral, dentro da cava da mina. Observa-se que três amostras apresentam perda de peso em torno de 13,5%, enquanto que a amostra C2-1 apresenta perda de 14,25%, bem próximo da perda teórica para o mineral. O pico endotérmico, caracterizado pela reação de desidroxilação, está compreendido entre 460° e 675° C. O pico exotérmico, responsável pela nucleação da mulita está entre 985° e 1005°C.

Apesar de pequena a variação lateral dentro de um mesmo horizonte, observou-se uma sensível diferença já em termos verticais, como o apresentado na Figura 36. São três amostras de

caulim *soft*, sendo que a amostra C1-3 apresenta-se com uma quantidade em peso expressiva de minerais pesados, responsável pela baixa de 12,2% de perda de peso. É de se esperar que o pico endotérmico seja relativamente menos intenso e em torno de 550°C. As outras duas amostras ficam em torno de 13,3% de perda de peso total.

As Figuras 37 e 38 apresentam uma distribuição verticalizada ao longo do horizonte de caulim *soft* e *flint* portanto, da base para o topo dos perfis 5 e 6.

O perfil 5 inclui caulim *soft* arenoso na base, caulim *soft*, transição entre *soft* e *flint* e no topo o caulim *flint*. A perda de peso total do caulim das amostras P5-3, 4 e 5 se mostraram entre 13,5 a 13,8%, enquanto que as amostras P5-1 e 2 tiveram suas perdas de peso em 8,7% e 11,7% respectivamente, em função da quantidade de areia associada (difratogramas de raios x, também confirmam a presença de quartzo). Os picos endotérmicos e exotérmicos se apresentam menos intenso se comparados com os teores de areia existente na amostra.

As amostras do perfil 6 apresentam comportamento similar aquelas do perfil 5, com a diferença que a amostra P6-1 (caulim arenoso) apresenta perda de 9,4% em peso e as demais amostras ficam entre 14,1 a 14,7% de perda de peso total. O pico endotérmico da amostra de caulim arenoso, também se apresenta menos intenso e mais largo, definindo a relação quantitativa (caulinita/quartzo) da amostra analisada.

Segundo Grim (1962) é comum ocorrer em caulinitas bem cristalizadas um pico endotérmico antes do pico exotérmico de nucleação da mulita, o que não foi observado neste trabalho, apesar de se estar trabalhando com caulinitas bem cristalizadas.

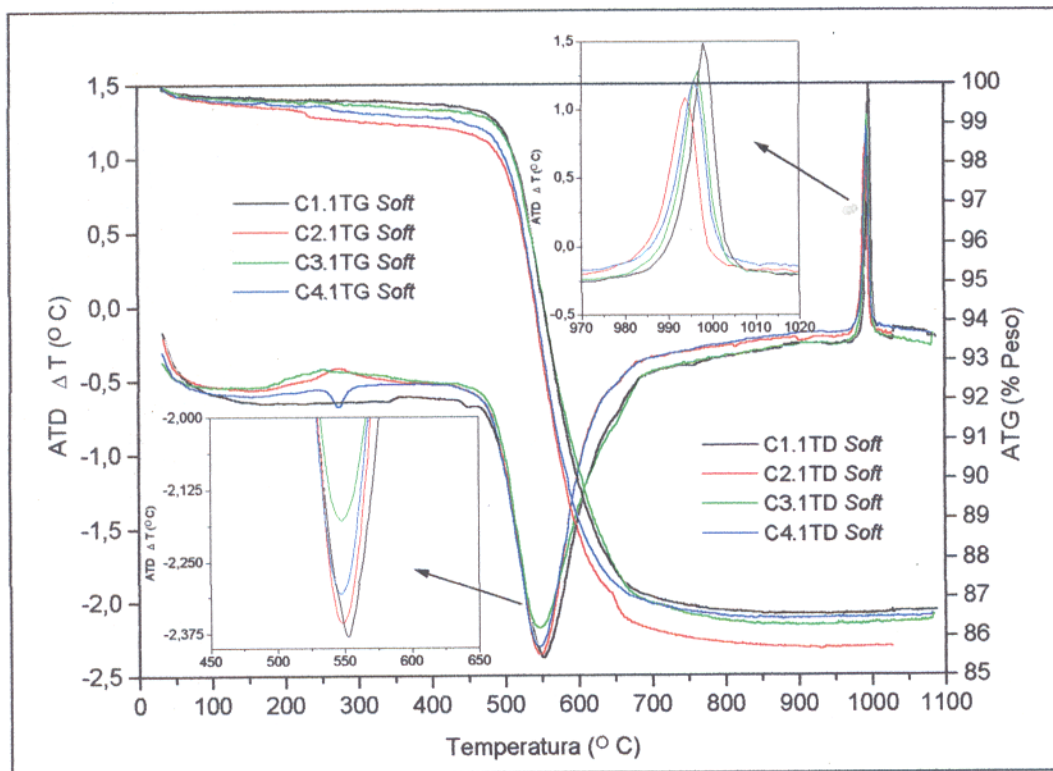


Figura 35 – Análise termogravimétrica e termodiferencial do caulim *soft* (disposição lateral).

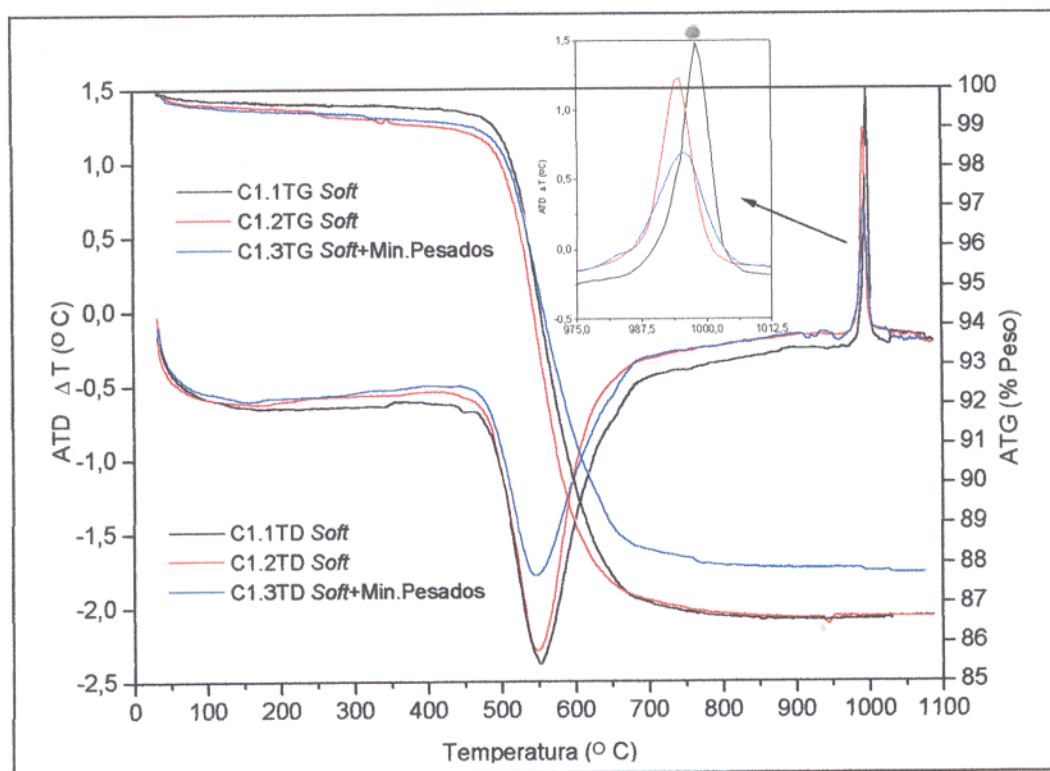


Figura 36 – Análise termogravimétrica e termodiferencial do ponto C1 (*soft*) (disposição vertical).

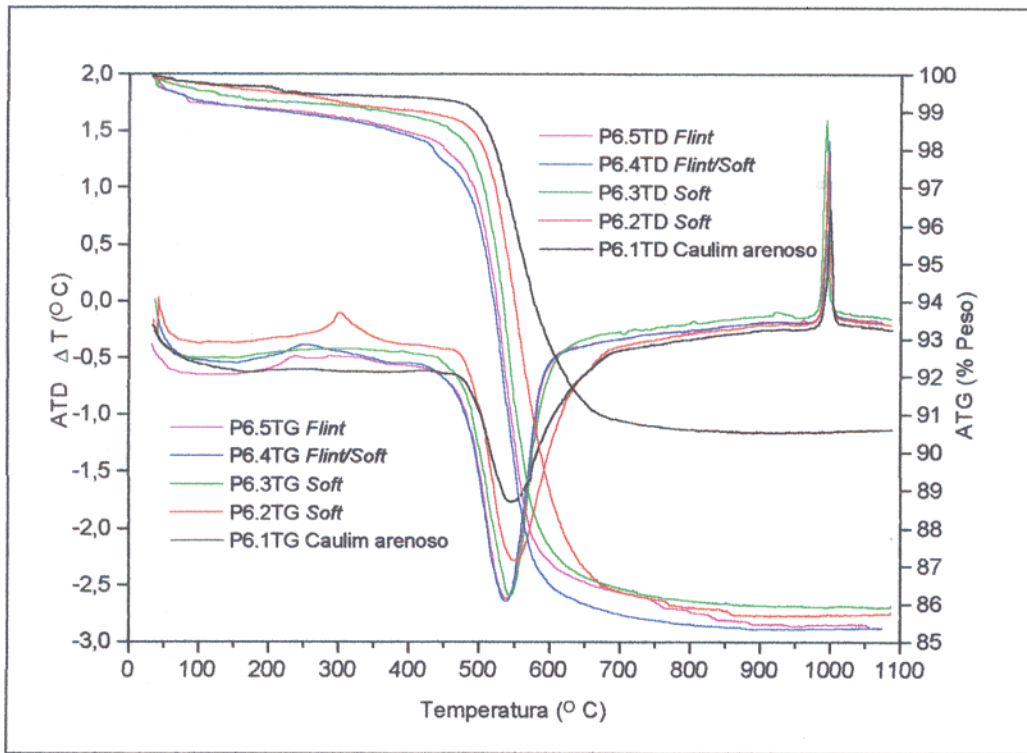


Figura 37 – Análise termogravimétrica e termodiferencial do perfil 6 no horizonte caulínico.

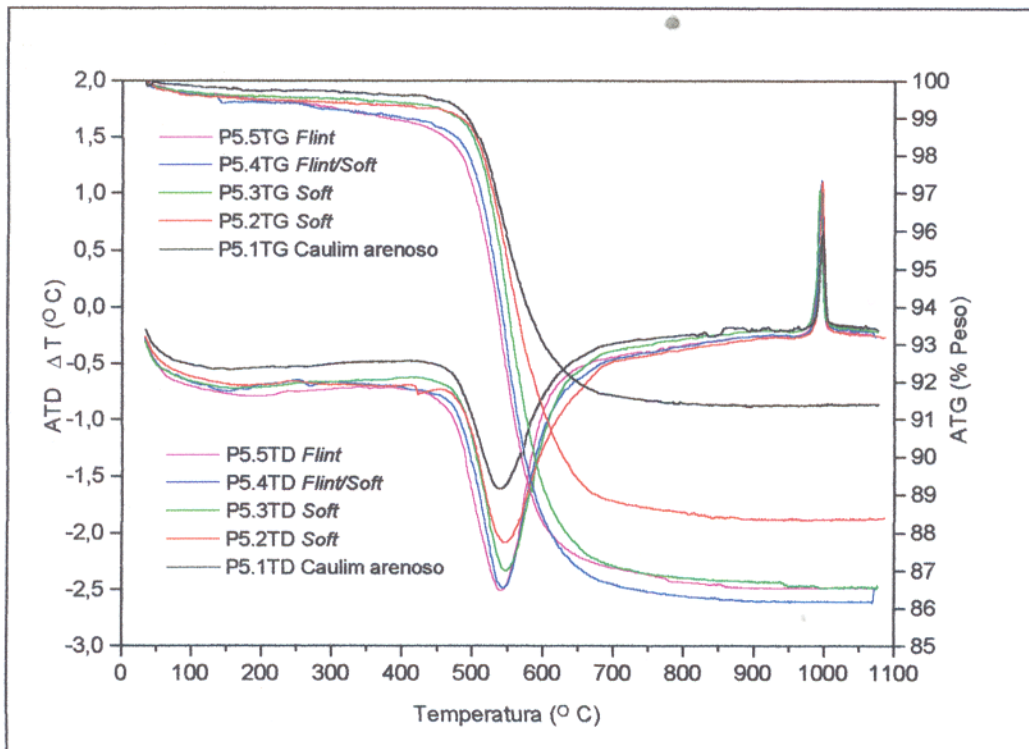


Figura 38 – Análise termogravimétrica e termodiferencial do perfil 5 no horizonte caulínico.

6.1.3 Por Infravermelho (IV)

Infravermelho é a região do espectro eletromagnético que fica entre o visível e as micro-ondas. A unidade de medida é a frequência ou o comprimento de onda. No infravermelho a frequência é normalmente expressa em unidades de número de onda, ou centímetros recíprocos (cm^{-1}), que são o número de ondas por centímetro. O comprimento de onda é expresso em micrômetro (10^{-3} mm), abreviado μm . A região do infravermelho estende de $0,75\mu\text{m}$ até quase 1mm, mas o intervalo mais usado pelo químico é de 4000 a 400 cm^{-1} ($2,5$ a $25\mu\text{m}$), chamada a região fundamental.

Todas as moléculas consistem de átomos mantidos juntos por ligações químicas. Estes átomos vibram um com respeito ao outro. As ligações funcionam como molas que conectam os átomos. Cada molécula tem seu conjunto único de frequências vibracionais. As frequências dessas vibrações estão na faixa das frequências infravermelhas da radiação eletromagnética.

Para Bessler (1983) a absorção da radiação infravermelha está intrinsecamente relacionada com movimentos moleculares periódicos (principalmente vibrações). Ocorre absorção de radiação, quando a vibração molecular envolve uma mudança periódica do vetor elétrico (momento de dipolo) cuja frequência coincide com aquela da radiação incidente, ou seja, energia eletromagnética (radiação) é transformada em energia mecânica (vibração).

A ligação O-H é bastante polar, portanto as vibrações correspondentes criam absorções de elevada intensidade no espectro. As frequências de estiramento O-H são muito sensíveis ao ambiente cristalinoquímico pela formação de "pontes de hidrogênio" entre um átomo de oxigênio da vizinhança próximo (Farmer, 1974).

Segundo Flament¹⁰ apud Duarte (1996) a caulinita apresenta os seguintes espectros em infravermelho: quatro bandas de vibração centradas em 3700 , 3670 , 3650 e 3620 cm^{-1} ; duas bandas de deformação Al-OH centradas em 915 e 940 cm^{-1} ; sete bandas de vibração da ligação Si-O-Si, sendo três simétricas em 690 , 750 , 790 cm^{-1} , duas antissimétricas em 1010 e 1040 cm^{-1} , uma antissimétrica (Si-O) em 1060 cm^{-1} e uma simétrica (Si-O) em 1110 cm^{-1} .

Badia (1974) entre outros autores, tem mostrado uma relação entre a intensidade das bandas relacionadas ao radical hidroxila e o grau de cristalinidade da caulinita. Contudo, algumas

¹⁰ FLAMENT, A. 1976. *Etude géologique, minéralogique et géochimique des formations kaoliniques associées aux bauxites varoises*. Thèse de Docteur de 3e cycle, Géochimie Appliquée. Univ. Paris VI. 120p.

afirmações podem ser feitas neste sentido, dentre elas as seguintes: a banda de absorção centrada em 3620 cm^{-1} caracterizado pela hidroxila, sendo que conserva a intensidade constante qualquer que seja o grau de cristalinidade da caulinita; a banda em 3700 cm^{-1} seria característica do grau de empilhamento, pois corresponde à vibração perpendicular ao plano "ab"; as bandas 3670 e 3650 cm^{-1} correspondem à vibração paralela ao plano "ab".

Uma caulinita bem cristalizada apresenta duas bandas de absorção em 915 e 938 cm^{-1} , a primeira é intensa e a segunda aparece sob a forma de um discreto ombro (Flament, 1976).

Para Van Olphen & Fripiat (1979) a intensidade da banda 3669 cm^{-1} , quando fraca, indica que a caulinita não é bem cristalizada, e caso contrário, trata-se de uma mineral com baixo grau de desordem. A duplicação da banda em 1100 cm^{-1} caracteriza uma caulinita mal cristalizada.

Na Figura 39, são observados espectro em infravermelho de amostras coletadas dentro do horizonte de caulim *soft* e uma amostra de argila caulínica vermelha (conhecida na mina como furo negativo) localizada a 100 metros a sul da cava da mina. As quatro bandas de vibração da hidroxila se acham presentes, bem como as duas bandas de deformação Al-OH em 915 cm^{-1} e 938 cm^{-1} , ambas as bandas são características de uma caulinita bem cristalizada. A duplicação tênue da banda em 1100 cm^{-1} também assegura uma caulinita com baixo grau de desordem.

As Figuras 40 e 41 apresentam a variação vertical do grau de cristalinidade dentro do horizonte caulínico com os perfis P-5 e o P6, na intenção de caracterizar o caulim bem cristalizado ou com baixo grau de desordem estrutural. No perfil 5, a amostra P5-5 é a que não apresentou as quatro bandas de vibração O-H, configurando a mal cristalinidade da caulinita, o que é confirmado pela duplicação da banda em 1100 cm^{-1} . No perfil 6, as amostras P6-1 e 2 apresentam bem definidas as quatro bandas de vibração O-H e denotando a mal cristalinidade das amostras P6-3 a 5 com a duplicidade da banda em 1100 cm^{-1} .

A Figura 42 apresenta duas amostras especiais (P6-NP com filmes de minerais pesados e P6NPBL4 compostos por *booklets* bem desenvolvidos de caulinita) e duas análises feitas em dois produtos finais da Empresa RCC, conhecido como caulim DG e NP (*Powder*). As bandas de vibração Al-OH apresentam-se bem desenvolvidas e apenas a amostra P6-NP apresenta a banda em 915 e 938 cm^{-1} pouco desenvolvido em relação as demais. As bandas de vibração da ligação Si-O-Si compreendidas entre 1000 e 1117 cm^{-1} , também se acham pouco desenvolvida na amostra P6-NP, talvez pela presença relevante de minerais pesados.

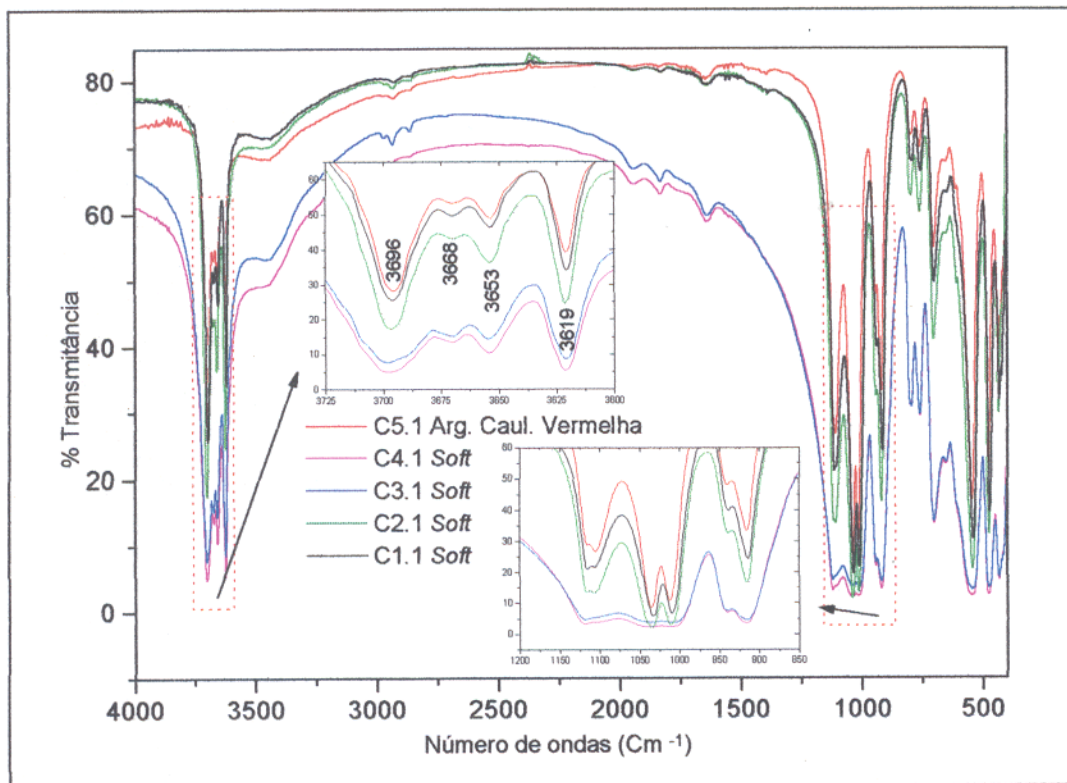


Figura 39 – Espectro infravermelho do caulim soft com ênfase à distribuição lateral.

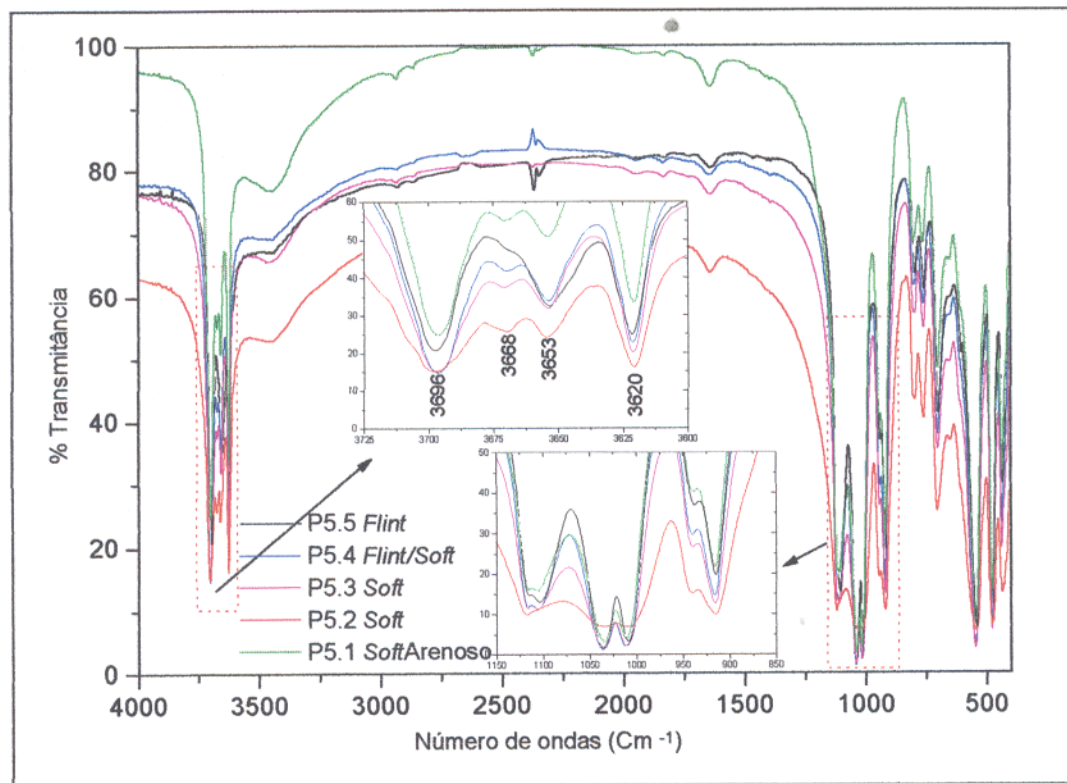


Figura 40 – Espectro infravermelho do caulim soft com ênfase à distribuição vertical no perfil 5.

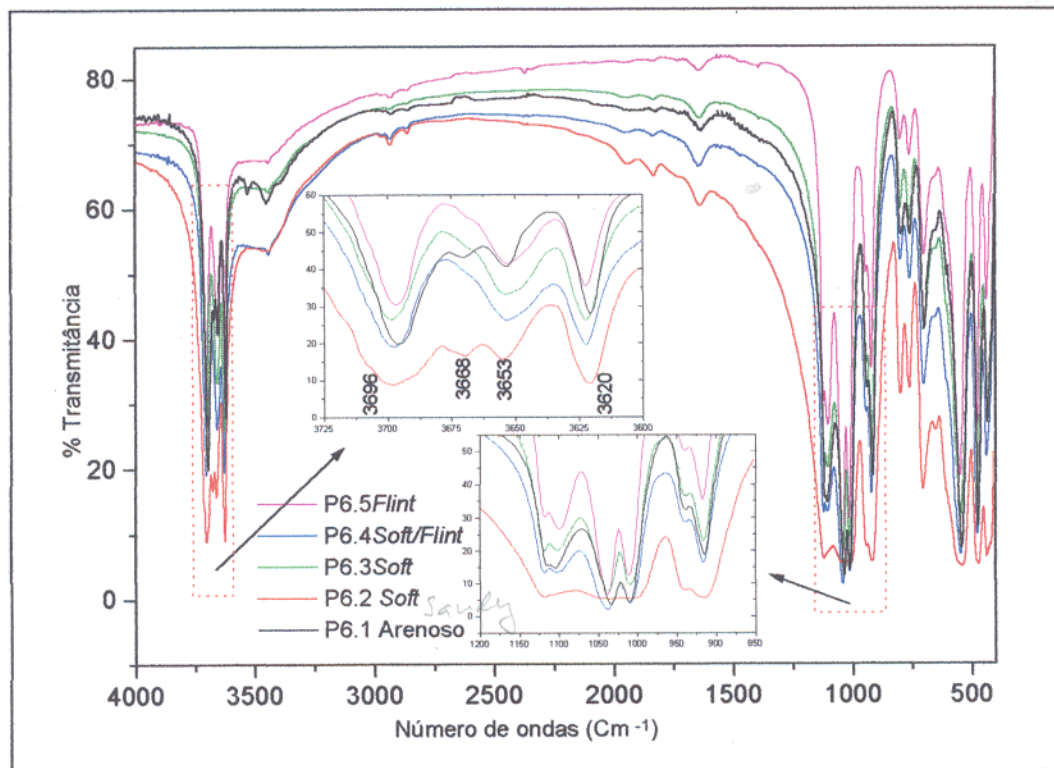


Figura 41 - Espectro infravermelho do caulim *soft* com ênfase à distribuição vertical no perfil 6.

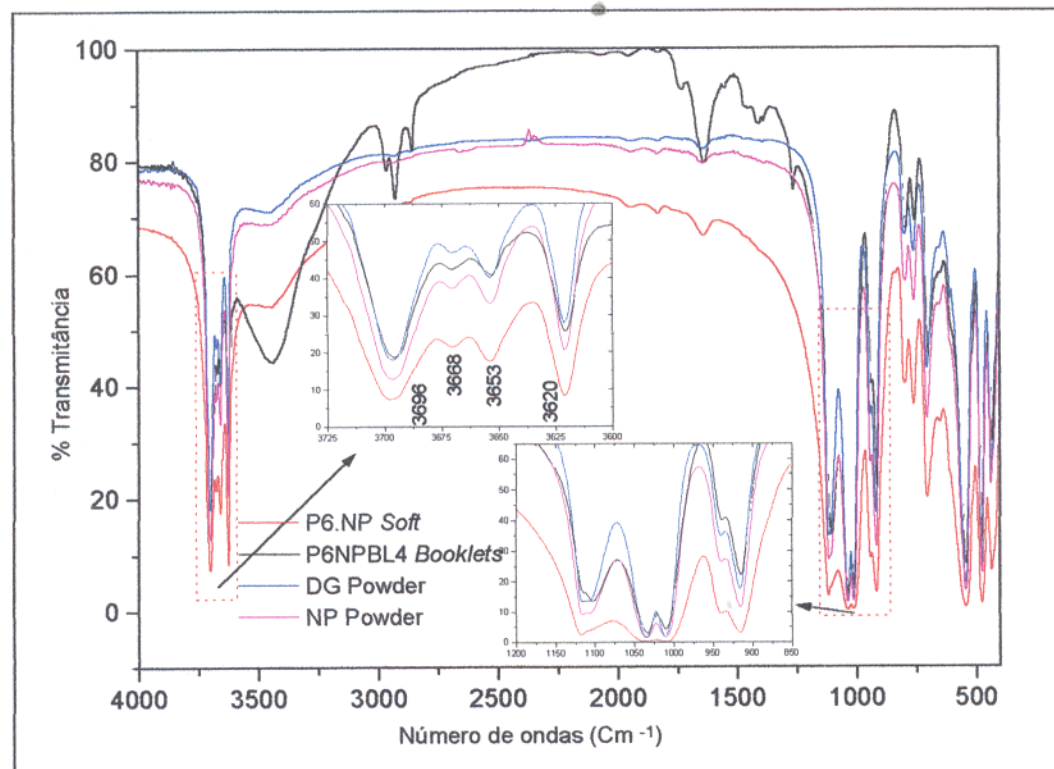


Figura 42 - Espectro infravermelho do caulim *soft*, booklets e dois produtos finais da RCC.

6.1.4 Análise Morfológica por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A MEV mostra que o caulim da RCC se apresenta como agregados de cristallitos euédricos a subédricos, formando uma massa heterogênea (Figura 43), e onde em porções localizadas são desenvolvidas estruturas vermiculares (*booklets*) com diâmetros que variam em torno de 15 μ m (Figuras 44 e 45), o que já foi mostrado em seções polidas ao microscópio petrográfico e pequenos fragmentos a lupa binocular.

Ao contrário da morfologia do caulim do Jari, desprovida desses agregados sanfonados bem desenvolvidos de caulinita (Duarte, 1996), os agregados vermiculares da mina da RCC chegam a atingir excepcionalmente 300 μ m de comprimento. Os agregados de cristallitos ou *booklets* apresentam-se mais desenvolvidos na base do caulim *soft* e diminuem em direção ao topo deste horizonte, tornando-se ausente no horizonte de caulim *flint*, onde domina uma massa criptocristalina.

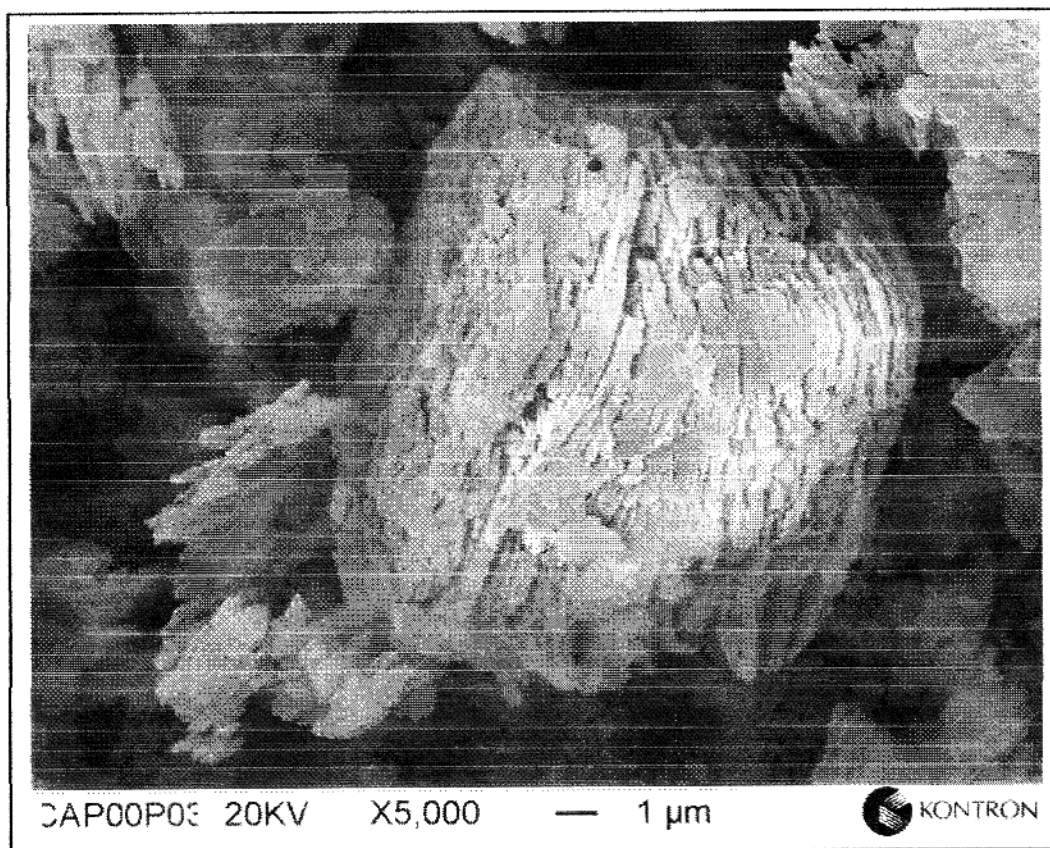


Figura 43 – Sanfonas de caulinita mostrando o empilhamento dos cristallitos no caulim da RCC.

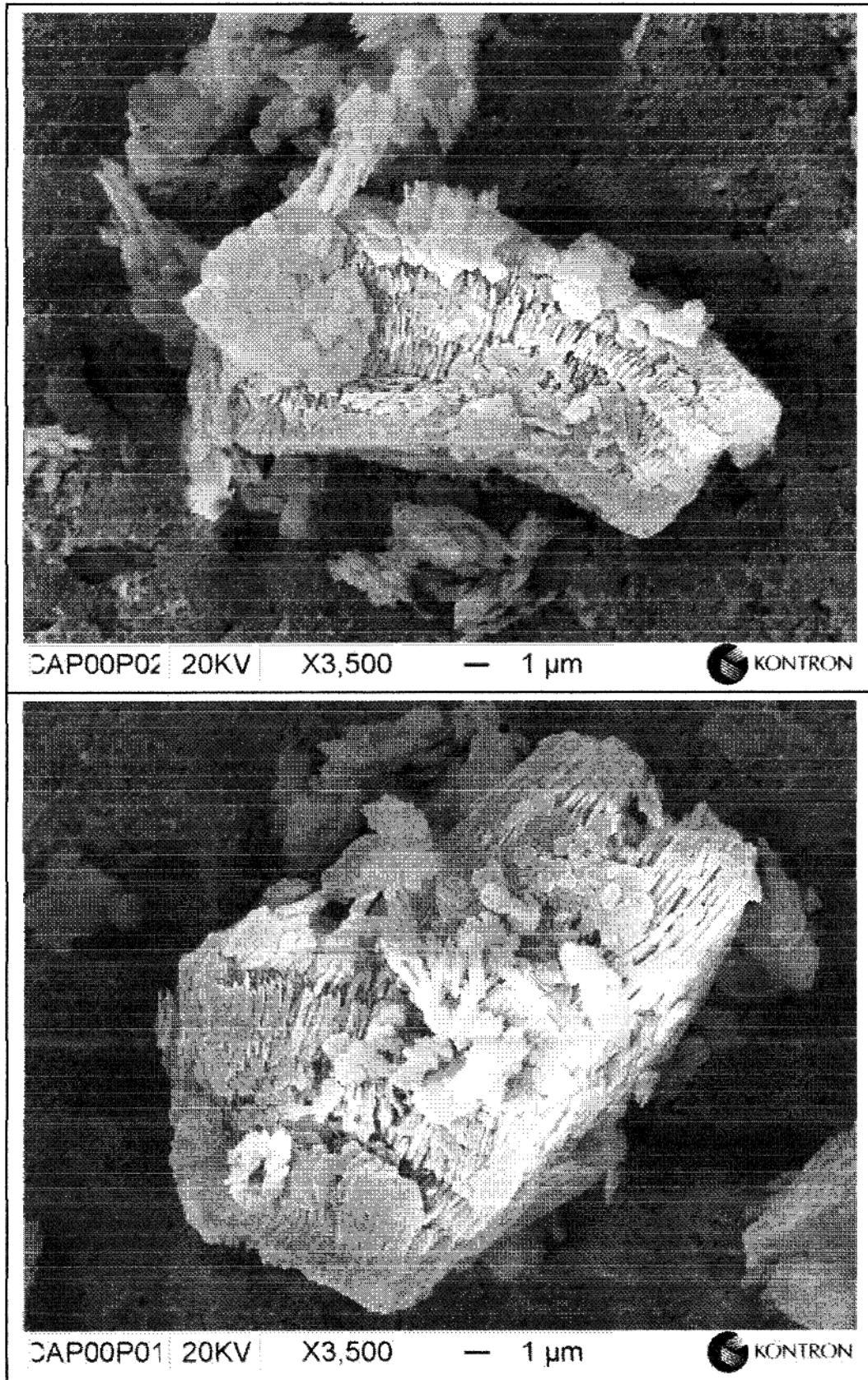


Figura 44 – Sanfonas (*booklets* ou *stacks*) bem desenvolvidos de caulinita no caulim da RCC.

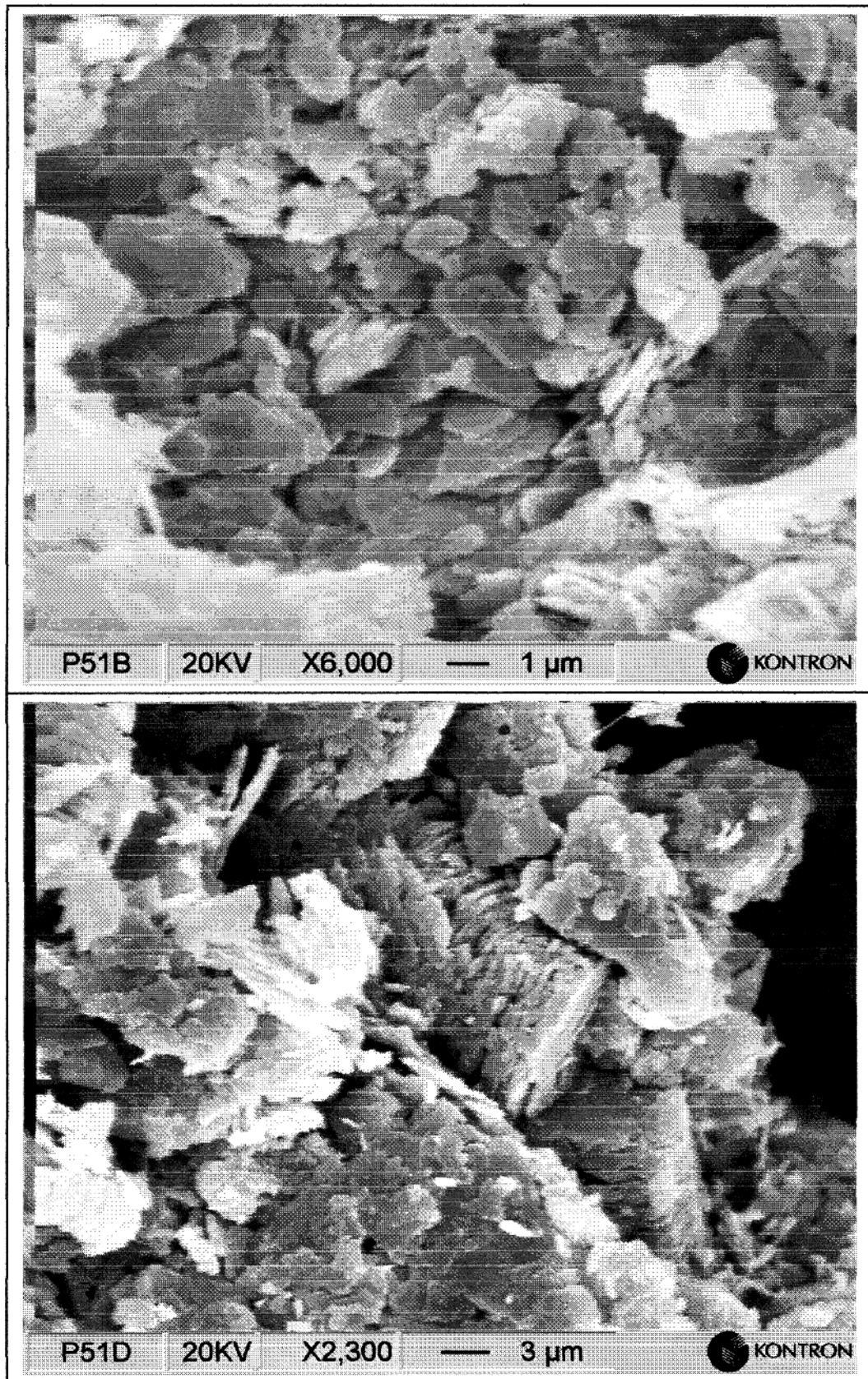


Figura 45 – Cristalitos pseudo-hexagonais (média 2 μm). Pilha vermicular de caulinita (10 μm de diâmetro).

6.1.5 Análise por MEV com Sistema de Energia Dispersiva (SED)

Foram analisadas quatro pontos em duas amostras (P-5-1 e P5-2) por microscopia eletrônica de varredura com sistema de energia dispersiva. Os valores em óxidos são calculados a 100% em peso e apresentados na Tabela 7. Devido limitações do método e sua aplicação ao caulim, os valores de Cl e F, são baseados na equivalência do peso atômico do oxigênio ($O_2=16$). Uma das limitações é a não detecção do elemento hidrogênio (peso atômico <10).

Os valores encontrados para SiO_2 , variam de 59,88 a 62,20%, portanto em média de 31% acima do valor teórico da caulinita que é de 46,54%, indicando que há um excesso de sílica, provavelmente na forma de quartzo, mineral sempre presente.

Os valores de Al_2O_3 apresentam um desvio relativo menor, com a média em torno de 36% em peso, e estando portanto 8,7% abaixo do valor teórico para caulinita, que é de 39,5%. Como é de se esperar, os valores em excesso para o Si, tendem a mostrar valores um pouco abaixo para o Al, já que os valores apresentados não são normalizados com base no mineral caulinita.

Valores de FeO, variam de 0,25 a 1,39% em peso. Numa amostra não foi detectado TiO_2 , enquanto que nas outras, os valores variam de 0,02 a 2,21%, indicando presença de minerais de anatásio e/ou rutilo no caulim. Os valores para K_2O variam de 0,19 a 0,94% indicando a contribuição da mica branca (muscovita) no caulim.

Tabela 7 – Análises químicas (% peso) por microscopia eletrônica de varredura (MEV-SED) do caulim.

	P5-1-2	P5-2-2	P5-2-3	P5-2-4	Média
SiO_2	62,20	60,00	59,88	61,83	60,98
Al_2O_3	36,97	35,33	36,19	35,78	36,07
FeO	0,25	0,57	0,61	1,39	0,71
TiO_2	0,00	2,21	1,49	0,02	0,93
MnO	0,00	0,12	0,08	0,14	0,09
CaO	0,13	0,01	0,57	0,00	0,18
Na_2O	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
K_2O	0,19	0,48	0,94	0,52	0,53
ZrO_2	0,23	0,96	0,00	0,00	0,30
Cl *	0,02	0,09	0,16	0,18	0,11
F *	0,00	0,22	0,09	0,13	0,11
Soma	100,24	100,56	100,62	101,38	100,70

* F = equivalente a O ($16/2*19$) e * Cl = equivalente a O ($16/2*35,45$).

7 – GEOQUÍMICA

7.1 INTRODUÇÃO

Na caracterização química do caulim da área da RCC, foram selecionados quatro perfis (P5, P10, P6/14 e P9) e que se apresentam distribuídos ao longo da cava oeste da mina, de modo a se ter uma representatividade das tiras 2 e 3. Foram coletadas amostras dos diferentes horizontes, dos perfis laterítico maturo e imaturo, com ênfase ao caulim *flint*, *soft* e caulim arenoso, ilustrados na Figura 46. A distribuição desses perfis em uma seção mais representativa de toda a tira 3, foi apresentada na figura 13. Ressalta-se que o perfil P6/14 é um perfil composto.

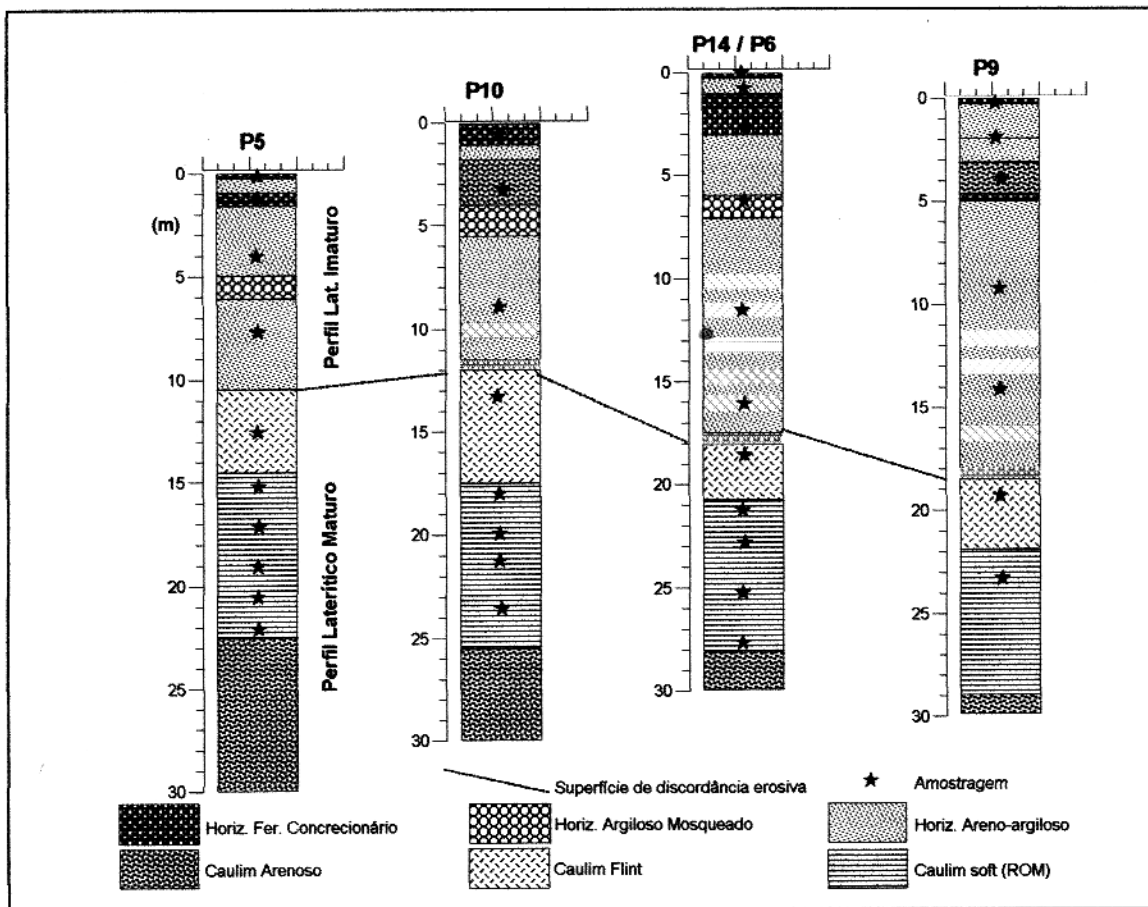


Figura 46 - Disposição dos quatro perfis analisados quimicamente ao longo das tiras 2 e 3 da mina da RCC.

Os resultados obtidos das análises químicas para elementos maiores, menores e traços nos quatro perfis selecionados estão apresentados nas Tabelas 8 e 9. Nestas tabelas, estão incluídas

amostras de diferentes tipos de caulim (*soft* e *flint*) e horizontes argilo-arenosos e ferruginosos/concrecionários, nas porções medianas e topo, respectivamente.

Nos horizontes caulínicos observa-se variações significativas nos teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , responsáveis segundo Grim (1968) pela caracterização dos caulins. No decorrer da discussão desse capítulo, será dado ênfase a esses três constituintes, além do TiO_2 .

Segundo Grim (1968) caulins s.s. (*sensu strictu*) apresentam a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ próxima ao da caulinita teórica (1,178), com teores de $\text{Fe}_2\text{O}_3 < 2\%$. Esses mesmos valores para a caulinita teórica são citados por Giese (1988). Portanto, segundo esses critérios, das amostras apresentados nas tabelas 8 e 9, apenas aquelas indicadas com asterisco (*) se enquadram como caulins (12 amostras) e que apresentam uma razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ média de 1,189.

7.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Segundo o critério de Grim (1968) as 12 amostras de caulim da RCC apresentam valores médios de SiO_2 de 44,72%, Al_2O_3 de 38,16%, Fe_2O_3 total de 1,03%, TiO_2 de 1,33%, e perda ao fogo de 13,65% (Tabelas 8 e 10).

O diagrama triangular (Figura 45) apresenta os valores de SiO_2 X Al_2O_3 X Fe_2O_3 da caulim da RCC com caulins de outras localidades, citados por Moraes (1994).

As amostras C1-3 (concentração de minerais pesados), P5-5 (caulim *flint*) e C5-1 (argila vermelha - amostra localizada a 100 metros a sul da tira 3, também conhecida como amostra de furo negativo) não se enquadram como minério de caulim, pois os valores de Fe_2O_3 estão acima de 2% propostos para caulins *sensu strictu*. As amostras P6-1 e P5-1 apresentam valores de SiO_2 acima de 54,7%, acima portanto dos valores propostos por Grim (1968).

As amostras P6-1 e P5-1 apresentam valores de SiO_2 com valores de 62,21% e 63,90%, respectivamente, o que se deduz tratar de um caulim arenoso, o que é confirmado pelos valores de perda ao fogo de 9,43% e 9,10% respectivamente.

A amostra C5-1, apesar de apresentar valores para SiO_2 , Al_2O_3 e perda ao fogo dentro dos valores aceitáveis para o caulim, trata-se de uma argila vermelha, por apresentar valores de Fe_2O_3 acima de 2%, contrariando portanto um dos conceitos de caulim, que é um mineral branco ou quase branco.

Tabela 8 - Composições químicas dos elementos maiores das amostras dos perfis da mina da RCC.

AMOSTRA	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	TiO ₂ (%)	H ₂ O+ (%)	Soma (%)
P5-9	69,84	15,13	5,09	0,68	8,39	99,13
P5-8	30,48	17,10	41,89	1,09	8,67	99,23
P5-7	72,81	15,58	3,35	0,99	6,74	99,47
P5-6	64,49	21,75	2,83	0,86	8,65	98,58
P5-5	44,49	37,36	2,50	1,88	13,67	99,9
P5-4*	44,80	37,56	1,18	1,98	13,62	99,14
C4-1*	44,96	38,35	1,02	1,09	13,67	99,09
P5-3*	44,73	37,88	0,77	1,38	13,67	98,43
P5-2*	53,18	33,15	0,57	0,61	11,63	99,14
P5-1	63,90	24,48	0,89	1,09	9,10	99,46
P10-8	29,97	20,48	38,16	1,14	9,89	99,64
P10-7	51,00	27,23	7,91	1,34	11,66	99,14
P10-6	56,87	25,20	5,18	1,19	10,40	98,84
P10-5	47,21	33,41	5,00	0,99	12,77	99,38
C1-1*	43,63	39,57	1,04	0,77	13,92	98,93
C2-1*	44,51	37,87	0,99	1,69	13,68	98,74
C1-2*	44,42	37,32	1,50	2,04	13,56	98,84
C1-3	39,65	32,91	3,69	8,12	12,00	96,37
P14-11	71,77	13,76	4,14	1,37	8,22	99,26
P14-10	61,31	21,25	6,01	0,73	9,73	99,03
P14-9	42,52	24,76	20,90	1,28	10,20	99,66
P14-8	75,59	13,60	4,01	0,51	5,79	99,5
P14-7	86,98	7,93	1,50	0,60	2,68	99,69
P14-6	81,07	10,95	2,15	0,60	3,67	98,44
P6-5*	44,64	37,71	1,66	1,91	13,94	99,86
P6-4*	44,16	39,18	0,51	1,30	13,97	99,12
P6-3*	44,23	38,91	0,94	1,26	13,71	99,05
P6-2*	43,90	39,22	0,96	0,91	13,91	98,9
P6-1	62,21	26,04	0,51	0,74	9,43	98,93
P9-6	40,31	23,10	24,86	0,87	10,18	99,32
P9-5	63,56	20,02	6,72	0,97	7,97	99,24
P9-4	71,11	15,50	4,52	1,06	6,38	98,57
P9-3	82,75	10,86	2,07	0,38	3,56	99,62
P9-2	53,48	12,11	26,49	1,25	7,06	100,39
P9-1	94,02	4,24	0,77	0,29	1,30	100,62
C3-1*	44,04	38,19	1,37	1,03	13,63	98,26
C5-1	44,95	35,78	3,89	1,03	13,37	99,02
Média Crustal	60,32	15,55	8,04	0,95	-	-

Valores sombreados correspondem a amostras caulínicas (*soft e flint*) e com asterisco, amostras de caulim *sensu stricto* (s.s.). Valores de média crustal segundo Krauskopf (1985).

H₂O+ = Perda ao Fogo.

Tabela 9 - Composição química de alguns elementos maiores e traço (em ppm) dos perfis da mina da RCC.

AMOSTRA	Ca	Mg	Na	K	Zn	Cu	Ni	Co	Cr	Mn
P5-9	14	176	76	266	15	<11	24	25	126	60
P5-8	<5	45	41	103	18	<11	23	26	591	39
P5-7	<5	123	98	242	13	<11	24	28	105	49
P5-6	<5	197	105	189	19	<11	34	43	148	66
P5-5	<30	49	251	78	24	9	63	46	247	76
P5-4*	<30	87	277	138	24	9	62	47	41	272
C4-1*	<30	137	147	647	14	10	45	68	33	83
P5-3*	<30	161	280	686	21	8	57	47	40	46
P5-2*	<30	96	112	257	12	9	42	60	7	87
P5-1	<30	95	109	289	11	8	34	35	10	95
P10-8	<5	79	84	144	18	<11	36	36	549	50
P10-7	<5	217	107	668	26	<11	39	32	183	69
P10-6	<5	284	182	1142	18	<11	44	42	173	62
P10-5	<5	238	132	1700	20	<11	49	48	225	33
C1-1*	<30	142	165	239	14	11	49	67	11	53
C2-1*	<30	141	349	504	23	8	58	43	67	47
C1-2*	<30	74	274	218	23	9	51	43	59	151
C1-3	<30	130	266	117	31	8	54	50	38	1250
P14-11	103	187	113	194	16	<11	21	22	95	96
P14-10	<5	173	82	183	20	<11	31	30	145	86
P14-9	<5	39	69	346	47	<11	30	26	310	77
P14-8	<5	157	88	556	11	<11	24	<10	110	48
P14-7	12	128	76	512	7	<11	14	<10	38	63
P14-6	<5	243	112	1517	8	<11	19	<10	66	61
P6-5*	<30	72	271	48	22	7	56	44	113	25
P6-4*	<30	132	126	40	14	9	51	75	118	27
P6-3*	<30	68	89	63	15	13	45	64	140	53
P6-2*	<30	169	146	152	12	10	48	71	14	62
P6-1	<30	84	96	196	11	8	31	46	6	31
P9-6	<5	81	94	277	18	<11	40	35	463	69
P9-5	<5	152	132	1082	16	<11	31	27	187	78
P9-4	<5	250	130	1272	13	<11	30	26	129	89
P9-3	<5	154	95	652	8	<11	19	<10	39	52
P9-2	<5	119	65	424	14	<11	25	22	83	66
P9-1	27	64	85	204	7	<11	12	<10	14	16
C3-1*	<30	122	130	416	16	10	45	65	16	160
C5-1	<30	88	295	123	24	8	59	41	21	226
Média Crustal	4.1%	2.3%	2.4%	2.1%	70	55	75	22	100	1000

Valores em ppm, (valores sombreados correspondem a amostras caulínicas - *lato sensu* e com asterisco caulins *sensu strictu*). Valores de média crustal segundo Krauskopf (1985).

Amostras com altas percentagens de SiO_2 (superiores a 80%), e valores de Al_2O_3 a no máximo 11%, associadas com baixos valores de perda ao fogo (1% a 5%) são típicas de areias quartzosas do perfil laterítico imaturo (pertencentes à Formação Barreiras).

Em relação aos elementos Ca, Mg, Na e K, apesar de serem elementos maiores, os mesmos apresentam-se em concentrações extremamente baixas, a nível de ppm, o que é característico em perfis lateríticos ou materiais supergênicos bastante lixiviados. Dessa forma os resultados da análise desses elementos e alguns traços são apresentados na Tabela 9, onde os resultados analíticos para os elementos Ca e Cu, apresentam dois diferentes limites inferiores de detecção, em função de diferentes análises realizadas.

A maioria dos elementos traço analisados no caulim, apresenta concentrações abaixo da média crustal, exceto Co (média crustal de 22 ppm), cujos valores variam de 35 a 75 ppm. Os valores das concentrações de Cr (média crustal de 100 ppm) variam de 6 a 247 ppm, porém, há uma frequência de distribuição em torno de 65 ppm.

Concentrações de K entre 500 e 1500 ppm, estão associadas aos horizontes arenosos e relacionados a muscovita na forma de pequenas placas. No caulim, os teores de Na, K e Mg observados, também são representativos da muscovita disseminada. Entre os minerais pesados, a turmalina tem sua contribuição com os elementos Na e Mg (e Cr com a dravita). Segundo Deer et al. (1982), zircões podem apresentar 0,1% de Ca, Fe e Mg, e até 10 ppm de Mn, não se descartando sua contribuição no minério de caulim.

Os valores de Cr (105 a 549 ppm) são superiores à média crustal (100 ppm) e estão provavelmente relacionados aos minerais secundários de Fe (goethita). Comportamento semelhante segue os elementos Ni e Co, devido a baixa mobilidade em condições lateríticas.

Para efeito de comparação na Tabela 10 são apresentados os teores médios das 12 amostras de caulim s.s. da RCC com médias de caulins de outras localidades no Brasil e no Exterior. É dada ênfase aos teores de ferro e titânio, causadores de cor e problemas de ordem industrial nas plantas de processamento.

Os teores de ferro e subordinadamente titânio da mina da RCC apresentam valores em torno de 1% e 1,3%, respectivamente, enquanto os caulins do Jari, são o dobro para o ferro (1,9% a 2,71%) enquanto que para o titânio os valores variam de 1,29% a 1,93%.

Tabela 10 - Comparações de composições químicas de caulins da Amazônia (inclusive RCC), USA e UK.

	Caulinita teórica ¹	Caulim ¹	SG ²	MI ²	BR ²	RC ²	MF ³ Superior	MF ³ Inferior
SiO ₂	46,54	43,6 a 54,7	67,10	57,50	45,70	50,50	43,93	43,39
Al ₂ O ₃	39,50	30,0 a 40,2	22,70	29,70	36,70	33,70	38,86	38,12
Fe ₂ O ₃	-	0,3 a 2,0	0,61	0,59	0,77	0,87	1,89	2,71
FeO	-	ne	0,21	0,19	0,18	0,18	0,14	0,14
TiO ₂	-	0,0 a 1,4	0,79	0,69	2,08	1,80	1,29	1,93
CaO	-	0,03 a 1,5	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	nd	nd
MgO	-	0,0 a 1,0	0,15	<0,10	<0,10	<0,10	0,30	0,45
K ₂ O	-	0,0 a 1,5	0,61	0,02	<0,02	0,04	0,02	0,06
Na ₂ O	-	0,0 a 1,2	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,05	0,06
H ₂ O	13,96	11,0 a 14,3	7,66	11,07	13,87	12,73	14,03	13,53
	Caulim RCC*	Caulim ⁴	SPS ⁵	Alfacote ⁵	Betagloss ⁵	Georgia ⁶	English ⁶	
SiO ₂	44,72	44,64	47,2	46,0	45,0	45,30	46,77	
Al ₂ O ₃	38,16	38,12	37,6	39,0	38,0	38,38	37,79	
Fe ₂ O ₃	1,03	2,20	0,68	0,58	1,0	0,30	0,56	
FeO	nd	nd	nd	nd	nd	0,06	0,11	
TiO ₂	1,33	1,30	0,04	0,53	1,6	1,44	0,02	
CaO	<0,04	0,11	0,08	0,04	0,06	0,05	0,13	
MgO	0,02	0,03	0,2	0,04	0,09	0,25	0,24	
K ₂ O	0,06	0,02	1,39	0,07	0,13	0,04	1,49	
Na ₂ O	0,05	Nd	0,08	0,18	0,29	0,27	0,05	
H ₂ O	13,65	13,52	12,7	13,9	14,0	13,97	12,79	

Valores em %, nd - não determinado, ne - não especificado, < = inferior a ..., - não está presente.

* **Caulim RCC** - Este trabalho.

¹ - Grim, 1968. Perda ao fogo (H₂O) a 950° C.

² - SG - São Gabriel, MI - Manaus-Itaquatiara (Amazonas); BR - BR010, RC - Rio Capim (Pará) (Moraes, 1994)

³ - MF - Morro do Felipe, média dos caulins superior e inferior (Duarte, 1996)

⁴ - MF2 - Morro do Felipe (Araújo, 1995)

⁵ - SPS - Reino Unido; Alfacote e Betagloss - USA (Bristow, 1987)

⁶ - Georgia - USA e English (St Austell) Reino Unido (Murray, 1986).

7.3 DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA DOS ELEMENTOS NOS PERFIS

Com este item, objetiva-se a visualização, na forma de perfis de distribuição geoquímica, do comportamento dos diferentes elementos, na sucessão vertical dos horizontes, dentro do contexto dos perfis lateríticos.

Dois perfis geológicos representativos são apresentados, perfil P5 e P6/P14 com a distribuição geoquímica dos elementos maiores e alguns elementos traço (Figuras 48 e 49).

Os teores de SiO_2 apresentam-se enriquecidos principalmente no solo, rico em matéria orgânica, horizonte areno-argiloso, onde está associado a fragmentos de concreções ferruginosas e material quartzoso de granulometria areia. Sotoposto ao horizonte caulínico *soft*, de forma transicional, ocorrem as areias caulínicas, ricas em quartzo, sendo visíveis na base do perfil 14.

O comportamento do Al_2O_3 (teores entre 14% e 25%) é inverso ao SiO_2 , mostrando que no topo do perfil, precisamente, na cobertura ou solo, os argilominerais estão presentes, o que também é visível no horizonte amarelado (*yellow clay*). A partir daí, os teores tendem a diminuir com o horizonte arenoso, rico em estruturas tipo estratificação cruzada. Os teores voltam a crescer no horizonte caulínico, ficando entre 35% e 40%.

Em relação ao Fe_2O_3 , observa-se teores constantes ao longo de todo o perfil, com um marcante enriquecimento no topo do perfil laterítico imaturo, em uma amostra exatamente no horizonte ferruginoso concrecionário; comportamento parecido, principalmente no perfil laterítico maturo, segue o TiO_2 , com leve aumento na base do perfil maturo, característico da presença de anatásio e rutilo no caulim.

O comportamento do Mn mantém-se estável, com exceção no topo do perfil, onde encontra-se associado aos complexos formando a camada de solo e o horizonte ferruginoso; uma anomalia (com 270 ppm) é visível no perfil 5, onde no topo do caulim *soft*, ocorrem concentrações de minerais pesados e pseudo-óólitos, formando filmes e ressaltados pelo acamamento reliquiar.

É marcante a quebra representada pela superfície discordante entre o perfil laterítico maturo e o imaturo, representada pelo aumento de SiO_2 e decréscimo abrupto dos teores de Al_2O_3 e PF, além de Ni e Co, dentre os elementos-traço.

Mineralogicamente, apesar do perfil maturo ter aproximadamente a mesma composição, i.e. caulinita, geoquimicamente os gráficos mostram que o horizonte de topo (caulim *flint*) tem um comportamento geoquímico distinto do caulim inferior (*Soft*). No topo da seqüência, no horizonte concrecionário do perfil laterítico imaturo, observa-se o domínio de óxidos e hidróxidos de Fe (goethita e hematita).

A superfície de discordância erosiva é caracterizada por uma inflexão, principalmente na distribuição dos elementos maiores como SiO_2 , Al_2O_3 e traços Co, Ni ao longo do perfil, causada pela diferenciação dos perfis maturo (horizonte argiloso) e imaturo (areno-argiloso).

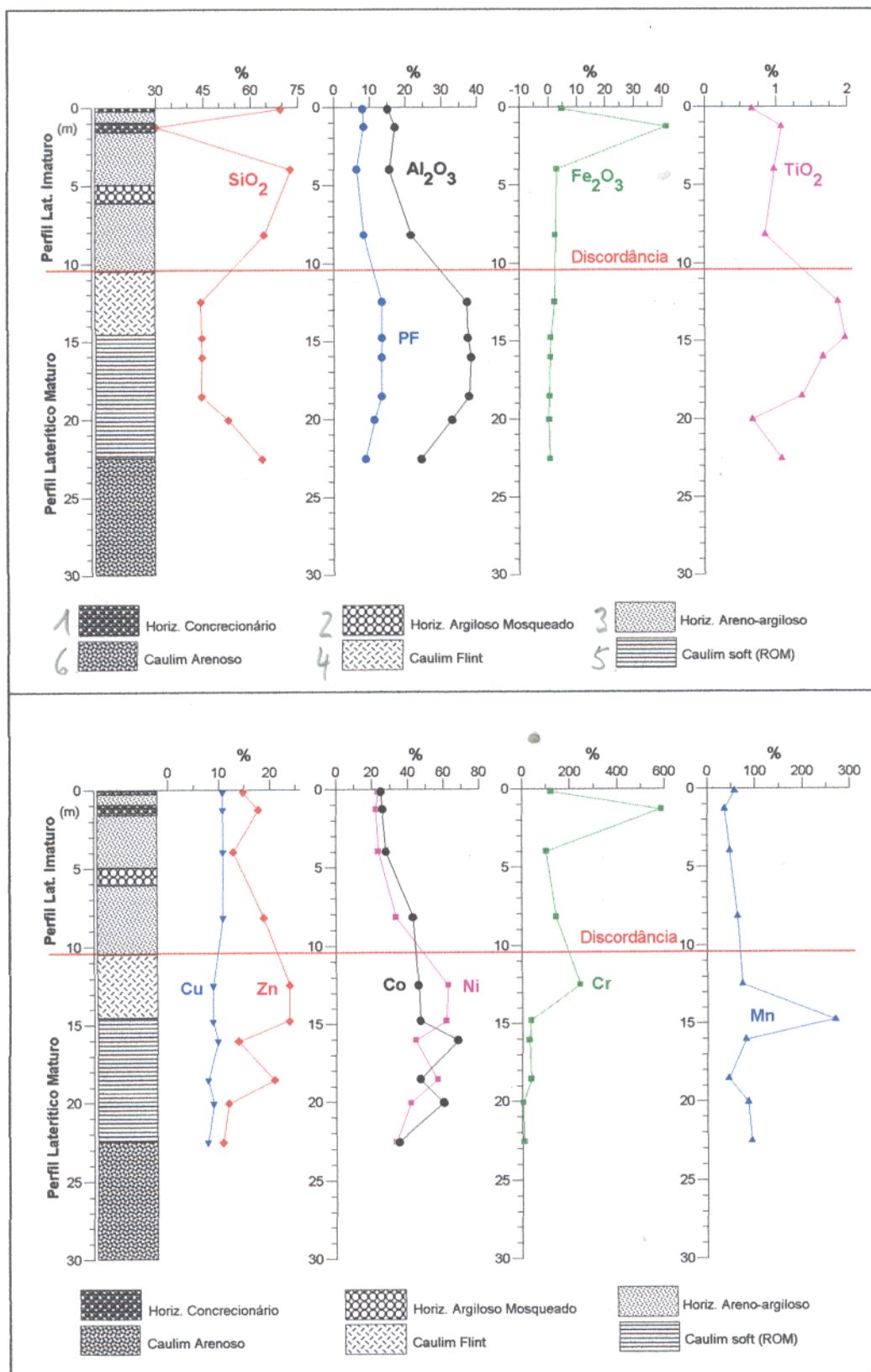


Figura 48 - Comportamento geoquímico dos elementos maiores e traço ao longo do perfil P5.

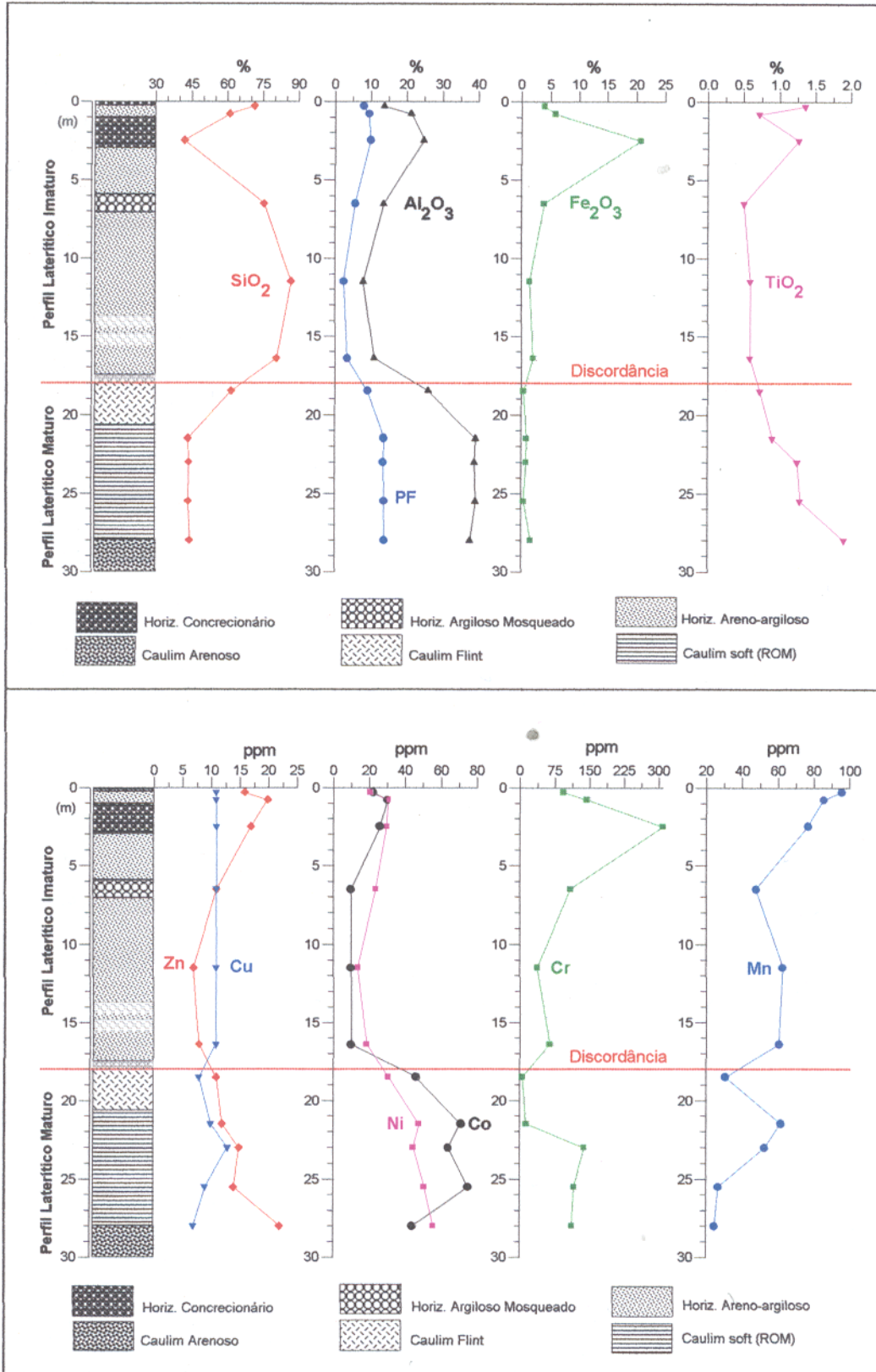


Figura 49 – Comportamento geoquímico dos elementos maiores e traço ao longo do perfil P6/P14.

8 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO CAULIM DA RCC.

8.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, serão abordados as principais propriedades físicas, aplicadas ao tratamento de caulim para fins específicos de cobertura (*coating*) na indústria de papel. As principais propriedades analisadas são descritas a seguir:

- 1) Percentagem de resíduo em malha de 325 mesh,
- 2) Percentagem do tamanho da partícula (granulometria) abaixo de 2 μm ,
- 3) Alvura ou *brightness* (padrão ISO) e Índice de amarelamento ou *yellowness*,
- 4) Viscosidade pelos métodos “Brookfield” e “Hercules”.

Além dessas propriedades, existem outras tais como: abrasividade (padrão Einlehner), receptividade à tinta, absorção de óleo, etc., destinadas a outras etapas do processamento, como por exemplo, na confecção do papel, ou porque são destinadas a confecção de outros produtos, não analisados neste trabalho. A importância desta caracterização física está relacionada aos diferentes tipos de aplicação onde cada propriedade, anteriormente citada está associada a especificidade do produto final.

Nos tópicos a seguir serão descritos os procedimentos para a caracterização física do caulim da RCC.

8.1.1 Percentagem de sólidos

O material que fica retido em peneira 325 mesh, corresponde a **percentagem de sólido**. Nesta etapa ocorre a remoção do material mais grosseiro como grãos de quartzo, placas de mica e outros minerais maiores que a malha da peneira. Em seguida, é seco em estufa, pesados e calculados a percentagem em relação a amostra seca inicial.

A Tabela 11 apresenta as principais características físicas das amostras com tratamento prévio tipo desareamento, representado pela percentagem em peso da fração superior a 325 mesh, pH das amostras secas (20% de sólidos), alvuras cruas (ISO) e percentagem granulométrica cumulativa inferior a 2 μm ; e que foram analisadas ao longo deste trabalho em capítulos anteriores. A partir da Tabela 12 as amostras de cada perfil são reunidas em quantidades aleatórias e apresentados como uma única amostra (P6, C e P5) procurando manter a representatividade de cada conjunto, e que serão medidos as principais propriedades físicas.

As amostras P5-1, P5-2 e P6-1, apresentadas na Tabela 11 e marcadas com asterisco, apresentam uma quantidade expressiva de grãos de quartzo, pois trata-se de caulim arenoso, da base do horizonte de caulim *soft*. A amostra C1-3 representa uma amostra de caulim com filmes de minerais pesados. As amostras P6-4 e P5-5, correspondem ao caulim da interface *soft/flint* do topo do perfil, o que mostra a presença do caulim *flint*, de difícil dissolução em água. Daí os altos valores de percentagem de sólidos em malha de 325 mesh. As demais amostras apresentam valores máximos de 10%, o que está dentro dos padrões de explotabilidade para o caulim ROM.

Dentro do horizonte caulínico *soft* o pH dos dois perfis analisados, parecem demonstrar que há um decréscimo da base para o topo do horizonte.

Tabela 11 - Análise dos parâmetros físicos de quinze amostras de caulim da RCC.

Amostras	% Resíduo >325 mesh	Granulometria (% < 2 µm)	pH (20% Sól.)	Alvura ISO
P6-4	58.09 *	71.2	4.99	68.39
P6-3	18.40 *	80.9	4.67	74.43
P6-2	8.45	47.7	5.24	89.38
P6-1	28.72 *	47.5	5.15	87.77
P5-5	17.46 *	74.1	4.85	62.40
P5-4	4.05	58.3	4.97	79.96
P5-3	9.09	51.2	5.12	81.56
P5-2	20.06 *	46.4	5.22	89.22
P5-1	46.91 *	52.2	5.38	82.52
C1-3	16.53 *	47.0	5.26	77.90
C1-2	3.21	58.1	5.07	75.39
C1-1	5.58	41.3	5.23	88.92
C2-1	2.42	56.0	5.21	78.71
C3-1	7.12	44.8	5.29	84.23
C4-1	3.56	56.1	na	78.77

Amostras P6 e C, são amostras coletadas ao longo de perfil vertical e lateral, respectivamente.

8.1.2 Granulometria

A granulometria é uma característica física fundamental para a indústria de processamento de caulim, mais especificamente quando se trata de uso na cobertura (*coating*) de papel. A distribuição granulométrica das partículas de caulinita são reflexos do comportamento reológico do minério e vai de certa forma direcionar a utilização ao produto final específico.

A Figura 50 mostra que a distribuição granulométrica ao longo da altura média do horizonte de caulim *soft* (C1, C2, C3 e C4) não varia tanto se comparado ao longo dos perfis

analisados, como o caso das amostras dos perfis P5 e P6. Observa-se que as amostras com diâmetros abaixo de $2\mu\text{m}$ apresentam valores de percentagem em peso abaixo de 60%.

Nas amostras P5 e P6, observa-se que há uma variação da percentagem em peso da granulometria ao longo do horizonte de caulim *soft*. Na Figura 51, as amostras da base do perfil P5, se apresentam com percentagem em peso um pouco abaixo dos 50% (P6-1, P6-2) enquanto que as amostras das porções superiores (P6-3, P6-4) apresentam-se com valores acima de 80 e 70%, respectivamente, indicando que as frações mais finas encontram-se na porção superior do referido perfil. O perfil P6 na Figura 52, tende a seguir o mesmo comportamento.

Na Tabela 12, três amostras são selecionadas para os testes das principais propriedades de caracterização física, e apresentam as percentagens de partículas abaixo de $2\mu\text{m}$, separados por processo de centrifugação. As amostras foram padronizadas e indicam que a amostra P6 apresenta uma percentagem de massa acumulativa levemente maior ($91,5\% < 2\mu\text{m}$), tendo portanto, uma granulometria mais fina que as amostras C e P5 ($90,3$ e $90,5\% < 2\mu\text{m}$) respectivamente (Figura 53). Na figura citada anteriormente, também são apresentados os campos de caulins para fins de preenchimento (*filler*) e cobertura (*coating*) com tendência reológica de desenvolvimento de *booklets* para o primeiro, e placas soltas (*plates*) para o segundo respectivamente. As etapas posteriores das análises físicas são baseadas na padronização de 70% de sólidos abaixo de $2\mu\text{m}$, o que é uma especificação do produto final tipo DG.

Tabela 12 - Análise da percentagem de sólidos e granulometria abaixo de $2\mu\text{m}$ de três amostras ROM dispersas da RCC.

Amostra	% sólidos	Dens. da Polpa	Granulometria* $< 2\mu\text{m}$
P6	25,9	1,190	91,5
C	27,4	1,204	90,3
P5	29,0	1,218	90,5

% de sólidos = baseado na densidade da polpa centrifugada; Dens. = densidade da polpa;

* Granulometria centrifugado $< 2\mu\text{m}$.

Ressalta-se que as amostras do horizonte caulínico *flint* não foram processadas no que diz respeito aos ensaios de caracterização física, devido a alta dureza do material e por problemas técnicos de rotina do laboratório. Ressalta-se que uma análise granulométrica indicou uma percentagem de massa acumulada em torno de 95 % das partículas inferior a $2\mu\text{m}$. Trata-se, portanto, de um caulim extrafino e de uma resistência elevada se comparado ao caulim *soft*.

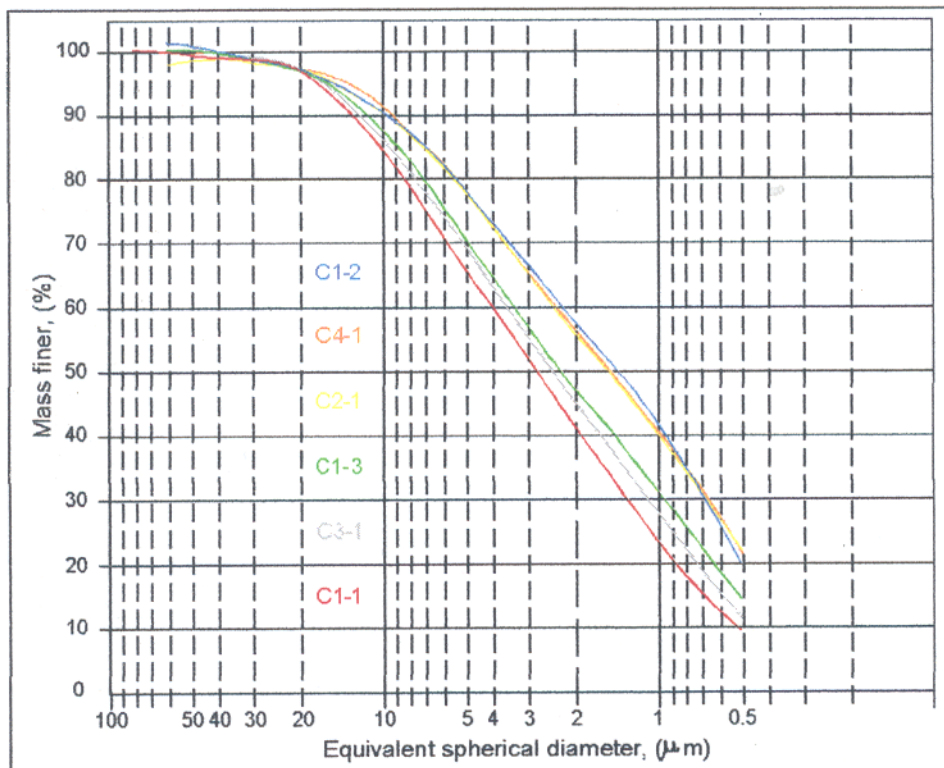


Figura 50 - Curvas de distribuição granulométrica das amostras (C's) ao longo do horizonte de caulim *soft*.

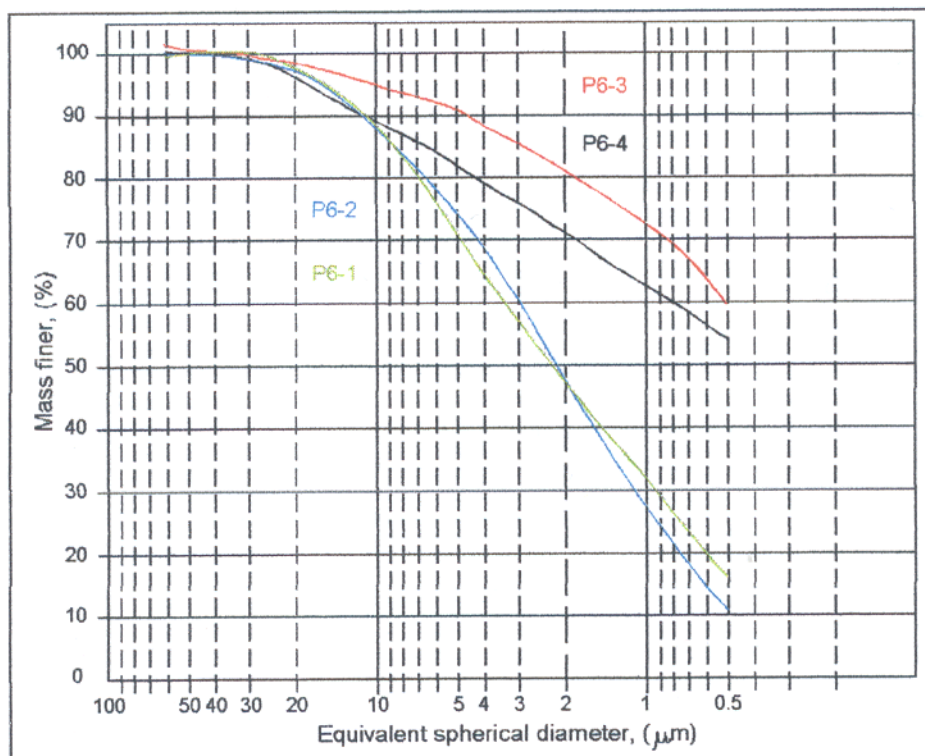


Figura 51 - Curvas de distribuição granulométrica do caulim *soft* ao longo do perfil 6.

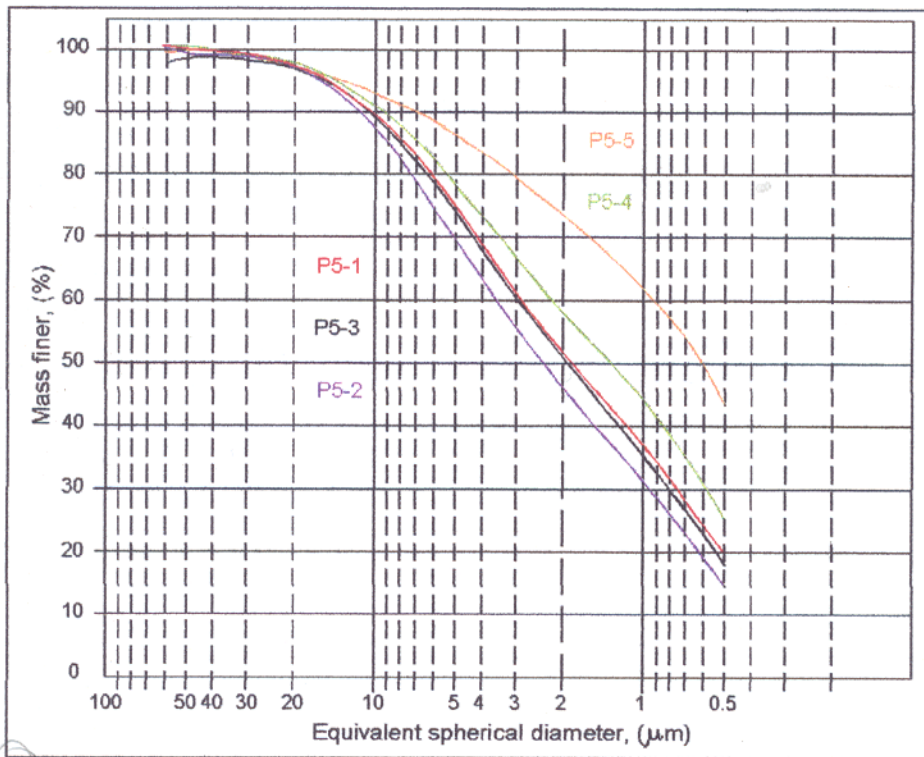


Figura 52 - Curvas de distribuição granulométrica do caulim *soft* ao longo do perfil 5.

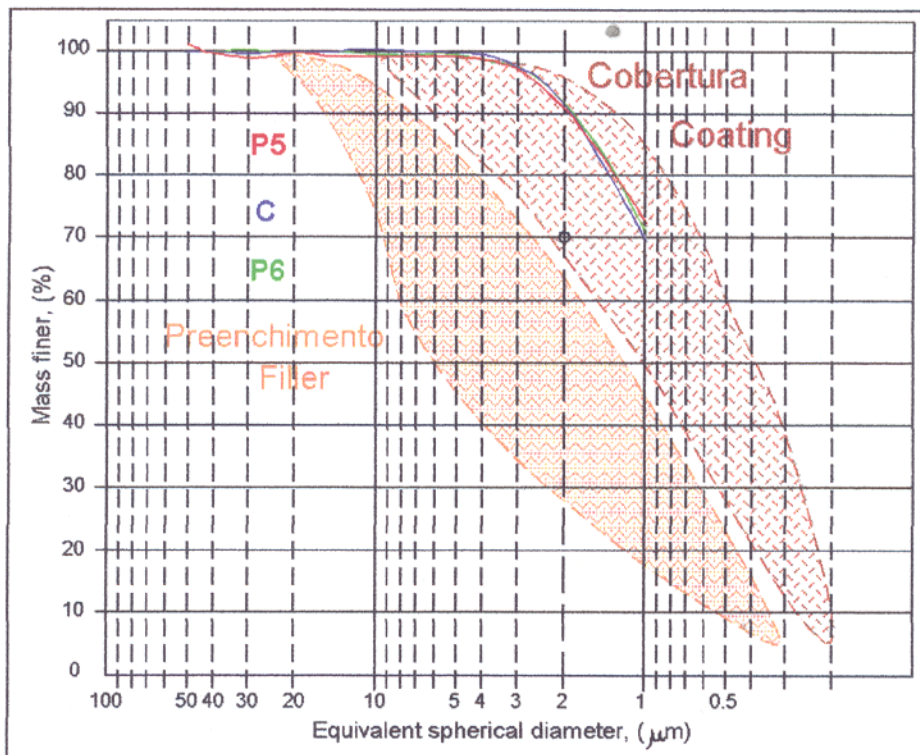


Figura 53 - Curvas de distribuição granulométrica das três amostras de caulim *soft* analisadas (P6, C e P5) e as regiões com características de preenchimento (*filler*) e cobertura (*coating*).

8.1.3 Viscosidade

Viscosidade é a resistência que todo fluido oferece ao movimento relativo de qualquer de suas partes. É o atrito interno de um fluido.

Na Tabela 13 são apresentadas as viscosidades de baixo cisalhamento ou de Brookfield e a de alto cisalhamento ou de Hercules. As “viscosidades disperso” são executadas com adição de 0,05% ou 0,5 kg/ton. de dispersante (poliacrilato de sódio).

Tabela 13 - Análises das viscosidade (Brookfield ou baixo cisalhamento e Hercules ou alto cisalhamento) de amostras padronizadas e tratadas com dispersante

Amostra	Viscosidade Brookfield		Viscosidade Hercules	
	10 RPM	100 RPM	RPM	cP
P6	2.280 cP	445 cP	194	1811
P6 disperso	2.600 cP	504 cP	196	1784
C	1.170 cP	272 cP	350	989
C disperso	1.570 cP	315 cP	378	950
P5	1.700 cP	332 cP	580	595
P5 disperso	1.950 cP	376 cP	656	525

Amostra disperso = 0,05 % (Poliacrilato 40% + Barrilha 60%, e concentração de 15 %) cP = centipoise. Viscosidade Brookfield = haste n.º 3, Tempo = um minuto, 70% sólidos. Viscosidade Hercules = Bob A, 1100 RPM, 100 Kdyn, 70% sólidos.

As viscosidades Brookfield, se comparadas com os valores da Tabela 14, típico dos produtos finais da RCC, se enquadram dentro dos padrões, mas encontram-se abaixo, quando comparadas às viscosidades de Hercules (alto cisalhamento).

Tabela 14 - Tipos de produto final da RCC com as respectivas propriedades físicas mais importantes usadas na indústria para a cobertura de papel.

Produtos * RCC	% Sólidos	PH	% máxima de resíduo < 325 Mesh	Granulometria % < 2µm	Alvura GE Mínima	Alvura ISO Mínima
DG	70	6 ~ 7,5	0.03	90 ~ 94	90	89
GP	68	6 ~ 7,5	0.03	83 ~ 87	90	89
NP	67	6 ~ 7,5	0.03	78 ~ 82	90	89
CC	67	6 ~ 7,5	0.03	45 ~ 55	90	88

Produtos * RCC	Viscosidade Brookfield (cP)		Viscosidade Hercules	
	10 RPM	100 RPM	RPM	Dynes
DG	< 1200	< 500	> 700	@ 18 dynes
GP	< 1200	< 500	> 400	@ 18 dynes
NP	< 1200	< 500	> 400	@ 18 dynes
CC	< 1200	< 500	> 400	@ 18 dynes

* DG = Delta Glossy, GP = Glossy Platty, NP = Naturally Platty e CC = Coarse Clay.

8.1.4 Alvura e índice de amarelamento (*yellowness*)

A alvura é a reflectância do material analisado em luz monocromática com comprimento de onda de 457nm em relação a um padrão de óxido de magnésio ou sulfato de bário. Existem dois padrões mais usados atualmente, o padrão GE, seguido pelas normas T646-om-86 da TAPPI (Technical Association of the Pulp and Paper Industry), usado nos Estados Unidos e o padrão ISO (International Standard Organization) equivalente à norma TAPPI 534-om-86 com diferente geometria ótica, muito difundido na Europa e vários países do mundo, inclusive o Brasil.

A Tabela 15 apresenta as alvuras de amostras (ROM) desareitados, alvuras não magnéticas (aquelas passadas no separador magnético), seguido da etapa final, o alveamento químico. Também mostra o índice de brancura ou *whiteness* e o de amarelamento ou *yellowness*, calculados a partir dos parâmetros R(Z) e R(Y) fornecidos pelo medidor de alvura Technibrite TB-1C.

Tabela 15 - Medidas de alvuras, whiteness e yellowness (desareiado, antes do separador magnético e químico) de três amostras da mina da RCC.

Amostra	Alvura* Desareiado	Dens.** antes Separ. Mag.	Alvura* Não Magnética	Dens.** depois Separ. Mag.	Alvura* Química	
P6	89,0	1,344	90,5	1,330	92,0	
C	84,3	1,346	87,0	1,360	90,0	
P5	85,1	1,386	88,3	1,360	91,1	
Amostra	Whiteness ASTM ***			Yellowness ASTM ***		
	Desareiado	Não Magn.	Alv. Quím.	Desareiado	Não Magn.	Alv. Quím.
P6	76,8	79,0	82,3	4,1	3,8	3,1
C	69,2	72,2	77,0	5,4	5,1	4,3
P5	73,7	77,0	80,5	4,0	3,9	3,4

*As alvuras estão no padrão ISO. ** Dens. = densidade (antes e depois) da separação magnética. *** Método de testes padrão da ASTM (American Society for Testing and Materials - "Standards on Refractory Materials") nº. E313, "Índices de Whiteness e Yellowness de materiais opacos, próximos do branco. Manual Técnico do equipamento MICRO TB-1C.

As amostras são passadas em separador magnético, seguidas de alveamento químico.

O processo de alveamento ou *leaching*, passo importante no agregamento de valor ao minério, tem-se mostrado com razões bem próximas entre as etapas de alvura de desareiado e alvura não magnética; e entre alvuras não magnéticas e a alvura química. Nas amostras P6 e C, tem-se uma sensível melhora do alveamento químico em relação a alvura não magnética e o contrário, ocorre com a amostra P5, onde a alvura magnética sobressai à alvura química. Ambas

etapas não desmerecem a outra, pois o processo é em série, chegando a atingir 2.9, 5.6 e 6 pontos percentuais (padrão ISO) nas amostras P6, C e P5, respectivamente, na alvura final do produto.

Na Tabela 15, citada anteriormente, também são apresentados os índices de *whiteness* e de amarelamento ou *yellowness*, este último é interpretado de modo que quanto menor o valor, menor a tendência de amarelar. A amostra P6 é a que apresenta o melhor índice de amarelidez, com valor de 3,14 no processo de alveamento químico, contrastando com a amostra C apresentando valor de 4,29.

A Tabela 16 apresenta as etapas de determinação do ponto ótimo de dispersão das amostras padronizadas a 70% de sólidos e pH entre 6,5 e 7,5, através da viscosidade de Brookfield a 100 RPM. Por meio deste procedimento, encontra-se a quantidade ideal de dispersante necessário para se manter o caulim em polpa (*slurry*), importante para acondicionamento e transporte do minério, sem contar a economia com o custo deste produto químico. A solução dispersante aqui usada é o Poliacrilato de sódio e barrilha em concentração de 15%.

O ponto ótimo de dispersão é o ponto de inflexão da curva de viscosidade versus adição de dispersante.

As etapas de determinação do ponto ótimo de dispersão indicam que todas as amostras apresentam valores de titulação de 7 ml de dispersante em 400 gramas de caulim, o que equivale 1,296 kg/ton. de poliacrilato de sódio base seca.

Tabela 16 - Determinação do ponto ótimo de dispersão de três amostras padronizadas (70 % de sólidos) da mina da RCC.

Amostra	Densidade da polpa a 70% de sólido	pH	Determinação do ponto ótimo de redispersão por viscosidade Brookfield (cP) a 100 RPM e haste Nº 3			
			5 ml	6 ml	7 ml	8 ml
P6	1,754	7,08	72	49	46	47
C	1,759	6,76	143	70	70	-
P5	1,764	7,83	122	69	63	67

8.2 DISCUSSÃO

Em termos da percentagem em peso de sólidos retidos em peneira de 325 mesh, do caulim da RCC, foram observados que nas porções inferiores do horizonte de caulim *soft*, ocorrem as maiores concentrações de sólidos retidos (20 a 47%), além de lentes de material arenoso em algumas porções do corpo mineralizado (vide Tabela 11). Comparando os valores encontrados

para o caulim de Manaus-Itacoatiara, Moraes (1994) encontrou valores inferiores a 30% em malha de 400 mesh e valores superiores a 40%, nos de São Gabriel da Cachoeira.

A percentagem acumulada da granulometria das partículas abaixo de 2 μm tem mostrado que na parte superior do horizonte de caulim *soft*, é onde se concentra as partículas mais finas, enquanto na parte mediana e basal, o predomínio do acúmulo das partículas abaixo de 2 μm é menor, corroborado pela presença de *booklets* de caulinita.

Um dos problemas encontrados nos caulins do Rio Capim, bem como nos da Geórgia, é a presença de pilhas vermicular de cristalitos de caulinita ou *booklets*, com tamanhos que chegam a atingir alguns décimos de milímetros, e que já foram reportados por Koutschoubey et al. 1996, no caulim da rodovia Belém-Brasília, entre as cidades de São Miguel do Guamá e Ipixuna, e no vale do Rio Capim, e Neumann et al. (1998); e nos caulins da Geórgia por Pickering & Hust (1989), Murray & Keller (1993), Pickering & Murray (1994).

Para aproveitar esse caulim, foi utilizada uma técnica chamada **delaminação**, que consiste na agitação, a alta rotação (alta taxa de cisalhamento) da polpa de caulim, na presença de grãos de quartzo, como meio desagregador, onde os agregados de caulinita são separadas em várias placas e tem por objetivo, melhorar as propriedades de cobertura do caulim (Luz & Costa, 1995).

Com a implantação da técnica de delaminação, o Eng. Químico da RCC, Anselmo Duarte, fez diversos ensaios (Figura 54) para o caulim da RCC. Com esta técnica, o caulim que antes não era reaproveitado, com até 55% em peso de partículas inferiores a 2 μm , passou a apresentar, com um tempo de delaminação de 20 minutos e proporção de areia e caulim de 50% em volume, um aumento para 71% em peso, portanto, um rendimento de 16 pontos percentuais ou 35,5%.

Os resultados de análises físicas aqui apresentados devem ser avaliados com certas reservas, levando-se em consideração que os mesmos foram obtidos através de um número reduzido de amostras e que apenas três amostras são analisadas nas etapas seguintes da caracterização. Apesar disto, os valores apresentados dão uma idéia a respeito das características em foco.

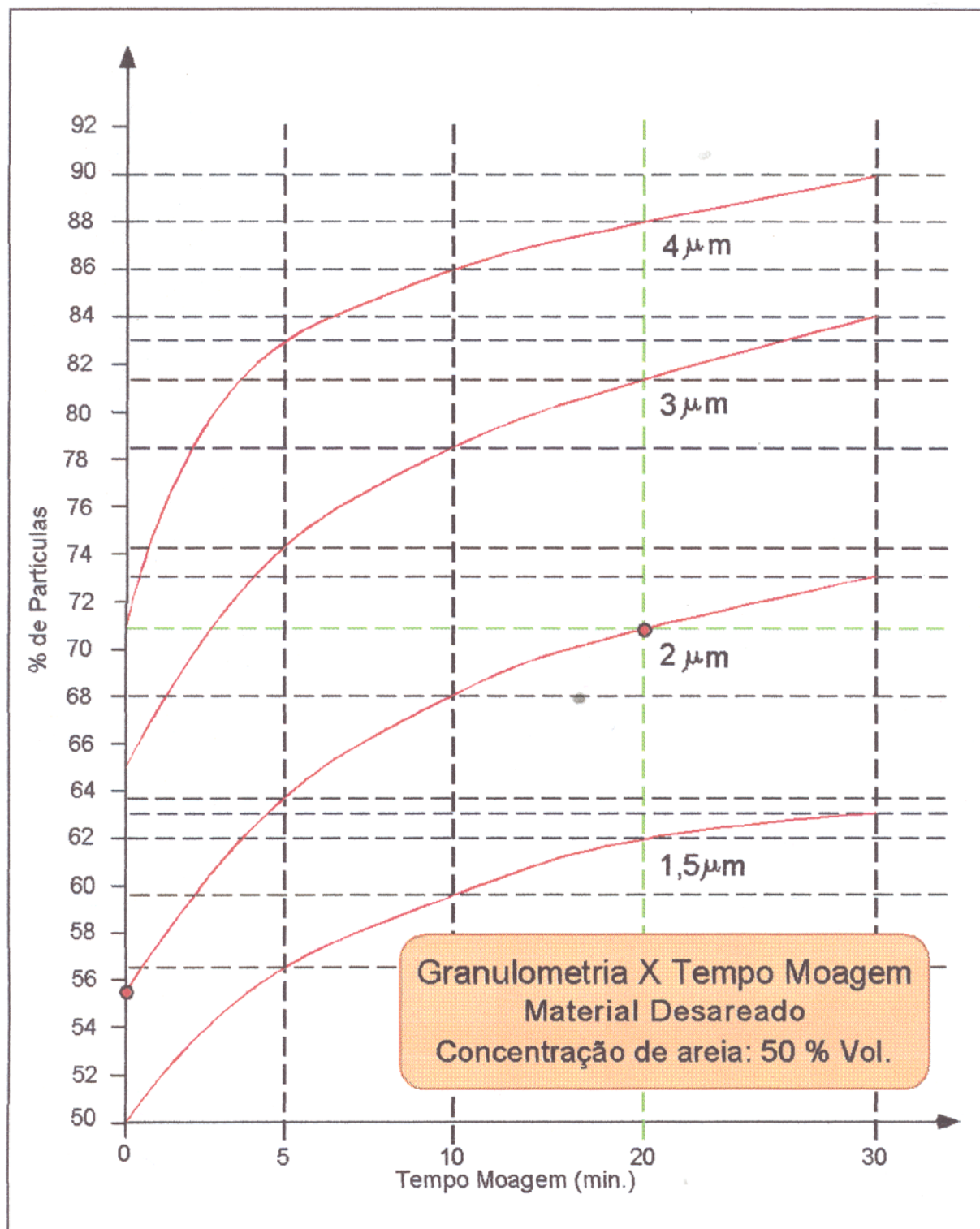


Figura 54 - Curva de distribuição granulométrica (porcentagem de partículas vs. tempo de moagem) obtida a partir de delaminação do caulim da RCC.

9 –EVOLUÇÃO SUPERGÊNICA DA ÁREA

A região correspondente a atual porção NE do Estado do Pará e que abrange o distrito caulínico do médio Rio Capim, na qual encontra-se inserida a mina de caulim da RCC - Rio Capim Caulim, área de enfoque deste trabalho, foi palco de intensas transformações geológicas desde o Mesozóico ao Cenozóico. Neste período, desempenha um papel fundamental a atuação de processos supergênicos na Amazônia com os eventos da lateritização, que contribuíram sobremaneira na formação dos depósitos de caulim da região.

Parte-se do pressuposto de que as rochas do embasamento cristalino (principalmente do Proterozóico), localizado a N/NE (Região Bragantina e médio Rio Gurupi) da área em estudo, por ação do intemperismo deram origem aos sedimentos que compoariam o protólito do caulim da região, e que foi transportado por uma distância superior a 100 km. Os sedimentos são transportados e depositados nas porções mais rebaixadas, muitas vezes configurando formas de pequenas micro-bacias, onde o material pelítico feldspático, quartzo e muscovita são os minerais principais, seguidos por zircão, turmalina, rutilo, cianita, estauroлита, entre outros, como minerais acessórios. Estes sedimentos passariam a compor a Formação Ipixuna. O processo de caulinização teria sido completo, já que não aparecem grânulos de feldspato, mesmo que em estado de alteração (Silva, 1994).

Ainda como rocha hospedeira para os depósitos de caulim, Costa e Moraes (1998) propõem que rochas sedimentares das Formações Alter do Chão e Itapecuru, de idades Meso-Cenozóicas, foram expostas na região durante o Terciário Inferior (Eoceno ao Oligoceno) e conjuntamente com rochas proterozóicas do embasamento tipo gnaissóides favoreceram química e mineralogicamente para a formação do caulim ao longo dos perfis lateríticos. Nos perfis estudados por Koutschoubey & Truckenbrodt (1992) próximos de Vila Aurora (PA), citam os arenitos arcosianos com intercalações pelíticas da Formação Ipixuna fortemente caulinizados e desferrificados sotopostos ao caulim *semi-flint*, também como protólitos dos caulins.

Segundo Urdinínea (1977) e ressaltado por Koutschoubey et al. (1996) a porção meridional da Plataforma Bragantina sofreu subsidência somente no Cretáceo, resultando na deposição das Formações Ipixuna e Itapecuru, enquanto que na porção setentrional, este processo ocorreu apenas no Terciário Superior, levando à deposição da Formação Pirabas e do Grupo Barreiras.

Borges et al. (1997) definem a Bacia do Rio Capim como um *hemigraben*, apresentando forma de um triângulo alongado na direção NE-SW, ligada ao último pulso extensional do evento de fragmentação do *Gondwana* ou evento Sul-Atlântico, e que geraram modificações expressivas na paisagem face ao soerguimento regional. Ressalta ainda que, a bacia é formada pelos sedimentos da Formação Ipixuna, por sucessões fluvial e transicional-marinha.

Superposto aos sedimentos da Formação Ipixuna, instalou-se um evento laterítico no início do Eoceno (ou quiçá, no final do Cretáceo, em condições de clima quente e úmido) na verdade um grande ciclo laterítico que vai até o final do Oligoceno (em condições semi-áridas a áridas) ou início do Mioceno, levando a formação de perfis complexos, descritos por Costa (1991) como os **perfis lateríticos maduros**. A permeabilidade dos sedimentos Ipixuna, as condições mais redutoras e levemente ácidas na zona saturada e a fraquíssima taxa de erosão permitiram a alteração dos feldspatos, filossilicatos e lixiviação do ferro. Tal processo resultou em neoformação de caulinita sem que houvesse a destruição das estruturas sedimentares (Koutschoubey et al., 1996).

Segundo os resultados obtidos, acredita-se que o caulim da Rio Capim Caulim e arredores tenha se formado "*in situ*" ou com pouco transporte e gerado às custas dos sedimentos da Formação Ipixuna após a formação e desenvolvimento do perfil laterítico maduro de Costa (1991). Uma dessas evidências é a presença de estruturas sedimentares reliquiares tipo acamamento que estão presente no horizonte de caulim *soft*, desenhados pela alternância de lentes milimétricas de minerais pesados e caulim.

Segundo Koutschoubey et al., (1996) durante o Oligoceno/Mioceno, sedimentos essencialmente argilosos acumulados em depressões na planície costeira sofreram uma intensa degradação sob efeito de ambiente moderadamente ácido e fortemente redutor. A acumulação em superfície de matéria orgânica, talvez em ambiente pantanoso, pode ter sido responsável pela geração de condições redutoras e ácidas propícias a tal lixiviação (Koutschoubey et al. 1989; Costa & Moraes, 1992; Koutschoubey & Truckenbroadt, 1992; Koutschoubey et al. 1994; Duarte, 1996). Silva (1994) acrescenta que durante o processo, a lixiviação teve sua eficácia pela ação conjunta das condições climáticas locais e da presença de ácidos orgânicos derivados de húmus em solução no lençol freático, sendo que, onde o caulim apresenta um maior teor de resíduo, apresenta também maior alvura em função da maior permeabilidade.

Superposto ao caulim *soft*, descreveu-se um horizonte de caulim *flint*, e que apresenta discretos tubos anastomosados, preenchidos por sedimentos argilo-arenosos, configurando estruturas riziformes, muitas vezes cobertas internamente por uma película de óxido de ferro. Conclui-se portanto, tratar-se de uma exposição subaérea em condições acima citadas. Koutschoubey et al. (1996) interpreta a origem da argila *semi-flint*, aqui correlacionado ao caulim *flint*, como sendo produto de lixiviação dos elementos mais solúveis, do ferro e parte da sílica e a conseqüente alteração dos filossilicatos, formando um produto amorfo, de composição essencialmente caulínica. Ainda segundo esses autores, a partir desse gel, desenvolveram-se cristalitos de caulinita intercrescidos em arranjo denso, o que resultou na formação de caulim *flint*. O grau crescente de “*flintização*” em direção ao topo das lentes e o enriquecimento em oxihidróxido de ferro na base desses corpos sugerem que a argila *semi-flint* se formou sob efeito de soluções percolando *per descensum*, em condições moderadamente ácidas e redutoras geradas pela presença de matéria orgânica.

Posteriormente, este perfil foi truncado na altura do horizonte argiloso em conseqüência de extensos processos erosivos causados por movimentação tectônica que levou à formação de relevo escarpado de grande parte do perfil hoje exposto. Esse quadro é conhecido como neotectônica ou tectônica resurgente de Costa et al. (1993) e Costa et al. (1997), configurando as superfícies mais elevadas da região amazônica, correspondentes à superfície geomórfica Velhas de King (1967), e descritos portanto, pelo perfil maturo de Costa (1991). Desenvolveu-se assim uma nítida superfície discordante.

Essa discordância erosiva desenvolvida no horizonte de caulim *flint*, configura uma camada guia, onde abaixo dela é provável de se ter o horizonte de caulim *soft*. Grande parte da área a nível regional sofreu dissecação suficientemente profunda, dificultando a localização da camada guia.

Ao final do Terciário, as condições de clima semi-árido do Plioceno, favorecidas pelos movimentos tectônicos, tem início o processo de dissecação dos perfis lateríticos maduros. Sobre a nítida superfície de discordância erosiva na altura do horizonte argiloso, depositaram-se os sedimentos areno-argiloso do Grupo Barreiras, típicos de ambientes continental flúvio-lacustre (Rossetti et al., 1989), sendo que em porções basais desses sedimentos são observados fragmentos de caulim *flint* retrabalhados.

Uma nova fase de lateritização instalou-se no final do Terciário, provavelmente de idade pleistocênica (início do Quaternário) e que formou-se sobre os sedimentos do Grupo Barreiras, e que na sua evolução atingiu o perfil laterítico maduro subjacente. Essa nova fase é correlacionável ao **perfil laterítico Imaturo** de Costa (1991) e reforçado em Costa et al. (1997). Esses são menos complexos em termos de evolução e estruturação dos horizontes em comparação com aqueles do ciclo maduro. Segundo Kotschoubey et al. (1996) ocorreu em condições climáticas úmidas e quentes que resultou em ferruginização e subsequente lateritização.

Um desenho esquemático é apresentado na Figura 55, e mostra o contexto evolutivo da região com ênfase ao desenvolvimento dos perfis lateríticos, como contribuidores da gênese do minério de caulim, bem como os litotipos envolvidos e as condições climáticas e umidades reinantes ao longo do tempo geológico.

Ao final do Pleistoceno e início do Holoceno, com a retomada das condições de clima mais úmido e reinstalação da floresta tropical, tem início um novo período de intemperismo das rochas preexistentes, inclusive os lateritos, indicando que foram truncados erosivamente, com exposição das crostas que geraram linhas de pedras e formação de latossolos (Angélica, 1996).

O modelo evolutivo aqui proposto, baseia-se em grande parte nas mudanças climáticas pelas quais passou a região costeira do Suriname, durante o Terciário e o Quaternário (Krook, 1979) e aplicadas à área em questão. Acredita-se que somente os processos de lateritização não foram capazes de gerar esses grandes depósitos de caulim na região, mas uma combinação de processos supergênicos foram primordiais para a formação das lateritas (Costa & Moraes, 1998).

Não se descarta que contribuições climáticas e de umidade associadas ao quadro tectônico tenham desempenhado papel importante na evolução do quadro supergênico e conseqüentemente do caulim da porção atual do NE do Estado do Pará.

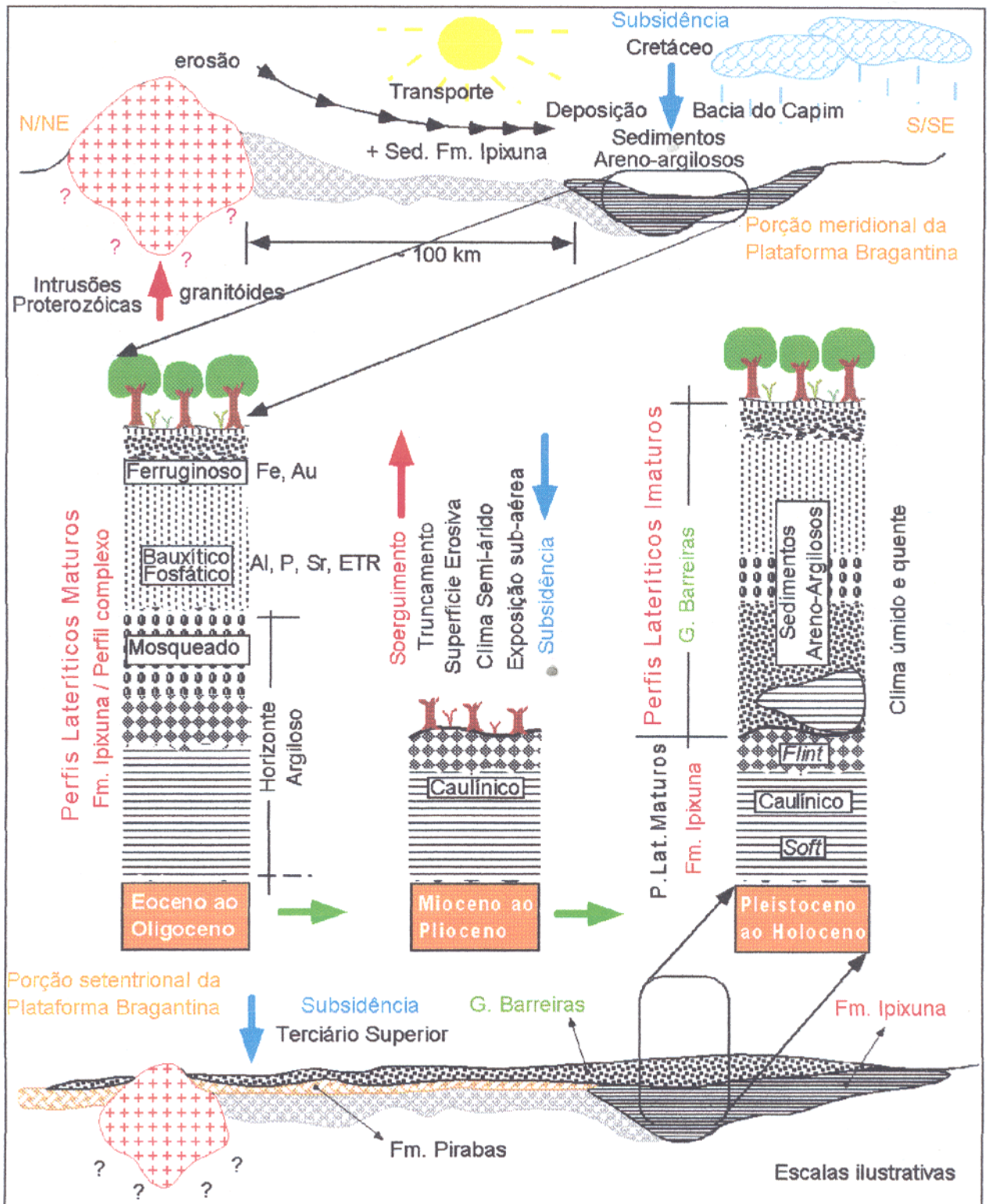


Figura 55 - Modelo evolutivo dos Eventos de laterização como contribuidores na gênese do caulim do Rio Capim (Modificado de Costa, 1991).

10 – CONCLUSÕES

Geologicamente, foi possível distinguir na mina da RCC duas grandes unidades estratigráficas, separadas entre si por uma superfície discordante erosiva. A **unidade inferior**, é formada pelo caulim, minério da jazida, sendo que na base o caulim é do tipo *soft* e no topo *flint*, onde se desenvolveu a paleosuperfície. As características sedimentares dessa unidade permitem correlacioná-la com a Formação Itapecuru/Ipixuna e a sua alteração laterítica com a fase Madura, de Costa (1991), mais especificamente com a base dos perfis lateríticos maduros (horizonte argiloso ou saprólito) de Costa op cit.

A **unidade superior** é formada por sedimentos arenosos na sua porção inferior a argilosos em porções restritas, na porção mediana dominam sedimentos siltsosos e argilosos e que gradam a sedimentos francamente arenosos no topo. Esta unidade encontra-se fortemente lateritizada, foram identificados os horizontes: argilo-arenoso, horizonte arenoso, horizonte argiloso, horizonte ferruginoso concrecionário e o latosolo amarelo e solo. Essas unidades são litologicamente correlacionáveis com a Formação Barreiras e o perfil laterítico sobreposto com os lateritos imaturos de Costa (1991).

O horizonte de caulim *soft* apresenta-se friável, com faixas decimétricas ressaltadas por variações de cores branca, creme a marron claro. Predominam feições de acamamento, ressaltado pela alternância de filmes milimétricos de minerais pesados e caulim. Em porções localizadas, são observados textura em mosaico, desenhada por fragmentos de caulim em meio a uma matriz caulínica arenosa.

O horizonte de caulim *flint*, apresenta-se de cor creme a rosado, compacto, poroso, resistente ao impacto mecânico, na parte superior ocorrem dutos, milimétricos a centimétricos, se intercomunicam e parecem ser desenvolvidos por processos biogênicos. Em se tratar que neste horizonte desenvolveu-se uma discordância erosiva, deduz-se que esta paleosuperfície tenha se desenvolvido em condições subaéreas.

No horizonte de caulim *soft*, os principais minerais presentes, além da caulinita são o quartzo e a muscovita. Os grãos de quartzo são do tipo hialino, predominantemente subangulosos, mal selecionados. Na base, exibe com freqüência feições de dissolução, além de apresentar granodecrescência ascendente. As palhetas de muscovita, na maioria das vezes apresenta-se dobradas ou encurvadas, e também alterando possivelmente para illita (?). A massa

caulinica é composta por cristais de caulinita criptocristalina e por caulinita bem desenvolvida, formando *booklets*, de aspecto vermiforme, chegando a alcançar 300 µm de comprimento.

Os minerais pesados identificados foram: hematita, ilmenorutilo, goethita, zircão, turmalina, rutilo, cianita, anatásio, estauroлита e raros grãos de berilo. O índice de maturidade mineralógica ZTR indica a abundância de minerais estáveis, em média de 82,26% no intervalo da fração fina e 89,71% na fração muito fina. Esses minerais ocorrem na forma de filmes milimétricos, ressaltando o acamamento reliquiar existente no caulim *soft*.

Dentro do caulim *soft*, ocorrem concreções (pseudo-óólitos) preenchidas por material argilo-arenoso. A crosta é formada por grãos de minerais pesados, encravados em uma matriz hematítica. Pela fragilidade dessas concreções ao transporte, deduz-se que as mesmas formaram-se contemporaneamente à deposição da massa caulinica, já que estão inseridos nos filmes de minerais pesados, impresso pelo acamamento reliquiar, e que posteriormente se desenvolveram às custas dos processos de alteração laterítica, correlacionada com a fase matura de Costa (1991), portanto, indicando uma contribuição laterítica para a formação desses caulins. Outra feição dentro do contexto estudado é o desenvolvimento o mineral anatásio com hábito estritamente tabular, o que é típico de ambiente supergênico. •

A **unidade superior** foi dividida, segundo aspectos sedimentológicos e da lateritização, em três horizontes: *horizonte saprolítico*, composto por sedimentos areno-argilosos espessos, friável, apresentando estratificação cruzada acanalada, sigmoidal e tangencial. Em porções localizada da base, ocorrem sedimentos argilosos intercalados por sedimentos arenosos finos, apresentando estratificação plano paralela. Este horizonte, na porção superior grada para sedimentos argilosos mosqueados. Sobreposto, de forma gradativa, ocorre o *horizonte ferruginoso concrecionário*, com concreções decimétricas, contínuas e interligadas, na base a centimétricas, formando um arcabouço aberto e matriz argilosa de coloração vermelha, no topo. O aspecto colunar mostra-se insipiente ao longo deste horizonte. O *horizonte latossolo amarelo* é areno-argiloso, homogêneo e desprovido de estrutura, ocorrendo de forma gradual ao horizonte anterior.

Usando-se o método Hinckley para quantificar o grau de cristalinidade da caulinita, obteve-se valores de baixa a moderada baixa cristalinidade (0,33 a 0,46 e 0,50) para as amostras localizadas nas porções superiores do caulim *soft* e das amostras do caulim *flint*. Valores de cristalinidade moderada alta a alta (0,90 a 1,27) para as amostras da base e porções medianas do

caulim *soft*. Portanto, chega-se a conclusão de que o caulim *soft* esteja associado a caulinita bem cristalizada e com cristais bem desenvolvidos (*booklets*), enquanto o caulim *flint*, à caulinita de baixa cristalinidade, com caulinita de granulometria muito fina ou criptocristalina.

Procedimentos analíticos por DRX, indicam que a caulinita do caulim *soft* apresenta o triplete bem desenvolvido pelas reflexões situadas entre 4,45 e 3,73 Å e que no caulim *flint*, são transformados em duplete, a diminuição das intensidades e o alargamento das bandas também ocorre com os dois tripletes compreendidos entre 2,55 e 2,28 Å, indicando que se trata de uma caulinita com crescente desordem ao longo do eixo "b", portanto mal cristalizada.

Assim como por DRX é possível acompanhar as quantidades relativas de quartzo ao longo do perfil, por ATD/TG é possível acompanhar a relação caulinita/quartzo, bem como a quantidade em percentual da água (perda ao fogo) na estrutura da caulinita. Os valores para o caulim *soft* variam de 13 a 14,5% de perda de água, para o caulim *soft* arenoso fica em torno de 11,5%, enquanto que para o caulim *flint*, variam de 8,5 a 9,5%.

Espectros de IV, mostram que no caulim *soft*, as bandas bem desenvolvidas em 3670 e 3650 cm^{-1} correspondem, segundo Van Olphen & Fripiat (1979) à vibração paralela ao plano "ab", indicando uma caulinita bem cristalizada e com baixo grau de desordem. No caulim *flint*, essas duas bandas tendem a se fundir, assumindo valores próximo de 3650 cm^{-1} , típico de caulinitas mal cristalizadas.

Análises químicas de doze amostras de caulim apresentam uma razão média $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,189 estando portanto, próximas da caulinita teórica que é de 1,178 segundo Grim (1968) e Giese Jr. (1988). Os valores de SiO_2 44,72%, Al_2O_3 38,16%, Fe_2O_3 1,03%, TiO_2 1,33, como elementos maiores e perda ao fogo 13,65. Como elementos traço: Na_2O 0,05, K_2O 0,06, MgO 0,02 e CaO inferior a 0,04. Análise por microscopia eletrônica de varredura com sistema de energia dispersiva, tem fornecido valores médios de SiO_2 próximos de 61%, de Al_2O_3 de 36%, e a razão $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ próximo de 1,690, apresentando, portanto um excesso de SiO_2 , o que indica ser o quartzo responsável por esse acréscimo.

Quanto a caracterização física do caulim da RCC, as percentagem de sólidos inferior a 325 mesh, variam de 2,4 a 9,0%, enquanto a base do caulim *soft*, por ser arenosa apresenta valores de 20 a 47% em peso. As amostras da interface *soft/flint* apresentam anomalias devido presença de fragmentos de caulim que dificilmente se desagregam ao peneiramento.

A percentagem granulométrica abaixo de $2\mu\text{m}$ do caulim *soft* ROM, indicam valores entre 41,3 e 58,3% e amostras de caulim *flint* (porção inferior) ficam entre 71,2 e 80,9%, indicando que no topo do caulim *soft* a granulometria é mais fina.

A viscosidade de Brookfield ou de baixo cisalhamento a 100 RPM, 70% de sólidos, haste nº 3 e tempo de um minuto, dão valores próximos ou abaixo de 500 centipoise, o que está dentro das especificações do *Caulim DG*; a viscosidade de Hercules ou alto cisalhamento, usando bob A, 1100 RPM e 70% de sólidos, fornecem valores entre 194 e 656 RPM, estando portanto, abaixo do valor especificado para o *Caulim DG* que é superior a 700 RPM.

As alvuras (ISO) do caulim ROM da RCC estão entre 75,39 a 89,38 para o caulim *soft*, e entre 62,40 e 81,56 para o caulim da interface *soft/flint*. Para as três amostras de caulim padronizadas para 70% de sólido e granulometria acima de 90% de partículas abaixo de $2\mu\text{m}$, obteve-se alvuras de desareiado (GE) entre 85,32 a 90,01. Para alvuras passadas pelo separador magnético obteve-se valores entre 89,31 a 91,47 e para alvuras por lixiviação química (ditionito de sódio) obteve-se valores entre 90,99 a 92,98 (GE).

Os índices de Yellowness (ASTM) para os caulins em foco, após alveamento químico indicam valores entre 4,3 a 3,14, indicando a baixa tendência em amarelar, fator esse associado a baixas concentrações de ferro.

A determinação do ponto ótimo de dispersão das amostras (P6 e P5) padronizadas a 70% de sólidos, indicam a necessidade de 14,814 kg/ton. de dispersante, enquanto a amostra C necessitou 12,962 kg/ton. O ponto ótimo de dispersão é muito importante para o armazenamento e transporte da polpa (slurry) pois com o valor exato de dispersante ou defloculante para cada amostra, a função é manter o caulim em suspensão, com maior teor de sólidos, vencendo assim a força da gravidade.

Com o processo de delaminação, o caulim que antes não era totalmente reaproveitado, e que continha até 45% em peso de partículas com granulometria superior a $2\mu\text{m}$, passou a ser reduzido a 29%, utilizando-se o tempo de delaminação de 20 minutos e proporção de areia versus caulim de 50% em volume, representando portanto, um rendimento de 35,5% da fração abaixo de $2\mu\text{m}$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACKERMANN, F. L. 1964. *Geologia e fisiografia da Região Bragantina*. Manaus, IMPA (Cadernos da Amazônia, 2).
- ACKERMANN, F. L. 1969. *Esboço para a geologia entre a cidade de Belém – Rio Gurupi e Atlântico – Rio Guamá*. Belém, Imprensa Universitária do Pará. 90p.
- AGUIAR, G. A. 1971. *Revisão geológica da bacia paleozóica do Maranhão*. In: CONG. BRAS. GEOLOGIA, 25., São Paulo. *Anais...* São Paulo, Soc. Bras. de Geologia. v.3, p.113-122.
- ALMEIDA, H. G., MARINHO, P. A. C., MARTINS, R. C. 1995. *Folha SB.22-X-D Marabá*. CPRM. Serviço Geológico do Brasil. 113p. (Prog. Lev. Geológicos Básicos do Brasil).
- ANDRADE, M. L. A.; CUNHA, L. M. S.; VIEIRA, J. R. M.; MARTINS, A. K. 1994. *Caulim*. (Relatório Setorial do BNDES).
- ANGÉLICA, R. S. 1996. *Mineralogia e geoquímica de gossans e lateritos auríferos na região de Carajás: Depósitos de Igarapé Bahia e Águas Claras*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Tese de doutorado). 138p.
- ARAI, M.; UESUGUI, N.; ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M. 1988. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do Estado do Pará. In: CONG. BRAS. GEOLOGIA, 35., *Anais...* Belém. v.2, p.738-752.
- ARANTES, J. L. G.; DAMASCENO, B. C.; KREBS, A. S. J. 1972. *Projeto Argila: relatório final*. Belém, DNPM. Convênio DNPM/CPRM. 2v. ilustr. Mapa. 40p.
- ARAÚJO, S. M. S. O. 1995. *Viabilidade de extração de ferro remanescente de caulim da Amazônia, previamente branqueado*. Belém, Centro Tecnológico da UFPa. (Dissertação de mestrado). 99p.
- BADIA, D. 1974. *Contribution à l'étude minéralogique et géochimique de la kaolinisation par resiliçification des bauxites du Sud-Est de la France. Application de la spectroscopie infrarouge*. Labo. Géol. Appl., Univ. Paris VI.
- BARBOSA et al. 1966. *Geologia estratigráfica, estrutural e econômica da área do Projeto Araguaia*. Rio de Janeiro. 94p. (Monografia da DGM, 19).
- BARBOSA, G. V. & PINTO, M. N. 1973. *Folha SA.23 São Luís e parte da Folha SA.24 Fotaliza: geologia, geomorfologia, solos, vegetação e uso potencial da Terra*. Rio de Janeiro, DNPM. p.3-26. (Levantamento de Recursos Naturais, 3).

- BESSLER, K. E. 1983. *Fundamentos da espectroscopia de infravermelho e suas aplicações na mineralogia*. Brasília, UnB. Departamento de Química. 33p. (Notas de aula).
- BIGARELLA, J.J. & ANDRADE, G.O. de. 1964. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreiras) Universidade Federal do Recife. p.2-14 (*Arquivos do Instituto de Ciências da Terra*, 2).
- BISH, D. L. & VON DREELE, R. 1988. Rietveld refinement of the crystal structure of kaolinite. In: AN. MEETING OF THE CLAY MINERALS SOC. *Abstract*. East Lansing. Michigan..
- BORGES, M. S.; COSTA, J. B. S.; HASUL, Y.; FERNANDES, J. M. G.; BEMERGUY, R. L. 1997. Instalação e inversão da Bacia do Capim. In: SNET, 6. Brasília, DF. *Boletim de resumos expandidos*. SBG/CPGQ. p.134-135.
- BRANCO, P. M. 1982. *Dicionário de mineralogia*. Porto Alegre. Ed. Universitária. 264p.
- BRASIL. Ministério do Exército. Diretoria do Serviço Geográfico. 1985. *Folha de Mãe do Rio e folha SA.23-Y-A-I*. Esc. 1:100.000.
- BRASIL MINERAL. 1999. As maiores empresas do setor mineral. Pinheiros: Signus Editora, v.16, n.172, maio. 102p.
- BRISTOW, C. M. 1987. Worldkaolins - Genesis, exploitation and applications. *Industrial Minerals*, London 3 (8): 45-59.
- CARVALHO, E. A. & ALMEIDA, S. L. M. 1997. *Caulim e carbonato de sódio: competição na indústria de papel*. Rio de Janeiro, CETEM/CNPq. 26p. (Série Estudos e Documentos, 41).
- CHEN, P. Y.; LIN, M. L.; ZHENG, Z. 1997. On the origin of the name kaolin and the kaolin deposits of the Kauling and Dazhou areas, Kiangsi, China. *Applied Clay Science* 12 (1-2): 1-25.
- COLARES, J. Q. S. & ARAÚJO, C.C. de. 1987. *Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação, para a Área do Programa Grande Carajás*. Subprojeto Recursos Minerais, Folha Santa Inês SA.23Y-D, Escala 1:250.000: relatório final. Fortaleza. DNPM/CPRM. 67p.; il.
- COLARES, J. Q. S. & CAVALCANTI, V. M. M. 1990. *Litofácies e sistemas da Formação Itapecuru na porção centro oeste do Estado do Maranhão*. In: CONG. BRAS. GEOL., 36. Natal. *Anais...* SBG. p.150-156.

- COLARES, J.Q. S., ARAÚJO, C. C. de, PARENTE FILHO, J. 1990. *Projeto Especial Mapas de Recursos Minerais, de Solos e de Vegetação para área do Programa Grande Carajás*. Subprojeto Recursos Minerais: Vitorino Freire, folha SB.23-V-B Estado do Maranhão, Brasília: DNPM/CPRM, p.75.; il. (Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil).
- COSTA, J. B. S. & HASUI, Y. 1997. Evolução geológica da Amazônia. In: COSTA, M.L. & ANGÉLICA, R.S. (Coords.). *Contribuições à Geologia da Amazônia*. Belém, FINEP/SBG-NO. p.15-90.
- COSTA, J. B. S.; HASUI, Y.; BEMERGUI, R. L.; BORGES, M. S.; COSTA, A. R.; TRAVASSO, J. A. M.; IGREJA, H. L. S. 1993. Aspectos fundamentais da neotectônica da Amazônia brasileira. In: SIMP. INT. DO QUATERNÁRIO DA AMAZÔNIA, Manaus. *Resumos e contribuições científicas*. p.103-106.
- COSTA, J. B. S.; PASTANA, J. M. N., COSTA, E. J. S., JOÃO, X. S. J. 1988. *A Faixa de Cisalhamento Tentugal. Folha SA-23-Y-B*. In: CONG. BRAS. GEOL., 35., Belém. *Anais...* v3, p.2257-2266.
- COSTA, J. L.; ARAÚJO, A. A. F.; VILLAS BOAS, J. M.; FARIA, C. A. S.; SILVA NETO, C. S.; WANDERLEY FILHO, V. J. R. 1977. *Projeto Gurupi: relatório final da etapa*. Belém. DNPM/CPRM. v.1. 258p.
- COSTA M. L. 1991. Aspectos geológicos dos lateritos da Amazônia. *Revista Brasileira de Geociências* 21 (2): 146-160.
- COSTA, M. L. & MORAES, E. L. 1992. As grandes reservas de caulim e a lateritização na Amazônia. In: CONG. BRAS. GEOL., 37., São Paulo. *Boletim de resumos expandidos*. SBG. v.1, p.588-589.
- COSTA, M. L. & MORAES, E. L. 1998. Mineralogy, geochemistry and genesis of kaolins from the Amazon region. Spring-Verlag. *Mineralium Deposita*, 33., p.283-297.
- COSTA, M. L., HORBE, A. M. C., MORAES, E. L. 1997. Lateritização imatura sobreposta a lateritos maduros em Mãe do Rio – Pará. In: COSTA, M. L. & ANGÉLICA, R. S. (Coords.). *Contribuições à geologia da Amazônia*. Belém, FINEP/SBG-NO. p.339-347.
- COURA, F.; MEORI, E. N., KERN, R. S. 1986. Geologia do caulim do Jari. In: CONG. BRAS. GEOL., 34., Goiânia. *Anais...* SBG/CO. v.5, p.2248-2258.
- CPRM. 1973. *Pesquisa de caulim no Rio Capim – Pará*. Belém. D.O. v.2.

- CPRM. 1976. *Pesquisa de Materiais Industriais no Estado do Pará: Projeto Materiais Industriais*. Belém, Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais/SUDAM. 44p.
- CUNHA, B.C.C. & DEL'ARCO, J.O. 1988. Variações faciológicas da Formação Itapecuru na Região de Santa Inês – MA. In: CONG. BRAS. GEOL., 35., Belém. *Anais...* SBG/NO. v.2, p.765-777.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A., ZUSMANN, J. 1982. *An Introduction to the rock-forming minerals*. New York, John Wiley & Sons. 696p.
- DELGADO, R.; DELGADO, G.; RUIZ, A.; GALLARDO, V., GAMIZ, E. 1994. The cystallinity of several Spanish kaolins: correlation with sodium amylobarbitone release. *Clay Minerals* 29: 785-797.
- DNPM. 1998. *Sumário Mineral*. Brasília, Ed. On Line.
- DUARTE, A. L. 1996. *Caulim do Morro do Felipe, baixo Rio Jari, contexto geológico e gênese*. Belém, Univ. Federal do Pará. Centro de Geociências. 132p. (Dissertação de Mestrado).
- FARMER, V. C 1974. *Infrared spectra of Minerals*. London, Mineralogical Society. 539p.
- FERREIRA, C.S. & FRANCISCO, B.H.R. 1988. As Relações da Formação Pirabas (Oligoceno-Mioceno), com as formações continentais terciárias no NE do Pará. In: CONG. BRAS. GEOL., 35., Belém. *Anais...* SBG/N. v.2, p.761-764.
- FLAMENT, A. 1976. *Etude géologique, minéralogique et géochimique des formations kaoliniques associées aux bauxites varoises*. Géochimie Appliquee. Univ. Paris VI. 120p. (Thèse de Docteur).
- FRANCISCO, B.H.R.; LOWENSTEIN, P.; SILVA, O. F., SILVA, G.G. 1971. Contribuição à Geologia da Folha de São Luís (SA-23) no Estado do Pará. *Bol. Museu Paraense Emilio Goeldi. Série Ciências da Terra*, Belém. v.17.
- GIESE Jr, R. F. 1988. Kaolin minerals: structures and stabilities. In: BAILEY, S. W. (Ed.) *Hydrous phyllosilicates: exclusive of micas*. Chelsea, Mineralogical Society of America. chapter 3, p.29-66 (Reviews in Mineralogy, 19).
- GOÉS, A.M. 1981. *Estudo sedimentológico dos sedimentos Barreiras, Ipixuna e Itapecuru, no nordeste do Pará e noroeste do Maranhão*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 55p. (Dissertação de Mestrado).
- GRIM, R. E. 1968. *Clay Mineralogy*. 2ed. New York, McGraw Hill. 596p. (International Series in the Earth Planetary Sciences).

- HALWARD, A.; SANCHEZ, C., OLIVEIRA, A. P. 1977. Comparação entre algumas propriedades físico-químicas do caulim Amazon 88 e de outros caulins. *Rev. Bras. Tecnol.*, (8):83-95.
- HEM, J. D. & LIND, C. J. 1974. Kaolinite Synthesis at 25° C. *Science* (184):1171-1173.
- HINCKLEY, D. N. 1963. Viability in "crystallinity" values among the kaolin deposits minerals of the coastal plain of Georgia and South Carolina. *Clays Clay Mineralogy* 11:229-235.
- HINSON, T. 1972. Caulim para revestimento de papel. *O Papel*. p.47-52. set.
- HOSKING, J. A. 1986. The Australian china clays wet processing plant at Tallawang, New South Wales. *Journal of the Australian Ceramic Society* 22(2):71-76.
- HUGHES, J. C. & BROWN, G. 1979. A cristallinity index for soil kaolins and its relations to parent rock, climate and soil maturity. *Journal Soil Science* (30)557-563.
- HURST, V. J. & BOSIO, N. J. 1975. Rio Capim Kaolin deposits, Brazil. *Economic Geology* 70 (5):990-992.
- IGREJA, H. L. S. da. 1985. *Estudo Geológico da Sequência Camiranga, nordeste do Pará*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 85p. (Dissertação de Mestrado).
- KELLER, W. D. 1970. Environmental aspects of clay minerals. *Journal of Sedimentary Petrology* 40:788-813.
- KING, L. C. 1967. *The morphology of the earth*. Edinburgh, Oliver & Boyd Eds. 726p.
- KLEIN, C. & HURLBUT, C. H. Jr. 1993. *Manual of Mineralogy*. John Wiley & Sons. 681p.
- KLEIN, V. C. & FERREIRA, C. S. 1979. Paleontologia e estratigrafia de uma fácies estuarina da Formação Itapecuru, Estado do Maranhão. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* 51(3): 523-533.
- KOTSCHOUBEY, B. & TRUCKENBRODT, W. 1992. Ocorrências de argila semi-flint no nordeste do Pará. In: CONG. BRAS. GEOL., 37., São Paulo. *Boletim de resumos expandidos*. SBG. v.2. 17p.
- KOTSCHOUBEY, B., TRUCKENBRODT, W.; HIERONYMUS, B. 1994. Gênese e evolução das bauxitas do NE do Pará - Nova proposta. In: SIMP. GEOL. AMAZ., 4., Belém. *Anais...* SBG/NO. v.1, 272-274p.
- KOTSCHOUBEY, B., TRUCKENBRODT, W.; HIERONYMUS, B. 1996. Depósitos de caulim e argila semi-flint no nordeste do Estado do Pará. *Rev. Bras. de Geociências* 26(2):71-80.

- KOTSCHOUBEY, B., TRUCKENBRODT, W.; MENESES, L. A. Q. 1989. *Poliphasic origin of the Ipixuna bauxite, northeastern state of Pará, Brazil*. p.105-113 (Travaux ICSOBA, 19)
- KRAUSKOPF, K. B. 1985. *Introduction to geochemistry*. 2 ed. Singapore, McGraw-Hill Book Company. 617p.
- KREBS, A. S. J. & ARANTES, J. I. 1973. Pesquisa de caulim no Rio Capim, Estado do Pará. In: CONG. BRAS. GEOL. 27., Aracaju. *Anais...* SBG. v 1, p.181-191.
- KROOK, L. 1979. *Sediment petrographical studies in northern Suriname*. Utrecht, Amsterdam. Vrije Universiteit. Academisch Proefschrift. 154p.
- LIETARD, O. 1977. *Contribution à l'étude des propriétés physicochimiques, crystallophiques et morphologiques des kaolins*. France, Université Nancy.
- LIMA, E. A. & LEITE, J. F. 1978. *Projeto estudo global de recursos minerais da Bacia do Parnaíba: integração geológica-metalogenética*. Recife, DNPM/CPRM. v.16.
- LIMA, E. A. M.; OLIVEIRA, A. A.; VIEIRA, A. T.; GALINDO, A. C.; VASCONCELOS, A. M.; SOARES FILHO, A. R.; MOURA, B. S.; SILVA, E. M. R.O.; FONSECA, E. G.; LINZ, F. A. P. L.; FORTES, F. P.; SILVA, F. P.; BENEVIDES, H. C.; LEITE, J. F.; RIBEIRO, J. A.; QUINHO, J. S.; ANGELIM, S. A. A. 1979. *Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba - Integração Geológica - Metalogenética* Belém, DNPM-CPRM. v.2 e 3. (Relatório Final da Etapa).
- LISBOA, M. A. R. 1914. The Permian geology of Northern Brazil. *American Journal of Sciences* 37 (211):425-443.
- LOUGBROUGH, R. 1993. Kaolin producer move upmarket. *Industrial minerals* (51): 69.
- LUZ, A. B. & COSTA, L. S. N. 1995. *Projeto beneficiamento de caulins do Rio Capim e Jari*. Rio de Janeiro, CETEM/CNPq. 141p. (Relatório Técnico).
- LUZ, A. B. & DAMASCENO, E. C. 1994. *Caulim: um mineral industrial importante*. Rio de Janeiro, CETEM/CNPq. 29p. (Tecnologia Mineral, 65).
- MARTINS, J. M. G. F.; QUADROS, M. L. E. S.; BEZERRA, O. V. , SOUZA Jr, C. M. 1991. Sobre o registro do icnofóssil Ophiomorpha no Grupo Barreiras, nordeste do estado do Pará e suas implicações na reconstituição paleoambiental. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 3. Belém. *Breves comunicações*. SBG/NO. p.600.
- MATOSO, S. Q. & ROBERTSON, F.S. 1959. Uso Geológico do termo Barreiras. *Boletim Técnico da Petrobrás* 2(3):37-43. Rio de Janeiro.

- MESNER, J., & WOOLDRIDGE, L. C. P. 1964. Estratigrafia das Bacias Paleozóicas e Cretácicas do Maranhão. *Boletim Técnico da Petrobrás*. 7 (2): 137-164p.
- MINÉRIOS & MINERALES. 1999. XI Universo da Mineração Brasileira. Ed. Univers. v. 19, n. 240, jun.
- MOLNAR, A. & B., URDINEIA, J. S. A. 1966. *Reconhecimento geológico entre as Bacias do Amazonas e Maranhão*. Belém: PETROBRÁS/RENOR. 62p.(Relatório Técnico)
- MONTEIRO, R. W. 1977. *Elementos traços no caulim do Rio Capim, estado do Pará*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 66p. (Dissertação de Mestrado).
- MORAES, E. L. 1994. *Estudo mineralógico, geoquímicos e físicos de caulins em São Gabriel da Cachoeira - AM, Manaus-Itacoatiara - AM e BR-010 / Rio Capim - PA (Amazônia)*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. (Dissertação de Mestrado). 130p.
- MORAES, E.L. & COSTA, M.L. 1993. Correlações físicas, mineralógicas e geoquímicas entre caulins derivados de gnaisses e rochas sedimentares na Amazônia Ocidental. In: CONG. BRAS. GEOQ. 4., Brasília. SBG. *Resumos Expandidos*. 215-217p.
- MORAES, E. L., SOUZA, J. A. S., COSTA, M. L. 1994. Caracterização tecnológica de caulins da Amazônia. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 5•SBG-NO. 176-179p.
- MOREIRA, M. D. 1994. *Aplicações dos minerais e rochas industriais*. Soc. Bras. Geol. Núcleo Bahia-Sergipe. Superintendência de geologia e recursos Minerais. Salvador. 87p.
- MURRAY, H. H. 1986. Clay. In: ULMANN'S Encyclopedia of Industrial Chemistry. 5.ed. Barcelona, VCH. p.109-136.
- MURRAY, H. H. 1988a. Kaolin minerals: their genesis and occurrences. In: BAILEY, S. W. (Ed.) *Hydrous phyllosilicates*. Chapter 4, p.67-89. (Reviews in mineralogy, 19).
- MURRAY, H. H. 1988b. *World Kaolins: diverse quality needs permit different resources types*. In: INDUSTRIAL MINERALS INTERNATIONAL CONGRESS. Boston. p.127-130.
- MURRAY, H. H. & KELLER, W. D. 1993. Kaolins, Kaolins and Kaolins. Kaolin Genesis and Utilyzation. MURRAY, H., BUNDY, W., HARVEY, C. (Eds). *The Clay Minerals Society*. 341p. (Special Publication, 1).
- MURRAY, H. H. & PARTRIDGE, P. 1981. *Genesis of Rio Jari Kaolin*. International Clay Conference. p.279-291 (Development in Sedimentology, 35).

- NEUMANN, R.; LUZ, A. B., CHAVES, A. P. 1998. Caracterização Tecnológica dos caulins de Morro do Felipe e Capim. In: ENC. NAC. DE TRAT. DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 17., & SEMINÁRIO DE QUÍMICA DE COLÓIDES APLICADA À TECNOLOGIA MINERAL, 1., Águas de S. Pedro. São Paulo. p.405-417.
- PETRI, S. 1977. Mesozóico não marinho do Brasil e seus problemas. In: SIMP. GEOL. REGIONAL, 1., São Paulo. *Atlas*. p.29-47.
- PETRI, S. & FÚLFARO, V. J. 1983. *Sobre a geologia do Brasil (Fanerozóico)*. São Paulo. T. A. Queiroz. Biblioteca de Ciências Naturais. USP. 631p.
- PICKERING Jr., S. M. & HUST, V. J. 1989. *Commercial kaolins in Georgia: Occurrence, mineralogy, origin and use*. Viagem de campo n3. Excursões de geologia na Georgia. W. J. Fritz Ed.. p.29-75. (Georgia Geological Society Guidebooks, 9).
- PICKERING Jr., S. M. & MURRAY, H. H. 1994. Kaolin. In: CARR, D. D. (Ed.). *Clays - Kaolin*. Industrial minerals and rocks. p.255-277. (Society for Mining, Metallurgy and Exploitation).
- PRASADA, M. S.; REID, K. J.; MURRAY, H. H. 1991. Kaolin: Processing, properties and application. *Applied clay science* 6: p.87-119. •
- PRICE, L. G. 1947. *Sedimentos Mesozóicos na Bacia de São Marcos, Estado do Maranhão*. Rio de Janeiro, DNPM. 12p. Projeto Geofísico Brasil-Canadá. Geoquímica regional no Centro-Oeste. Fase Brasileira. Goiânia. 5V.
- RANGE, K. J. & WEISS, A. 1969. Über das Verhalten von kaolinit bei hohen Drücken. *Ber. Deut. Keram. Ges.* 46:231-288.
- ROSSETTI, D; TRUCKENBRODT, W; GÓES, A. M. 1989. Estudo Paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. *Bol. do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra.* (1)1:25-74.
- SANTOS, E. J.; COUTINHO, M.G. N.; COSTA, M. P. A., RAMALHO, R. 1984. *A região de dobramento nordeste e Bacia do Parnaíba, incluindo o Cráton São Luís e as Bacias Marginais. Geologia do Brasil*. Brasília, DNPM.
- SANTOS, P. S. 1992. *Ciência e tecnologia de argilas*. São Paulo, Ed. Edgar Blücher. 408p.
- SILVA, S. P. 1994. *Depósitos de caulim do médio Rio Capim, Pará*. Rochas e Minerais Industriais. Cap. 12, p.131-137.

- SILVA, S. P. & DUARTE, A. L. S. 1983. *Depósito de caulim do Morro do Felipe, Município de Mazagão - Amapá*. DNPM. 12p. (Relatório, 1734).
- SMYKATZ-KLOSS, W. 1974. *Differential thermal analysis, application and results in mineralogy*. New York, Springer-Verlag. 185p.
- SOUSA, D. J. L., ANGÉLICA, R. S., COSTA, M. L.; MANGOLG, K. A. 1999b. A relação da lateritização com o depósito de caulim da mina RCC (Rio Capim Caulim), NE do Estado do Pará. In: CONG. BRAS. GEOQUÍMICA, 7., Salvador. *Anais...* Salvador. p. 418-420.
- SOUSA, D. J. L., COSTA, M. L., ANGÉLICA, R. S.; MANGOLG, K. A. 1999a. Aspectos geológicos do caulim da mina RCC (Rio Capim Caulim), NE do Estado do Pará. In: SIMP. GEOL. AMAZÔNIA, 6., Manaus. *Boletim de resumos expandidos*. p.188-191.
- SUGUIO, K. 1980. *Rochas Sedimentares: propriedades, gênese, importância econômica*. São Paulo, Edgar Blücher. 500p.
- THOREZ, J. 1976. *Practical identification of clay minerals: a handbook for teachers and students in clay mineralogy*. Belgique, G. Lelatte . 90p.
- TRIVEDI, N. C. & HAGEMeyer, R.W. 1994. Fillers and coatings. In: CARR, D. D. (Ed.). *Industrial Minerals and Rocks*. 6. ed. Society for Mining, Metallurgy and Exploitation. p.483-494.
- TRUCKENBRODT, W. & ALVES, R. J. 1982. Petrografia do Arenito Guamá. *Bol. do Museu Paraense Emilio Goeldi*. Belém, p.27.
- TRUCKENBRODT, W. & KOTSCHOUBEY, B. 1981. Argila de Belterra - Cobertura Terciária das bauxitas amazônicas. *Revista Brasileira de Geociências* 11(3):203-208.
- URDINÍNEA, J. S. A. 1977. *Aspectos geoquímicos e ambientais dos calcários da Formação Pirabas, PA*. Porto Alegre, UFRS. (Tese de Doutorado).
- VAN OLPHEN, H. & FRIPIAT, J. J. 1979. *Data handbook for clay materials and other non-metallic minerals*. Oxford, Pergamon Press. 346p.
- VIEIRA, L. S. & SANTOS, P. C. T. C. 1987. *Amazônia: seus solos e outros recursos naturais*. São Paulo : *Agronômica Ceres*. 416p.
- VOGEL, A. 1981. *Análise inorgânica quantitativa*. 4ed. Rio de Janeiro. 631p.