



Gabriel Pinheiro Carneiro

**CARACTERIZAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E QUALIDADE DE
RESERVATÓRIO DO ARENITO FURNAS (EODEVONIANO, BACIA
DO PARANÁ) NA REGIÃO DO CÂNION DO GUARTELÁ (PR)**

Trabalho final de Curso
(Bacharelado em Geologia)

UFRJ
Rio de Janeiro
2009



UFRJ

Gabriel Pinheiro Carneiro

**CARACTERIZAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E QUALIDADE DE
RESERVATÓRIO DO ARENITO FURNAS (EODEVONIANO, BACIA
DO PARANÁ) NA REGIÃO DO CÂNION DO GUARTELÁ (PR)**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Orientador:

Leonardo Borghi

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2009

CARNEIRO, Gabriel Pinheiro

caracterização estratigráfica e qualidade de reservatório do Arenito Furnas (eodevoniano, Bacia do Paraná) na região do Cânion do Guartelá (PR) / Gabriel Pinheiro Carneiro - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2009. xi, 31 p. : il.; 30cm. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2009.

Orientador: Leonardo Borghi

1. Geologia. 2. Sedimentologia e estratigrafia – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Leonardo Borghi. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa de Pós-graduação em Geologia. III. Título.

Gabriel Pinheiro Carneiro

**CARACTERIZAÇÃO ESTRATIGRÁFICA E QUALIDADE DE
RESERVATÓRIO DO ARENITO FURNAS (EODEVONIANO, BACIA
DO PARANÁ) NA REGIÃO DO CÂNION DO GUARTELÁ (PR)**

Trabalho de Conclusão de Curso de
Graduação em Geologia do Instituto de
Geociências, Universidade Federal do Rio
de Janeiro – UFRJ, apresentado como
requisito necessário para obtenção do grau
de Bacharel em Geologia.

Orientador:

Leonardo Borghi

Aprovada em: dia.mês.ano

Por:

Orientador: Leonardo Borghi (UFRJ)

Dr. Renato Rodriguez Cabral Ramos (MN-UFRJ)

Dra. Paula Lúcia Ferrucio da Rocha (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2009

Dedico esse trabalho de conclusão de curso a meu pai Márcio Gonçalves Carneiro. Durante dias pensei em palavras que realmente pudessem expressar a admiração e o que sinto por você meu pai; procurei palavras que verdadeiramente lhes fizessem uma justa homenagem. Mas, tirando minha incapacidade literária e afirmando sem qualquer tipo de demagogia eu digo que palavras humanas não o descreve. Esperarei ansiosamente pelo momento de nosso reencontro e cantarei para sempre o hino da vitória. Que a paz seja convosco. Dedico, também, à minha mãe Carmem Lúcia Pinheiro Carneiro por toda a ajuda e apoio. Creio que ela ainda não se deu conta da força que tem, apesar de às vezes insistir pelo contrário. É uma honra tê-la como mãe; agradeço a Deus por essa chance de aprendizado e por ter colocado uma pessoa de tamanha luz em minha existência. Por fim, agradeço a meus irmãos por todo o companheirismo nas horas boas e ruins da vida.

Agradecimentos

A meu orientador, professor, chefe e amigo Leonardo Borghi. Com certeza eu não estaria aqui se não fosse pelo seu apoio. Tenho convicção de que saio da Universidade apto a um mercado de trabalho extremamente qualificado graças, em grande parte, a sua ajuda.

Ao programa de capacitação de recursos humanos em Geologia do Petróleo da UFRJ (Conv. UFRJ/PRH-ANP/MCT n. 18) pela concessão de bolsa.

Ao Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) pela análise de DRX nas amostras de argilas.

Ao Instituto Ambiental do Paraná pela permissão de estudos no Parque Estadual do Guartelá.

Ao técnico Roberto Campos do laboratório de Geologia Sedimentar da UFRJ.

A todos os colegas do Laboratório de Geologia Sedimentar da UFRJ (LAGESED) pelo apoio durante a realização do trabalho.

Resumo

CARNEIRO, Gabriel Pinheiro. **caracterização estratigráfica e qualidade de reservatório do Arenito Furnas (eodevoniano, Bacia do Paraná) na região do Cânion do Guartelá (PR)**. 2009. xi, 32 p. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

Este estudo procura analisar estratigraficamente e correlacionar a sucessão sedimentar de 200 metros de espessura do Arenito Furnas aflorante no cânion do Guartelá (rio Iapó, PR), analisada por Lobato e Borghi (2005) em termos faciológicos e estratigráficos de alta resolução, com poços de sondagem (subsuperfície), através de perfis geofísicos de raios-gama. A correlação rocha-perfil no cânion do Guartelá inicialmente proposta por Carneiro (2006) é discutida em função de análises petrográficas e mineralógicas (minerais pesados) de 18 amostras ao longo da sucessão do cânion, aqui apresentadas, com as quais se buscou melhor compreender a resposta petrofísica (radioativa) do Arenito Furnas. Paralelamente, buscou-se analisar petrograficamente a qualidades dos arenitos do ponto de vista de reservatórios petrolíferos (microescala), mais particularmente da sua evolução diagenética. Para a identificação dos argilominerais presentes nesses arenitos são realizadas análises de DRX. Assim, com a correlação proposta, confrontada ainda com outras correlações da literatura, somada às informações de qualidade de reservatórios e do estudo estratigráfico de sequências, espera-se contribuir para o fomento exploratório da Bacia do Paraná e para o detalhamento estratigráfico da Formação Furnas.

Palavras-chave: Formação Furnas, reservatório de petróleo, caracterização estratigráfica, correlação.

Abstract

CARNEIRO, Gabriel Pinheiro. **stratigraphic characterization and the quality of Furnas Sandstone reservoir (eodevonian, Parana Basin) in the region of Guartelá canyon (PR)**. 2009.xi, 32 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

This study seeks stratigraphic analysis and correlate the sedimentary succession of 200 meters in thickness of the Furnas Sandstone outcropping in cânion of Guartelá (river Iapó, PR), analyzed by Lobato & Borghi (2005) in facilogic terms and stratigraphic High-resolution, with searching wells (subsurface) through GEOPHYSICAL-gamma ray profiles. The rock-profile correlation in canyon of Guartelá originally proposed by Carneiro (2006) is discussed in terms of petrographical and mineral analysis (heavy minerals) of 18 samples all over the succession of canyon presented here with which it was sought a better understanding response of petrophysical (radioactive) of Furnas Sandstone. In parallel it was tried to analyze petrographically the quality of sandstone from the oil reservoirs viewpoint (microscale), particularly its diagenetic evolution. To identify clay minerals which are present in those sandstones XRD analysis are done. Then, with the proposed correlation, still compared with other correlations in the literature, added to the quality information of reservoirs and the sequence stratigraphy approach, it is expected to contribute to the exploration promotion of the Parana Basin and to the stratigraphic Furnas Formation detail.

Key-words: Furnas Formation, Petroleum reservoir, Stratigraphic characterization, correlation.

Lista de Figuras

Figura 1 Localização da area de estudo.

Figura 2 Diagrama estratigráfico da bacia do Paraná.

Figura 3 Gráfico de Fisher para a sucessão estudada (86 ciclos) com a indicação dos intervalos identificados.

Figura 4 Perfil composto para a área de estudo.

Figura 5 Curva de K e gráfico mostrando a variação da concentração de epimatriz em função das 18 amostras.

Figura 6 Curva de Th e gráfico mostrando a variação da concentração de monazita/xenotímio em função das 18 amostras; observam-se, ainda, monazitas verdes em lupa binocular ZEISS (aumentado de 4x).

Figura 7 Curva de U e gráfico mostrando a variação da concentração de zircão em função das 18 amostras; observam-se, ainda, zircões em lupa binocular ZEISS (aumentado de 4x).

Figura 8 Correlação entre a curva RG (afloramento) e poços de sondagem com base no artigo de Assine (1999).

Figura 9 Correlação entre a curva RG (afloramento) e poços de sondagem com base no artigo de Bergamaschi e Pereira (2001).

Figura 10 Gráficos mostrando a variação de porosidade, matriz e cimento em função das 18 amostras analisadas; notar o comportamento contrário das curvas, assim como os dois melhores intervalos para reservatórios apontados no estudo (retângulo em vermelho).

Lista de tabelas

Tabela 1 – Cotas das amostras coletadas ao longo da sucessão sedimentar do Cânion do Guartelá.

Sumário

Agradecimentos.....	xi
Resumo.....	xii
Abstract.....	xiii
Lista de figuras.....	ix
Lista de tabelas.....	x
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 MATERIAL E MÉTODO.....	2
3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....	5
4 RESULTADOS.....	11
4.1 Correlação Rocha-Perfil RG (perfil composto).....	11
4.2 Curva de K.....	13
4.3 Curva de Th	14
4.4 Curva de U.....	15
4.5 Correlação do perfil RG (afloramento) com poços de sondagem.....	16
4.6 Estudo petrográfico do Arenito Furnas.....	19
4.6.1 Composição geral do arcabouço e aspectos texturais.....	19
4.6.2 Sequência diagenética do Arenito Furnas.....	20
4.6.3 Arenito Furnas como reservatório petrolífero.....	27
5 Discussão e conclusão.....	29
Referências bibliográficas.....	30
Apêndice A – Estampas de fotomicrografias	
Apêndice B – Análise de argilas	
Anexo A – Amostras classificadas segundo diagrama ternário de Folk (1974)	

1 INTRODUÇÃO

A bacia do Paraná, considerada de fronteira exploratória pela ANP, revelou na quase virada do século a sua primeira acumulação comercial de gás, gerado nos folhelhos da Formação Ponta Grossa (campo de Barra Bonita), associado ao sistema petrolífero Ponta Grossa–Itararé(!). Logo em seguida, após a quebra do monopólio estatal da exploração, a ANP disponibilizou blocos exploratórios na bacia (1^a e 3^a rodadas), com certo sucesso. Todavia, um dos seus sistemas petrolíferos, Ponta Grossa–Furnas(?), de idade devoniana, foi pouco valorizado, não obstante o seu potencial, uma vez que possui os folhelhos geradores e/ou selantes da Formação Ponta Grossa. Um dos fatores do seu pouco interesse está na falta de uma abordagem sobre as heterogeneidades do Arenito Furnas como reservatório petrolífero. A ANP, sensível ao problema de investimento exploratório nas bacias paleozóicas (sobretudo com enfoque para gás), hoje procura estimular entre as universidades esforços de pesquisa nessas bacias. Assim, propõe-se agregar neste estudo informação geológica de reservatórios sobre os arenitos devonianos da Formação Furnas, pelo detalhamento dessas heterogeneidades faciológicas em superfície, sobretudo do ponto de vista petrográfico e petrofísico (comportamento da curva RG) desses arenitos. Paralelamente, busca-se caracterizar uma sucessão estratigráfica de 200 metros em afloramento da Formação — de onde a caracterização da qualidade de reservatório é feita — e correlacioná-la com poços da Petrobrás (subsuperfície), através de perfis de RG, tanto no afloramento quanto nos poços.

2 MATERIAL E MÉTODO

O trabalho foi realizado numa sucessão estratigráfica contínua de cerca de 200 metros de arenitos da Formação Furnas aflorantes no Parque Estadual do Cânion do Guartelá, borda Leste da Bacia do Paraná, localizado entre os municípios de Castro e Tibagi (Figura 1).

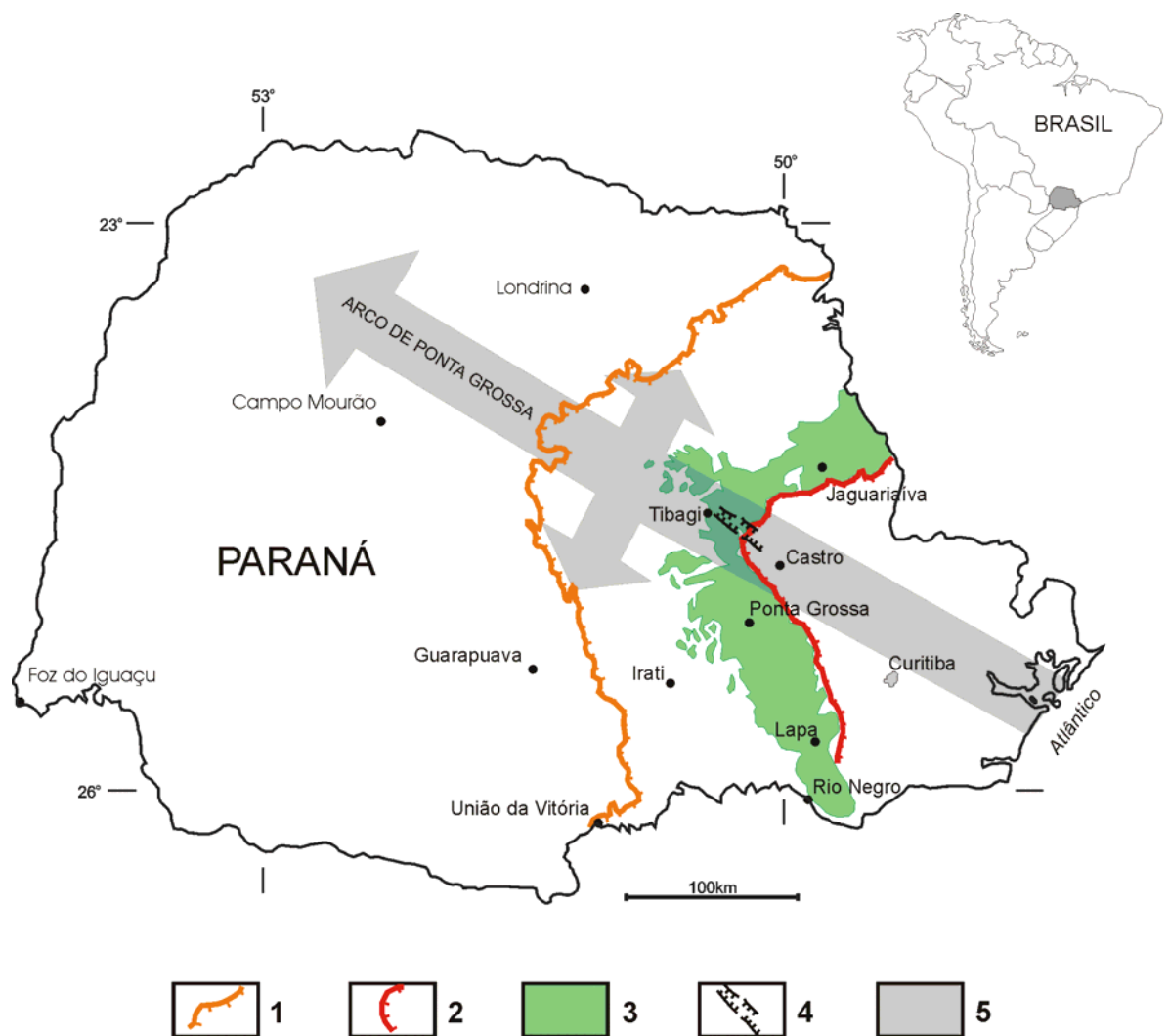


Figura 1 – Localização da área de estudo. 1 – Escarpa da Serra Geral; 2 – Escarpa Devoniana; 3 – Campos Gerais do Paraná; 4 – Cânion do Guartelá; 5 – posição aproximada do eixo do arco de Ponta Grossa (baseado em Maack (1948, 1981) e MINEROPAR (1989), *apud* Melo (2000). Fonte: SIGEP 094.

Para a análise estratigráfica, foi executada uma perfilagem de raios-gama multiespectral (Th^{232} , U^{238} , K^{40}) com um cintilômetro de mão (GF Instruments, modelo GRS 2000). As leituras de emissão natural de radioatividade das rochas foram realizadas em espaçamento de 50 cm, ao longo do caminhamento do perfil estratigráfico levantado por Lobato e Borghi (2005), com as quais foi elaborado um perfil composto (perfil sedimentológico vs. perfil RG) da área de estudo. Com o intuito de compreender-se o comportamento das curvas de RG multiespectrais obtidas, separaram-se, em laboratório, minerais pesados radioativos (monazita, zircão e xenotímio) de 18 amostras coletadas ao longo da sucessão (em espaçamento de aproximadamente 10 metros, v. tabela 1), os quais contêm Th^{232} e U^{238} ; bem como argilominerais para análise de DRX, visando o mesmo para a curva de K^{40} . O método para a obtenção dos minerais pesados consistiu: (1) moagem das amostras e separação granulométrica das frações areia fina e areia muito fina; (2) separação de minerais pesados dessas frações via líquido denso (bromofórmio); (3) separação eletromagnética dos mesmos via equipamento Franz nas amperagens de 0,5 a 1 A; (4) análise dos concentrados em lupa binocular ZEISS. Já para as argilas: (1) separação das frações finas via peneira de 0,62 mm; (2) pipetagem para separação da fração argila; (3) laminação para a análise de DRX. Dados petrográficos de 18 lâminas confeccionadas a partir das amostras dão suporte às análises realizadas. Posteriormente, buscou-se a correlação do perfil RG total de afloramento com os de poços de sondagem da Petrobrás com base em Assine (1999) e Bergamaschi e Pereira (2001).

Tabela 1 — Cotas das amostras ao longo do perfil litológico elaborado por Lobato e Borghi (2005) no Cânion do Guartelá.

Amostra	Cota (m)
1	12,5
2	21,5
3	36
4	48
5	57
6	67,5
7	79
8	92
9	103

Amostra	Cota (m)
10	117
11	127,5
12	139,5
13	150
14	160
15	169
16	179,5
17	190
18	200

Quanto o estudo petrográfico de Lobato e Borghi (2005), as lâminas foram descritas em microscópico petrográfico de luz fotônica transmitida/polarizada (ZEISS Axioskop 40), as quais foram analisadas quantitativamente através de um contador manual de pontos, com uma cobertura de 300 pontos por lâmina. Nas descrições das lâminas, procurou-se: (1) observar a composição geral das amostras e aspectos texturais, visto que esses fatores são fundamentais para o perfeito entendimento dos aspectos diagenéticos de uma rocha sedimentar; (2) observar os processos atuantes na diagênese do Arenito Furnas que, quando ordenados cronologicamente, compõem sua evolução diagenética; (3) observar os principais tipos de porosidade presentes nas amostras, sejam eles de caráter primário ou secundário; (4) por fim, indicar os melhores intervalos reservatório na sucessão do ponto de vista de sua qualidade com o apoio de dados sedimentológicos e petrofísicos.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

A bacia do Paraná é uma extensa sinéclise paleozóica localizada na porção centro-sul do continente sul-americano. Preenche-se por rochas sedimentares e vulcânicas com idades que variam do siluriano ao cretáceo. Sua extensão supera 1.400.000 km² dos quais cerca de 1.100.000 km² encontra-se em território brasileiro. Os restantes estão distribuídos entre a República Oriental do Uruguai (cerca de 100.000 km²), pela República do Paraguai (cerca de 100.000 km²) e pela República da Argentina (cerca de 100.000 km²). Possui uma forma elíptica alongada segundo a direção NNE-SSW com cerca de 1750 km de comprimento e 900 km de largura. Dois terços da porção brasileira são cobertos por derrames de lavas basálticas que atingem até 1700 m de espessura. O terço restante é representado por um cinturão de afloramentos de rochas sedimentares localizados nas bordas leste, nordeste, noroeste, oeste e sul. A espessura máxima de seu arcabouço estratigráfico gira em torno de 6000 m em seu depocentro, cuja posição coincide com a do rio homônimo.

Segundo Milani *et al.* (1994) o pacote sedimentar-magmático da bacia do Paraná constitui-se de seis grandes seqüências limitadas por expressivas discordâncias regionais (Figura 2), sendo a Sequência Devoniana a abordada no presente estudo, mais especificamente a Formação Furnas. Esta juntamente com a Formação Ponta Grossa constituem o Grupo Paraná, no qual a Formação Furnas é a mais antiga. Constitui-se, essencialmente, de quartzo-arenitos e subarcóseos com estratificações “cruzadas” e plano-paralelas, podendo se encontrar conglomerados a base e muito subordinadamente lutitos. Integra a parte inferior de um grande ciclo transgressivo-regressivo de 2^a ordem, cujo ápice de transgressão situa-se nos folhelhos da Formação Ponta Grossa.

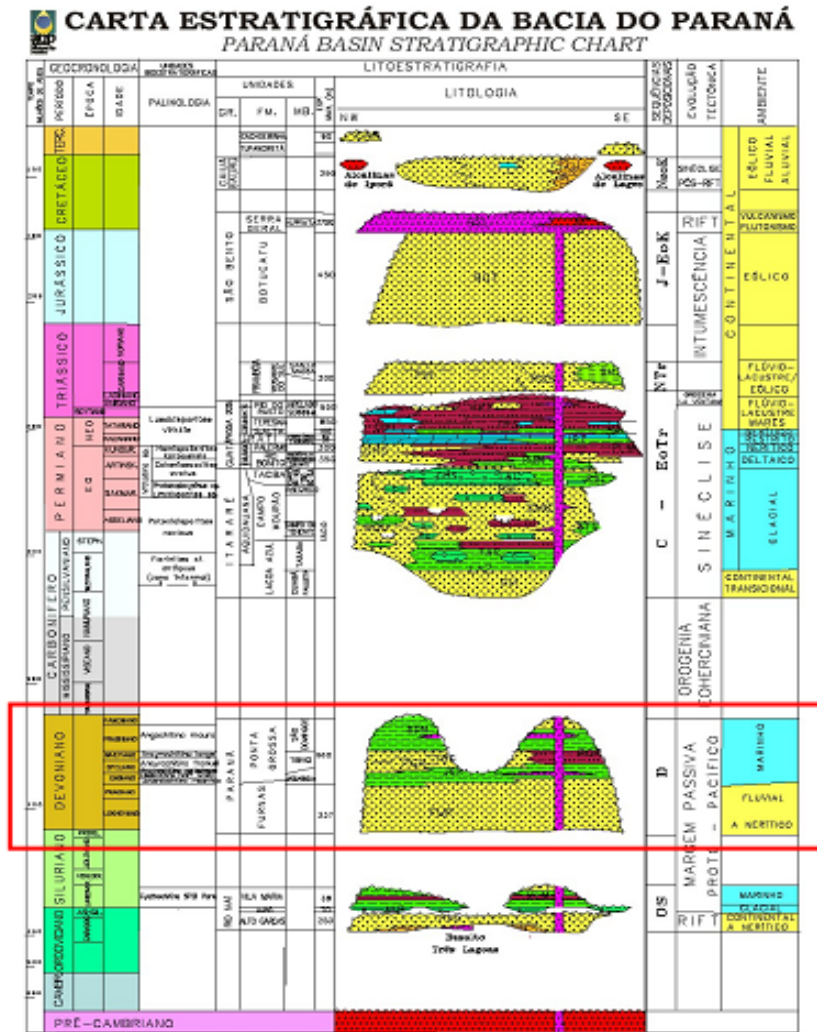


Figura 2 – Diagrama estratigráfico da Bacia do Paraná (Milani et al. 1993, apud ANP, via <http://www.anp.gov.br>); o retângulo em vermelho demarca a seqüência devoniana, na qual a Formação Furnas está inserida.

Estudos estratigráficos mais recentes, como os executados por Assine (1999), Bergamaschi e Pereira (2001), Borghi (1993) e Lobato e Borghi (2005), na atual região de estudo, permitem as análises aqui propostas. Outros estudos na Formação Furnas, podendo citar Cruz (1987), De Ross (1998) e Formoso (1975) dão suporte ao atual trabalho.

Com o intuito de interpretar o paleoambiente deposicional da Formação Furnas, Assine (1999) realizou um estudo faciológico numa faixa de afloramentos localizada no flanco sudeste da bacia do Paraná, na qual a Formação Furnas foi subdividida em 3 intervalos informais caracterizados por associações faciológicas distintas que se sucedem na vertical (unidade inferior, média e superior). Segundo o autor, a unidade inferior é composta de

arenitos e conglomerados depositados em extensas planícies aluviais costeiras; a unidade média é composta de camadas de arenitos com estratificação cruzada separadas por níveis pelíticos; por fim, a unidade superior é composta de arenitos com estratificação cruzada onde se observam depósitos residuais de seixos provocados por joeiramento do fundo oceânico.

Dentre a gama de afloramento descritos e visitados pelo mesmo, a seção do Cânion do Quartelá foi designada a mais representativa, sendo considerada, inclusive, seção-tipo das 3 unidades. Almejando a formalização como membros das 3 unidades propostas em seu trabalho, foi demonstrado o caráter regional da sua subdivisão através da correlação do perfil estratigráfico elaborado em superfície (borda leste) com perfis geofísicos de poços da Petrobrás localizados na borda oeste, mas sem obter êxito até o momento na sua proposta. Do ponto de vista da resposta radioativa das 3 unidades, a unidade inferior apresenta baixa radioatividade condizente com arenitos e conglomerados que a compõe e escassez de argila; a unidade média apresenta arenitos com valores mais altos de radioatividade, indicativos de maior argilosidade, e um padrão serrilhado nos perfis geofísicos com picos devido a presença das camadas siltico-argilosas; já a unidade superior apresenta novamente padrão baixo de radioatividade devido aos arenitos e pavimentos de seixos observados.

Esse padrão geral de comportamento das curvas RG de poços da Petrobrás descrito pelo autor foi mencionado, também, por Bergamaschi e Pereira (2001). Nesse trabalho, os autores subdividiram o registro siluro-devoniano (formações Furnas e Ponta Grossa) da Sub-Bacia de Apucarana (bacia do Paraná), em 6 seqüências deposicionais de 3ª ordem, quais sejam: seqüência A (de idade pridoliana-a eo-lochkoviana), seqüência B (neo-lochkoviana a emsiana), seqüência C (neo-emiana a eo-eifeliana), seqüência D (eifeliana), seqüência E (neo-eifeliana a neo-givetiana) e seqüência F (frasniana).

Para a caracterização das seqüências foi aplicado os conceitos da moderna estratigrafia de seqüências introduzidos pela escola da Esso. O interesse do atual trabalho está focado na

Seqüência deposicional A, já que sua distribuição estratigráfica é coincidente com a abrangência da Formação Furnas. Os poços analisados pelos autores são os mesmos utilizados por Assine (1999) em seu trabalho, sendo as descrições do comportamento das curvas geofísicas muito semelhantes, com o adicional que os autores atribuem esse padrão geral de comportamento dos perfis de RG da Formação Furnas a variações relativas do nível do mar, associando a parte inferior (curva deslocada a esquerda) e mediana (curva deslocada a direita associada a um padrão serrilhado) a um trato de sistema transgressivo, estendendo-se até a superfície de inundação máxima localizada no domínio central. A partir da SIM ocorre uma suave tendência de deflexão à esquerda e novamente um padrão em “caixote” deslocado para a curva das areias, instalando-se um trato de sistema de mar alto.

Borghì (1993), estudando uma assembléia de fácies aflorantes no bordo leste da bacia do Paraná, analisou e caracterizou faciológicamente a Formação Furnas buscando sua descrição do ponto de vista sedimentológico e da arquitetura deposicional, contribuindo para a elucidação dos cenários paleogeográficos da Formação Furnas.

Lobato e Borghi (2005) analisaram estratigraficamente uma sucessão sedimentar de arenitos da Formação Furnas aflorantes no Parque Estadual do Cânion do Guartelá à luz dos conceitos da moderna estratigrafia de seqüências, com o apoio do perfil litológico. Nesse foram identificados 86 ciclos deposicionais (espessura média de 2,33 m, mínima de 0,5 m e máxima de 6,3 m) com base em critérios faciológicos (afinamento ou engrossamento granulométrico, espessamento ou afinamento de camadas, presença de estratificação cruzada hummocky, laminação de baixo ângulo, grânulos ou estratificação plano-paralela como feições limitantes de ciclo e variação da seleção granulométrica.), com os quais foi elaborado um gráfico de Fisher (Figura 3). O método para a obtenção do gráfico consiste na plotagem contínua das espessuras dos ciclos e na posterior comparação da espessura de cada ciclo em relação à média das espessuras dos ciclos. Assim, sucessões de ciclos mais espessos que a

média das espessuras dos ciclos (subida na curva) indicam paulatino incremento no espaço pra acomodação sedimentar, o que sugere subida do nível relativo do mar. O inverso também é válido, onde sucessões de ciclos mais delgados que a média indicam paulatino decréscimo no espaço de acomodação sedimentar e queda do nível relativo do mar. Com base no comportamento da curva obtida e das fácies sedimentares, a sucessão sedimentar estudada pelos autores foi subdividida em 4 intervalos estratigráficos (2 subintervalos), quais sejam: trato de sistema de mar baixo, trato de sistema transgressivo, trato de sistema de mar alto e novamente trato de sistema transgressivo no topo da sucessão, todos limitados por superfícies estratigráficas (superfície transgressiva, de inundação máxima e limite de seqüência). Esses intervalos foram interpretados como ciclos de 3ª ordem (ciclos de Vail) e apresentam características distintas no que diz respeito à paleocorrentes, evolução petrogenéticas e fácies observadas. Vale ressaltar, que a taxa de subsidência foi considerada constante para a construção do gráfico.



Figura 3 - Gráfico de Fischer segundo Lobato e Borghi (2005) para a sucessão sedimentar do cânion do Guartelá, com indicação dos intervalos identificados.

Objetivando o estudo petrológico dos arenitos da Formação Furnas na região do arco de Ponta Grossa, Cruz (1987) propôs um modelo diagenético para esses arenitos, ordenando

cronologicamente seus estágios diagenéticos (sequência diagenética seguida no atual trabalho).

De Ross (1998), estudando amostras de arenitos da Formação Furnas, determinou os processos diagenéticos atuantes nesses arenitos no sistema $\text{SiO}_2\text{--Al}_2\text{O}_3\text{--K}_2\text{O--H}_2\text{O}$ e seus complexos padrões de distribuição ao longo da porção oriental da bacia do Paraná, objetivando determinar os principais controles que causam desvios nos modelos conhecidos.

Ramos e Formoso (1975), descrevendo amostras de testemunhos de sondagem de poços da parte leste e sul da bacia do Paraná, estudou vinte amostras da Formação Furnas em um total de 10 poços. Constatou presentes nas amostras os argilominerais illita, caulinita, clorita e camadas mistas (I–M), ficando claro a mobilidade do alumínio, sílica, potássio e outros componentes na diagênese do Arenito Furnas, assim como será discutido ao longo do trabalho.

4 RESULTADOS

4.1 Correlação rocha – perfil

O perfil composto da área de estudo foi obtido a partir da correlação entre o perfil litológico de Lobato e Borghi (2005) e o perfil RG elaborado na sucessão sedimentar do cânion do Guartelá (figura 4). Nota-se que todas as superfícies estratigráficas limites dos intervalos estratigráficos de Lobato e Borghi (2005) têm correspondência na curva RG (quebras na curva); mais ainda, a curva RG apresenta quebras quando ocorrem mudanças no grupamento Cluster e sentido de paleocorrentes, o que mostra claramente mudanças paleogeográficas dos paleoambientes de sedimentação, do sistema flúvio–deltaico (intervalo I) para o marinho–raso (intervalo IV), que pode ter sido resultado de um basculamento tectônico na bacia forçando a migração do seu depocentro e, em decorrência, do sentido principal de transporte sedimentar. Conseqüentemente, mudanças mineralógicas ocorrem nos diferentes intervalos, justificando as quebras no perfil RG e seu comportamento.

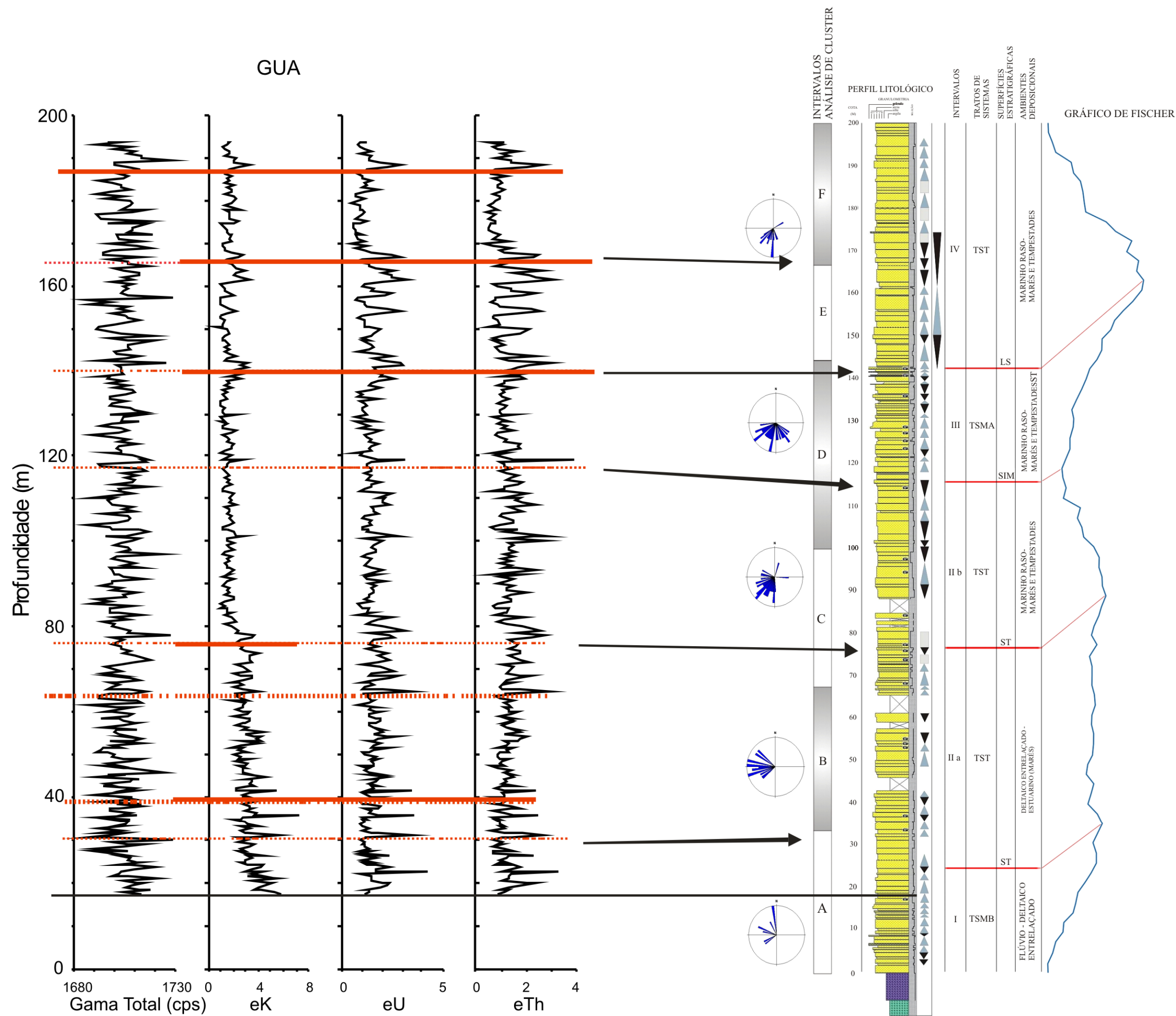


Figura 4 – Perfil composto da área de estudo mostrando a correlação dos perfis RG elaborados em superfície com o perfil estratigráfico de Lobato e Borghi (2005)

4.2 Curva de K^{40}

Como um cintilômetro multiespectral permite a observação em separado de cada elemento químico responsável pelo comportamento da curva de RG total, foi analisado individualmente o comportamento de cada curva (Th^{232} , U^{238} e K^{40}) para se fazer um estudo mais detalhado da Formação do ponto de vista de sua resposta petrofísica (radioativa).

A curva de K^{40} mostrada na figura 5 foi analisada com êxito em função da variação de epimatriz observada nas 18 lâminas petrográficas disponíveis da área de estudo. Nota-se a quebra na curva na cota 80 metros mudando completamente o comportamento da mesma, passando de valores mais altos de K^{40} (CPS) para valores mais baixos (CPS). Notar, ainda, como o valor na concentração de epimatriz muda da amostra 7 para 8, justificando, assim, o comportamento da curva de K^{40} .

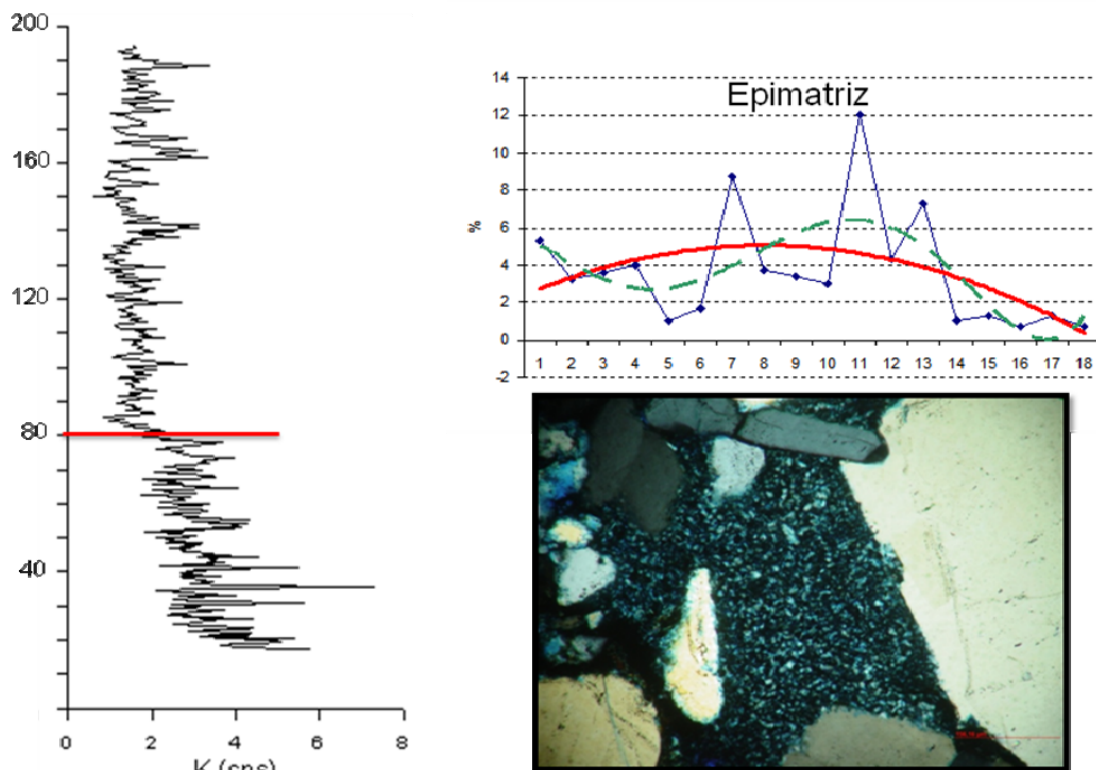


Figura 5 – Curva de K^{40} e gráfico mostrando a variação da concentração de epimatriz em função das 18 amostras.

4.3 Curva de Th²³²

A curva de Th²³² foi tentativamente analisada em função da variação da concentração dos minerais pesados de Monazita e Xenotímeo separados em laboratório via separador eletromagnético Franz.

A figura 6 mostra o comportamento da curva de Th²³², onde se observa uma gradual tendência de diminuição para o topo da sucessão, o que fica contraditório quando se observa a variação da concentração de Monazita / Xenotímeo nas 18 amostras, sugerindo-se que outro fator ou minerais expliquem melhor o comportamento dessa curva ao invés dos usados na análise.

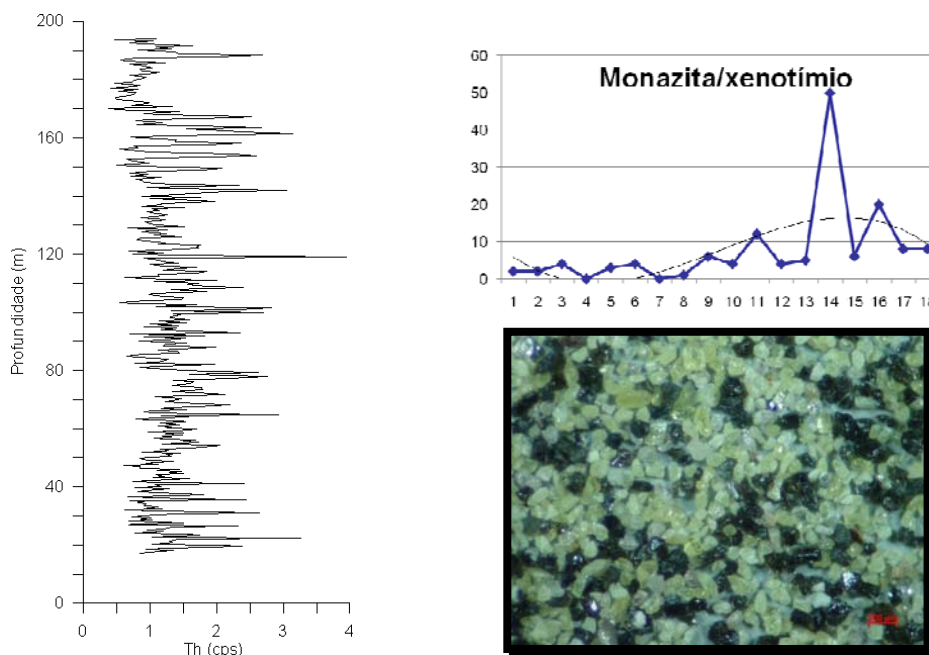


Figura 6 – Curva de Th²³² e gráfico mostrando a variação de concentração de monazita/xenotímeo em função das 18 amostras analisadas; observam-se, ainda, monazitas verdes em lupa binocular Zeiss (aumento de 4 x).

4.4 Curva de U^{238}

A curva de U^{238} foi analisada com êxito através da variação de concentração do mineral Zircão nas 18 amostras. Foram observadas as frações não atraídas pelo separador eletromagnético Franz nessa etapa de estudo.

A figura 7 mostra o comportamento da curva de U^{238} em consonância com a variação de concentração do mineral Zircão.

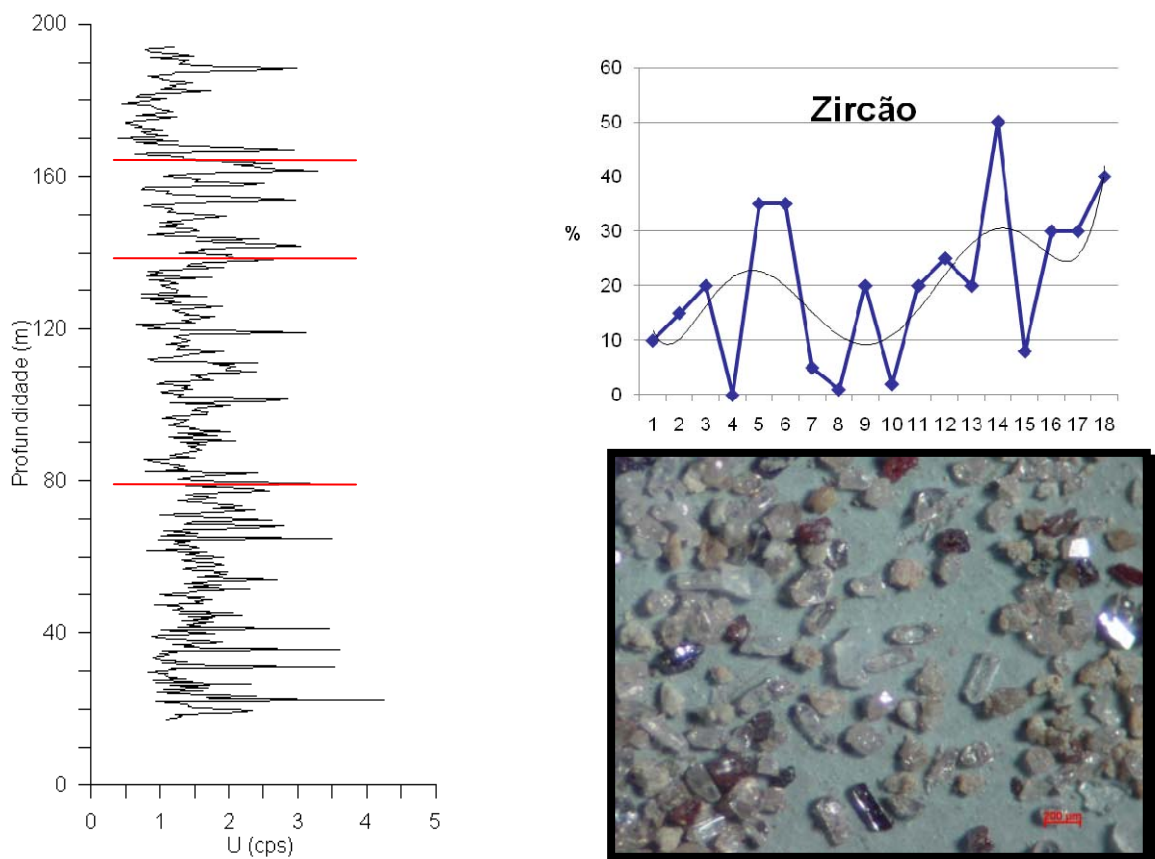


Figura 7 – Curva de U^{238} e gráfico mostrando a variação da concentração de Zircão em função das 18 amostras analisadas; observam-se, ainda, zircões em lupa binocular Zeiss (aumento de 4 x).

4.5 Correlação do perfil RG Total (afloramento) com poços de sondagem

Nessa etapa de estudo obteve-se a correlação do perfil composto elaborado em afloramento com poços de sondagem da Petrobrás. A correlação proposta foi baseada em Assine (1999) e Pereira Bergamaschi (2001).

Observa-se que o comportamento radioativo geral descrito pelos autores para as curvas geofísicas de poços foi observado na curva RG de afloramento (Figura 8 e 9), o que estende a correlação dos dados de superfície para o âmbito de poços, subsidiando decisões exploratórias. Vale destacar, que não foram observadas camadas siltico-argilosas no perfil estratigráfico elaborado na área de estudo, assim como descrito por Assine (1999), sendo explicado o comportamento serrilhado da parte mediana do perfil RG pelo aumento da concentração de epimatriz (Figura 5, amostra 7 a 12). Como os perfis de poços utilizados por Bergamaschi e Pereira (2001) são os mesmos dos que os utilizados por Assine (1996) em seu trabalho, a correlação estratigráfica feita na figura 8 é muito semelhante à anterior, com o somatório da correlação obtida entre a SIM dos primeiros e a de Lobato e Borghi (2005).

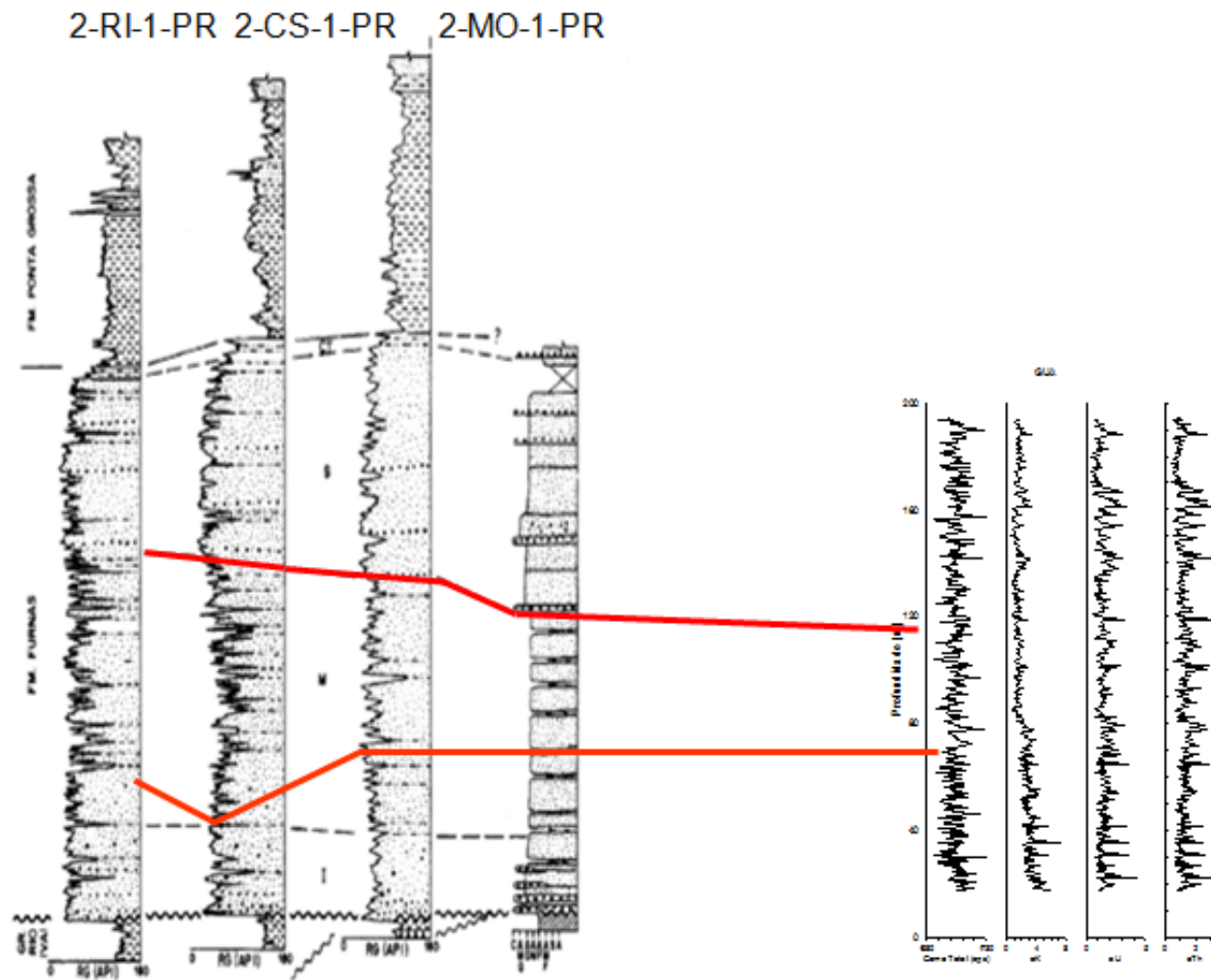


Figura 8 – Correlação entre a curva RG (afloramento) e poços de sondagem com base no artigo de Assine (1999).

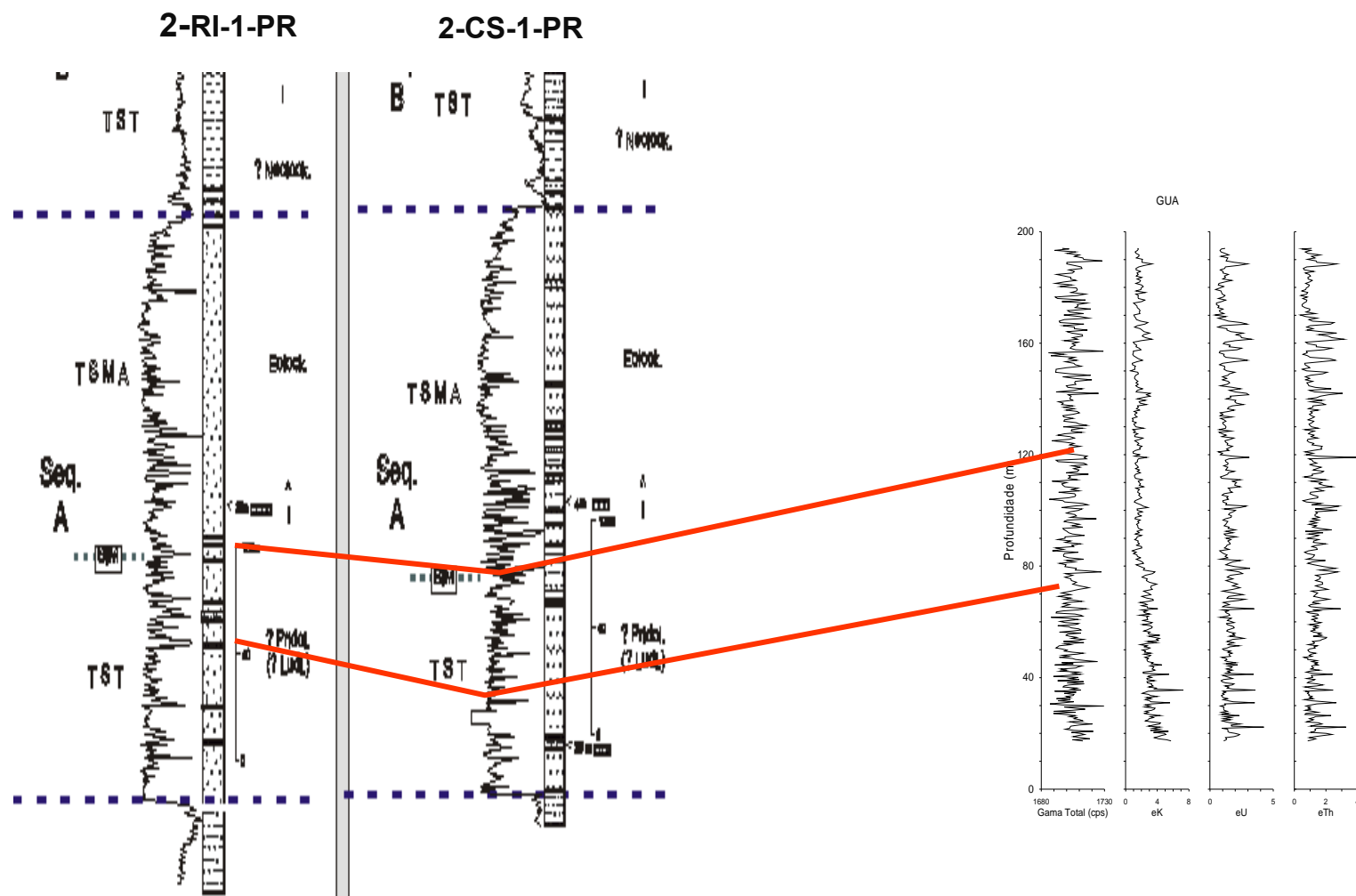


Figura 9 – Correlação entre a curva RG (afloramento) e poços de sondagem com base no artigo de Bergamaschi e Pereira (2001).

4.6 Estudo petrográfico do Arenito Furnas

4.6.1 Composição geral do arcabouço e aspectos texturais

Segundo Lobato e Borghi (2005), as amostras estudadas apresentam uma notável regularidade composicional, com a predominância de quartzo e pequenas porcentagens de feldspato e fragmentos líticos. Classificam-se como quartzo-arenitos, subarcóseos e sublíticos de acordo com o diagrama de Folk, 1974 (Anexo A). Nota-se que rochas originalmente ricas em feldspato têm esse componente bruscamente reduzido em função de processos de dissolução, modificando, assim, suas composições originais para quartzo-arenitos e subarcóseos. Outros constituintes completam o quadro geral da composição do Arenito Furnas, muito homogêneo em todas as lâminas estudadas. Para a presente seção optou-se fazer uma breve descrição desses constituintes, ficando maior detalhamento para a próxima.

Dentre as micas, a muscovita ocorre em todas as lâminas observadas, sendo objeto de marcantes mudanças diagenéticas. Aparece na forma de lamelas alongadas, muitas vezes deformadas por compactação e exibindo diferentes estágios de alteração.

Fragmentos líticos são comuns e observados em todas as lâminas analisadas. Ocorrem, principalmente, grãos metamórficos do embasamento da Bacia do Paraná (meta-arenitos, filitos e xistos). Comumente são observados na forma de pseudomatriz esmagados em meio a grãos do arcabouço.

Minerais como turmalina, zircão, epidoto, óxidos (principalmente rutilos) e opacos completam a composição geral do Arenito Furnas.

No que diz respeito a dados texturais das amostras, observou-se: granulometria, seleção e grau de arredondamento. Quanto à granulometria, esta se encontra bastante variada,

podendo observar-se desde areia fina até areia grossa, com predominância de areia média a grosseira; quanto à seleção, os arenitos são, na maioria das amostras, moderadamente selecionados, podendo ocorrer, em algumas amostras, bem selecionados. Como não foi encontrada protomatriz nessas amostras deduz-se que a energia do agente de transporte era alta suficiente para lavar a fração silto-argilosa, sendo essa fração encontrada nas amostras na forma de epimatriz, pseudomatriz e na forma de pequenos grãos precipitados (óxidos e argilas telogenéticas); quanto ao grau de arredondamento dos grãos, fica difícil uma determinação mais precisa, visto a intensa compactação mecânica, crescimento secundário de quartzo (tanto 1ª fase quanto tardia) e corrosão nas bordas dos grãos, observados nas lâminas devido a evolução diagenética do arenito. A existência de linhas de impureza marcando o limite entre o grão e o precipitado químico possibilita a visualização de grãos bem arredondados, o que indica grande trabalhamento desse sedimento.

4.6.2 Sequência diagenética do arenito Furnas

Nessa etapa de estudo busca-se um melhor entendimento dos processos diagenéticos atuantes no Arenito Furnas, sendo estes produtos da interação entre minerais, fluídos e cimentos. Para uma dinamização e simplificação do trabalho, utilizou-se o trabalho de Choquette e Pray (1970) como guia, onde os referidos autores subdividem o campo diagenético em eodiagênese, mesodiagênese e telogênese. A eodiagênese envolve todas as mudanças ocorridas nos sedimentos próximas à superfície, onde não ocorre um soterramento efetivo e a química das águas superficiais é controlada principalmente pelo ambiente deposicional. Na mesodiagênese o sedimento já experimenta um soterramento efetivo, sendo as mudanças ocorridas no sedimento processadas desde profundidades capazes de isolar o sedimento da influência superficial até o limite com o metamorfismo. A maior parte da

evolução diagenética do Arenito Furnas parece se enquadrar nesse campo. A telodiagênese envolve processos atuantes no soerguimento dessa rocha previamente submetida ao soterramento efetivo, sendo o principal o intemperismo.

Nas seções a seguir será discutida a evolução diagenética do Arenito Furnas proposta por Cruz (1987), sendo, ao final, proposto melhores intervalos na sucessão sedimentar do ponto de vista de sua qualidade como reservatório.

Compactação mecânica — A compactação mecânica atua principalmente na eodiagênese e é o principal fator responsável pela diminuição de porosidade nas primeiras centenas de metros de soterramento de qualquer material sedimentar. Estudos recentes mostram que as partículas constituintes desse material sofrem uma série de rearranjos texturais, sobretudo físicos, quando submetidos à sobrecarga sedimentar, diminuindo consideravelmente o espaço poroso.

O efeito da compactação mecânica sobre o material é função da granulometria, forma das partículas sedimentares e sua composição. Assim, os grãos do material reagem de maneira diferente ao peso sedimentar. Grãos rígidos como quartzo e feldspato respondem à sobrecarga por rotações e deslizamentos relativos, podendo até se fraturarem, tornando o empacotamento mais apertado. Grãos de muscovita apresentam um comportamento mais elástico, ficando espremidos entre os grãos do arcabouço (apêndice A, estampa I). Grãos que apresentam um comportamento mais dúctil, como clastos metamórficos ou fragmentos de folhelhos se deformam facilmente e se esmagam dando origem a pseudomatriz.

Crescimento secundário de quartzo — Essa etapa da diagênese do Arenito Furnas foi observada em todas as lâminas analisadas. Segundo De Ros (1997), esse processo diagenético é observado no Arenito Furnas desde a eodiagênese e estende-se até a mesodiagênese. É

caracteristicamente marcado por uma cimentação de sílica que ocorre como sobrecrescimento nos grãos de quartzo e feldspato com mesma orientação óptica dos grãos hospedeiros. A ocorrência de sobrecrescimento em grãos de quartzo e feldspato tem sido constatada em diversos arenitos, sendo seu estudo de grande importância para a caracterização de um reservatório petrolífero.

Sua distinção não é tarefa fácil em lâminas petrográficas devido à continuidade óptica entre grão e cimento, ficando sua observação facilitada pela presença de linhas de impureza (argilas, óxidos) que marcam o limite entre o clasto e o quartzo autigênico (apêndice A, estampa II).

Quanto à fonte provável da sílica em solução, De Ros (1997) cita crescimento secundário de quartzo em amostras do Arenito Furnas após uma intensa fase de dissolução por pressão, sendo esse fator, juntamente com a alteração de feldspatos para caulinita, dissolução de grãos do arcabouço e a circulação de fluídos quentes oriundos do soerguimento e magmatismo na região do arco de Ponta Grossa as fontes mais plausíveis da sílica em solução.

O cerne da discussão dessa seção diz respeito ao efeito do crescimento secundário de quartzo sobre a porosidade. Observa-se, em todas as lâminas estudadas, uma redução da porosidade primária devido ao sobrecrescimento, efeito esse que juntamente com a compactação mecânica contribuiu para a formação de um arcabouço rígido e fechado.

Compactação química — Essa etapa do estudo diz respeito à dissolução por pressão observada essencialmente ao longo dos contatos intergranulares dos grãos de quartzo e feldspato. Os grãos de quartzo são tipicamente mais afetados e o resultado são contatos intergranulares côncavo-convexos e suturados. Segundo Wilson (1984) a dissolução por pressão é facilitada pela presença de finas cutículas de argilas circundando os grãos, que sob

pressão, liberam íons K^+ . Esse cátion cria um micro ambiente alcalino, no nível dos contatos entre os grãos, promovendo a dissolução do quartzo. No caso das lâminas estudadas observam-se finas lamelas de muscovitas entre os grãos de quartzo, as quais seriam responsáveis pela liberação do K^+ (apêndice A, estampa III).

Quanto à redução da porosidade em função da compactação química, essa aumenta linearmente com a profundidade e é controlada essencialmente pela temperatura. Apesar do empacotamento fechado observado no Arenito Furnas ser fruto principalmente de crescimento secundário de quartzo, a dissolução por pressão tem sua parcela na redução da porosidade original.

Porosidade secundária — Quando se analisa o Arenito Furnas do ponto de vista de sua qualidade como reservatório petrolífero e mais especificamente observando sua porosidade, é notável em todas as lâminas estudadas, a observação de um sistema poroso nitidamente de caráter secundário, resultante da dissolução dos grãos de feldspato e processos pós deposicionais e modelado por duas fases de crescimento secundário de quartzo, uma anterior a dissolução e outra posterior. Os critérios petrográficos para a identificação de porosidade secundária nas lâminas descritas foram: grãos corroídos marginalmente que ficam com reentrâncias após a dissolução; poros agigantados devido à dissolução em grãos de feldspato, pseudomatriz e cimento; resquícios de grãos de feldspato dissolvidos com geminação Tartan ainda evidente (raramente ocorre); e porosidade secundária oriunda do alívio de carga (poros lamelares e fraturas que superam o limite do grão). Tipos de poros secundários são ilustrados apêndice A, estampa IV.

Segundo Zalán *et al.*, (1987) a Formação Furnas esteve exposta durante um período de 10 Ma antes de ser recoberta pelos depósitos marinhos transgressivos da Formação Ponta Grossa. Esse longo período de exposição permitiria uma extensiva circulação de águas

meteóricas, que explicaria a intensa dissolução de feldspatos e a caulinitização observada na Formação, assim como a cimentação eogenética de quartzo.

Sem dúvida, o aspecto mais importante a ser destacado referente à dissolução dos grãos de feldspatos é o problema da mobilização do alumínio. Segundo Cruz (1987), a água intersticial da Formação Furnas tornou-se ácida devido à concentração de complexos orgânicos oriundos da maturação da matéria orgânica presente na Formação Ponta Grossa, provocando a dissolução dos grãos e favorecendo o transporte de metais solúveis, entre eles o alumínio.

Caulinita — Essa etapa da diagênese do Arenito Furnas é muito característica e amplamente observada em todas as lâminas analisadas. A caulinita ocorre na Formação Furnas de duas maneiras: como cimento, precipitando-se nos poros secundários, intergranulares e entre as fatias resultantes da alteração de muscovitas (apêndice A, estampa V, fotomicrografias A e B); e sob a forma de muscovitas caulinitizadas exibindo diferentes estágios de alteração em função do processo de caulinitização que gera aberturas em suas estruturas segundo suas clivagens basais, onde se precipita o cimento caulínico e, em fases mais avançadas, redução da birrefringência dos grãos e formação de massas acinzentadas (apêndice A, estampa V, fotomicrografias C e D). Assim como descrito por Cruz (1987), raros são os casos de se observar a caulinita substituindo diretamente grãos de feldspato detríticos, mas o alumínio e silícios necessários para a sua precipitação foram derivados provavelmente da dissolução desses grãos.

A ocorrência diagenética da caulinita na Formação Furnas foi observada por Ramos e Formoso (1975) partir de Difractometria de Raios X. O presente estudo ressalta este dado com 18 amostras onde se coletam argilas para análise de Rx (apêndice B). Em todas as amostras

analisadas encontraram-se os argilominerais caulinita e illita, apesar de petrograficamente não ser comum a ocorrência do último.

Como mencionado na seção anterior, águas ácidas intersticiais puderam dissolver feldspatos e transportar em solução sódio, potássio, cálcio, alumínio e sílica. Assim como grãos de muscovitas perderam potássio de suas estruturas para as soluções intersticiais, separando-se ao longo dos planos de clivagem. Com a evolução da diagênese e aumento de temperatura as águas dos poros saturadas nesses elementos entraram no campo de estabilidade da caulinita, favorecendo sua precipitação. Dissolvendo-se cada vez mais grãos de feldspato, muscovita e precipitando-se caulinita, a água de formação ficou enriquecida em íons K^+ , favorecendo a alteração de caulinita para illita.

Reativação da compactação mecânica — Ocorrida devido ao peso sedimentar a profundidades maiores, essa etapa da diagênese do Arenito Furnas iniciou a partir da dissolução de feldspatos. Como mencionado anteriormente, o peso sedimentar provoca uma série de rearranjos físicos nos grãos do arcabouço que respondem de maneira diferente a depender da sua composição, contribuindo para a redução da porosidade e a formação de um empacotamento fechado. A dissolução de feldspatos criou uma heterogeneidade nesse empacotamento possibilitando novos rearranjos texturais dos grãos em função dos novos espaços gerados (apêndice A, estampa VI).

Crescimento secundário de quartzo tardio — Assim como a fase inicial de cimentação de quartzo autigênico, a fase tardia também contribui para a redução da porosidade e modelamento do sistema poroso. Essa última ocorre após a dissolução dos grãos de feldspato reduzindo o espaço poroso secundário. Também é possível situá-la após a cimentação de

caulinita devido a observação, em alguns casos, do limite entre o grão e sobrecrecimento tardio ser formado por esse argilomineral.

A diferença principal entre o quartzo autigênico inicial e o tardio é que o segundo possui faces prismáticas muito bem desenvolvidas em função do crescimento livre nos espaços gerados pela dissolução de feldspato (apêndice A, estampa VII).

Minerais de titânio — A ocorrência de minerais autigênicos de Titânio como fase diagenética do Arenito Furnas já foi mencionada anteriormente, podendo citar De Ros (1997) e Cruz (1987). Segundo o primeiro autor, cristais prismáticos de rutilo precipitam-se em poros secundários, ocorrem inclusos em sobrecrecimentos de quartzo (portanto essa fase se iniciou na eodiagênese e se estendeu a mesodiagênese) e tipicamente substituem minerais de Fe-Ti, os quais seriam as fontes de Ti.

Nas lâminas analisadas observaram-se agregados e cristais isolados maiores de rutilo precipitados em poros intergranulares e secundários (apêndice A, estampa VIII), o que contribuiu para a redução da porosidade.

Processos telogenéticos — Como mencionado anteriormente, a telogênese envolve processos atuantes na rocha devido ao soerguimento e intemperismo experimentado pela mesma após um soterramento efetivo. Certos minerais formados em condições de alta temperatura e pressão tornam-se instáveis quando submetidos a condições superficiais oxidantes, acarretando uma série de alterações. Os processos intempéricos (tanto físicos quanto químicos), assim, são necessários para que se atinja um novo estado de equilíbrio do sistema.

O soerguimento dos arenitos da Formação Furnas foi responsável, principalmente, pela formação de uma porosidade de alívio de carga. Facilmente identificado nas lâminas, as

fraturas geradas pelo alívio de carga superam o limite do grão e atravessam vários grãos do arcabouço, contribuindo para a permeabilidade da rocha (apêndice A, estampa IX, fotomicrografia A).

Muito característico dessa fase diagenética do Arenito Furnas é a precipitação de óxidos e argilas. Os óxidos precipitam-se em poros secundários, intergranulares, sobre cimento e no contorno de grãos prejudicando ainda mais a porosidade (fotomicrografia B, apêndice J). As argilas encontram-se impregnando cimento caulínico, sobre crescimento secundário de quartzo e precipitando-se nos poros intergranulares e secundários (apêndice A, estampa IX, fotomicrografia C). Apresentam-se amorfas e aparentemente sem deformações, o que sugere uma infiltração mecânica durante a fase telogenética.

4.6.3 Arenito Furnas como reservatório petrolífero

Essa seção tem o objetivo de identificar os melhores intervalos reservatórios na sucessão estratigráfica do cânion do Guartelá a partir do estudo petrográfico realizado e com o apoio dos dados sedimentológicos e petrofísicos obtidos.

Foram apontados dois intervalos na sucessão estudada que apresentam melhores porosidades visuais, apesar de diversos processos diagenéticos descritos anteriormente a prejudicarem. Assim, o intervalo compreendido até 60 metros apresenta uma porosidade essencialmente de caráter secundário (porosidade de alívio de carga e provocada pela dissolução de grãos) e o intervalo de 140 a 180 metros apresenta uma porosidade essencialmente intergranular (figura 10). Dados sedimentológicos e petrofísicos dão suporte à indicação dos resultados; ambos apresentam melhor seleção, menor quantidade de matriz e RG baixo equivalente a menor argilosidade. Como mostrado na figura, o gráfico de matriz e cimento têm o comportamento oposto ao gráfico da porosidade e auxilia na explicação de seu

comportamento. Vale ressaltar que esses valores de matriz e cimento englobam todos os processos que prejudicam a porosidade. Portanto, os valores de matriz dizem respeito à pseudomatriz e a epimatriz; e os valores de cimento a crescimento secundário de quarto tanto inicial quanto tardio e cimentação por óxidos telogenéticos.

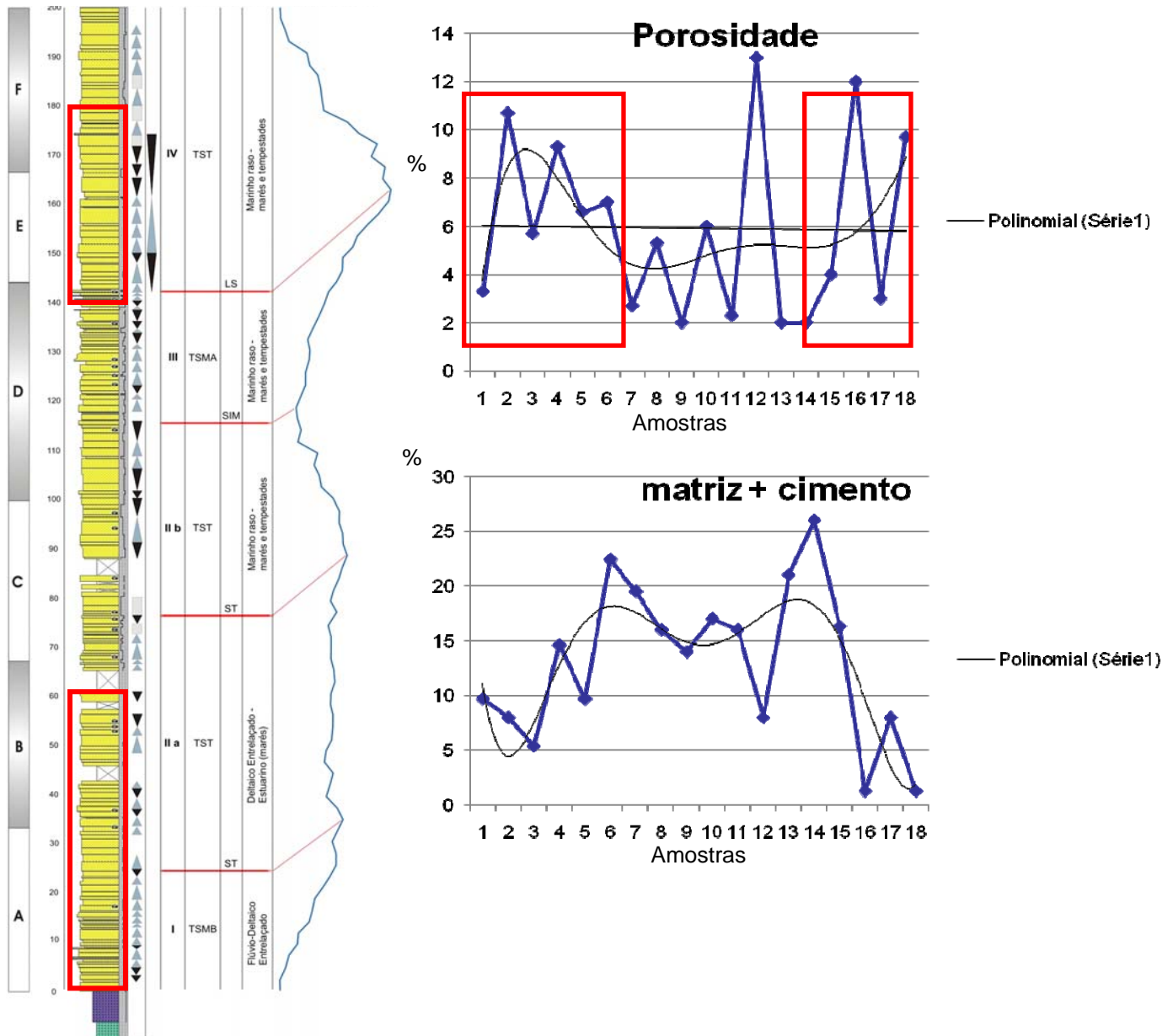


Figura 10 – gráficos mostrando a variação de porosidade, matriz e cimento em função das 18 amostras analisadas; notar o comportamento contrário das curvas, assim como os dois melhores intervalos para reservatórios apontados no estudo (retângulos em vermelho) tanto no perfil quanto no gráfico.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Como somatório ao detalhamento estratigráfico da Formação Furnas, o presente trabalho mostra uma correlação consistente entre os dados de afloramento (correlação entre perfil RG e sedimentológico) e desses com perfis geofísicos de poços da Petrobrás, o que oferece uma melhor resolução estratigráfica para correlação na Formação Furnas, até então não alcançada. Com o auxílio de dados petrográficos e sedimentológicos pôde-se explicar o comportamento radioativo do Arenito Furnas, assim como dar apoio à análise estratigráfica.

No que diz respeito ao estudo da qualidade do Arenito Furnas como reservatório petrolífero, este passa pelo entendimento de suas características petrofísicas (permeabilidade e porosidade) e de suas heterogeneidades (tanto em microescala quanto em meso e macro escala). Inicialmente, tinha-se a idéia de medir a permeabilidade das amostras a partir de um permeâmetro. Mas, as amostras devido ao processo de laminação ficaram demais pequenas, não possibilitando essa análise. O estudo da arquitetura deposicional do Arenito Furnas já foi iniciado, mas, não concluído. Portanto, foram apontados dois melhores intervalos reservatórios na sucessão a partir de dados petrográficos das amostras (porosidade visual e aspectos diagenéticos) e com o suporte de dados sedimentológicos e petrofísicos, contribuindo, assim, para o fomento exploratório da bacia e somando conhecimento geológico para o sistema petrolífero Ponta Grossa–Furnas (?). Tendo em vista a grande extensão do Arenito Furnas, sua espessura média de 250 metros e porosidade média de 6,2 % das amostras, esse hipotético reservatório mostra-se promissor em termos exploratórios, apesar das heterogeneidades mencionadas no trabalho.

Referências Bibliográficas

ASSINE, M. L.; SOARES, P. C.; MILANI, E. J. Sequências tectono-sedimentares meso-paleozóicas da Bacia do Paraná, sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 24, n. 2, p.77-89, jun. 1994.

ASSINE, Mário Luis. Fácies, Icnofósseis, Paleocorrentes e Sistemas deposicionais da Formação Furnas no flanco sudeste da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 29, n. 3, p.357-370, set. 1999.

BERGAMASCHI, S. *et. al.* Interacción entre depósitos aluviales y costeros en la Formación Furnas. Devónico de la cuenca del Paraná, Brasil. **Geogaceta**, v. 38, p. 99-102, 2005.

BERGAMASCHI, S.; PEREIRA, E. Caracterização de sequências deposicionais de terceira ordem para o siluro-devoniano na sub-bacia de Apucarana, Bacia do Paraná, Brasil. In: J.H.G. Melo & G.J.S. Terra (eds.) **Correlação de sequências paleozóicas sul-americanas**. Ciência-Técnica-Petróleo. Seção: Exploração de Petróleo, v.20, p.63-73, nov.2001.

BORGHI, Leonardo. **Caracterização e análise faciológicas da Formação Furnas em afloramentos do bordo leste da Bacia sedimentar do Paraná, Estado do Paraná, Brasil**. 1993. 227 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BORGHI, Leonardo. A Formação Furnas revisitada no bordo leste da Bacia do Paraná. In: Simpósio sul-americano do siluro-devoniano: Estratigrafia e Paleontologia, 1., 1996, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa, Grafica Planeta Ltda., p. 13-28.

BORGHI, Leonardo. **Fácies, arquitetura deposicional, tempestitos e o devoniano da Bacia do Paraná**. 2002. 309 f. Tese (Doutorado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

CARNEIRO, Gabriel Pinheiro. Caracterização Estratigráfica da Formação Furnas (Eodevoniano, Bacia do Paraná) em Afloramento e sua Correlação com Poços de Sondagem. In: Jornada Giulio Massarani de Iniciação Científica, Artística e Cultural, XXVIII., 2006, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: UFRJ, 2006.

CRUZ, Francisco Eduardo Gomes da. **Petrologia dos Arenitos da Formação Furnas, na região de Ponta Grossa, Paraná**. 1987. 93 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em geologia) – Curso de Graduação em Geologia, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro.

De ROS, Luiz Fernando. Heterogeneous generation and evolution of diagenetic quartzarenites in the silurian-devonian Furnas Formation of the Paraná Basin, southern Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 116 (1). p. 99-128. 1998.

FOLK, Robert. L. Petrology of sedimentary rocks. Austin, Texas : Hemphill Publishing Co., 1974. 182 p.

LOBATO, Gustavo; BORGHI, Leonardo. Análise estratigráfica da Formação Furnas (Devoniano Inferior) em afloramentos da borda Leste da bacia do Paraná. **In:** CONGRESSO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 3., Salvador, 2005. **Anais...** Salvador: IBP, 2005. 1 CD-ROM, 6p.

MELO, M.S. 2002. Canyon do Guartelá, PR - Profunda garganta fluvial com notáveis exposições de arenitos devonianos. *In:* Schobbenhaus, C.; Campos, D.A. ; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M.L.C. (*Edits.*) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. 1. ed. Brasília: DNPM/CPRM - Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), 2002, v.01: 279-288.

MILANI, Edson J.; FRANÇA, Almério B.; SCHNEIDER, Rubem L. Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 8, n. 1, p.69-82, mar. 1994.

MILANI, Edson J.; RAMOS, Victor A.. Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-Occidental do Gondwana E Os Ciclos De Subsidência da Bacia Do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p.473-484, dez. 1998.

RAMOS, A. N.; FORMOSO, M. L. L. **Argilominerais Das Rochas Sedimentares Da Bacia Do Paraná**. Ciência-Técnica-Petróleo. Rio de Janeiro, PETROBRAS/CENPES/DINEP, série Ciência – Técnica – Petróleo, v.9, 1975.

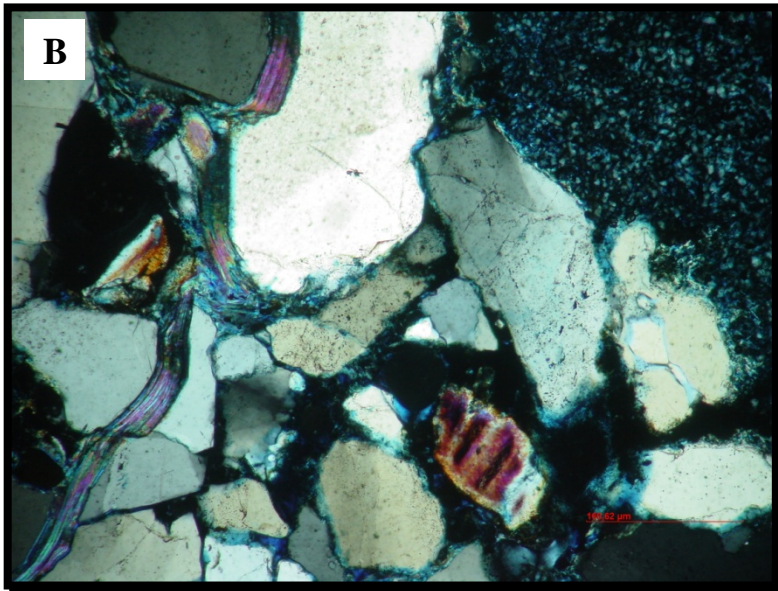
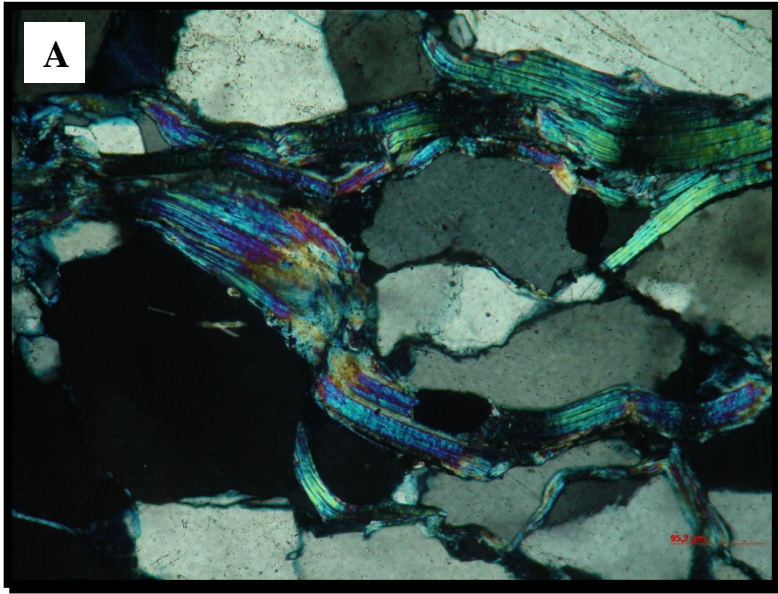
ZALÁN, Pedro V. *et. al.* Tectônica E Sedimentação Da Bacia Do Paraná. *In:* 3º Simpósio Sul - Brasileiro De Geologia, 1987, Curitiba. **Anais...** Curitiba: SBG, 1987. v 1. p. 441-477.

Apêndice A – Estampas de fotomicrografias

Estampa I – Fase diagenética de compactação mecânica.

Fotomicrografia A – Compactação mecânica em grão dúctil de muscovita, esmagada em meio aos grãos do arcabouço. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 95,2 μm . Amostra CG10.

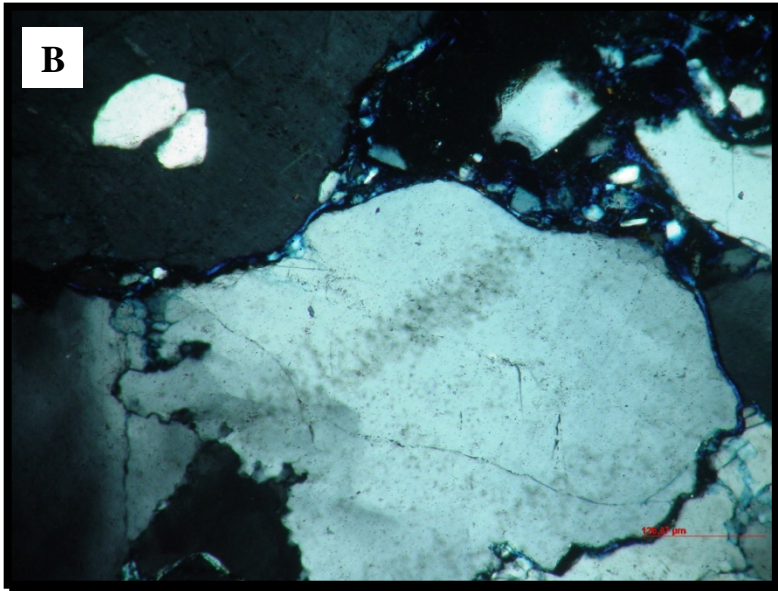
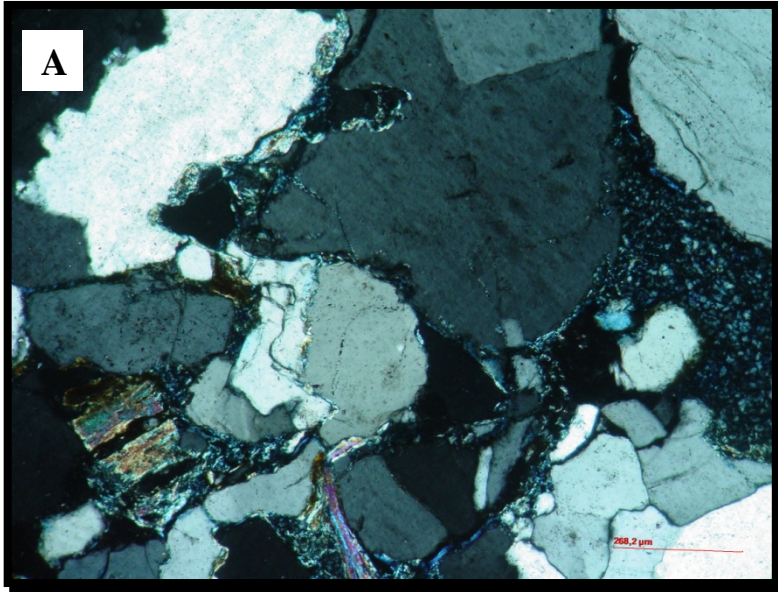
Fotomicrografia B – Lamela de muscovita esmagada e deformada devido à compactação mecânica. Notar, ainda, cimentação de caulinita em poro intergranular no canto direito superior da foto e muscovita caulinitizada abaixo. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 168,62 μm . Amostra CG08.



Estampa II – Fase diagenética de crescimento secundário de quartzo.

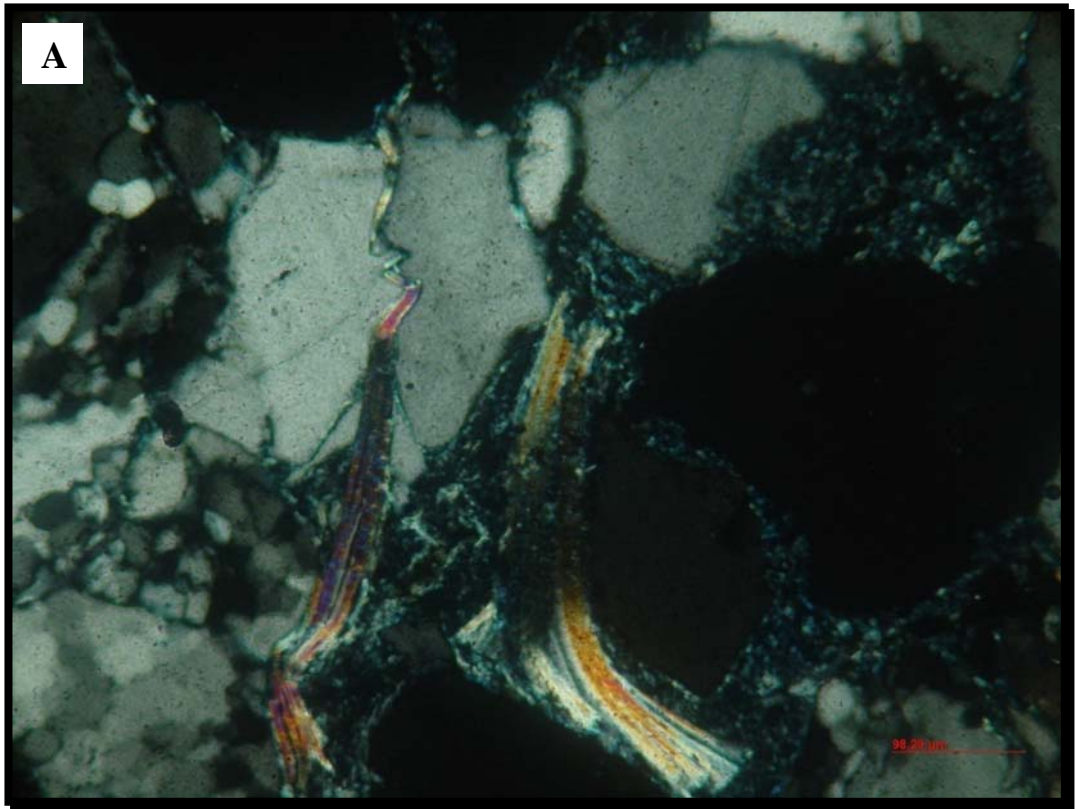
Fotomicrografia A – Crescimento secundário em grão de quartzo ao centro. Notar linha de impureza entre o grão e o sobrecrescimento. Notar, ainda, grãos do arcabouço dissolvidos com reentrâncias nas bordas, cimentação de caulinita em poro intergranular e grão de muscovita caulinitizado no canto esquerdo inferior da foto. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 268,2 μm . Amostra CG17.

Fotomicrografia B – Crescimento secundário de quartzo. Notar linha de impureza entre o grãos e o sobrecrescimento. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 126,37 μm . Amostra CG17.



Estampa III – Fase diagenética de compactação química.

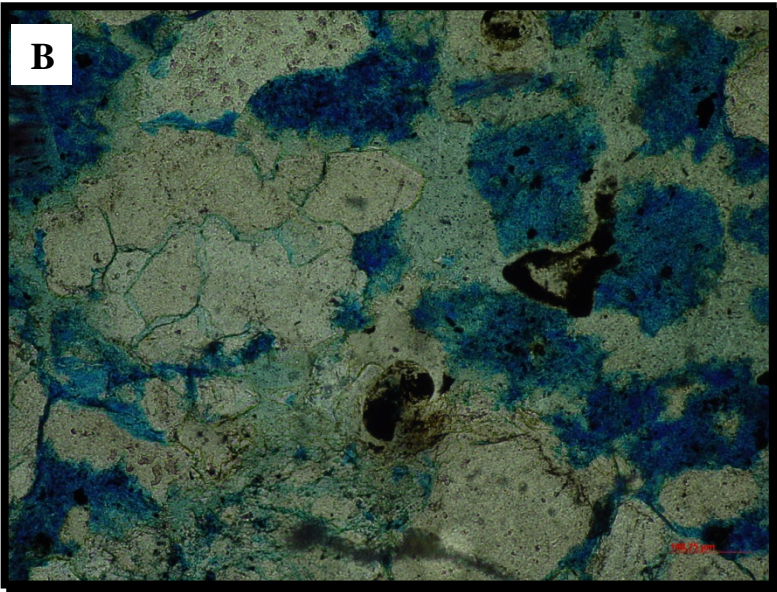
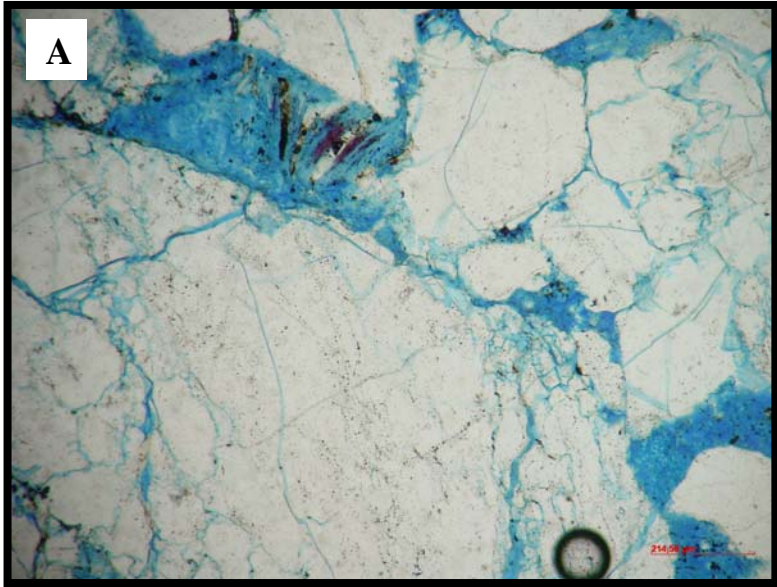
Fotomicrografia A – Compactação química entre grãos de quartzo; a lamela de muscovita entre os grãos cria uma microzona alcalina que favorece a dissolução da sílica. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 98,29 μm . Amostra CG07.



Estampa IV – Fase diagenética de porosidade secundária.

Fotomicrografia A – Porosidade de fratura. Lentes polarizadas descruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 163,88 μm . Amostra CG02.

Fotomicrografia B – Poros móldicos em grãos do arcabouço originados por dissolução. Lentes polarizadas descruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 168,75 μm . Amostra CG06.



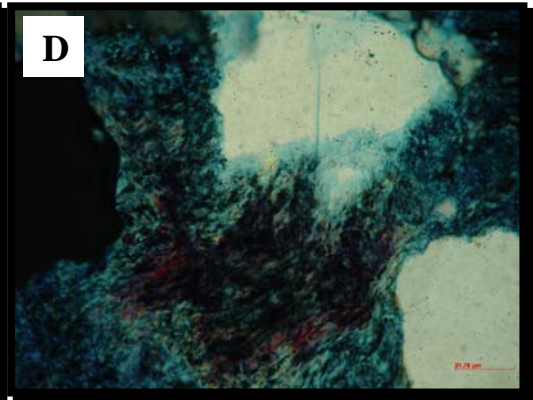
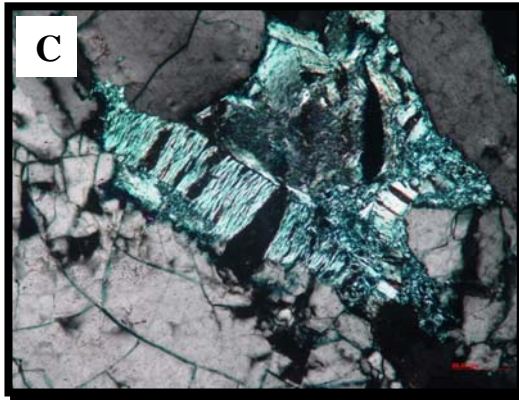
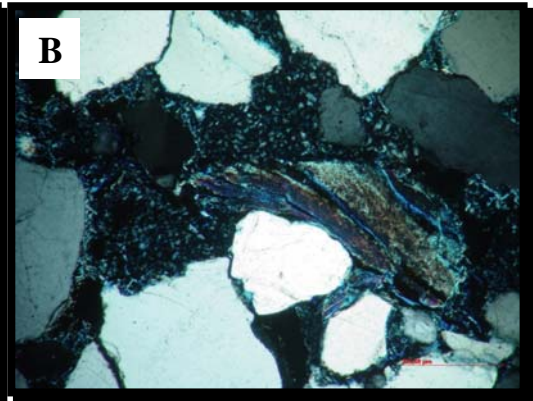
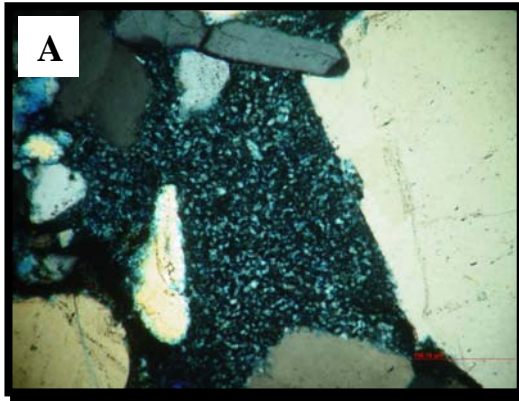
Estampa V – Fase diagenética de caulinita.

Fotomicrografia A – Cimentação de caulinita em poro intergranular. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 156,16 μm . Amostra CG08.

Fotomicrografia B – Cimentação de caulinita entre as lamelas resultantes da alteração de muscovita. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 329,69 μm . Amostra CG17.

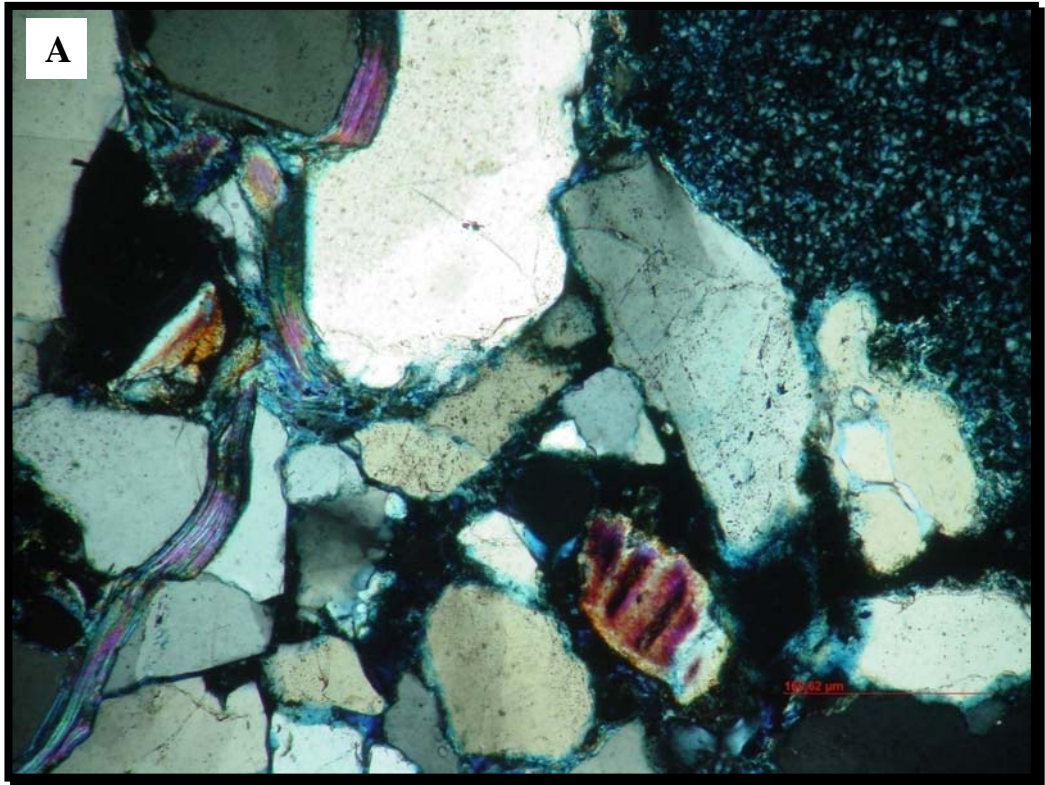
Fotomicrografia C – Caulinitização em muscovita. Notar a perda de birrefringência do grão e a formação de uma massa acinzentada. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 86,68 μm . Amostra CG02.

Fotomicrografia D – Fase avançada de caulinitização em grão de muscovita. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 91,78 μm . Amostra CG02.



Estampa VI – Fase diagenética de Reativação da compactação mecânica

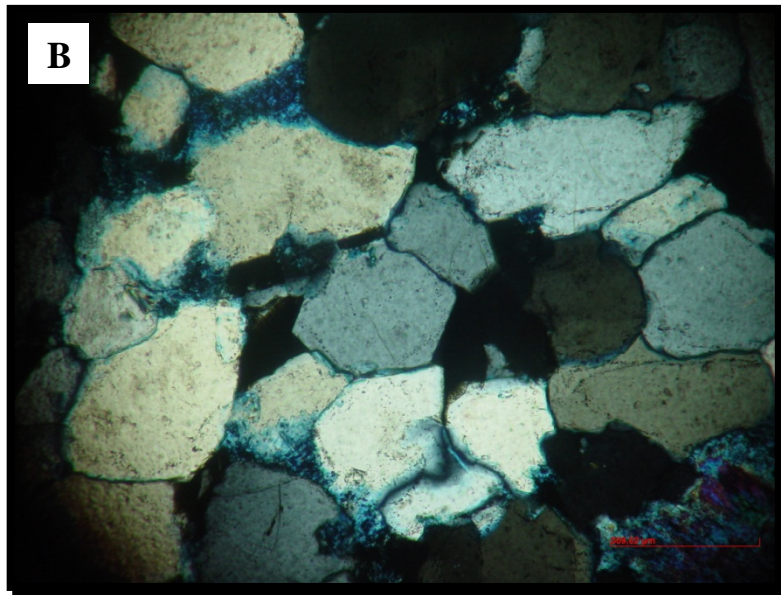
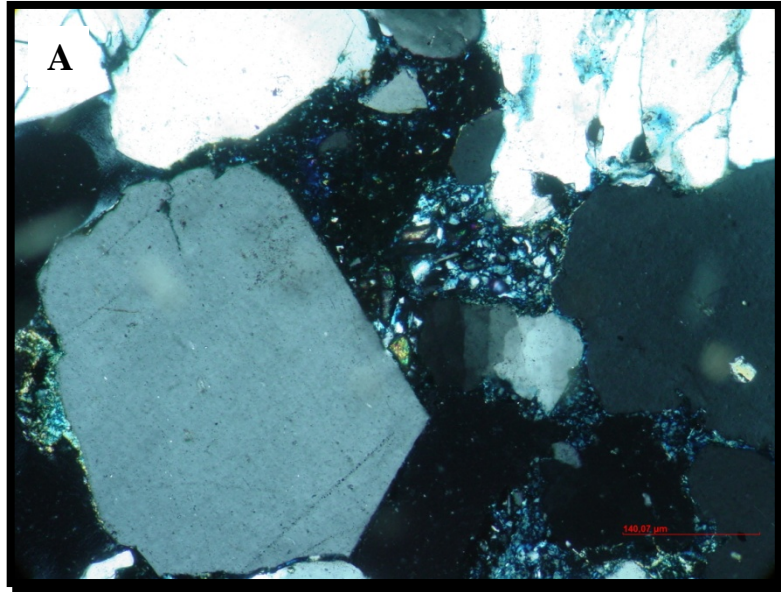
Fotomicrografia A – Fase de reativação da compactação mecânica no Arenito Furnas. Notar lamela de muscovita deslocada. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 160,62 µm. Amostra CG08.



Estampa VII – Fase diagenética de Crescimento secundário de quartzo

Fotomicrografia A – Crescimento secundário de quartzo tardio. Notar faces cristalinas bem formadas em relação a primeira fase de sobrecrescimento. Notar, ainda, cimento caulínico e grão de óxido de titânio no canto esquerdo inferior. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 140,07 μm . Amostra CG08.

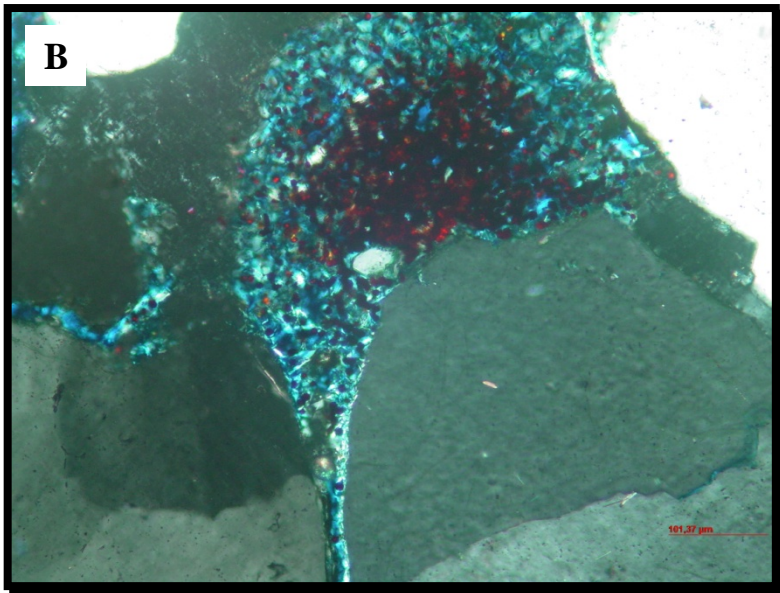
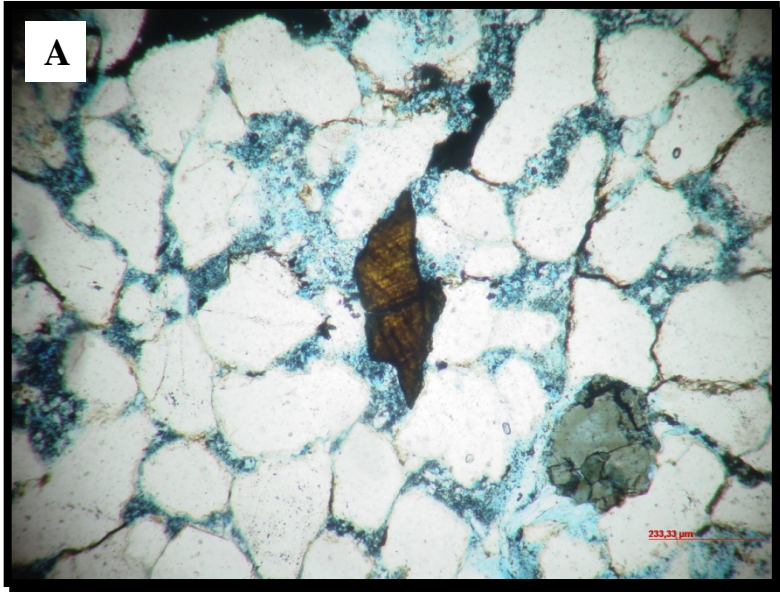
Fotomicrografia B – Crescimento secundário de quartzo tardio em grãos do arcabouço contribuindo para a formação de um arcabouço fechado. Notar faces cristalinas bem formadas em relação à primeira fase de sobrecrescimento. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 309,02 μm . Amostra CG05.



Estampa VIII – Fase diagenética de Crescimento de minerais de titânio

Fotomicrografia A – Fase de crescimento de minerais de titânio. Notar grão de rutilo no centro da foto. Lentes polarizadas descruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 233,33 μm . Amostra CG03.

Fotomicrografia B – Agregado de minerais de titânio obliterando a porosidade. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 101,37 μm . Amostra CG17.

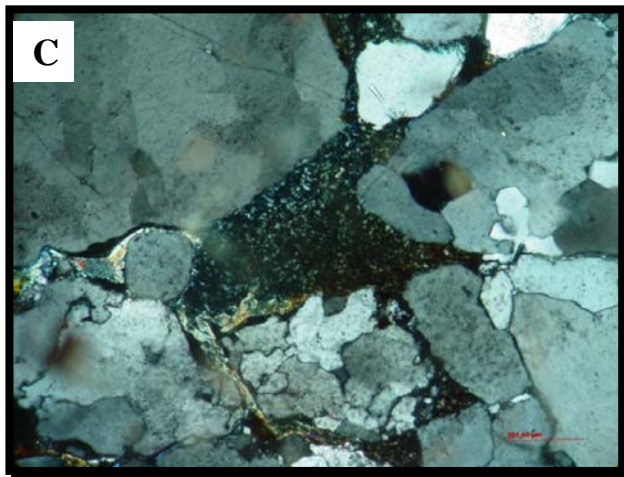
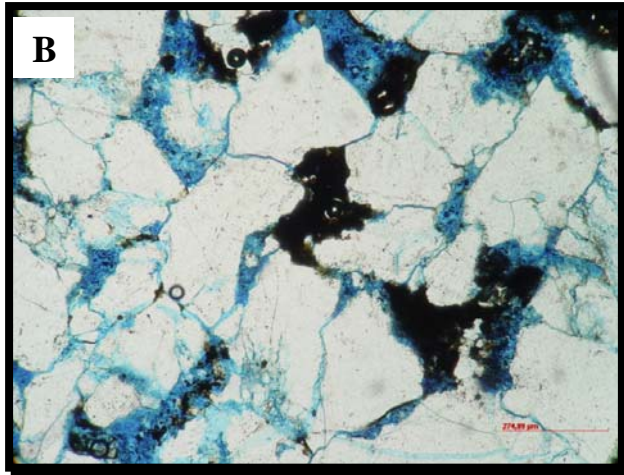
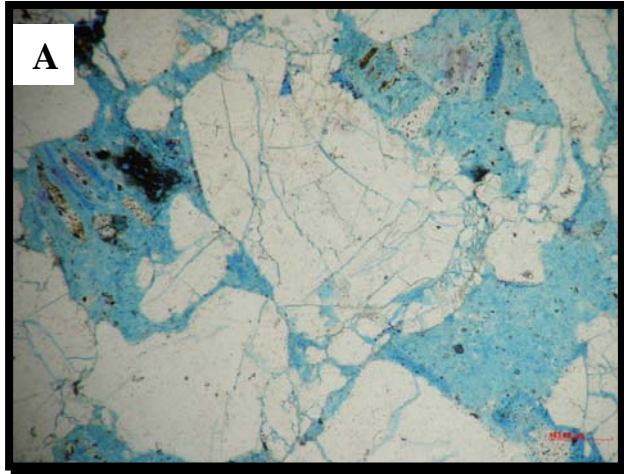


Estampa IX – Processos telogenéticos

Fotomicrografia A – Porosidade secundária devido ao alívio de carga sedimentar. Lentes polarizadas descruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 163,88 μm . Amostra CG02.

Fotomicrografia B – Precipitação de óxidos em fase telogenética obliterando a porosidade. Lentes polarizadas descruzadas. Aumento de 10 x. Escala de 274,99 μm . Amostra CG02.

Fotomicrografia C – Precipitação de argilas telogenéticas sobre cimento caulínico e contorno dos grãos. Lentes polarizadas cruzadas. Aumento de 20 x. Escala de 201,46 μm . Amostra CG 17.



Apêndice B – Análise de DRX das argilas.

Análise A – Amostra 1 (cota 12,5 m)

Análise B – Amostra 2 (cota 21,5 m)

Análise C – Amostra 3 (cota 36 m)

Análise D – Amostra 4 (cota 48 m)

Análise E – Amostra 5 (cota 57 m)

Análise F – Amostra 6 (cota 67,5 m)

Análise G – Amostra 7 (cota 79 m)

Análise H – Amostra 8 (cota 92 m)

Análise I – Amostra 9 (cota 103 m)

Análise J – Amostra 10 (cota 117 m)

Análise L – Amostra 11 (cota 127,5 m)

Análise M – Amostra 12 (cota 139,5 m)

Análise N – Amostra 13 (cota 150 m)

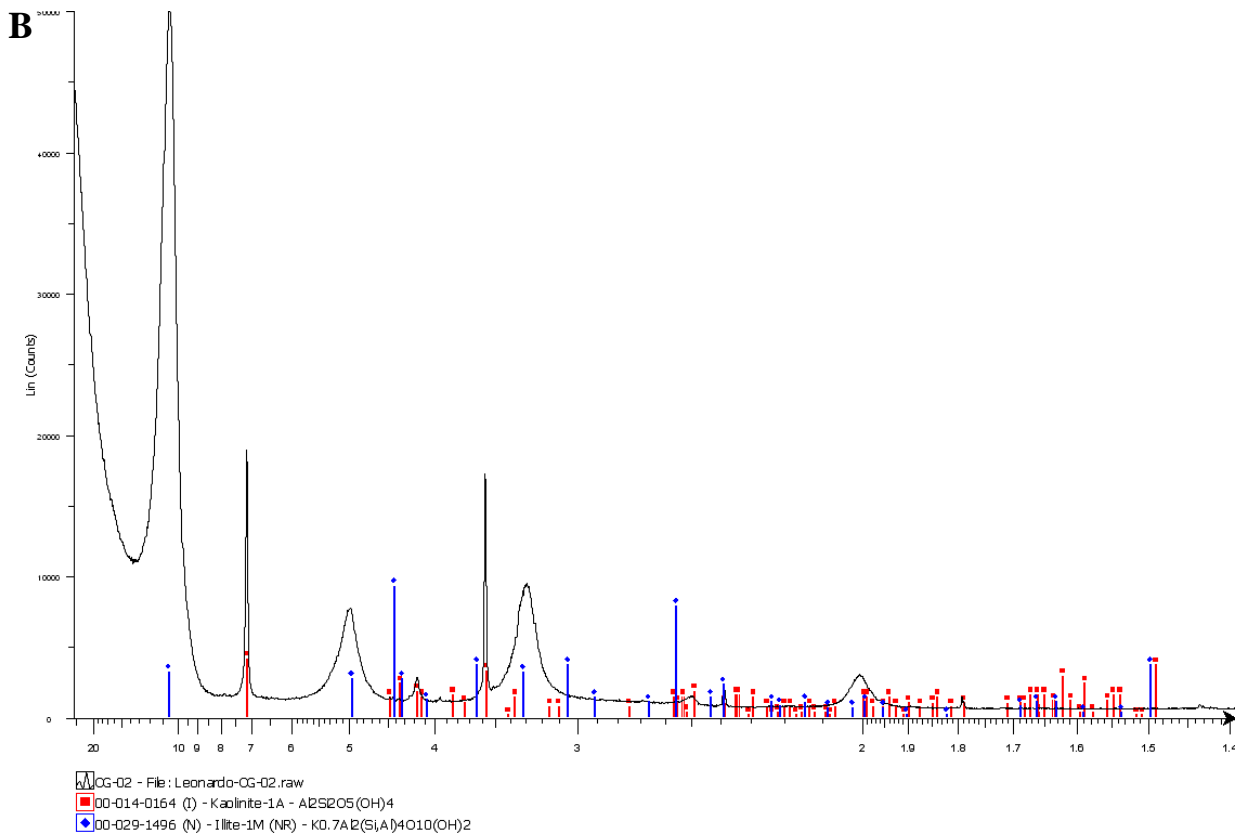
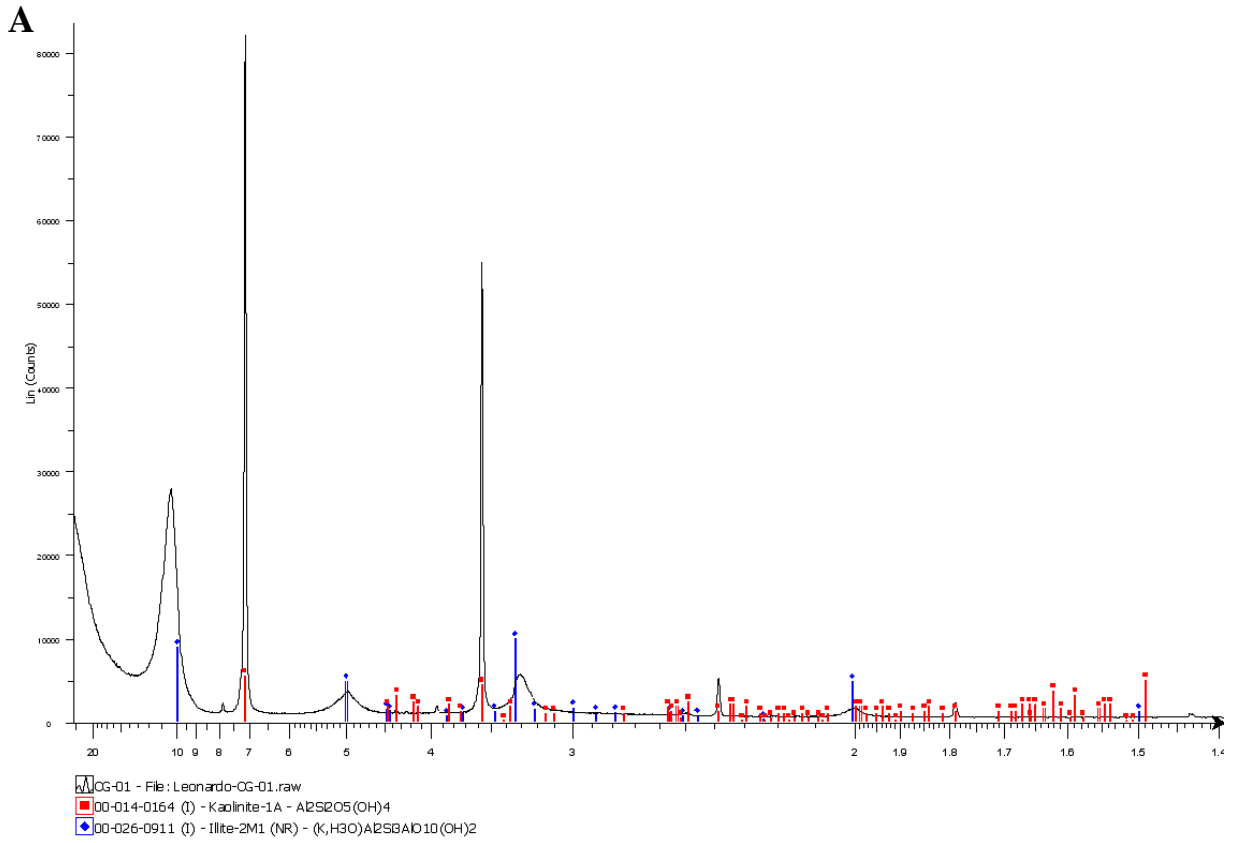
Análise O – Amostra 14 (cota 160 m)

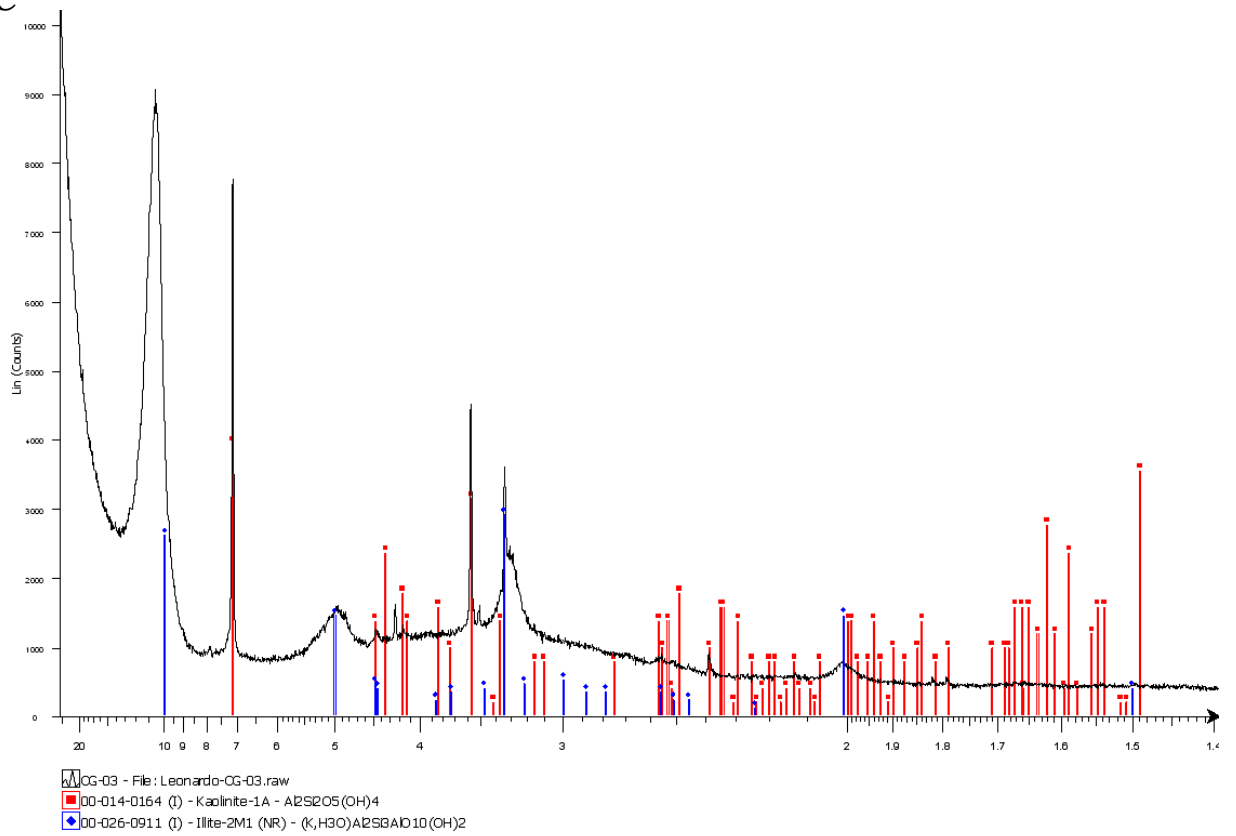
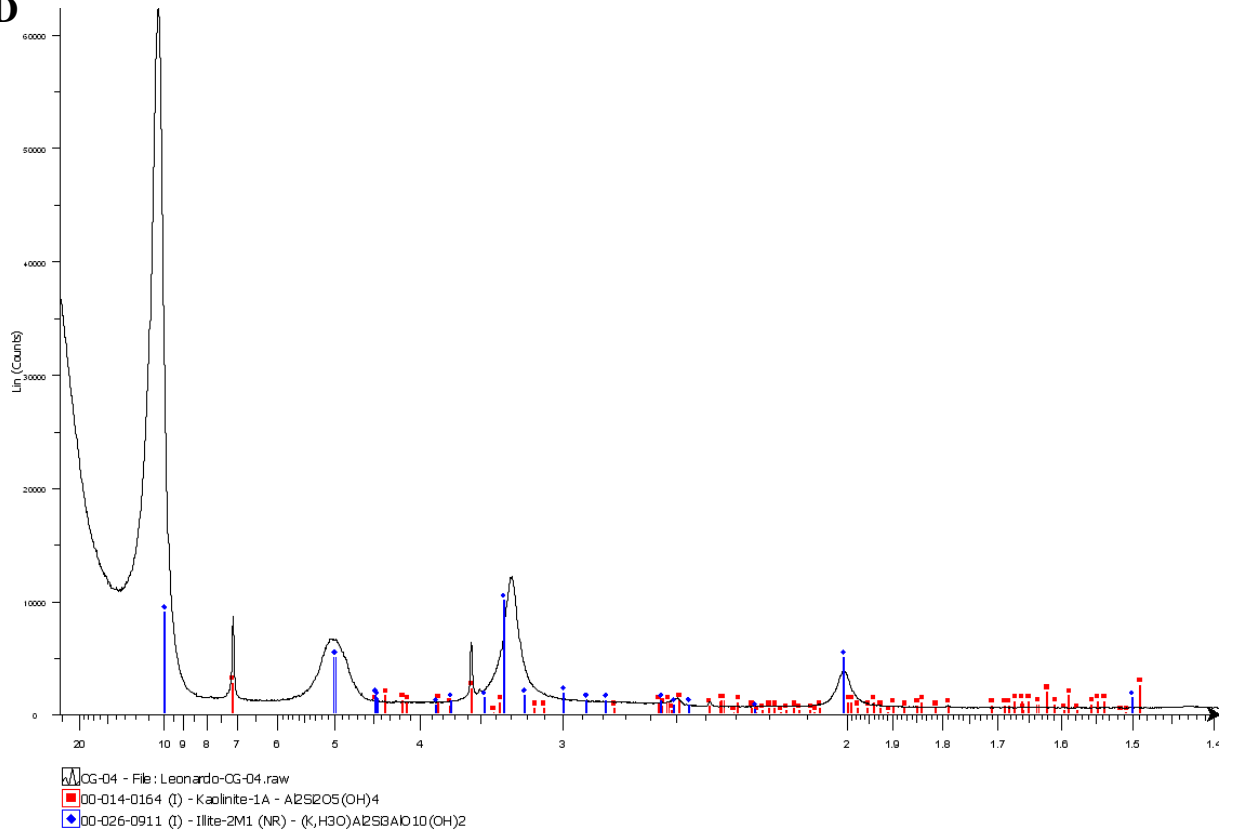
Análise P – Amostra 15 (cota 169 m)

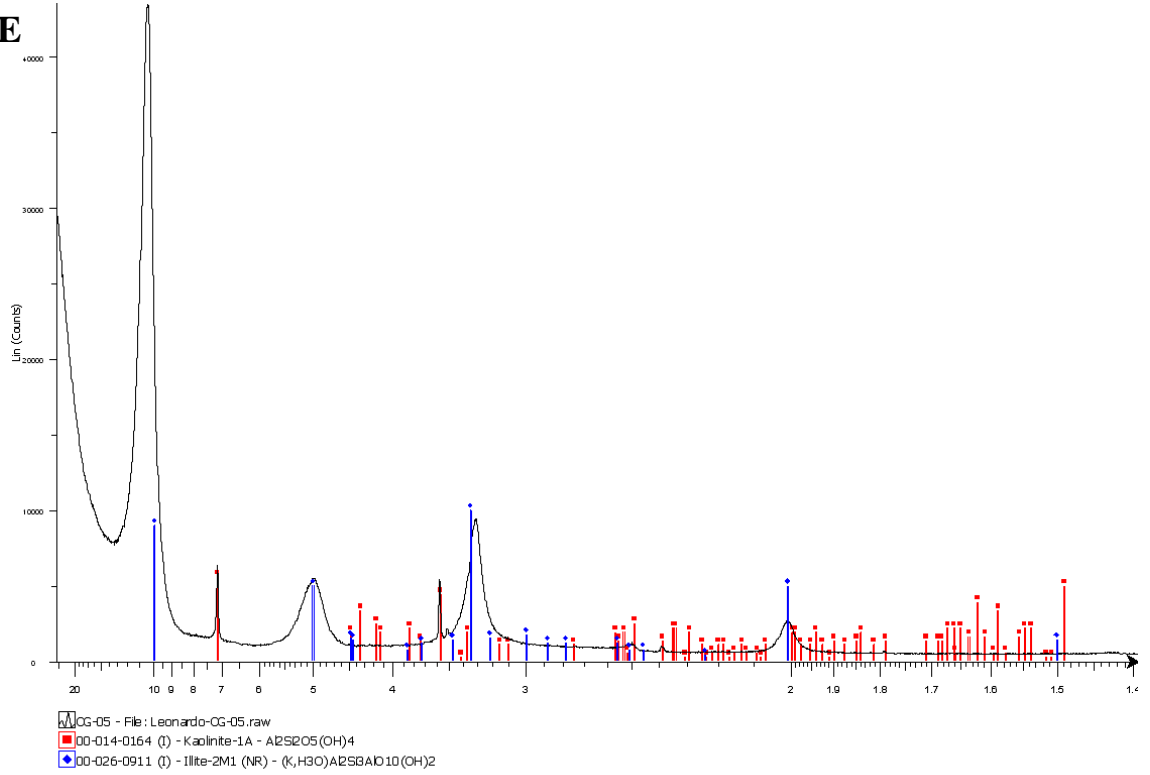
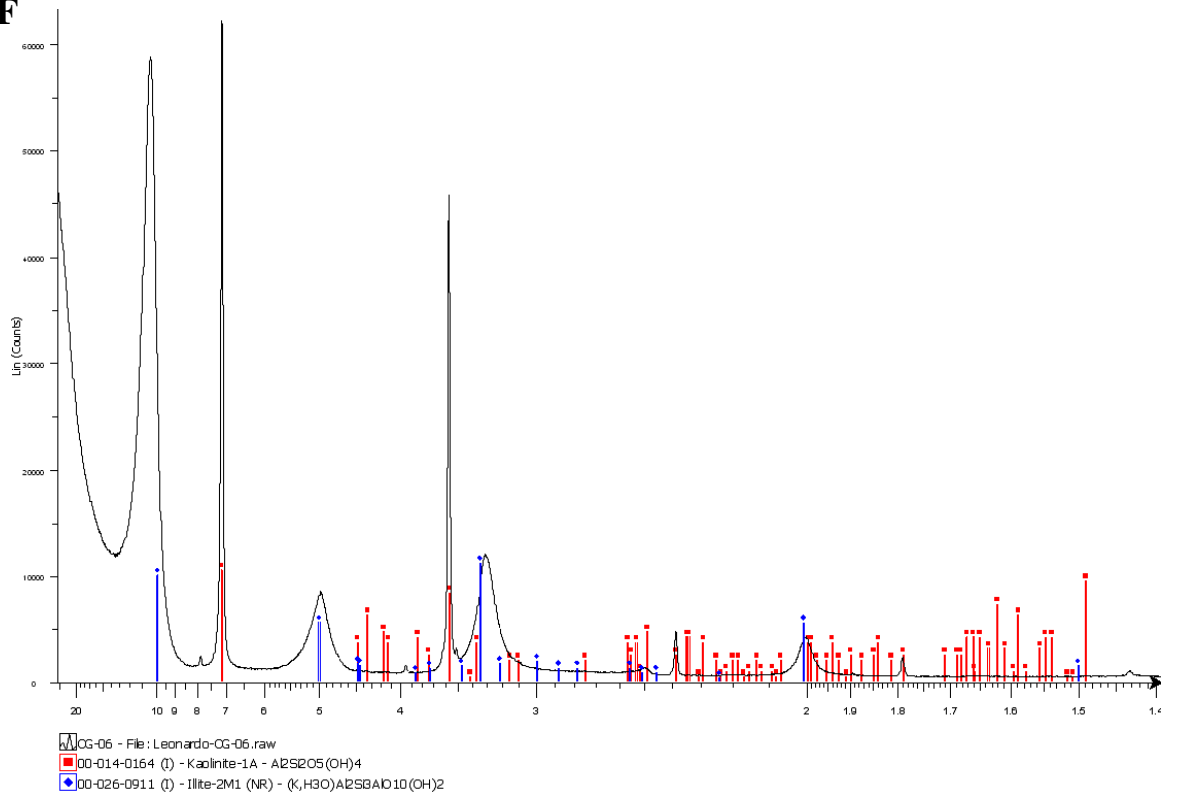
Análise Q – Amostra 16 (cota 179,5 m)

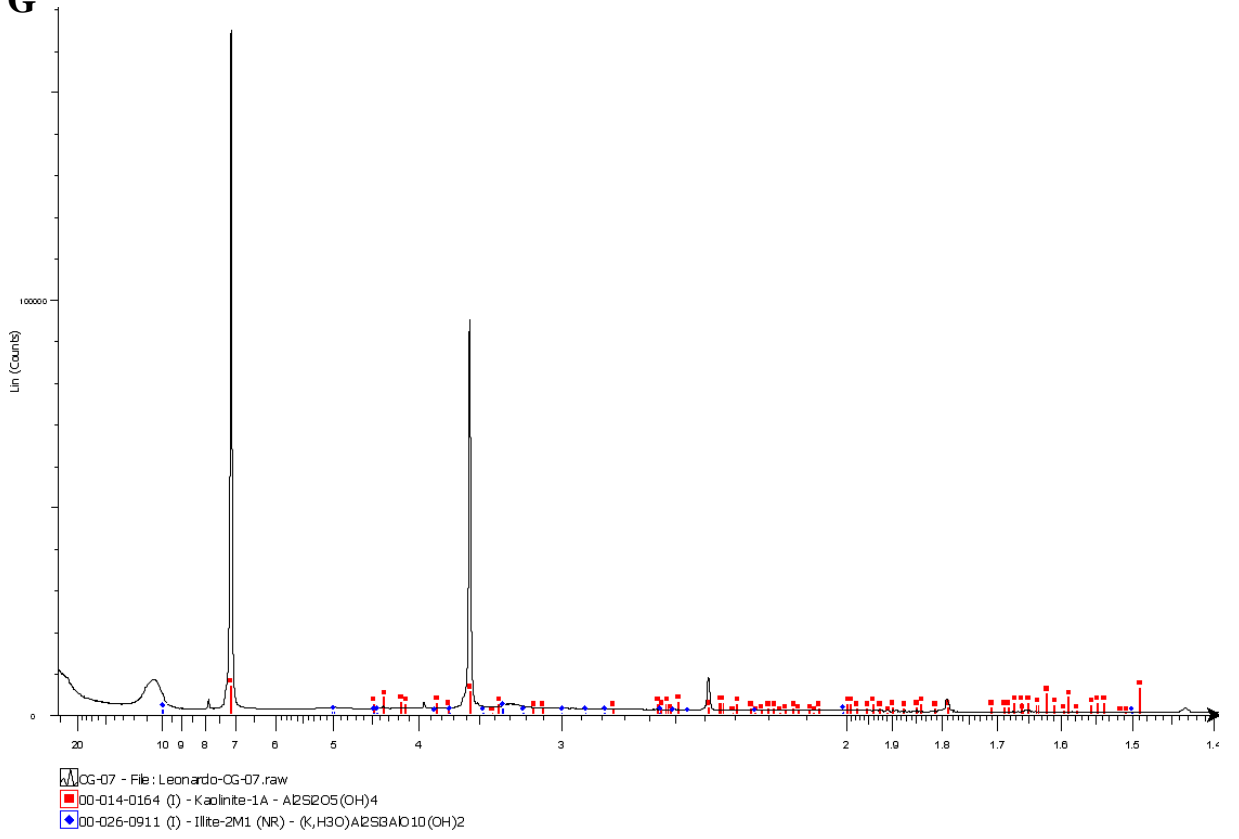
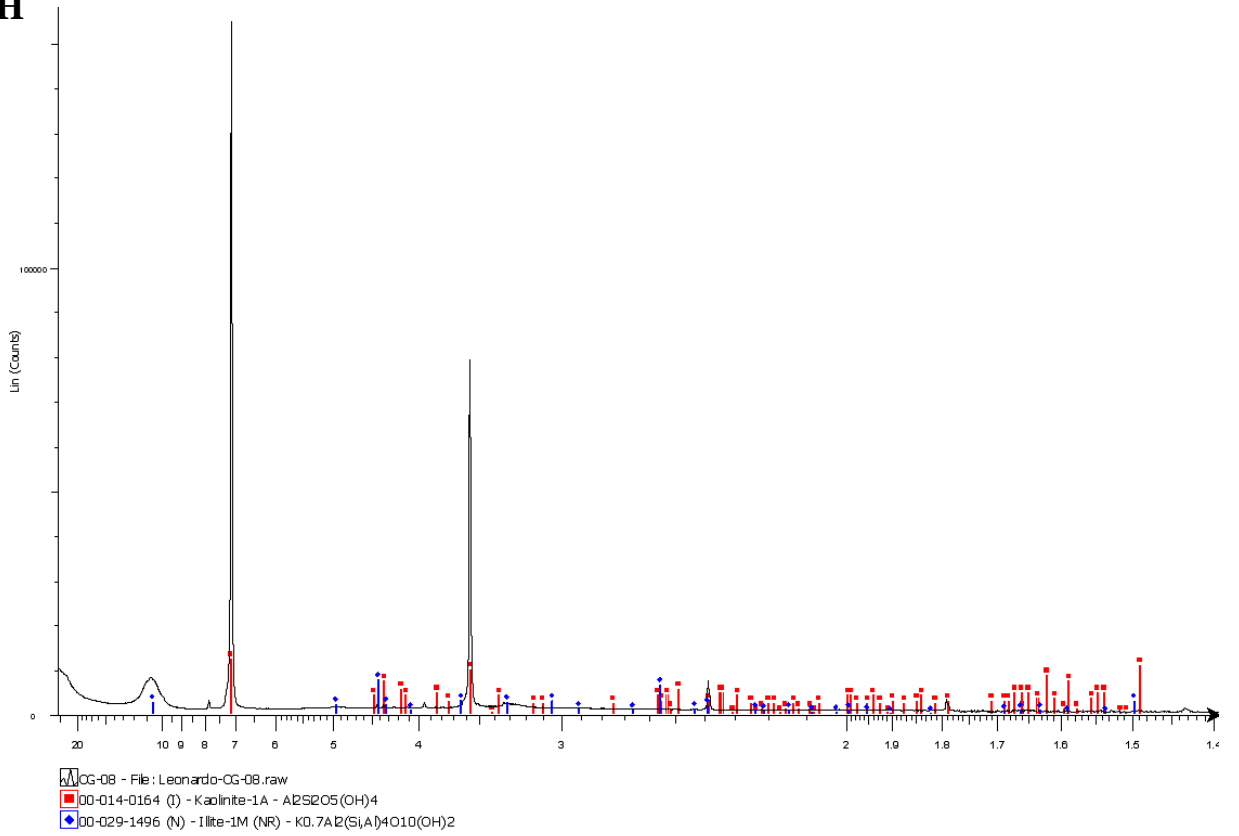
Análise R – Amostra 17 (cota 190 m)

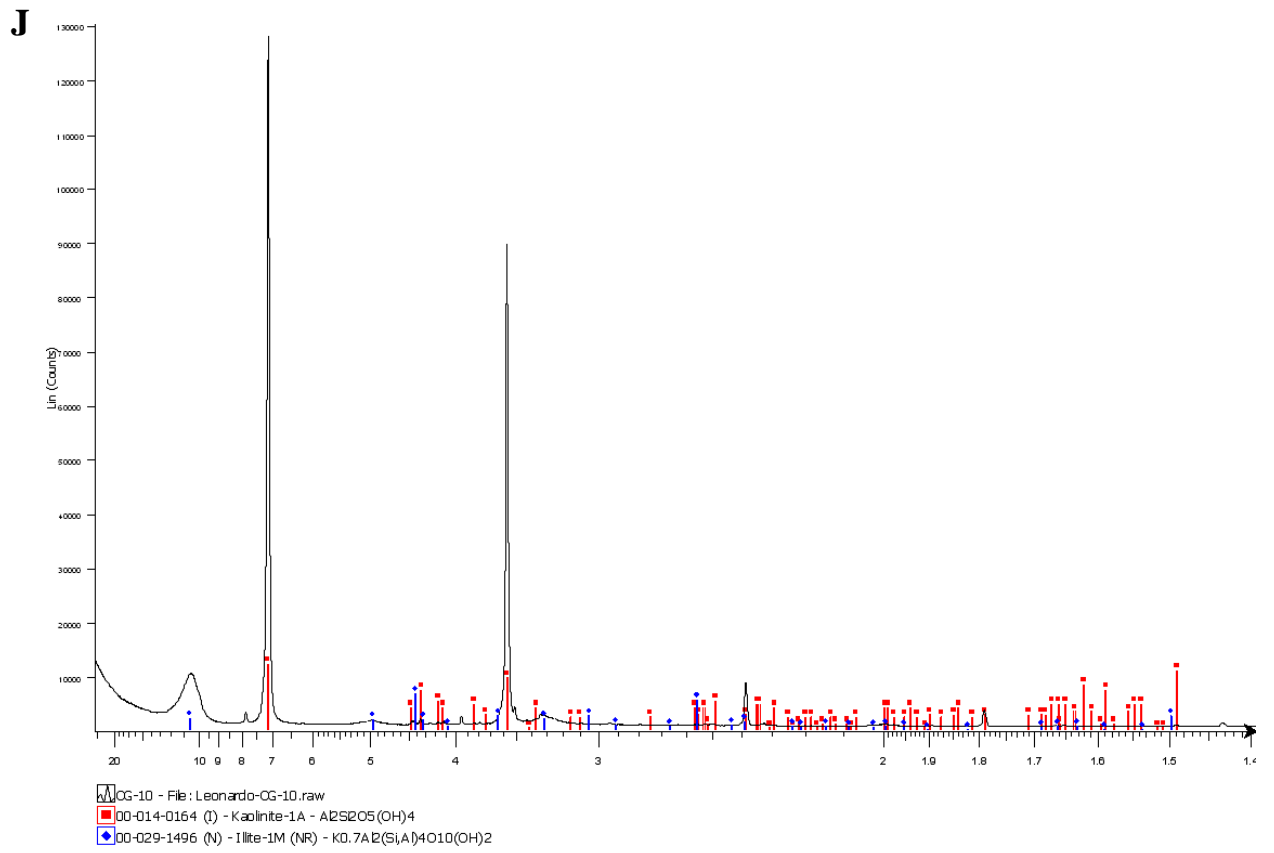
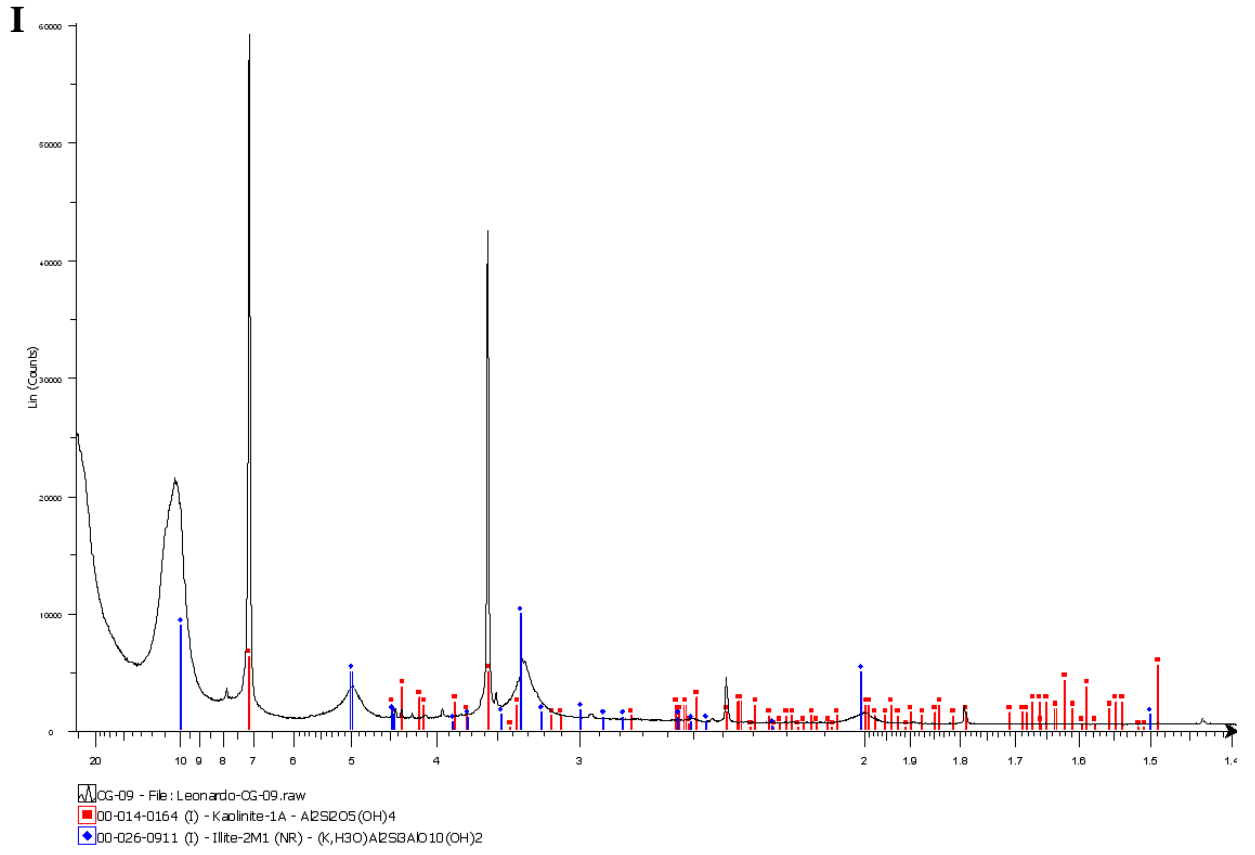
Análise S – Amostra 18 (cota 200 m)

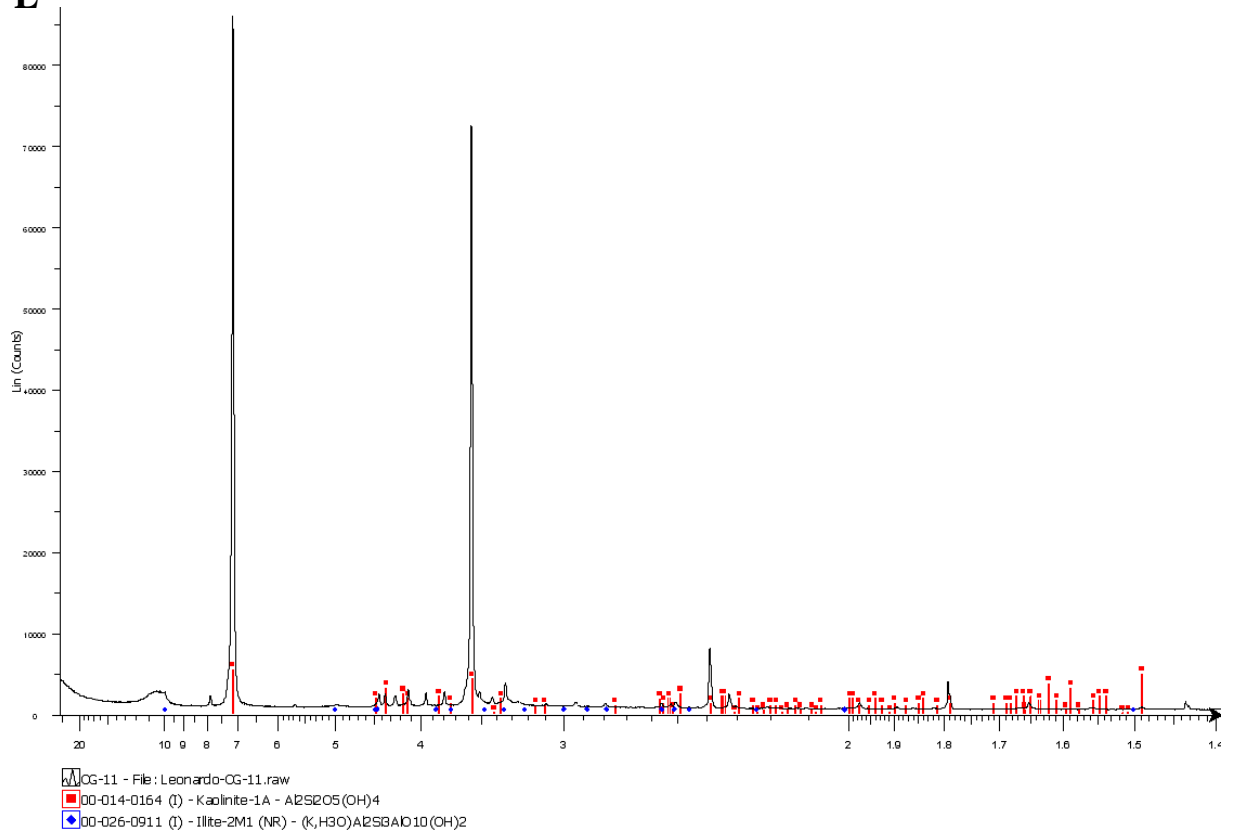
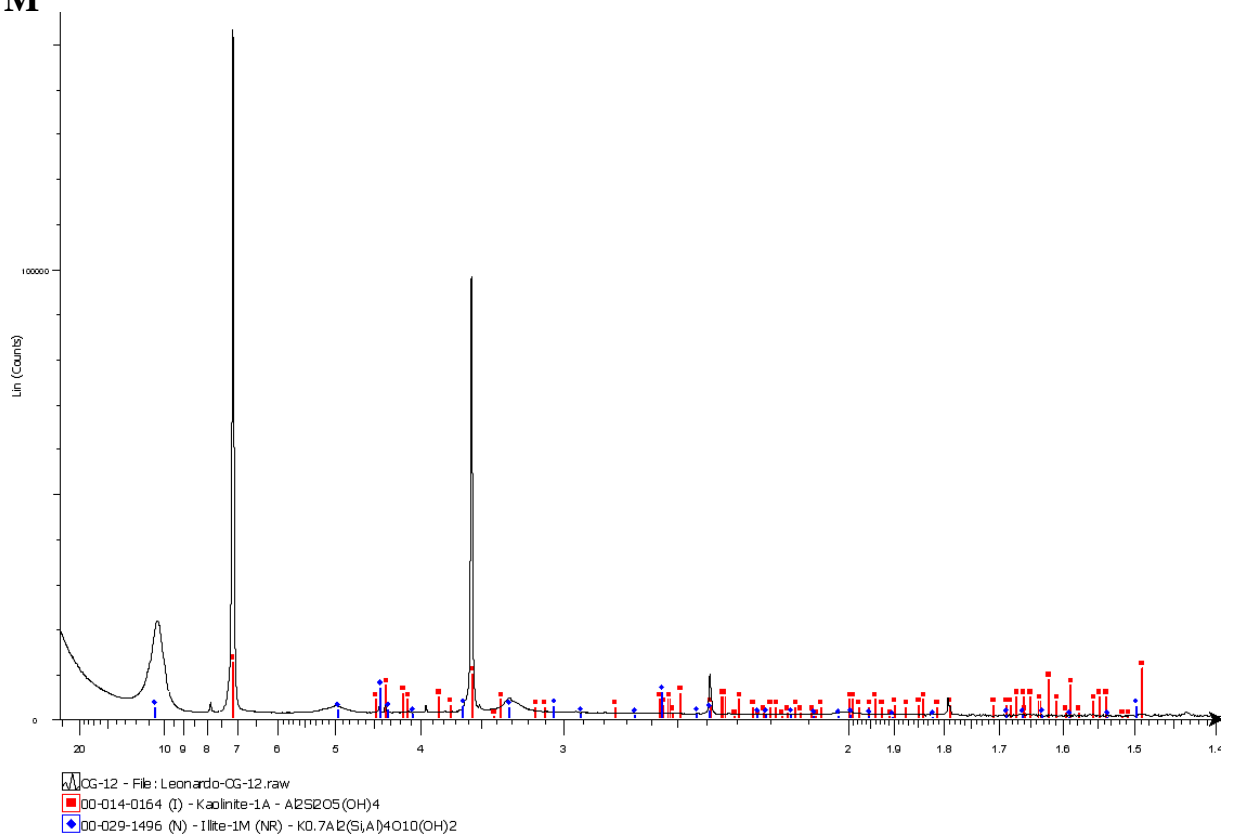


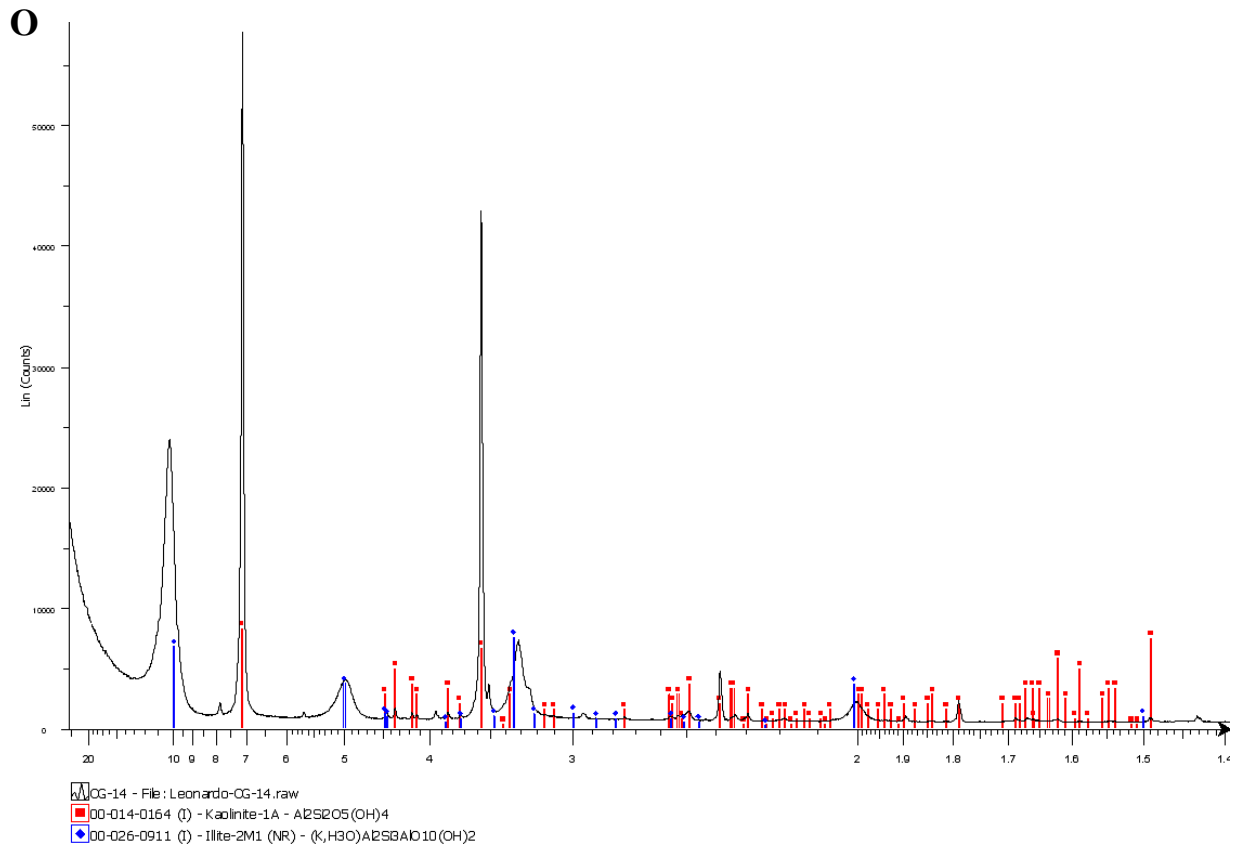
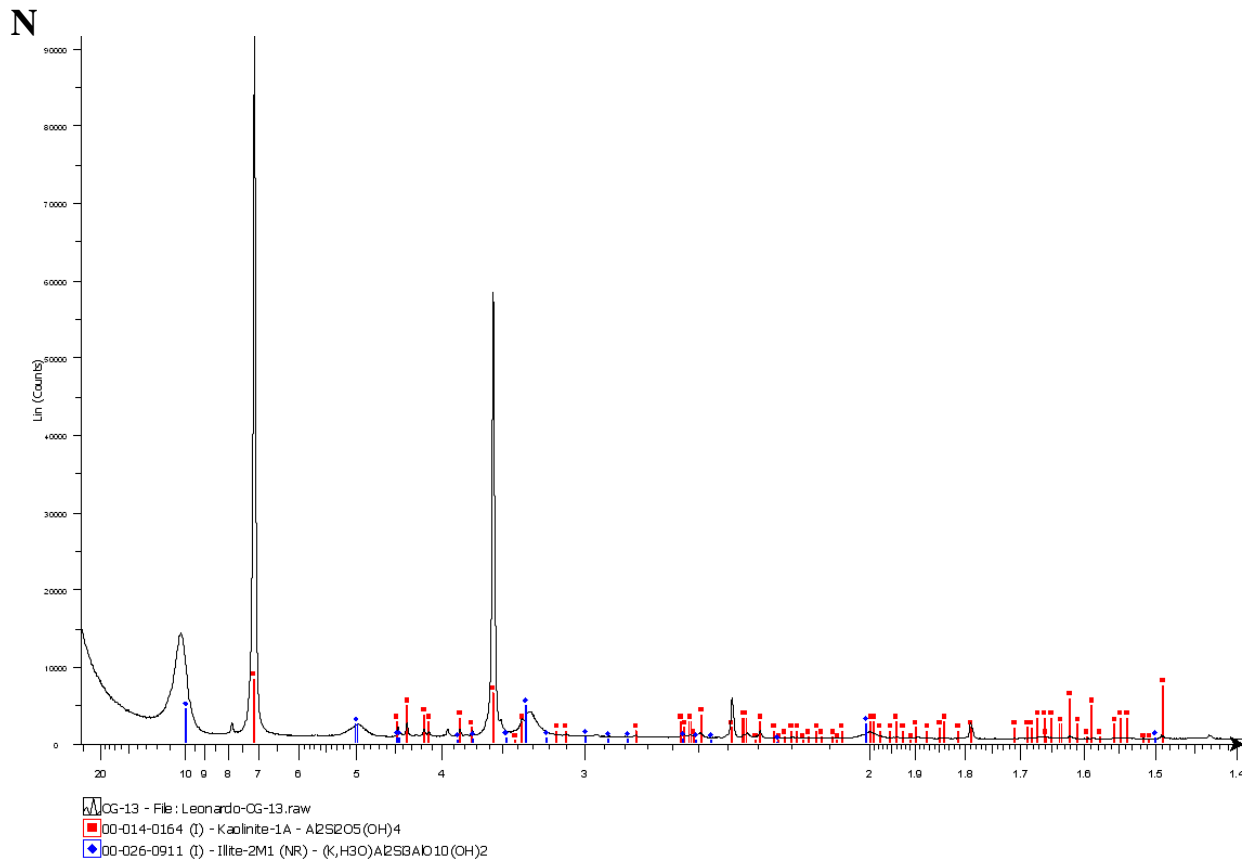
C**D**

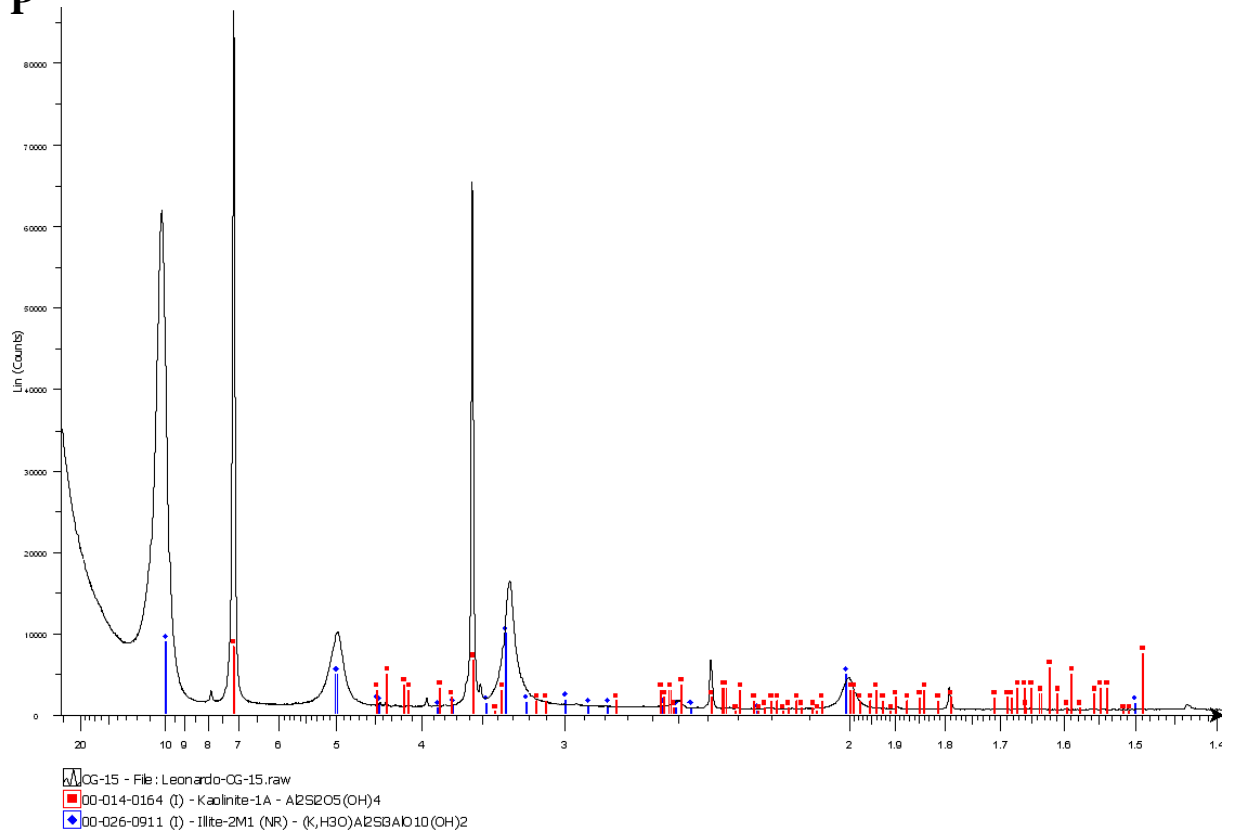
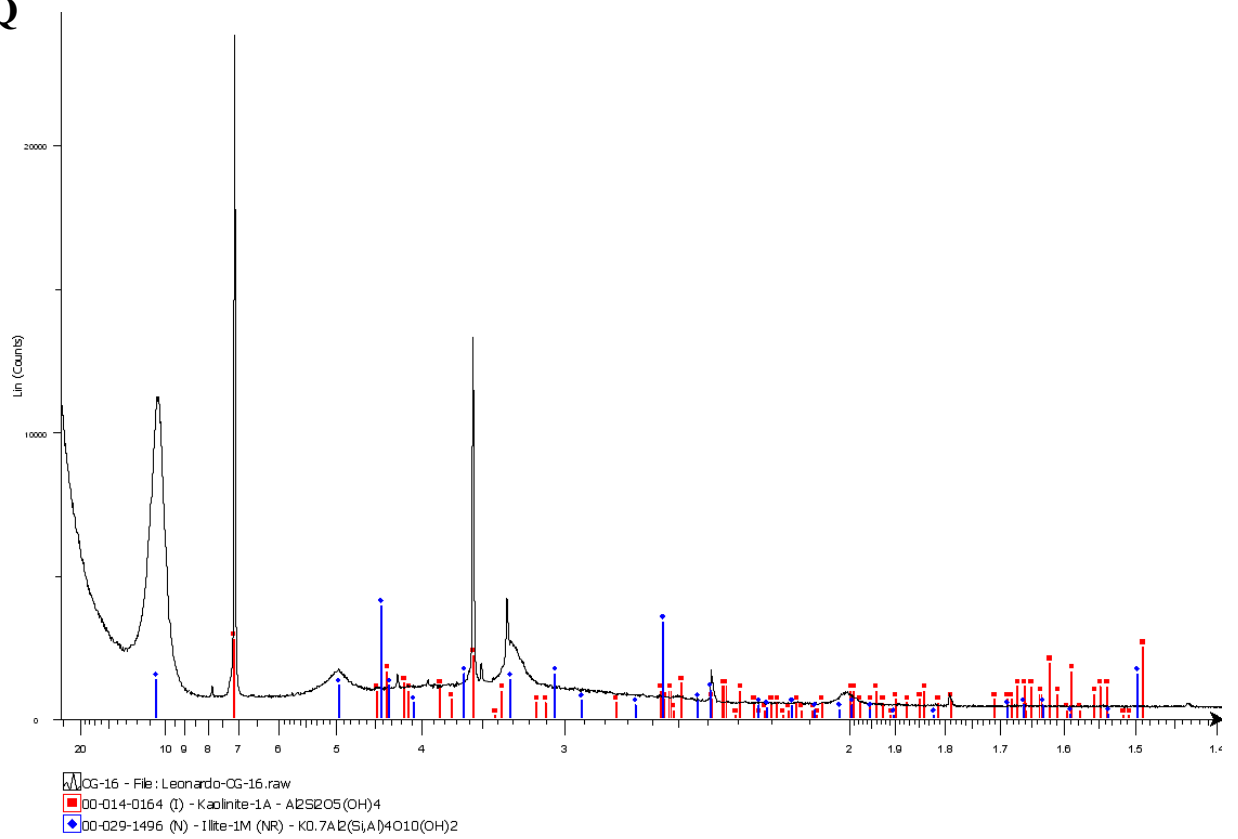
E**F**

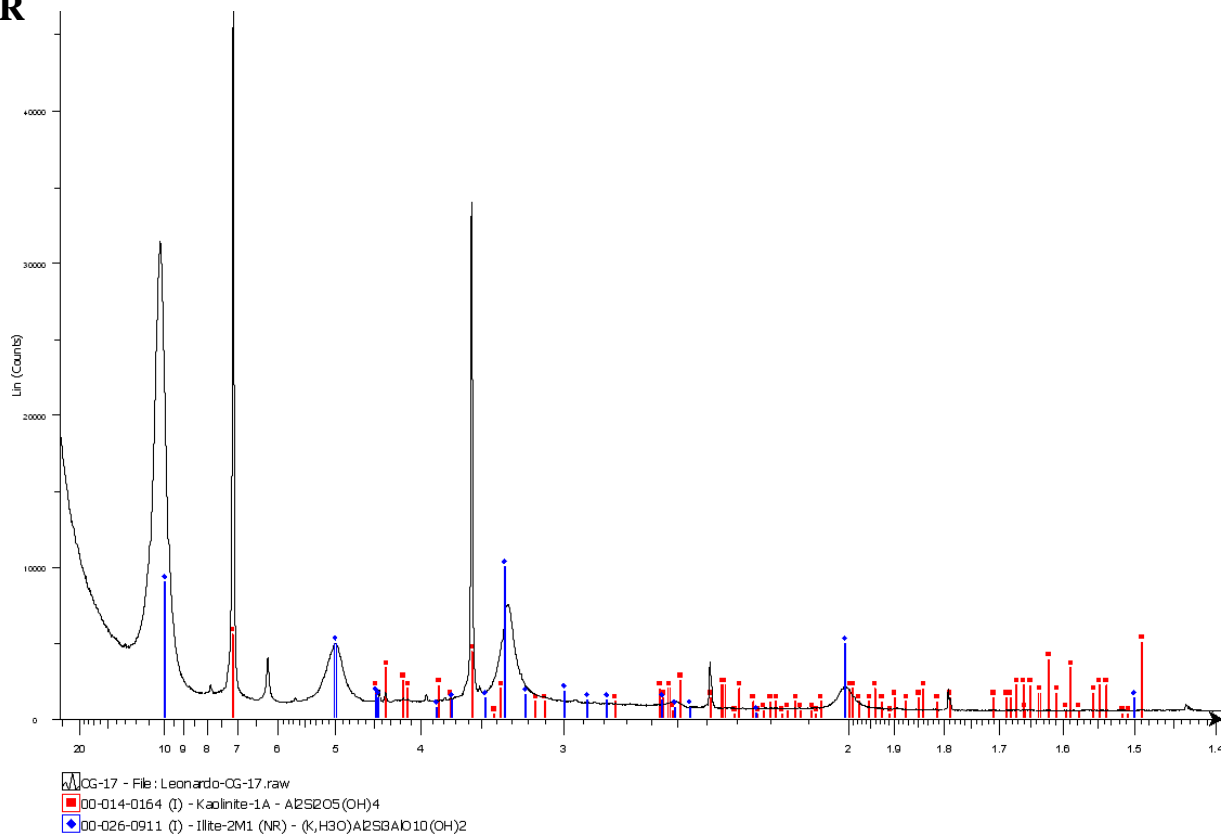
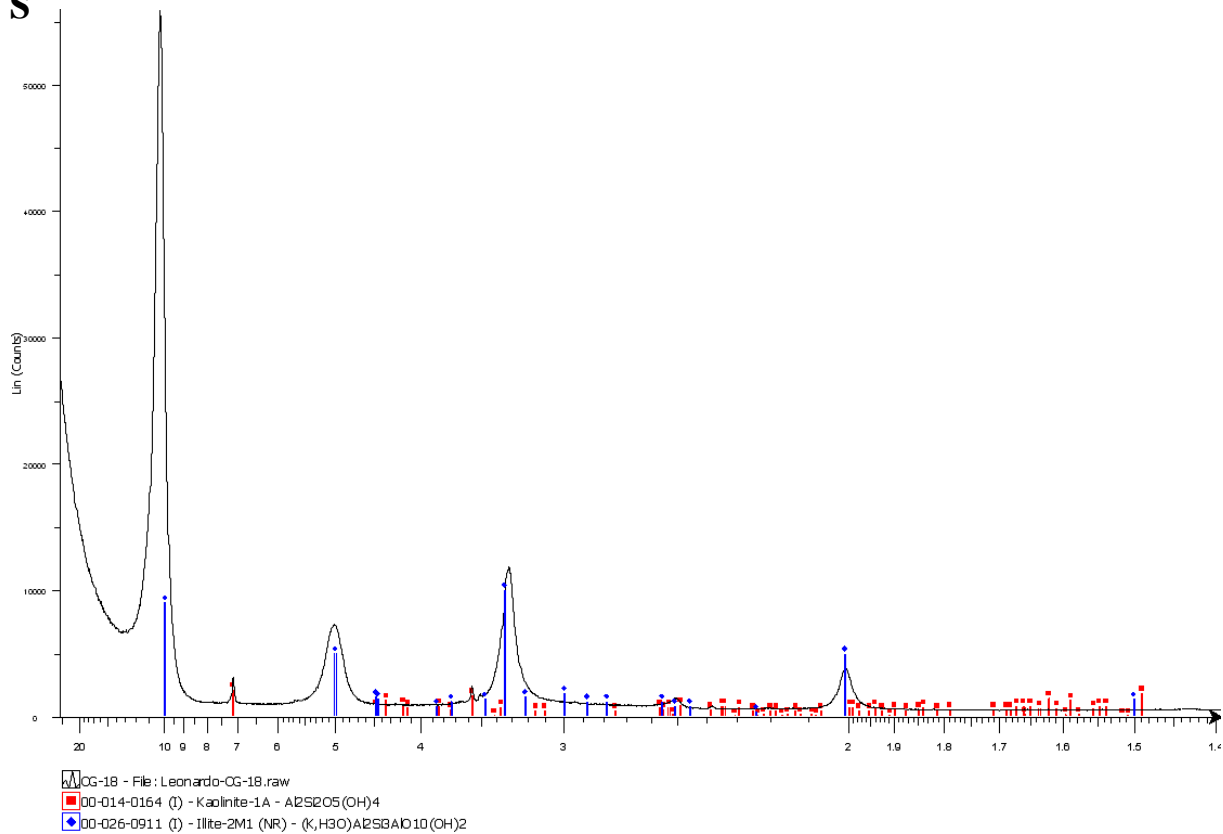
G**H**



L**M**



P**Q**

R**S**

Anexo A – Amostras classificadas segundo diagrama ternário de Folk (1974) segundo Lobato e Borghi (2005)

Diagrama A – Amostras referentes ao intervalo I da sucessão.

Diagrama B – Amostras referentes ao intervalo II a da sucessão.

Diagrama C – Amostras referentes ao intervalo II b da sucessão.

Diagrama D – Amostras referentes ao intervalo III da sucessão.

Diagrama E – Amostras referentes ao intervalo IV da sucessão.

