



**Caracterização de Piroxênios associados à mineralização uranífera da
Jazida Cachoeira, Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia**

Rhaine Matos Gonçalves

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais e Metalogênese

Orientador: Dr. Francisco Javier Rios

Co-Orientador: Dr. Kazuo Fuzikawa

Belo Horizonte

2005

Comissão Nacional de Energia Nuclear
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e
Materiais

**Caracterização de Piroxênios associados à mineralização uranífera da
Jazida Cachoeira, Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia**

Rhaine Matos Gonçalves

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação
em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e
Materiais, como requisito parcial à obtenção do Grau
de Mestre em Ciência e Tecnologia das Radiações,
Minerais e Materiais

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos
Materiais e Metalogênese

Orientador: Dr. Francisco Javier Rios
Co-Orientador: Dr. Kazuo Fuzikawa

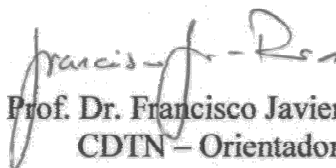
Belo Horizonte
2005




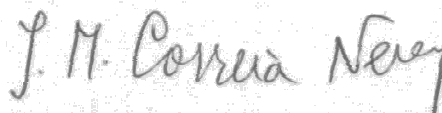
**MESTRADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DAS
RADIAÇÕES, MINERAIS E MATERIAIS**

A presente dissertação de mestrado, intitulada *“Caracterização de piroxênios associados à mineralização uranífera da Jazida Cachoeira, Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia”*, de autoria de **RHAINE MATOS GONÇALVES**, foi defendida e aprovada em 31 de maio de 2005 pela Banca Examinadora abaixo assinada.

Belo Horizonte, 31 de maio de 2005


Prof. Dr. Francisco Javier Rios
CDTN – Orientador


Prof.^ª Dr.^ª Rosa Maria da Silveira Bello
Universidade de São Paulo/SP


Prof. Dr. José Marques Correia Neves
CDTN

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Muitos são os agradecimentos, que certamente extrapolam os nomes que aqui menciono. Ao meu orientador professor doutor Francisco Javier Rios, pelo empenho na realização das tarefas deste trabalho e pela compreensão. Ao meu co-orientador professor doutor Kazuo Fuzikawa, pela participação nos trabalhos. Ao professor doutor José Marques Correia Neves, ao Msc. James Vieira Alves, e ao doutor Alexandre de Oliveira Chaves por terem participado do desenvolvimento dos trabalhos. Ao coordenador do colegiado, professor Waldemar A. A. Macedo, pelo estímulo e clareza na discussão de problemas.

À pesquisadora Sônia Pinto Prates pela inestimável colaboração no estudo petrográfico das amostras.

Aos colegas de mestrado pela convivência e pelo estímulo. À Odair Miranda, pelo aconselhamento sincero.

Ao CDTN, pela gentil acolhida neste mestrado e por ter disponibilizado instalações e equipamentos para a realização dos trabalhos. A todos os funcionários e membros do CDTN, que muitas vezes me ajudaram em situações difíceis, meu sincero muito obrigado.

À doutora Simone Cerqueira Pereira Cruz pela ajuda no momento oportuno.

À professores da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) que participaram dos trabalhos em algum momento.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) pelo auxílio financeiro para desenvolvimento dos trabalhos.

À Indústrias Nucleares do Brasil (INB) pela permissão para visitar às atividades na Província Uranífera de Lagoa Real e para coleta de amostras, pelo suporte concedido à toda equipe para o transporte Belo Horizonte – Caetité – Belo Horizonte e para o transporte diário na região de Caetité, e pela hospedagem e alimentação concedidas à toda a equipe durante a estadia em Caetité. Agradeço especialmente ao Geólogo Evando Carele de Matos (Gerente de Engenharia, Geologia e Avaliação de Jazidas - INB) que se mostrou disponível e atencioso para realização dos objetivos propostos.

Ao Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), especialmente ao pesquisador Dr. Carlos Alberto Pérez, pela atenção dispensada a este trabalho.

Ao Laboratório de Micro-análises do CDTN/UFMG pela disponibilidade e presteza dos serviços, na pessoa de Willian Tito Soares.

Agradeço aos meus pais e familiares pelo apóio e por estarem presentes.

A Kezia, meu amor, presença indispensável, por seu carinho, compreensão e apóio em todos os momentos desta difícil tarefa.

Agradeço, enfim, a todos aqueles que contribuíram, direta ou indiretamente, para que este trabalho fosse concluído.

RESUMO

Caracterização de Piroxênios associados à mineralização uranífera da Jazida Cachoeira, Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia

Rhaine Matos Gonçalves

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo contribuir para o conhecimento sobre a gênese da Jazida de Urânio Cachoeira (Lagoa Real, BA), caracterizando piroxênios (com ênfase nos associados à mineralização uranífera e que hospedam inclusões fluidas) e suas inclusões associadas. Em função das análises realizadas, foram descritos, de maneira geral, os passos que devem ser seguidos para obtenção e interpretação de dados, em inclusões fluidas (IF), na linha D09B XRF Fluorescência de Raios-X do Laboratório Nacional de Luz síncrotron (LNLS), Campinas, SP.

As análises dos piroxênios revelaram augita, diopsídio e aegirina-augita, havendo também termos intermediários, por exemplo entre augita e diopsídio. Os piroxênios apresentaram inclusões fluidas bifásicas e trifásicas (que podiam apresentar fase sólida birrefringente), sendo algumas possivelmente primárias. Os piroxênios apresentaram, também, inclusões sólidas. A análise de algumas inclusões sólidas revelou tratarem-se de albita, que provavelmente é anterior ao piroxênio hospedeiro.

Os resultados obtidos indicaram que os piroxênios estudados estão associados a uma importante fase de metassomatismo cálcico. Tais piroxênios não estariam totalmente associados à precipitação do minério uranífero. No estudo petrográfico das amostras chamou a atenção, a identificação de duas gerações de plagioclásios, uma fortemente alterada e outra menos alterada.

A luz síncrotron, utilizada para estudo de IF, é uma poderosa ferramenta de análise. Foi constatado que cuidados na preparação da amostra, como a seleção de IF superficiais, são muito importantes para se obter um bom dado.

Devido principalmente a fatores experimentais, somente o vanádio foi detectado em maior quantidade na área que continha as IF (no piroxênio), em relação à área branca, nos estudos com luz síncrotron. A ocorrência de tal elemento é de difícil interpretação.

Estudos futuros, envolvendo as inclusões fluidas e sólidas do piroxênio, e de outros minerais, serão importantes para compreender a Jazida Cachoeira. A pesquisa de U em IF, mediante uso da luz síncrotron, será também de grande importância.

ABSTRACT

Caracterização de Piroxênios associados à mineralização uranífera da Jazida Cachoeira, Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia

Rhaine Matos Gonçalves

ABSTRACT

This work had as objective to contribute for the knowledge about the genesis of the Cachoeira uranium deposit (Lagoa Real Uranium Province, Bahia State, Brazil), characterizing pyroxenes (with emphasis in those associated with the uranium mineralization and those hosting inclusions) of the deposit and their associated inclusions. In function of the accomplished analyses, steps that should be followed to obtain and interpret data from fluid inclusions (FI), in the D09B XRF X-Ray Fluorescence Beam Line of the National Synchrotron Light Laboratory, Campinas, Brazil, have been described.

The analyzed pyroxenes are augites, diopsides and aegirine-augites, and intermediate terms, for example between augite and diopside, were detected. They presented two and three phases fluid inclusions being some, possible, primary ones. The three phases FI could present a birefringent solid phase. The pyroxenes presented, also, solid inclusions. The analysis of some solid inclusions revealed that they were albites. These albites are, probably, previous to the pyroxene host mineral.

The obtained results indicated that the studied pyroxenes are associated to an important phase of calcic metasomatism. These pyroxenes are not totally associated to the precipitation of the uranium. In the petrographic study of the samples, two types of plagioclase were identified, one very altered and other less altered.

Synchrotron light is a powerful tool for analyze FI. It was verified that care in the preparation of the sample, such as the selection of near-surface FI, are very important to obtain reliable data.

In the studies with synchrotron light only the vanadium was detected in larger amount in the area that contained FI (in pyroxene), in relation to the control area, due, mainly, to experimental factors. The presence of this element it's not easy to interpret.

Additional studies, on solid and fluid inclusion in pyroxene, and in other minerals, will be important to understand the Cachoeira uranium deposit. The research of U in FI, using synchrotron light, will be of great importance as well.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1 Ciclo simplificado do combustível nuclear, evidenciando (caixa cinza) a etapa de mineração do U..	16
FIG. 2 Localização (mostrada pelo quadrado negro) da Província Uranífera de Lagoa Real no estado da Bahia.....	19
FIG. 3 Mapa Geológico simplificado do Aulacógeno do Paramirim, enfatizando as principais unidades geológicas e estruturas tectônicas de idade brasileira	22
FIG. 4 Projeto Lagoa Real. Jazida Cachoeira - anomalia 13. Seção horizontal	25
FIG. 5 Projeto Lagoa Real. Perfil Geológico - LB - 80 Nw- Jazida Cachoeira	29
FIG. 6 Paragênese mineral desenvolvida ao curso do metassomatismo sódico-cálcio dos granitos e gnaisses do complexo de Lagoa Real.....	30
FIG. 7 Aparência de amostra (albitito) de testemunho de furo de sondagem, utilizado para confecção de lâminas neste trabalho	33
FIG. 8 Zona contendo plagioclásio fortemente alterado (PlgA) e plagioclásio pouco alterado (Plg)	35
FIG. 9 Anfibólio (Anf) incluído em massa de piroxênio (Px)	36
FIG. 10 a - Piroxênio exibindo mineralização evidente (indicada pelas setas) com halo de alteração. b – Mineralização (indicada pela seta) contornando cristais de piroxênio.....	37
FIG. 11 Aspecto da petrografia das amostras, sem nicóis cruzados (a) e com nicóis cruzados (b), mostrando piroxênio mineralizado (Px) e plagioclásio (Plg), este último exibindo maclas	37
FIG. 12 Representação esquemática do pequeno volume irradiado pelos elétrons que incidem em uma amostra polida.....	38

FIG. 13 Diagrama de classificação (Q-J) dos piroxênios estudados nas lâminas 03jun26-01-2 e 03jun25-15-2 das respectivas amostras mineralizadas.	41
FIG. 14 Diagrama de classificação Ca-Mg-Fe e Na piroxênios dos mesmos piroxênios (indicados pelos círculos) da FIG. 13 estudados nas lâminas 03jun26-01-2 e 03jun25-15-2 das respectivas amostras mineralizadas.....	41
FIG. 15 Classificação (Ca-Mg-Fe clinopiroxênios) de piroxênios selecionados (indicados pelos círculos) estudados nas lâminas 03jun2601-2 e 03jun2515-2 das respectivas amostras mineralizadas.....	42
FIG. 16 Inclusão fluida primária bifásica em piroxênio.	50
FIG. 17 Inclusão fluida primária trifásica apresentando fase sólida birrefringente (apontada pela seta) quando são cruzados os nicóis (b).	50
FIG. 18 IF trifásicas primárias em piroxênio paralelas e ocorrendo em planos diferentes (a e b).	50
FIG. 19 Inclusão fluida de origem indeterminada, trifásica em piroxênio.....	51
FIG. 20 a - Inclusões sólidas em piroxênio. b - Inclusões sólidas de albita em piroxênio.	52
FIG. 21 Classificação de inclusões superficiais (indicada pelo círculo) em piroxênio e de um mineral vizinho (também indicado pelo círculo) ao piroxênio.	53
FIG. 22 Abordagem para estudo de inclusão fluida irradiando a inclusão inteira.....	59
FIG. 23 Abordagem para estudo de inclusão fluida irradiando apenas parte da inclusão.	60
FIG. 24 Esquema simplificado, mostrando partes da linha de luz D09B XRF do LNLS.....	62
FIG. 25 Representação esquemática da montagem do porta-amostra + amostra utilizado no LNLS	63
FIG. 26 Inclusões Fluidas e área “branca” analisadas em piroxênio, no LNLS.....	65
FIG. 27 Espectros p1a0008 e p1a0011.....	65

FIG. 28 Espectros p1a0009 e p1a0011.....	67
FIG. 29 Espectros p1a0010 e p1a0011.....	68
FIG. 30 Inclusão fluida e área “branca” analisadas em quartzo, no LNLS.....	68
FIG. 31 Espectro c1a0001 e c1a0002.....	69
FIG. 32 Representação esquemática de algumas das principais observações petrográficas nas lâminas estudadas.....	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Parte das análises, de inclusões de albita (melt) e de um mineral vizinho (Albita) ao hospedeiro, representadas na FIG. 21. (Calibração para albita). Esta tabela corresponde a uma parte da TABELA 9.....	54
TABELA 2 - Análises da massa de piroxênio hospedeiro das inclusões de albita (melts) da área X (Calibração para piroxênio)	54
TABELA 3 - Análises (por microsonda eletrônica) selecionadas, do mineral hospedeiro (Px), de algumas de suas inclusões (Tap M1 e M2) e de um mineral vizinho (ao hospedeiro) rico em TiO ₂ (Tap T2). (Calibração para piroxênios).	55
TABELA 4 – Análise Matemática dos Espectros obtidos no piroxênio (Parte 1)	72
TABELA 5 - Análise Matemática dos Espectros obtidos no quartzo (Parte 1)	74
TABELA 6 - Análises (selecionadas) de Piroxênios da Jazida Cachoeira	88
TABELA 7 - Análise do piroxênio que continha as inclusões analisada por luz síncrotron ...	89
TABELA 8 - Análises por microsonda de inclusões sólidas em piroxênios (calibração para piroxênio).....	89
TABELA 9 - Análises de inclusões de albita em piroxênio (calibração para albita)	89

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
2	RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA	16
3	OBJETIVOS	17
3.1	OBJETIVO GERAL.....	17
3.2	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	17
4	METODOLOGIA	18
5	LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DE LAGOA REAL	19
5.1	LOCALIZAÇÃO DA PROVÍNCIA URANÍFERA DE LAGOA REAL.....	19
5.2	CONTEXTO GEOLÓGICO	20
5.2.1	Geologia Regional.....	20
5.2.2	Geologia Local.....	23
5.2.3	Albitização e mineralização em Lagoa Real	31
6	PETROGRAFIA DAS AMOSTRAS E ESTUDOS POR MICROSSONDA ELETRÔNICA.....	33
6.1	PETROGRAFIA DAS AMOSTRAS	33
6.1.1	Mineralogia.....	34
6.2	ANÁLISES POR MICROSSONDA ELETRÔNICA	38
6.2.1	Introdução.....	38
6.2.2	Análises por microsonda na Província Uranífera de Lagoa Real.....	39
7	ESTUDO DAS INCLUSÕES FLUIDAS.....	43
7.1	INTRODUÇÃO	43
7.2	MÉTODOS DE ESTUDO DAS IF.....	44
7.3	INCLUSÕES FUNDIDAS	45
7.4	ESTUDO DE IF EM DEPÓSITOS MINERAIS	45
7.4.1	Estudo de Inclusões fluidas na Jazida Cachoeira.....	46
7.5	RESULTADOS DA PETROGRAFIA DAS INCLUSÕES NOS PIROXÊNIOS.....	48

8	USO DE LUZ SÍNCROTRON PARA ESTUDO DE IF.....	56
8.1	INTRODUÇÃO	56
8.2	APLICAÇÕES DO MÉTODO	57
8.3	ASPECTOS PRÁTICOS DA ANÁLISE COM LUZ SÍNCROTRON	57
8.3.1	Mineral hospedeiro das IF	58
8.3.2	Tamanho das inclusões a serem estudadas	58
8.3.3	Profundidade das IF a serem estudadas	58
8.3.4	Montagens experimentais	59
8.4	ESTUDO DOS DADOS	60
8.5	A LINHA XRF DO LNLS	61
8.6	MONTAGEM EXPERIMENTAL E ANÁLISES REALIZADAS	61
8.6.1	Montagem Experimental	61
8.6.2	Análises Realizadas	64
8.6.3	Problemas detectados durante a realização dos experimentos - Fontes de imprecisão dos dados	70
9	DISCUSSÃO FINAL	75
10	CONCLUSÕES.....	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
	APÊNDICE A - ANÁLISES POR MICROSSONDA ELETRÔNICA	88

1 INTRODUÇÃO

A energia nuclear é produzida pela fissão do núcleo do Urânio (U^{235}), provocada pelo bombardeamento de nêutrons, e esta energia pode ser utilizada para fins militares ou para geração de energia termoelétrica (TAIOLI, 2001). A utilização do combustível nuclear em usinas nucleares para geração de energia apresenta vantagens, como o fato de não liberar H_2S e NO_x (óxidos de nitrogênio) (TAIOLI, 2001). Apresenta, também, desvantagens, como as que resultam quer de potenciais acidentes graves, quer do armazenamento dos rejeitos nucleares (TAIOLI, 2001).

Atualmente, o Brasil conta com duas usinas nucleares, Angra I e Angra II (ELETRONUCLEAR, 2005). Devido à crescente demanda por energia elétrica e à dificuldade para o licenciamento da exploração das reservas hídricas remanescentes, a energia nuclear representa um importante papel no cenário energético nacional (ELETRONUCLEAR, 2005). Sendo assim, a disponibilidade de U para utilização em reatores nucleares é tema de vital importância para nosso País.

A Jazida Uranífera Cachoeira, em processo de exploração pelas Indústrias Nucleares do Brasil, constitui, atualmente, o mais importante dos depósitos de U da Província Uranífera de Lagoa Real. É a única desse gênero em atividade na América do Sul. A compreensão, quer da geoquímica dos fluidos da formação desse depósito, mediante estudo de inclusões fluidas, quer da mineralogia da região, são importantes para os trabalhos de prospecção e pesquisa de urânio na área da província.

O objetivo final desta dissertação, que envolve os aspectos supracitados, é contribuir para a compreensão da gênese dessa Jazida, mediante estudo dos piroxênios associados a mineralização uranífera.

A elaboração deste texto constitui atividade do “Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais” do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, área de concentração, “Ciência e Tecnologia dos Materiais e Metalogênese” .

2 RELEVÂNCIA E JUSTIFICATIVA

Para a produção do combustível nuclear utilizado nas Centrais Elétricas Nucleares Brasileiras (Angra I e Angra II) a contínua atividade de mineração do U (FIG. 1) constitui etapa fundamental, já que tem que ser garantido suprimento permanente de combustível para as referidas usinas.

A descoberta de uma jazida mineral precede a exploração do minério e, é um processo que demanda recursos financeiros substanciais, além de um esforço pluri-disciplinar contínuo e prolongado. Tal esforço e recursos podem ser melhor utilizados com o incremento no conhecimento que se tem a respeito da deposição do bem mineral de interesse. Por isso, o estudo em uma jazida uranífera, de minerais e de suas inclusões (fluidas ou sólidas), pode ser importante, uma vez que contribui para o conhecimento a respeito do processo genético que originou o depósito. No caso da jazida Cachoeira, essa contribuição pode ser significativa.

Estudos mineralógicos e geoquímicos em piroxênios da Jazida Cachoeira já foram realizados anteriormente (por exemplo, MARUÉJOL, 1989; LOBATO & FYFE, 1990). Da mesma forma, já foram desenvolvidos estudos preliminares de inclusões fluidas (IF) em piroxênios desta Jazida (por exemplo, ALVES & FUZIKAWA, 1984; FUZIKAWA & ALVES, 1988). No presente trabalho, utilizando como ferramentas principais a petrografia, a microssonda eletrônica e a luz síncrotron, pretende-se agregar novos dados, que contribuam para a melhor compreensão da origem e composição dos piroxênios e, portanto, da gênese dessa Jazida.

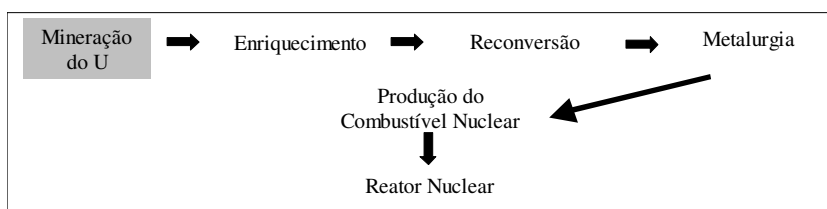


FIG. 1 Ciclo simplificado do combustível nuclear*, evidenciando (caixa cinza) a etapa de mineração do U. Modificado de Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (2005).

* **Ciclo do combustível nuclear:** “inclui todas as atividades envolvidas na obtenção e na irradiação do combustível em reatores nucleares, bem como a estocagem definitiva ou o reprocessamento do combustível gasto, com ou sem o reaproveitamento dos materiais físséis ainda presentes, e a deposição final dos rejeitos constituídos de produtos de fissão gerados durante a irradiação. (INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES, 2005).”

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

Contribuir para o conhecimento sobre a gênese de Jazidas de Urânio, especialmente em terrenos metamórficos, mediante estudo de aspectos da mineralogia da jazida e das inclusões, fluidas e sólidas, presentes em minerais.

3.2 Objetivo específico

- Caracterizar os piroxênios (com ênfase nos associados à mineralização uranífera e que hospedam inclusões) da Jazida Cachoeira e suas inclusões, fluidas e sólidas;
- Descrever, de maneira geral, os passos que devem ser seguidos para obtenção e interpretação dos dados obtidos em IF na linha D09B XRF Fluorescência de Raios-X do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS), Campinas.

4 METODOLOGIA

As etapas estabelecidas para atingir o objetivo proposto, consistiram, de maneira geral, em:

- Levantamento Bibliográfico;
- Coleta de amostras,
- Seleção e preparação de lâminas delgadas e bipolidas;
- Estudo petrográfico das amostras, utilizando, principalmente, os microscópios petrográficos LEITZ ORTHOLUX II POL BK e LEICA DMRXP.
- Caracterização química dos piroxênios, mediante o uso da microsonda eletrônica do laboratório de micro-análise da UFMG-CDTN;
- Microscopia e mapeamento de inclusões fluidas e sólidas visando caracterizar morfologicamente tipos de inclusões encontradas nos piroxênios. Para tanto foram utilizados microscópios petrográficos, principalmente LEITZ ORTHOLUX II POL BK e LEICA DMRXP.
- Caracterização da composição elementar (qualitativa) dos fluidos das IF em piroxênios utilizando a metodologia de fluorescência de raios-X do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS, Campinas);
- Caracterização das inclusões sólidas presentes nos piroxênios, utilizando a microsonda eletrônica;
- Tratamento de dados utilizando softwares específicos;
- Elaboração do texto da Dissertação.

Maiores detalhes sobre os métodos utilizados em cada etapa do trabalho serão apresentados ao longo deste texto.

5 LOCALIZAÇÃO E GEOLOGIA DE LAGOA REAL

5.1 Localização da Província Uranífera de Lagoa Real

A Província Uranífera de Lagoa Real se estende por uma área de 1.200 Km² e localiza-se (FIG. 2) no centro-sul do Estado da Bahia (MATOS, 1995). Segundo Matos (1995), é limitada pelas coordenadas geográficas 42°07'30'' – 42°22'30'' e 13°45'00'' - 14°07'30'' e sua área pertence aos municípios de Caetité e Lagoa Real. A província uranífera de Lagoa Real, como definida acima, está contida no Complexo Lagoa Real.

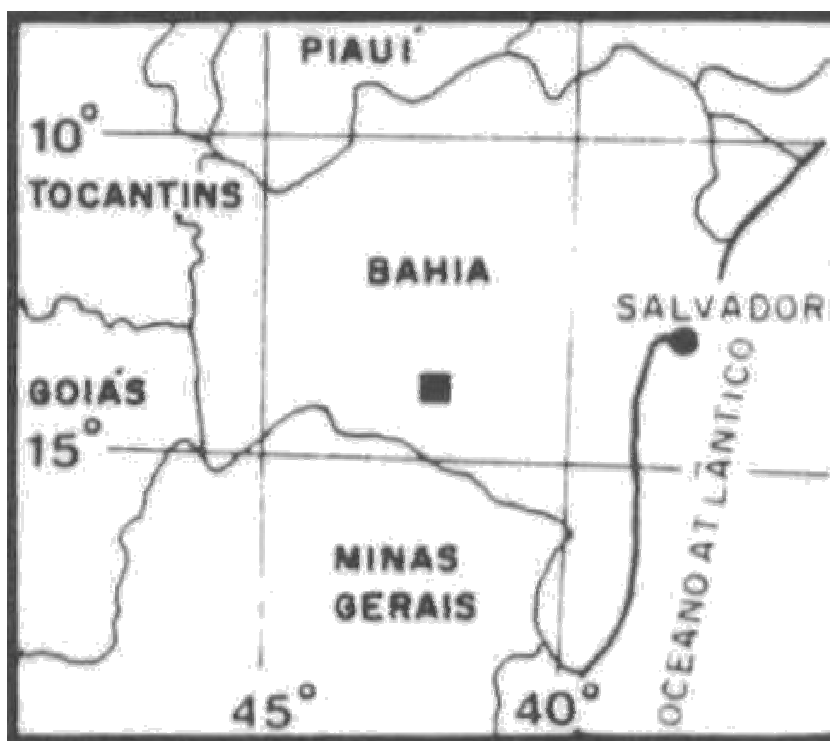


FIG. 2 Localização (mostrada pelo quadrado negro) da Província Uranífera de Lagoa Real no estado da Bahia. Modificado de Rocha (1992).

5.2 Contexto geológico

5.2.1 Geologia Regional

O complexo de Lagoa Real está localizado na porção sul do Aulacógeno do Paramirim (FIG. 3) (CRUZ, S., 2004). A geologia regional da área estudada neste trabalho será tratada como a geologia do Aulacógeno do Paramirim.

O Aulacógeno do Paramirim é a feição morfoestrutural da porção norte do Cráton do São Francisco e, abarca a Serra do Espinhaço setentrional, os vales do Paramirim e do São Francisco e a Chapada Diamantina (CRUZ, S., 2004). As suas unidades características são os Supergrupos Espinhaço e São Francisco (CRUZ, S., 2004).

ESTRATIGRAFIA

O substrato do aulacógeno é constituído por rochas Arqueanas e Paleoproterozóicas mais antigas que 1.8 Ga perfazendo o embasamento estratigráfico e, também, por grande volume de rochas plutônicas Paleoproterozóicas que foram posicionadas por volta de 1.75 Ga (CRUZ, S., 2004).

O embasamento

O Bloco do Gavião contém o embasamento do aulacógeno do Paramirim (CRUZ, S., 2004). Três principais unidades litológicas formam o bloco do Gavião: **a)** um grupo de gnaisses de cor cinza que correspondem a uma associação plutônica de tonalitos, trondhjemitos, granodioritos (TTG) amplamente distribuídos no bloco e, afetados de modo diverso por processos anatéticos; **b)** seqüências supracrustais comportando metavulcanitos, com termos ultramáficos, máficos e intermediários, formações ferríferas bandadas (BIF), níveis carbonáticos e calciosilicáticos com grau de metamorfismo variando entre a do fácies anfíbolito e a do fácies xisto verde; **c)** rochas plutônicas, predominantemente cálcio-alcálicas, que formam corpos intrusivos nos terrenos descritos acima (CUNHA et al., 1994).

O complexo Lagoa Real

O complexo Lagoa Real é intrusivo nos gnaisses do bloco Gavião (CRUZ, S., 2004). No item geologia local será descrito o complexo Lagoa Real em maior detalhe.

Supergrupo Espinhaço

Constitui a unidade de preenchimento mais importante do Aulacógeno do Paramirim englobando uma sucessão de sedimentos essencialmente terrígenos com contribuições de vulcânicas ácidas a intermediárias na base (CRUZ, S., 2004). Encontra-se integralmente exposto e apresenta significativa diferenciação faciológica entre a porção oeste, que corresponde à Serra do Espinhaço Setentrional, e a leste do aulacógeno, que corresponde à Chapada Diamantina (ALKMIN, 2004).

Segundo Cruz (2004) o Supergrupo Espinhaço, com sua deposição iniciando-se em torno de 1.75 Ga, registra a nucleação e a primeira fase de desenvolvimento do Aulacógeno em questão.

Supergrupo São Francisco

Engloba um conjunto de rochas terrígenas e carbonáticas depositadas em um ambiente marinho com influência glaciogênica (CRUZ, S., 2004). Exibe grandes diferenças entre as ocorrências de oeste e leste e encontra-se preservado somente nos baixos estruturais do Aulacógeno (ALKMIN, 2004).

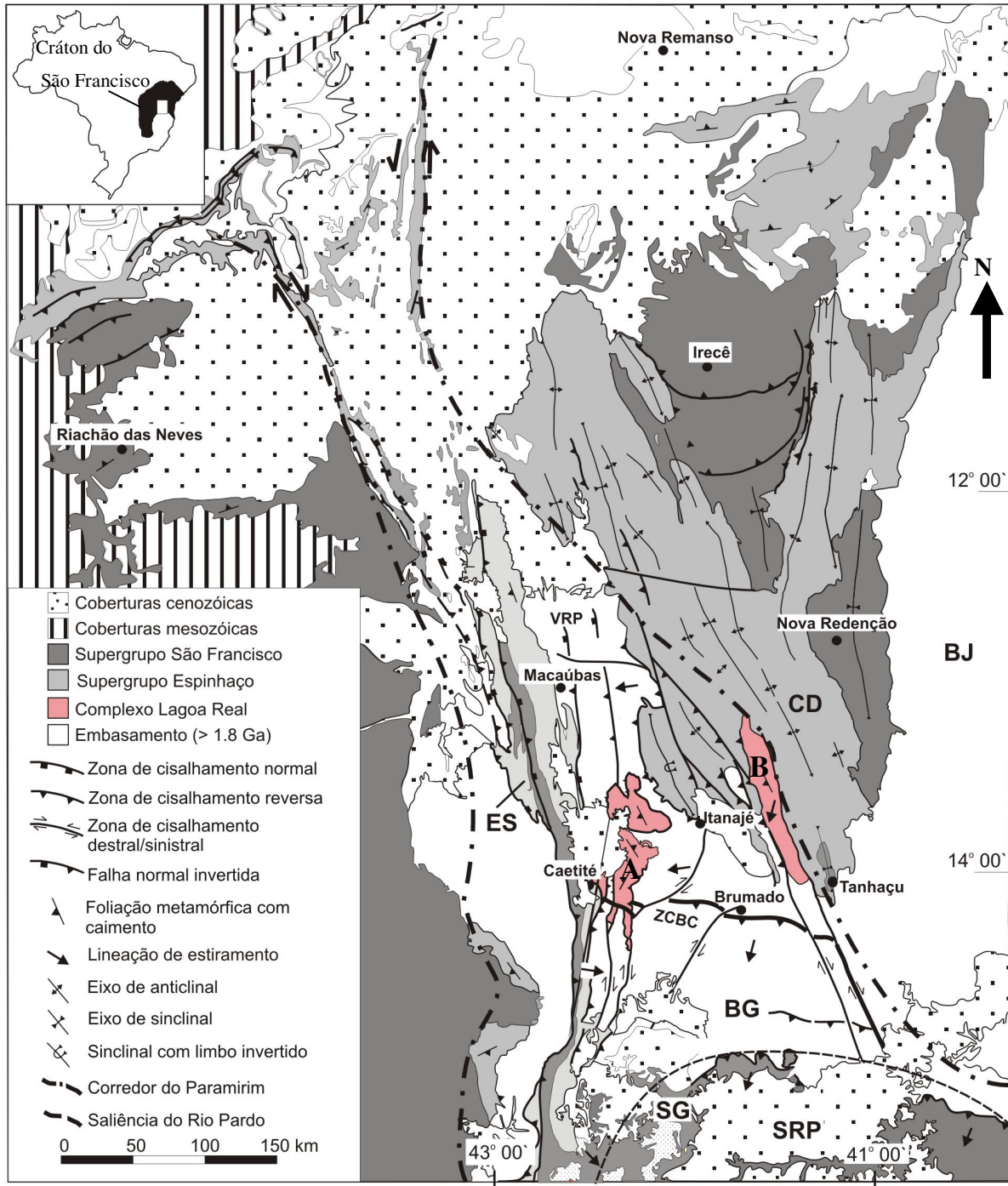


FIG. 3 Mapa Geológico simplificado do Aulacógeno do Paramirim, enfatizando as principais unidades geológicas e estruturas tectônicas de idade brasileira. BG- Bloco Gavião, BJ- Bloco Jequié, ZCBC – Zona de cisalhamento Brumado-Caetité, ES- Espinhaço Setentrional, CD- Chapada Diamantina, SRP- Saliência do Rio Pardo (Faixa Araçuaí), VRP – Vale do Rio Paramirim e SG – Serra Geral. A e B: ocorrências do complexo de Lagoa Real. Modificado de Cruz & Alkmin (2005). (Imagem gentilmente cedida por Simone Cerqueira Pereira Cruz).

5.2.2 Geologia Local

Em Costa et al. (1985) encontramos um mapeamento inicial para o complexo de Lagoa Real, no estado da Bahia, , entre as coordenadas: meridianos $42^{\circ} 07' 30''$ W e $42^{\circ} 22' 30''$ W e os paralelos $13^{\circ} 45' 00''$ S e $14^{\circ} 07' 30''$ S.

Segundo Cruz, S., (2004), o complexo Lagoa Real ocorre em duas regiões distintas, a primeira no vale do rio Paramirim (FIG. 3 – A), situada entre as cidades de Paramirim (ao norte) e Caculé, e a segunda no núcleo do Anticlinal de Abaíra-Jussiape a leste de Itanajé (FIG. 3 - B).

Neste texto utilizaremos a carta geológica de Cruz, S., (2004).

Segundo consta em Cruz, S., (2004), o complexo Lagoa Real abarca Suíte Intrusiva Lagoa Real (ARCANJO et al., 2000 apud CRUZ, S., 2004), que compreende um conjunto de granitos e gnaisses e albitos deles derivados, bem como rochas que ocorrem no vale do Paramirim (desde o paralelo $13^{\circ}30'S$, na altura da cidade de Paramirim, até o paralelo $14^{\circ}24'S$, a norte da cidade de Caculé) numa extensão de, ~ 112 Km*. Ainda segundo Cruz, S., (2004), integram também este complexo as rochas granitóides e os gnaisses da região de Abaíra e Jussiape.

A mineralização de urânio em Lagoa Real esta associada a corpos denominados albitos (GEISEL SOBRINHO et al., 1980; BRITO et al., 1984; MARUÉJOL et al., 1987; MARUÉJOL, 1989; LOBATO & FYFE, 1990; CRUZ, S., 2004).

Número superior a 30 anomalias de urânio já foram relatadas no setor de Lagoa Real (RIBEIRO et al., 1984; LOBATO & FYFE, 1990). A uraninita constitui o principal mineral de urânio, ocorrendo subordinadamente a pechblenda e o uranofano (GEISEL SOBRINHO et al., 1980; RIBEIRO et al., 1984), a gumita e a torbernita (RIBEIRO et al., 1984). A mineralização uranífera pode-se apresentar sob a forma de pequenos cristais de uraninita, margeando outros minerais ou no interior destes (LOBATO & FYFE, 1990).

De acordo com Matos (1995), a Jazida Cachoeira, de onde se originam as amostras estudadas neste trabalho, leva o nome da fazenda onde se acha localizada e apresenta uma extensão de 420 metros na direção noroeste e uma largura de, aproximadamente, 250 metros.

* O símbolo “ \sim ” significa: aproximadamente.

Estudos de cava foram feitos na Jazida e os dados econômicos indicaram uma ótima recuperação do minério até 100 metros de profundidade havendo, ainda, a possibilidade de se alcançarem profundidades maiores no futuro (MATOS, 1995).

Ainda segundo Matos (1995), foram individualizados na Jazida três corpos principais de minério conforme seção horizontal, cota 840m (FIG. 4):

Corpo 1: Apresenta extensão de 220 metros, com espessura mineralizada variando de 2 a 13 m;

Corpo 2: Possui 130 metros de comprimento e espessura de 1 a 20 m

Corpo 3: Exibe duas lentes principais. A lente situada na lapa apresenta extensão de 170 m e espessura variável de 20 a 30 m. A lente situada na capa apresenta espessura que varia de 2 a 27m.

Cruz, S., (2004) realizou uma nova descrição da litologia da área do Complexo Lagoa Real. A descrição, a seguir, baseia-se em grande parte no texto desta autora.

Granitóides Lagoa Real

Englobam o conjunto de granitóides genericamente denominados Granito São Timóteo (sensu latu) (FERNANDES et al., 1982 apud CRUZ, S., 2004), e o granito Jussiape (LOPES, 1991, apud CRUZ, S., 2004). O Granito São Timóteo (sensu latu) apresenta diferenciações texturais que permitiram subdividi-lo em granitóides São Timóteo (sensu strictu), granitóides Jurema e granito Jussiape (CRUZ, S., 2004).

Os granitóides podem ser classificados como rochas metaígneas, pois uma associação mineralógica e várias texturas deformacionais, determinadas por tectônica posterior à gênese dos granitos, ambas sin-metamórficas, ocorrem (CRUZ, S., 2004).

A mineralogia varietal é composta por biotita e pelo anfibólio, sendo que minerais como ortopiroxênio e granada, ainda que raramente, podem ser encontrados na matriz dessas rochas (CRUZ, S., 2004). Titanita, zircão, fluorita, apatita, monazita, ilmenita, magnetita e alanita constituem a mineralogia acessória (CRUZ, S., 2004).

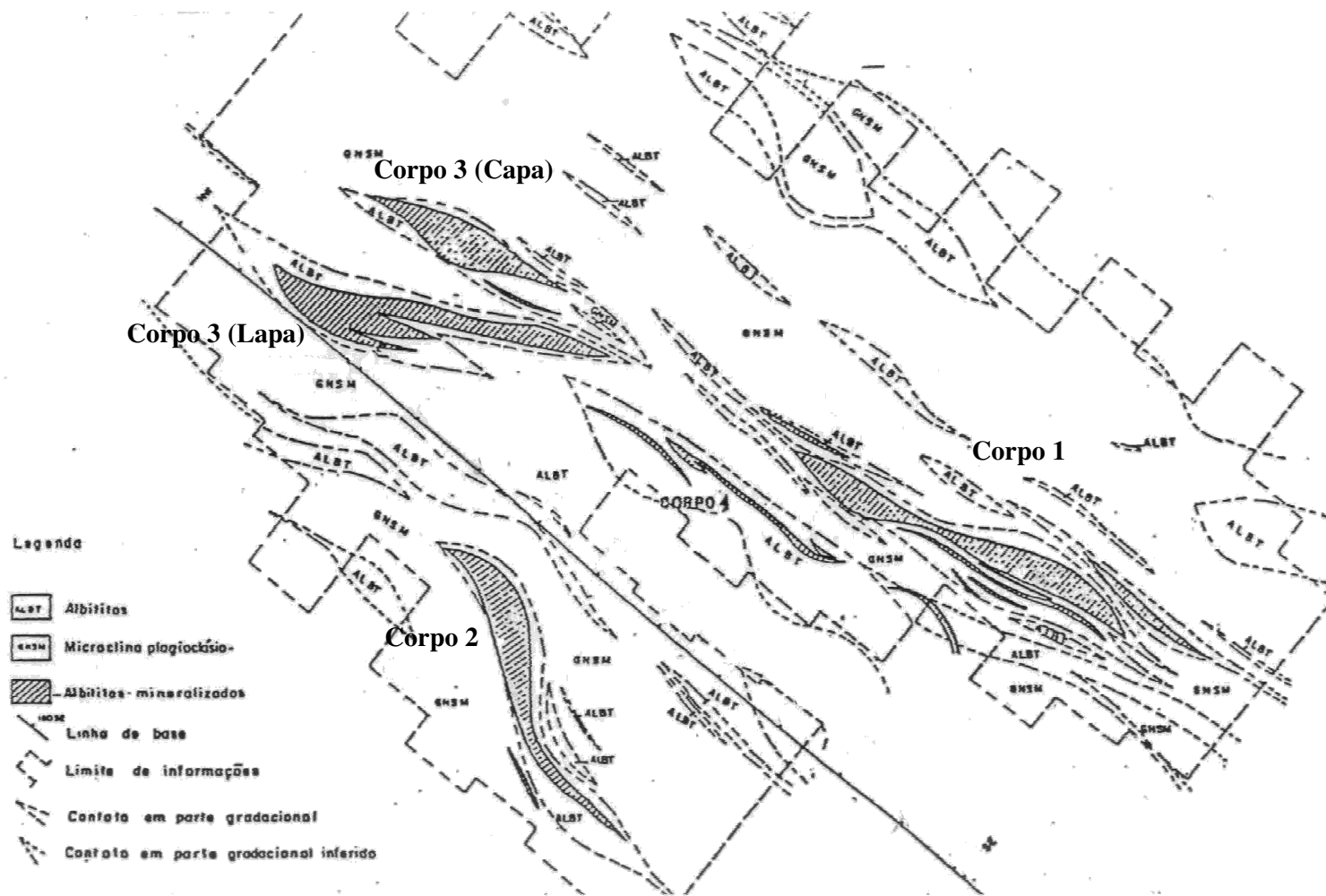


FIG. 4 Projeto Lagoa Real. Jazida Cachoeira - anomalia 13. Seção horizontal - cota 840m. Modificado de Matos (1995). Para referência aproximada à escala, considerar que o corpo 2 apresenta comprimento de 130m.

a) Granitóides São Timóteo

Constituem um conjunto de rochas hololeucocráticas a leucocráticas, com coloração que varia entre cinza-rósea e cinza-azulada (CRUZ, S., 2004). Apresentam composição que varia entre sienítica, álcali feldspato sienítica, quartzo-álcali feldspato sienítica, álcali-feldspato granítica e sienogranítica (CRUZ, S., 2004). Biotita e Anfibólio são os minerais varietais (e juntos não ultrapassam 20% do volume total da rocha), sendo que pode ocorrer ortopiroxênio e granada (CRUZ, S., 2004).

Os Granitóides São Timóteo (sensu strictu) apresentam fácies porfirítica e cumulática e, texturas granofírica e piterlítica são frequentemente encontradas (CRUZ, S., 2004). Nas duas fácies, as rochas exibem textura fanerítica grossa, muito grossa a pegmatoidal (CRUZ, S., 2004).

b) Granitóides Jurema

Constituem um conjunto de rochas hololeucocráticas a leucocráticas, com coloração que varia entre creme-acinzentado e cinza-azulado (CRUZ, S., 2004). Tem composição semelhante à do granitóide São Timóteo, com variações entre sienito, álcali-feldspato sienito, quartzo-álcali feldspato sienito, álcali-feldspato granito e sienogranito; apresentam fácies porfirítica e fanerítica média e, a transição entre estes granitóides e o granitóide São Timóteo é gradacional. (CRUZ, S., 2004). A biotita predomina em relação ao anfibólio (juntos chegam a compor 18% da rocha) (CRUZ, S., 2004).

c) Granitos Jussiape

Correspondem ao granito Jussiape descrito por Lopes (1991, apud CRUZ, S., 2004), que está localizado no extremo leste da porção setentrional do núcleo do Anticlinal de Abaíra-Jussiape e dividem-se em duas fácies: fanerítica média e porfirítica média (CRUZ, S., 2004).

São rochas hololeucocráticas a leucocráticas, de coloração rósea e há predominância da composição monzogranítica à biotita e magnetita sendo que estes minerais, juntos, raramente ultrapassam os 10% (em muitos casos, a biotita é praticamente inexistente) (CRUZ, S., 2004).

Granitóides Foliados e Gnaisses

Os granitóides do Complexo Lagoa Real sofreram variados graus de deformação, dando origem a gnaisses, albitos, oligoclasitos e microclinitos (CRUZ, S., 2004).

Os gnaisses são o constituinte de maior volume do Complexo Lagoa Real e, em concordância com suas características principais, foram agrupados em quatro fácies (nomeadas de acordo com a localidade mais próxima de sua ocorrência) que representam o registro de diferentes estágios de deformação – granitóides foliados Pilões e Limeira, gnaisses Cercado, Lagoa Grande e Caetitê (CRUZ, S., 2004). Nos gnaisses, os minerais varietais normalmente encontrado são a biotita, o anfibólio e o piroxênio (CRUZ, S., 2004).

a) Granitóides Foliados Pilões

Possuem coloração creme-alaranjada a cinza azulada e compreendem um conjunto de granitóides foliados, cujo protólito é o Granitóide São Timóteo sensu strictu (CRUZ, S., 2004).

Sua composição é semelhante à dos granitóides São Timóteo, variando entre sienítica, álcali-feldspato sienítica, quartzo-álcali feldspato sienítica, álcali-feldspato granítica e sienogranítica, com predominância sienogranítica (CRUZ, S., 2004). Dentre os minerais varietais o mais comuns é a biotita e, subordinadamente, o anfibólio, sendo que estes minerais juntos raramente ultrapassam 20% na composição modal da rocha (CRUZ, S., 2004).

Estas rochas exibem textura fanerítica grossa, muito grossa a pegmatoidal, com fenocristais relícticos do protólito ígneo imersos em matriz fanerítica média (CRUZ, S., 2004).

b) Granitóides Foliados Limeira

Apresentam coloração rósea a cinza-rosada e textura fanerítica média. Compreendem protomilonitos gerados a partir da deformação sin-metamórfica do Granito Jussiape. Apresentam a mesma composição mineralógica do seu protólito, ou seja, sieno-granítica a monzogranítica (CRUZ, S., 2004).

c) Gnaisses Cercado

Exibem coloração creme-rosada a cinza-rosada (CRUZ, S., 2004). Representam as fácies de deformação cataclástica do granitóide São Timóteo (sensu-strictu) (CRUZ, S.,

2004). Há predominância da composição sienogranítica e a biotita e o anfibólio, somados, não ultrapassam os 12 % (CRUZ, S., 2004).

As feições do protólito foram substituídas de maneira ampla pela trama metamórfica-deformacional (CRUZ, S., 2004). O fator de diferenciação deste gnaiss em relação aos demais é a presença de textura cataclástica envolvendo os feldspatos (CRUZ, S., 2004).

d) Gnaisses Lagoa Grande

Constituem augen-gnaisses de coloração creme-alaranjada, creme-amarelada, cinza-rosada e cinza-castanha (CRUZ, S., 2004). Correspondem a um conjunto de rochas miloníticas originadas do Granitóide São Timóteo (*sensu strictu*) havendo predominância da composição sienogranítica (CRUZ, S., 2004).

Os cristais de biotita, magnetita, anfibólio, piroxênio e granada, juntos, raramente ultrapassam os 20 % (CRUZ, S., 2004). As feições do protólito ígneo foram obliteradas, de maneira total, pela trama deformacional (CRUZ, S., 2004).

Podem ser diferenciados do granitóide foliado Pilões pela presença do bandamento metamórfico, de *ribbons* policristalinos de quartzo e pela presença de dobras isoclinais envolvendo essas estruturas planares (CRUZ, S., 2004).

d) Gnaisses Caetité

Apresentam coloração que varia entre o cinza-esverdeado e o creme-acinzentado e a composição predominante é sienogranítica (CRUZ, S., 2004). As feições do protólito ígneo foram totalmente obliteradas (CRUZ, S., 2004). Cristais de biotita, piroxênio, granada e anfibólio, somados, raramente superam os 20 % (CRUZ, S., 2004).

Constituem milonitos e ultramilonitos gerados a partir da deformação progressiva dos granitóides São Timóteo (*sensu strictu*) e dos gnaisses Lagoa Grande (CRUZ, S., 2004). Sua principal diferença em relação aos gnaisses Lagoa Grande é a presença de um bandamento metamórfico muito bem desenvolvido, contínuo ao longo de sua extensão e disposto paralelamente à foliação principal (CRUZ, S., 2004).

Albitos

Os albitos foram definidos como rochas constituídas por albita em porcentagem maior ou igual a 70 % (GEISEL SOBRINHO et al., 1980). Entretanto, esta definição não é

adotada por todos os autores, podendo-se encontrar para a definição de albitito, em Lagoa Real, o conceito de rocha com albita > 50% (LOBATO & FYFE, 1990).

Cruz (2004) adotou a classificação de albititos para rochas com porcentagem de albita superior a 70 %. Esta autora dividiu os albititos em mineralizados (albititos I) e não mineralizados (albititos II) e os nomeou, de acordo com a abundância de minerais varietais, como: anfibólio albitito, piroxênio albitito, magnetita-hematita albitito, biotita albitito, granada albitito e variações entre esses termos.

As rochas albitíticas formam corpos lenticulares, fusiformes, descontínuos, de larguras e comprimentos que variam de milímetros a centenas de metros (FIG. 5) (CRUZ, S., 2004). Ainda segundo Cruz, S., (2004), os albititos apresentam coloração cinza-esbranquiçada e aspecto sacaroidal e são os principais hospedeiros da mineralização uranífera. As rochas albitíticas têm como minerais acessórios mais comuns microclina, quartzo, biotita, granada, anfibólio, magnetita, hematita, titanita, epidoto e calcita (CRUZ, S., 2004). As texturas freqüentemente observadas nas rochas albitíticas são fanerítica fina a grossa, inequigranular, porfioroclástica, granoblástica poligonal, nematoblásticas, marcada pela orientação do anfibólio e do piroxênio, e lepidoblásticas, marcada pela orientação da biotita (CRUZ, S., 2004). O contato dos albititos com suas encaixantes é predominantemente brusco (CRUZ, S., 2004).

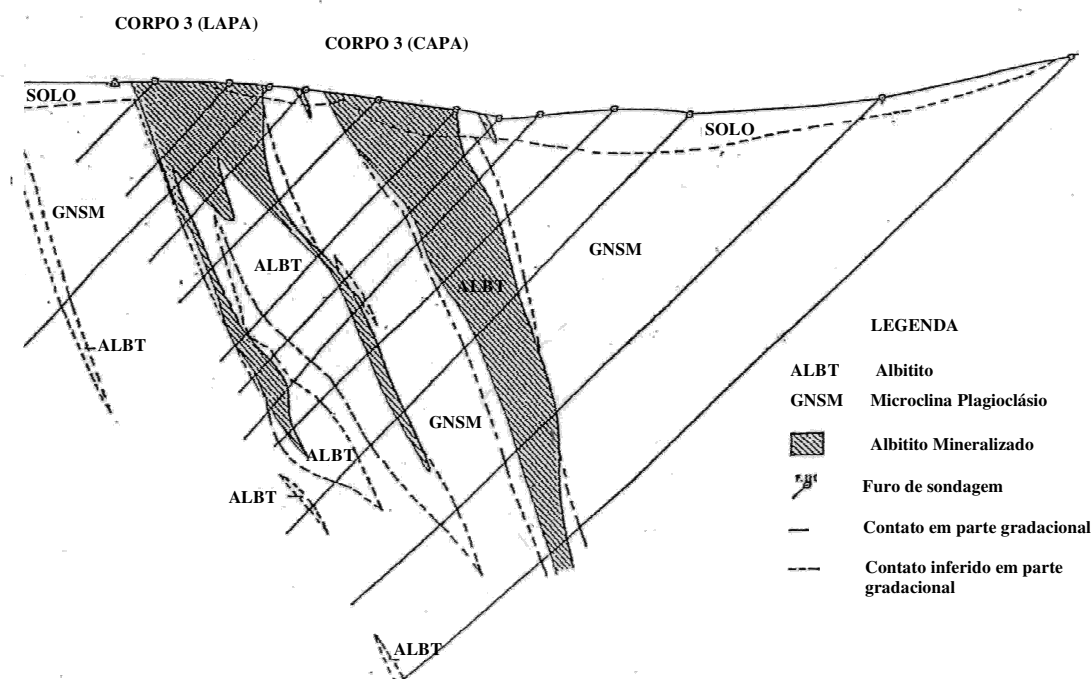


FIG. 5 Projeto Lagoa Real. Perfil Geológico - LB - 80 Nw- Jazida Cachoeira - Anomalia 13. Imagem apenas para demonstração da maneira de ocorrência dos albititos em profundidade. Imagem sem escala. Modificado de Matos (1995).

Nos albitos mineralizados foi descrita mineralização de urânio em vários minerais (GEISEL SOBRINHO et al., 1980; MARUÉJOL et al., 1987; LOBATO & FYFE, 1990, CRUZ, S., 2004), incluindo andradita, piroxênio, albita, hornblenda, biotita, calcita e hematita, sendo que a granada e o piroxênio parecem ser os principais minerais associados à uraninita (FUZIKAWA et al., 1988).

Sequência Paragenética

Em Maruéjol (1989) pode ser encontrada uma representação esquemática da paragénese mineral dos albitos desenvolvida ao curso do metassomatismo sódico e cálcio dos granitos e gnaisses do complexo de Lagoa Real (FIG. 6).

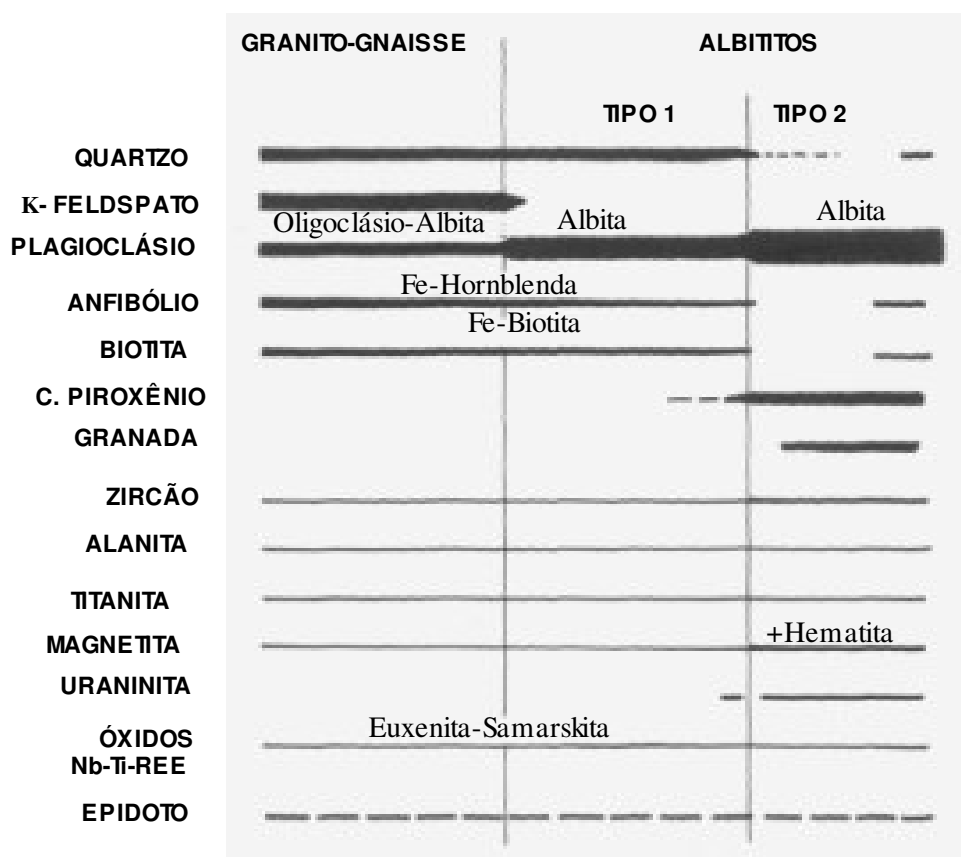


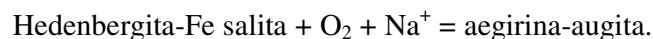
FIG. 6 Paragénese mineral desenvolvida ao curso do metassomatismo sódico-cálcio dos granitos e gnaisses do complexo de Lagoa Real. **Albitito tipo 1**: albitito com quartzo; **Albitito tipo 2**: albitito sem quartzo; **C. Piroxênio**: clinopiroxênio. Adaptado de Maruéjol (1989).

5.2.3 Albitização e mineralização em Lagoa Real

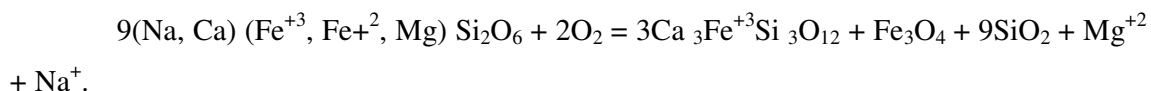
Vários modelos foram propostos para explicar aspectos tais como a albitização e a mineralização em Lagoa Real (FYFE 1979 apud BRITO et al., 1984; STEIN et al., 1980; GEISEL SOBRINHO, 1981; MARUÉJOL, 1989; LOBATO & FYFE, 1990; CRUZ, S., 2004) o que reflete a complexidade do tema e a dificuldade em se encontrar uma resposta definitiva para a albitização e a mineralização uranífera. Esses diversos modelos têm pontos em comum e divergências, alguns dos quais serão analisados neste texto.

O metassomatismo com papel importante na gênese da província uranífera de Lagoa Real, é mencionado por todos os autores citados no parágrafo anterior. São descritos, no mínimo, metassomatismo cálcico e metassomatismo sódico (MARUÉJOL, 1989; CRUZ, S., 2004).

Em relação ao piroxênio, que é o objeto de estudo do presente trabalho, podemos citar algumas reações metamórficas mencionadas por Lobato & Fyfe (1990), como a recristalização e desidratação-oxidação da hastingsita produzindo hedenbergita, e a oxidação e o enriquecimento da hedenbergita em Na levando à formação de aegirina-augita:



Uma oxidação adicional do piroxênio levaria a formação da andradita:



Lobato & Fyfe (1990) também mencionam a alteração incipiente a moderada do piroxênio para anfibólio. Maruéjol (1989) e Cruz (2004) também discutem as reações envolvendo os piroxênios de Lagoa Real.

A origem do fluido albitizante e mineralizante é tema controverso. Para Fyfe (1979, apud BRITO et al., 1984) os fluidos teriam origem a partir de sedimentos do Espinhaço. Entretanto de acordo com Fuzikawa et al. (1988) fluidos estudados em amostras do Supergrupo Espinhaço e do complexo de Lagoa Real são diferentes e, a baixa salinidade ou a composição de água pura encontrada nas inclusões de amostras do Espinhaço não seriam adequadas para promover a albitização e mineralização. Para Maruéjol (1989) os minerais

acessórios dos granitos, metamícticos na época da albitização seriam a fonte do urânio em Lagoa Real.

Um outro tópico interessante de discussão é em relação à importância do cavalgamento de rochas da região de Lagoa Real sobre os metassedimentos do Espinhaço. Para Fyfe (1979, apud BRITO et al. 1984), e Lobato & Fyfe (1990) esse processo representou papel determinante para a albitização e mineralização de Lagoa Real, tendo esse evento proporcionado a circulação de fluidos que gerou a albitização e mineralização. Para Maruéjol (1989) tal processo não teria sido importante para a ocorrência da mineralização e albitização. Esta última autora menciona a presença de uma hipotética fonte de calor para a circulação dos fluidos.

6 PETROGRAFIA DAS AMOSTRAS E ESTUDOS POR MICROSSONDA ELETRÔNICA

6.1 Petrografia das amostras

A descrição que se segue é baseada no estudo de lâminas petrográficas de quatro amostras: 03jun25-13; 03jun26-01; 03jun25-15, 03jun25-06 obtidas de testemunhos de furos de sondagem como o mostrado na FIG. 7. As amostras apresentaram grande variabilidade em suas características. O texto a seguir constitui uma síntese das feições petrográficas observadas, não necessariamente em todas as amostras.

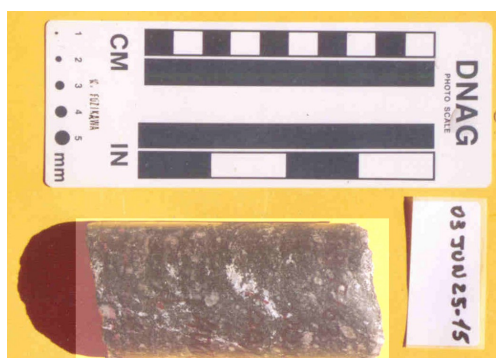


FIG. 7 Aparência de amostra (albitito) de testemunho de furo de sondagem, utilizado para confecção de lâminas neste trabalho. Amostra 03jun25-15.

As amostras 03jun25-06, 03jun25-13 e 03jun25-15 são provenientes do testemunho de sondagem do furo “F163”, em profundidades respectivas de ~66,00 m; ~92,95 m; ~100,00 m. A amostra 03jun26-01 é proveniente do testemunho de sondagem do furo “F109” a uma profundidade de ~ 45,59 m.

Classificar as amostras estudadas neste trabalho como albititos é questão problemática pois, não há uma definição unânime para este termo em Lagoa Real (veja, por exemplo, definições diferentes em GEISEL SOBRINHO et al., 1980 e LOBATO & FYFE, 1990). Dificulta também a classificação das amostras estudadas, o fato de as lâminas petrográficas representarem apenas parte da rocha original, que poderia, por exemplo, exibir

áreas com maior concentração de máficos, o que localmente levaria a redução da proporção de albita observada.

Os testemunhos dos furos de sondagem, dos quais se originaram as amostras estudadas neste trabalho, foram descritos por Evando Carele Matos (amostras 03jun25-06, 03jun25-13, 03jun25-15) e Carlos A. de Carvalho Filho (amostra 03jun26-01). De acordo com a descrição dos testemunhos, as amostras 03jun2601, 03jun25-15 e 03jun25-06 são amostras de albititos. A parte do testemunho de sondagem de onde retiramos a amostra 03jun25-13, é descrita como microclina gnaiss, entretanto, a petrografia feita neste estudo, nesta mesma amostra, contradiz esta informação. Na petrografia foi encontrada pouca microclina nessa amostra, e uma grande quantidade de plagioclásio. Neste último caso existe a probabilidade de haver sido coletado um fragmento próximo à transição gnaiss-albitito, pois o ponto de onde foi coletada a mostra estava próximo a transição entre estes dois tipos litológicos, segundo a descrição do testemunho de furo de sondagem.

As amostras 03jun25-15, 03jun25-06 e 03jun26-01 são nitidamente mineralizadas em urânio. Na amostra 03jun25-13 não foi identificada mineralização uranífera de maneira inequívoca.

Nas amostras estudadas a textura é em geral granoblástica poligonizada podendo ocorrer textura granolepidoblástica. Pode-se observar, em alguns casos, foliação marcada por cristais orientados de mica.

É possível perceber a presença de faixas, de espessura variável, às vezes alternadas, onde predominam: **a)** plagioclásios + piroxênio, **b)** anfibólio + piroxênio **c)** plagioclásios.

6.1.1 Mineralogia

O plagioclásio é o mineral que aparece em maior proporção, sem no entanto, alcançar 70% da amostra. Os cristais de plagioclásio (FIGs. 8 e 11) são, em geral, anédricos a euédricos, inequigranulares com contatos retos a irregulares entre si, frequentemente exibindo pontos triplos, indicando intenso processo de recristalização. Podem apresentar maclas segundo a lei da albita, que em alguns casos podem estar deformadas. Há cristais que apresentam extinção ondulante. Alguns cristais podem aparecer alterados em argilominerais e carbonatos. Foram encontradas duas gerações nitidamente diferentes de plagioclásios.

Na primeira os cristais apresentam sinais evidentes de alteração metassomática ou hidrotermal. Deve-se destacar que essas faixas de plagioclásios fortemente alterados contornam (embora não sempre) as faixas quase monominerálicas de piroxênio.

A segunda geração de plagioclásio apresenta poucos sinais de alteração e os cristais aparecem mormente limpos

Estudos de microsonda indicaram a existência de uma geração de albita precoce, anterior ao piroxênio, que aparece sob a forma de fases sólidas micrométricas dentro deste último mineral.

O piroxênio e a biotita são os minerais máficos predominantes, sendo que em uma preparação a biotita parece predominar sobre o piroxênio (amostra 03jun25-15).

Em geral os cristais de piroxênio (FIGs. 10 e 11) apresentam coloração verde clara e podem estar agregados entre si. Podem apresentar pleocroísmo, variando de verde amarelado a verde.

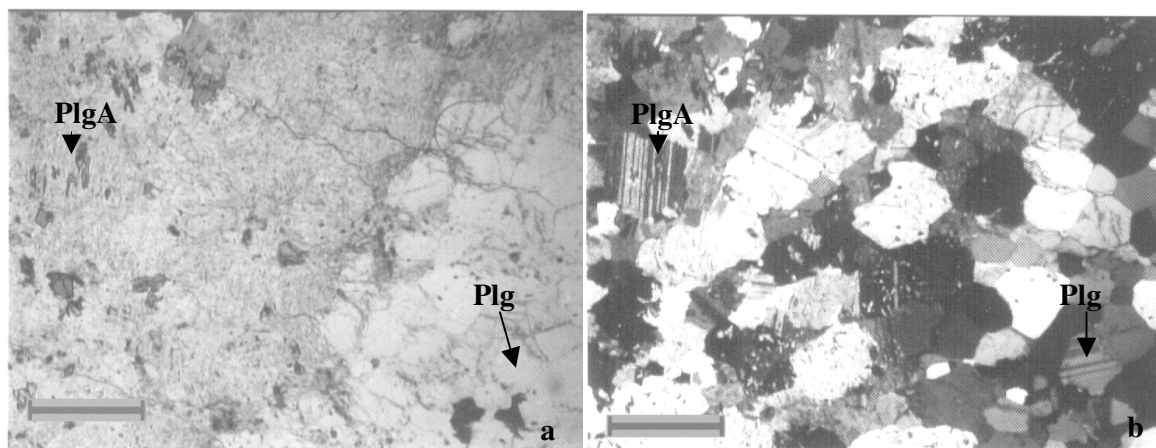


FIG. 8 Zona contendo plagioclásio fortemente alterado (PlgA) e plagioclásio pouco alterado (Plg). Amostra 03jun25-06. Nicóis cruzados em figura **b**. Observar a transição brusca de uma área para a outra. A barra equivale a ~ 1mm. Devido a efeito fotográfico, as imagens **a** e **b**, em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio estão, individualmente, invertidas.

Em alguns casos, diminutos cristais de um mineral opaco inclusos no piroxênio, exibem intensos halos de alteração (FIG 10). Trata-se muito provavelmente de um mineral uranífero. A petrografia indica que esta mineralização aparece associada quer as bordas dos cristais de piroxênio, quer em trilhas que atravessam o cristal, aparecendo, também, em forma de granulações isoladas dentro da massa do piroxênio.

Em algumas amostras, na massa de piroxênio foram observados anfibólios (FIG. 9). O anfibólio pode apresentar forma irregular (com pleocroísmo verde amarelado à verde azulado), ou idiomórfica (com pleocroísmo verde a verde escuro) com forma de losango.

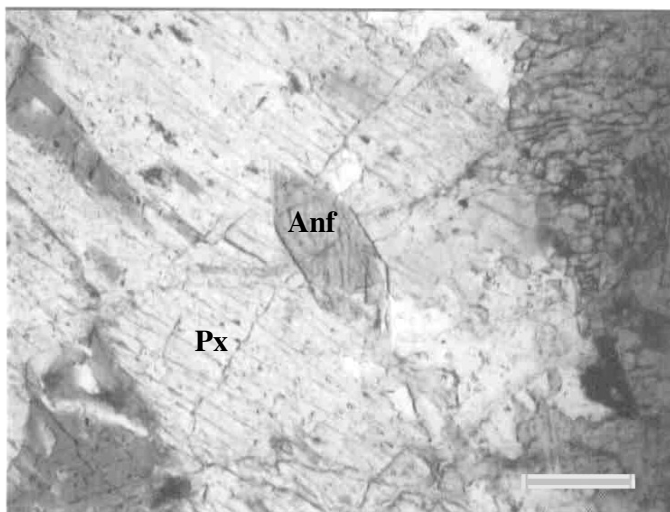


FIG. 9 Anfibólio (Anf) incluído em massa de piroxênio (Px). Amostra 03jun25-06. A barra equivale a $\sim 200\mu\text{m}$. Nicóis descruzados. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio.

Em Maruéjol (1989), anfibólios com características semelhantes ao da FIG. 9 foram descritos como formados a partir da hidratação de clinopiroxênio

A biotita aparece em palhetas, com coloração marrom avermelhada localmente exibindo orientação preferencial. Pode apresentar diminutos cristais de mineral opaco que produzem halos pleocróicos (provavelmente minerais uraníferos).

Os minerais acessórios estão preferencialmente associados aos minerais máficos. Dentre estes acessórios podemos citar, zircão, opaco, apatita, titanita, epidoto e alanita.

O zircão apresenta-se em prismas e a apatita é subédrica. A alanita e titanita podem se apresentar metamictizadas. A granada pode aparecer sob a forma de cristais irregulares, amarelados.

Em uma preparação, observou-se aumento da presença de carbonato formando cristais de granulação média, geralmente agregados entre si e intercalados às porções máficas (veios). Os cristais de carbonato aparecem como neoformações dentro de cristais de piroxênio.

Convém mencionar, ainda, a presença de microclina que, em uma preparação (amostra 03jun26-01), foi o terceiro mineral mais comum. A microclina se apresentou ora em cristais maiores bastante alterados em argilominerais e sericita, ora em cristais finos, límpidos, intersticiais à matriz granoblástica poligonizada constituída de plagioclásio e raro quartzo, sugerindo duas gerações de microclina.

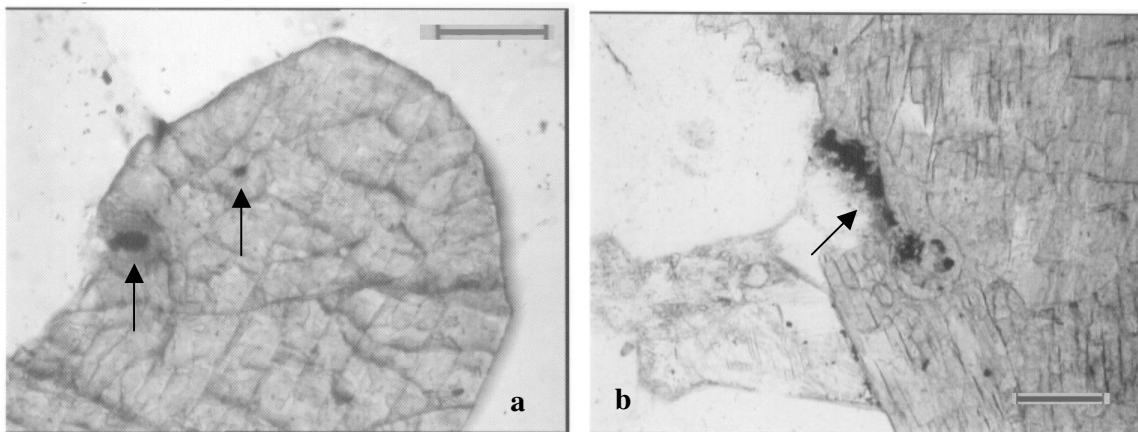


FIG. 10 **a** - Piroxênio exibindo mineralização evidente (indicada pelas setas) com halo de alteração. Amostra 03jun26-01. Nicóis descruzados. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio. A barra equivale a $\sim 50\mu\text{m}$.

b – Mineralização (indicada pela seta) contornando cristais de piroxênio. Amostra 03jun26-01. Nicóis descruzados. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio. A barra equivale a $\sim 100\mu\text{m}$.

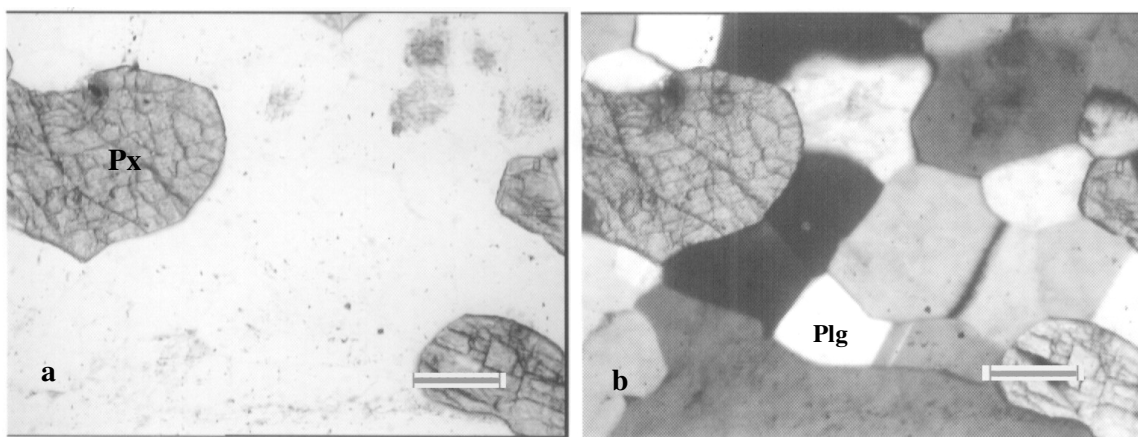


FIG. 11 Aspecto da petrografia das amostras, sem nicóis cruzados (**a**) e com nicóis cruzados (**b**), mostrando piroxênio mineralizado (Px) e plagioclásio (Plg), este último exibindo maclas. Amostra 03jun26-01. Devido a efeito fotográfico, as imagens **a** e **b**, em relação à imagens visualizada na ocular do microscópio estão, individualmente, invertidas. A barra equivale a $\sim 100\mu\text{m}$.

6.2 Análises por microsonda eletrônica

6.2.1 Introdução

A análise por microsonda eletrônica é uma técnica de espectrografia de raios-X (CRUZ, M., 1995), cuja fonte original de energia é um feixe de elétrons finamente focalizados (KLEIN, 2002). Ganhou notoriedade no meio geológico no final da década de 60, com o advento do programa de investigação das rochas lunares (GOMES, 1980).

Constitui técnica de micro-análise porque os resultados quantitativos e qualitativos são obtidos, de maneira não destrutiva, em pequenas quantidades de material. (em condições ótimas o feixe eletrônico pode ser focalizado em diâmetro inferior a 1 μm) (CRUZ, M., 1995). O volume mínimo de análise varia de 10 a 20 μm^3 (FIG. 12) (KLEIN, 2002). A habilidade que esta técnica tem de realizar análise quantitativa, em um volume reduzido de amostra, é a principal razão para sua grande popularidade no estudo de minerais, rochas, cerâmicas e outros materiais (KLEIN, 2002).

Nas análises por microsonda eletrônica um feixe eletrônico de alta energia atinge a amostra e, pode deslocar elétrons de suas posições iniciais, que quando retornam a suas posições originais, podem emitir raios-X característicos de cada elemento químico (CRUZ, M., 1995). O espectro de energia obtido pode ser analisado por diferentes cristais do espectrômetro, no caso do espectrômetro por dispersão de onda (WDS), ou pelo sistema de energia dispersiva (EDS) (CRUZ, M., 1995).

Devido ao fato de os elétrons atingirem a amostra em alta velocidade, eles penetram no material em uma profundidade de até 3 vezes o diâmetro do feixe de luz (FIG. 12) (KLEIN, 2002).

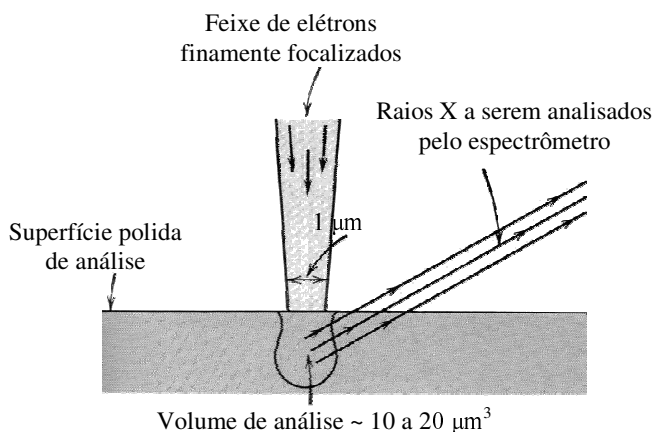


FIG. 12 Representação esquemática do pequeno volume irradiado pelos elétrons que incidem em uma amostra polida (Adaptado de Klein (2002)).

A análise qualitativa é relativamente simples e rápida, desde que a amostra esteja nas condições apropriadas (por exemplo, na forma de uma sessão polida de um mineral) (KLEIN, 2002). A análise quantitativa, por sua vez, pode envolver procedimentos complexos de correção que consideram interações entre os raios-X gerados e seu caminho através da amostra antes da detecção pelo espectrômetro (KLEIN, 2002). Tais correções geralmente são realizadas por computadores de alta velocidade conectados ao aparelho de microsonda (KLEIN, 2002).

6.2.2 Análises por microsonda na Província Uranífera de Lagoa Real

Existem estudos prévios de microsonda eletrônica em amostras da Província Uranífera de Lagoa Real, dentre eles, Maruéjol et al. (1987), Maruéjol (1989), Lobato & Fyfe (1990) e Cruz, S., (2004). Neste trabalho demos ênfase aos piroxênios e suas inclusões que ocorrem no material da Jazida Cachoeira.

Estudos prévios de piroxênios de albitos em Lagoa Real

Maruéjol (1987) relata que os clinopiroxênios neoformados dos albitos (albitos tipo 2) evoluíram de salitas ricas em Mg para hedenbergita, com aumento correlacionado de proporções de acmita. Lobato & Fyfe (1990) definiram os piroxênios dos albitos como sendo membros da série diopsídio-hedenbergita esclarecendo que na maioria dos casos podem ser definidos como aegirina-augita. Estes últimos autores afirmam que em albitos ricos em cálcio o piroxênio é diopsídico.

Em Cruz S., (2004), o piroxênio dos albitos mineralizados é apresentado como aegirina-augita.

Metodologia de Estudo

Foi utilizado o equipamento de microsonda eletrônica - – JEOL JXA-8900 RL, WD/ED Combined Microanalyser - do Laboratório de Micro-análises da UFMG-CDTN.

A partir das amostras foram preparadas lâminas bipolidas com espessura adequada para estudar IF. Os minerais de interesse foram mapeados previamente e fotografados para identificação. A identificação dos piroxênios, nas lâminas para análise, foi feita,

principalmente, em função de sua cor. Tal limitação, imposta pela espessura da lâmina para estudo de IF, faz com que algumas das análises que referimos como sendo de piroxênio possam ser de um mineral de composição próxima (por exemplo, um anfibólio). Fortalece, no entanto, a classificação dos cristais estudados como piroxênios, o fato de nas lâminas petrográficas respectivas às amostras estudadas por microsonda, o anfibólio ser raro.

Os dados obtidos na microsonda foram analisados utilizando o programa Minpet (RICHARD, 1996), versão 2.02.

Resultados

O software Minpet (RICHARD, 1996) recalcula as análises dos piroxênios para que possam ser classificadas de acordo com os guias da IMA (International Mineralogical Association) como descrito em Morimoto et al. (1988) (MINPET..., entre 1988 e 1996).

Ao representar os dados obtidos nos cristais analisados das lâminas espessas (03jun26-01-2 e 03jun25-15-2) das amostras mineralizadas (03jun26-01 e 03jun25-15), no diagrama Q-J (FIG. 13) pode-se observar que as análises correspondem a Na-Ca piroxênios e Ca-Mg-Fe piroxênios (Quad), havendo algumas análises na interface desses dois campos. Ao representar os mesmos dados no diagrama Ca-Mg-Fe e Na piroxênios (FIG. 14) pode-se verificar a presença de aegirina-augita. O diagrama Ca-Mg-Fe piroxênios (FIG. 15) se refere a alguns piroxênios representados na área Quad do diagrama Q-J. Nesta figura (FIG. 15) pode-se constatar que há análises de Ca-Mg-Fe piroxênios com composição de augita e com composição de diopsídio havendo termos intermediários entre esses dois extremos. O diopsídio (por exemplo, LOBATO & FYFE, 1990) e a aegirina-augita (por exemplo, LOBATO & FYFE, 1990; CRUZ, S., 2004), já haviam sido descritos anteriormente em Lagoa Real.

Os valores em óxidos fornecidos pelo equipamento de microsonda e que foram utilizados para construir as FIGs. 13, 14 e 15, variaram (ver TABELA 6 no APÊNDICE A): Na₂O : 0,88-3,17; FeO: 6,82-18,86; CaO: 17,85-24,31; SiO₂: 50,41-52,99; MnO: 0,20-0,50; TiO₂: 0,00-0,08; MgO: 8,43-14,59; Al₂O₃: 0,18-2,09.

Os resultados obtidos nas inclusões sólidas do piroxênio serão apresentados no item 7.

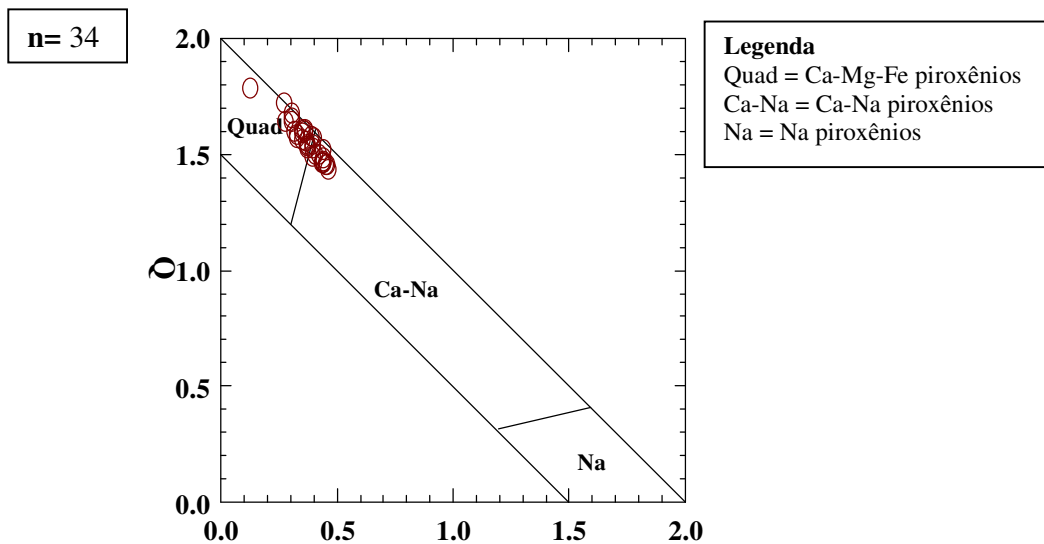


FIG. 13 Diagrama de classificação (Q-J) dos piroxênios estudados nas lâminas 03jun26-01-2 e 03jun25-15-2 das respectivas amostras mineralizadas. **n=** número de pontos representados. Classificação realizada com o software Minpet (RICHARD, 1996). **Q=** Ca + Mg + Fe²⁺; **J=** 2Na.

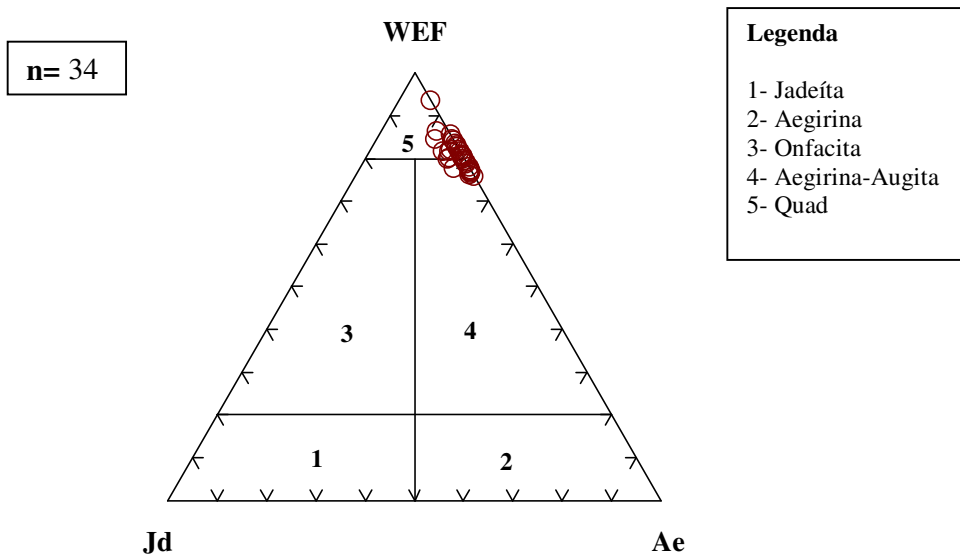


FIG. 14 Diagrama de classificação Ca-Mg-Fe e Na piroxênios dos mesmos piroxênios (indicados pelos círculos) da FIG. 13 estudados nas lâminas 03jun26-01-2 e 03jun25-15-2 das respectivas amostras mineralizadas. **Quad** representa a área dos Ca-Mg-Fe piroxênios. **n=** número de pontos representados. Classificação realizada com o software Minpet (RICHARD, 1996). **Jd:** Jadeíta; **Ae:** Aegirina; **Wef:** Wollastonita, Enstatita, Ferrosilita.

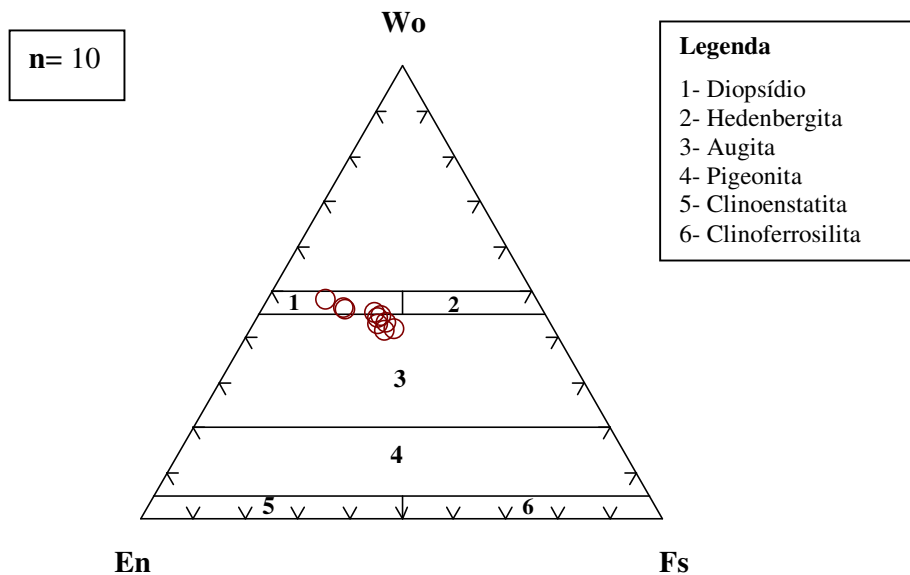


FIG. 15 Classificação (Ca-Mg-Fe clinopiroxênios) de piroxênios selecionados (indicados pelos círculos) estudados nas lâminas 03jun2601-2 e 03jun2515-2 das respectivas amostras mineralizadas. **n**- número de pontos representados. **Wo**- Wollastonita; **En**- Enstatita; **Fs**- Ferrosilita. Classificação realizada com o software Minpet (RICHARD, 1996).

7 ESTUDO DAS INCLUSÕES FLUIDAS

7.1 Introdução

Inclusões fluidas (IF) podem ser definidas como porções de fluidos inclusas nos minerais (FUZIKAWA, 1985). Seu estudo é importante porque permite, via de regra, compreender melhor o mineral hospedeiro (FUZIKAWA, 1985).

Os dez minerais nos quais há descrição mais freqüente de IF, são, segundo Shepherd et al. (1985): quartzo, fluorita, halita, calcita, apatita, dolomita, esfalerita, barita, topázio, cassiterita. Esses minerais tem em comum o fato de serem transparentes e levemente coloridos, o que é pré-requisito fundamental para realizar estudos ópticos (SHEPHERD et al. 1985). O estudo de inclusões fluidas em minerais opacos em luz visível é possível quando se utiliza a luz infravermelha (veja por exemplo, CAMPBELL et al., 1984; CAMPBELL & ROBINSON-COOK, 1987; RIOS et al., 2000; ROSIÈRE & RIOS, 2004).

Sorby (1858, apud FUZIKAWA, 1985) publicou um importante artigo com numerosas observações e interpretações sobre inclusões fluidas. Este autor propôs a teoria de que as bolhas presentes nos fluidos da maioria das inclusões seriam resultado da contração diferencial do líquido e do mineral hospedeiro, durante o resfriamento, a partir de uma temperatura mais elevada de aprisionamento. Sorby (1858, apud FUZIKAWA, 1985) supôs que se o processo pudesse ser revertido aquecendo-se a inclusão, poder-se-ia chegar à temperatura de formação da inclusão, no momento da homogeneização do fluido.

No estudo de IF considera-se que a composição e a densidade do fluido de uma inclusão não tenham mudado desde a sua formação e, que se ocorreram alterações, elas são observáveis na amostra (FUZIKAWA, 1985).

As IF podem apresentar número variável de fases, e são denominadas monofásicas, quando à temperatura ambiente (~ 25 ° C), apresentam somente uma fase líquida ou gasosa; bifásicas quando contêm duas fases (por exemplo, uma fase líquida e uma gasosa); trifásicas quando apresentam uma combinação de três fases (por exemplo, uma líquida, uma sólida e uma gasosa) e polifásicas ou multifásicas quando são constituídas por número de fases igual ou maior que quatro (FUZIKAWA, 1985).

Inclusões fluidas podem ser também classificadas quanto à origem em primárias, secundárias e pseudo-secundárias (ROEDDER, 1984). Segundo este autor, inclusões primárias são as formadas durante o crescimento do cristal pelo selamento de irregularidades neste crescimento; pseudo-secundárias são as IF resultantes da cicatrização de fraturas durante o crescimento do cristal; IF secundárias são as resultantes da cicatrização de fraturas após a formação do cristal. É importante, no entanto, alertar o leitor que este tipo de classificação, embora seja de vital importância para a interpretação dos dados oriundos de estudos de IF, é muitas vezes difícil ou até mesmo impossível (ROEDDER, 1984).

É interessante dizer que inclusões primárias e pseudo-secundárias devem refletir os fluidos presentes durante o crescimento do cristal, enquanto que as inclusões secundárias representam fluidos posteriores, possivelmente não relacionados aos responsáveis pelo crescimento primário (SHEPHERD et al. 1985).

Segundo Roedder (1984), independentemente da origem e história das IF, elas representam verdadeiras amostras dos fluidos existentes em algum tempo da história geológica da rocha. Como tal, fornecem importantes pistas no entendimento do “modus operandi” geológico - temperatura, pressão, densidade e composição dos fluidos que formaram ou percolaram a rocha (ROEDDER, 1984).

7.2 Métodos de estudo das IF

Vários métodos são usados para estudar IF (SAMSON et al., 2003), podendo ser eles destrutivos ou não destrutivos (ROEDDER, 1984). Serão abordados neste texto os métodos, microscopia petrográfica das inclusões (não destrutivo – ROEDDER, 1984) e análise de IF por luz síncrotron (geralmente não destrutiva – VANKO & MAVROGENES, 1998) por serem os dois métodos utilizados nos trabalhos aqui apresentados.

Segundo Fuzikawa (1985), através da microscopia petrográfica várias características das IF podem ser estudadas, como por exemplo, sua morfologia, número e característica das fases existentes, modo de ocorrência no mineral e classificação genética das mesmas (primárias, secundárias ou pseudo-secundárias).

Vários problemas geológicos podem ser resolvidos estudando IF sem a utilização de dados químicos ou da microtermometria (SAMSON et al., 2003). Pode-se citar a pesquisa da existência de migração de hidrocarbonetos em uma unidade litológica, na qual, a simples

constatação da presença ou ausência de inclusões de petróleo, pode solucionar a questão (SAMSON et al., 2003).

A análise de IF com luz síncrotron é geralmente uma técnica não destrutiva e, para uma inclusão individual, fornece dados sobre o sistema químico presente. (VANKO & MAVROGENES, 1998). Uma discussão mais aprofundada desta técnica será dada ainda neste texto.

7.3 Inclusões Fundidas

Inclusões Fundidas podem ser definidas como corpos de “melt”, vidro ou cristais que se tornam inclusos inicialmente em estado de “melt” em um cristal hospedeiro (SAMSON et al., 2003). Inclusões Fundidas tornam possíveis abordagens para o estudo da evolução magmática, sendo, entretanto, importante considerar que a fidelidade e durabilidade destas inclusões é ainda incerta (SAMSON et al., 2003).

A maioria das inclusões fundidas silicáticas são primárias pois são aprisionadas durante o crescimento do mineral hospedeiro, entretanto, ocasionalmente, inclusões fundidas secundárias formando trilhas dentro de cristais individuais podem ser observadas (FREZZOTTI, 2001).

Em rochas vulcânicas, as inclusões fundidas silicáticas consistem de vidro \pm uma ou mais bolhas gasosas \pm minerais de saturação (FREZZOTTI, 2001).

Estudos petrográficos são fundamentais para a caracterização das inclusões fundidas silicáticas (FREZZOTTI, 2001). Outros métodos são também importantes como a microsonda eletrônica e os estudos em platinas de aquecimento (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY, 2005).

7.4 Estudo de IF em depósitos minerais

A solução de vários problemas relacionados à gênese de depósitos minerais requer o conhecimento dos parâmetros físico-químicos que caracterizam suas condições de formação (TUGARINOV & NAUMOV, 1969). O estudo de IF pode ser útil no estudo da gênese do depósito mineral (ROEDDER, 1984). Entretanto, este último autor, alerta para o fato que os fluidos que deram origem ao depósito mineral podem ter mudado drasticamente antes de seu aprisionamento, como resultado de processos ocorridos dentro dos próprios depósitos.

Em depósitos uraníferos, IF observadas em amostras de áreas mineralizadas e de suas vizinhanças fornecem dados valiosos para ajudar na avaliação de sua gênese (POTY & PAGEL., 1988). Constituem a única evidência direta dos fluidos que lixiviaram o urânio nas rochas fonte, e em seguida o transportaram e o depositaram em estruturas ou ambientes adequados (POTY & PAGEL, 1988).

Dificuldades no estudo de IF em depósitos de urânio existem. Poty & Pagel (1988) mencionam que em depósitos de urânio a ganga em geral não é adequada para a microtermometria.

É interessante mencionar, também, que o estudo de IF em rochas metamórficas, pode apresentar dificuldades (ROEDDER, 1984). A presença de inclusões muito pequenas e a dificuldade em determinar a origem da inclusão são alguns fatores problemáticos (ROEDDER, 1984).

7.4.1 Estudo de Inclusões fluidas na Jazida Cachoeira

Estudos de IF em diferentes minerais da Jazida Cachoeira já foram realizados (por exemplo, ALVES & FUZIKAWA, 1984; FUZIKAWA & ALVES, 1988).

Os fluidos estudados por Alves & Fuzikawa (1984) no quartzo das encaixantes, na albita do albitito estéril, no piroxênio e na albita dos albititos mineralizados e nas calcitas da fase pós-mineralização, sempre apresentaram salinidade elevada (aproximadamente 18 % em equivalente em peso de NaCl). Indícios da presença de CO₂ e CH₄ nas IF foram encontrados nos quartzos das encaixantes, na albita e piroxênio dos albititos mineralizados e na calcita da fase pós mineralização estudada por estes autores.

Alves & Fuzikawa (1984) mencionam que a composição dos fluidos, por eles estudados na Jazida Cachoeira, é semelhante ao de outras jazidas uraníferas como as de Nabarlek na Austrália e Rabbit Lake no Canadá..

Estudos anteriores de IF em piroxênios de albititos mineralizados da Jazida Cachoeira

O estudo de IF em piroxênios de albititos mineralizados de Lagoa Real é complexo. Isto se deve ao tamanho reduzido de algumas IF, a dificuldade na visibilidade das IF ocasionada pela cor no mineral (ALVES & FUZIKAWA, 1984) e, ao fato de o piroxênio

apresentar escurecimento significativo com o resfriamento durante a criometria (ALVES & FUZIKAWA, 1984; FUZIKAWA & ALVES, 1988).

Alves & Fuzikawa (1984) e Fuzikawa & Alves (1988) encontraram inclusões secundárias (monofásicas e bifásicas) em piroxênio (aegirina-augita) de albititos mineralizados de Lagoa Real.

Fuzikawa & Alves (1988) observaram inclusões primárias aquosas, bifásicas (H₂O líquido + vapor) com raras monofásicas (H₂O líquido) em piroxênio (aegirina-augita) de albitito mineralizado da Jazida Cachoeira. Em algumas inclusões encontraram pequena fase sólida amorfa. As inclusões distribuíam-se individualmente pelo cristal e apresentavam formas semi-retangulares geralmente subparalelas entre si. Para estas IF encontraram temperatura de fusão do gelo em torno de - 4° C (7% em equivalente de peso de NaCl) e temperatura de homogeneização variando de +200 ° C a + 300 ° C.

Alves & Fuzikawa (1984) estudaram IF bifásicas (líquido + vapor ou gás) com formas equidimensionais ou irregulares que se apresentavam bem individualizadas, em piroxênio (aegirina-augita) de albitito mineralizado da Jazida Cachoeira. Na criometria das IF obtiveram temperaturas de acomodação final da bolha e aumento da mesma dispersas em ampla faixa (- 5,5 ° C a - 15,5 ° C). Interpretaram esta dispersão de valores como sendo devida a mistura em diferentes proporções de CO₂ e CH₄ além de outros gases. Em uma outra amostra contendo este mesmo tipo de IF, não observaram congelamento, mesmo abaixo de -130 °C, o que para estes autores sinalizava elevada salinidade.

No teste de aquecimento em IF (provavelmente primárias) em piroxênio (aegirina-augita) de albitito mineralizado da Jazida Cachoeira, Alves & Fuzikawa (1984) encontraram temperaturas de homogeneização de 220 °C a 310 °C com concentração no intervalo de 260 ° C a 280 ° C. Estes autores sugeriram, para explicar esta dispersão nos valores, que a recristalização do mineral após o aprisionamento das IF teria levado a alteração do conteúdo dos fluidos.

De todo o exposto, verificamos que as IF estudadas nos piroxênios de albititos mineralizados de Lagoa Real, apresentaram, de modo geral, salinidade significativa e temperaturas de homogeneização entre 200 e 310° C.

7.5 Resultados da Petrografia das Inclusões nos piroxênios

O texto a seguir é resultado de mapeamento e caracterização de inclusões fluidas e inclusões sólidas em piroxênio de duas lâminas (espessas) bipolidas (03jun26-01-2 e 03jun25-15-2) de amostras mineralizadas em urânio (03jun26-01 e 03jun25-15, respectivamente) da Jazida Cachoeira. Foi mapeado um número superior a 50 campos sendo que cada um podia conter número muito variável de inclusões. Procurou-se classificar as inclusões no que tange ao número de fases presentes, forma da inclusão, tamanho e origem. Antes de citar a descrição, algumas observações são importantes.

Em relação à origem é importante dizer que foram classificadas como IF de origem indeterminada aquelas que não satisfizeram prontamente critérios para origem primária encontrados em Roedder (1984).

Não foi medido o tamanho de todas as inclusões encontradas de um determinado tipo, de maneira que os valores aqui relatados representam apenas exemplo dos verificados.

A descrição que se segue não compreende a totalidade das inclusões presentes nas amostras, pois algumas podem ter passado despercebidas durante o mapeamento, outras eram de difícil identificação e ainda outras podem ter apresentado tamanho muito pequeno para poderem ser estudadas.

As inferências relativas às fases presentes na inclusão foram feitas basicamente por suas formas, sendo que não necessariamente fazem referência a um estado físico (uma bolha pode ser de líquido ao invés de ser formada por gás).

A determinação do mineral hospedeiro das inclusões em lâmina espessa (para inclusões fluidas) foi difícil, podendo ter sido, em alguns casos, enganosa. Na maioria dos casos, as inclusões, em função da limitação imposta pela espessura da lâmina para estudo de IF, tiveram seu mineral hospedeiro identificado principalmente pela cor do mesmo. Fortalece a classificação dos cristais estudados como piroxênio, o fato de alguns destes terem sido submetidos à análise por microsonda eletrônica, resultando em composição compatível com piroxênio. Além disso, as amostras da qual se originaram as lâminas de IF aqui descritas, quando analisadas em lâmina delgada, continham pouco anfibólio, mineral esse que poderia ser confundido com o piroxênio em função da coloração parecida.

Na maioria das inclusões fluidas estudadas não foi possível inferir a proporção entre as fases presentes, seja em função da irregularidade na forma das inclusões, que ocasionaria erro considerável (ROEDDER, 1984), seja da visibilidade inadequada. O fato das IF se

tratarem, freqüentemente, de inclusões trifásicas com fases sólidas de tamanho e forma irregular, contribuiu, também, para que não fosse possível uma estimativa da proporção entre as fases de maneira adequada.

A má visibilidade foi um fator que dificultou freqüentemente a classificação e identificação das inclusões. Dificuldade na visibilidade de IF em piroxênios já haviam sido descritas anteriormente (por exemplo, FERNANDEZ et al., 2001; ALVES & FUZIKAWA, 1984).

Inclusões primárias

Estas inclusões aparecem em quantidade significativa.

O critério utilizado para classificar as IF como primárias foi, em geral, a presença de inclusões alinhadas e paralelas entre si (FIG. 18). Os limites dos cristais hospedeiros não são nítidos, o que tornou imprecisa a avaliação de se um grupo de inclusões ultrapassava ou não estes limites. Tal limitação, imposta pelas características da amostra, adiciona incerteza na classificação destas IF quanto à sua origem. Em alguns casos, foi possível verificar que as inclusões ocorriam paralelas entre si e em mais de um plano (FIG. 18). A inclusão foi considerada primária ainda que a inclusão situada em paralelo a mesma, não tenha sido classificada (por má visibilidade, por exemplo). O aspecto alinhado que as inclusões apresentaram dentro do mineral hospedeiro foi considerado como orientação ao longo do eixo de crescimento do piroxênio.

As inclusões primárias possuem formas irregulares. Foram observadas inclusões com bolha + fase (sugestiva de líquido) + fase sólida (há fases sólidas amorfas, em alguns casos arredondadas). Algumas fases sólidas apresentavam birrefringência (FIG. 17).

Foi identificado também inclusão do tipo bifásica (FIG. 16) em número muito reduzido, apresentando bolha + fase sugestiva de líquido. Este tipo de inclusão podia ser encontrado em um campo que continha, também, IF primárias trifásicas.

O tamanho medido das IF primárias foi muito variável, podendo ocorrer inclusões grandes: ~ 36 x 8,2 µm e pequenas com apenas ~ 10 x 4 µm .

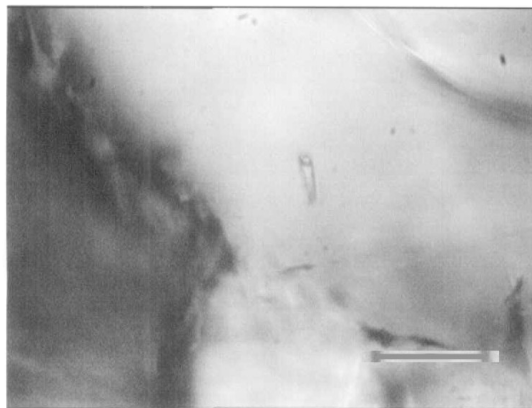


FIG. 16 Inclusão fluida primária bifásica em piroxênio. Amostra 03jun2601-2. A barra equivale a ~ 20 μm . Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio.

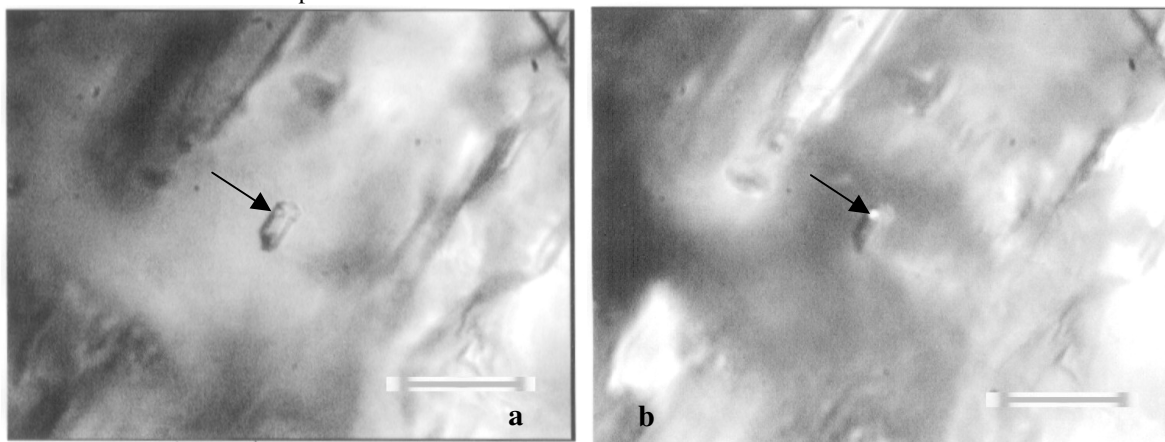


FIG. 17 Inclusão fluida primária trifásica apresentando fase sólida birrefringente (apontada pela seta) quando são cruzados os nicóis (b). Amostra 03jun2515-2. A barra equivale a ~ 20 μm . Devido a efeito fotográfico, as imagens **a** e **b**, em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio estão, individualmente, invertidas.

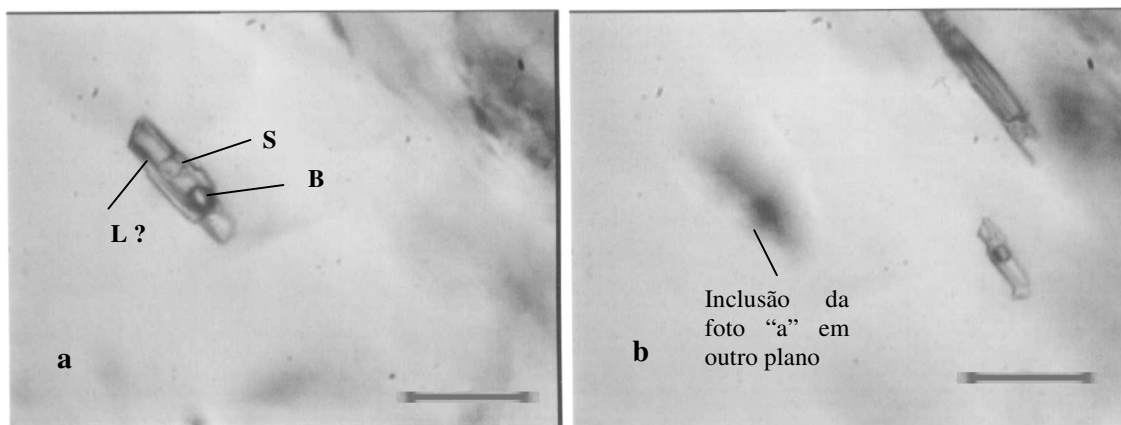


FIG. 18 IF trifásicas primárias em piroxênio paralelas e ocorrendo em planos diferentes (**a** e **b**). Amostra 03jun2601-2. A barra equivale a ~20 μm . **B**= bolha, **L?**= líquido ?, **S**= fase sólida. Devido a efeito fotográfico, as imagens **a** e **b**, em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio estão, individualmente, invertidas.

Inclusões de origem indeterminada

As inclusões de origem indeterminada (FIG. 19) aparecem em cristais próximos a hospedeiros de inclusões classificadas como primárias, e, também, em um mesmo campo, junto com inclusões classificadas como primárias.

Foram observadas formas variadas. Observou-se inclusões com bolha + fase sugestiva de líquido + fase sólida (que podia ser amorfa).

Foi encontrado número muito reduzido de inclusão fluida do tipo bifásica, com bolha + fase sugestiva de líquido e forma de bastão.

As IF de origem indeterminada possuem tamanhos variados. Cita-se: $\sim 38 \times 11,8 \mu\text{m}$; $\sim 8,4 \times 3,8 \mu\text{m}$.

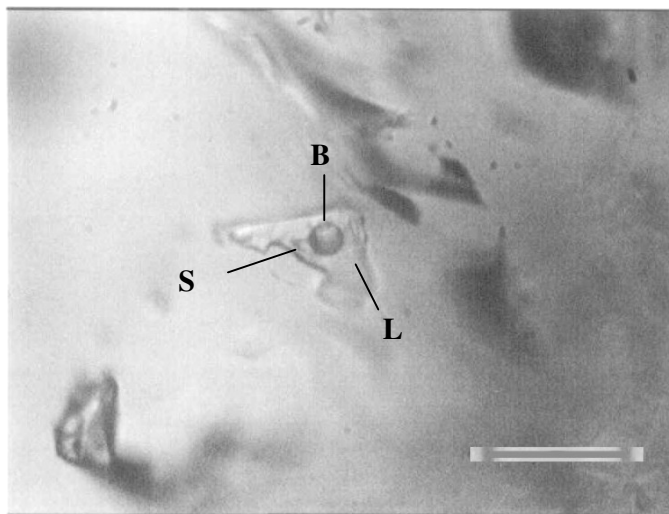


FIG. 19 Inclusão fluida de origem indeterminada, trifásica em piroxênio. Amostra 03jun2601-2. A barra equivale a $\sim 20 \mu\text{m}$. **B**= bolha; **S**= fase sólida amorfa; **L**= fase líquida. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio.

Inclusões sólidas

Aparecem também em quantidade significativa e formas variadas. A identificação do número de fases internas foi difícil. Embora a diferenciação entre inclusões aquosas e vítreas seja problemática (ROEDDER, 1984), estas inclusões foram consideradas sólidas, e referidas

como tal neste texto. A classificação destas inclusões como sólidas derivou da ausência de bolhas, e do fato de algumas dessas inclusões se localizarem na superfície da amostra (sendo visualizadas por microscopia de luz refletida) e permitirem sua análise por microsonda eletrônica.

Os tamanhos destas inclusões sólidas são muito variáveis, podendo ocorrer inclusões grandes: $\sim 94 \times 55,8 \mu\text{m}$ e pequenas: $\sim 8,4 \times 4,2 \mu\text{m}$.

Foram encontradas inclusões monofásicas, apresentando formas e tamanhos variados. Estas inclusões podem aparecer em planos diferentes em um mesmo campo.

Foram encontradas, também, inclusões bifásicas (FIG. 20) ou multifásicas que apresentaram formas e tamanhos variados. Há inclusões com fases mais claras e outras mais escuras sendo as fases de forma irregular. Tais inclusões também podem aparecer em diferentes planos em um mesmo campo.

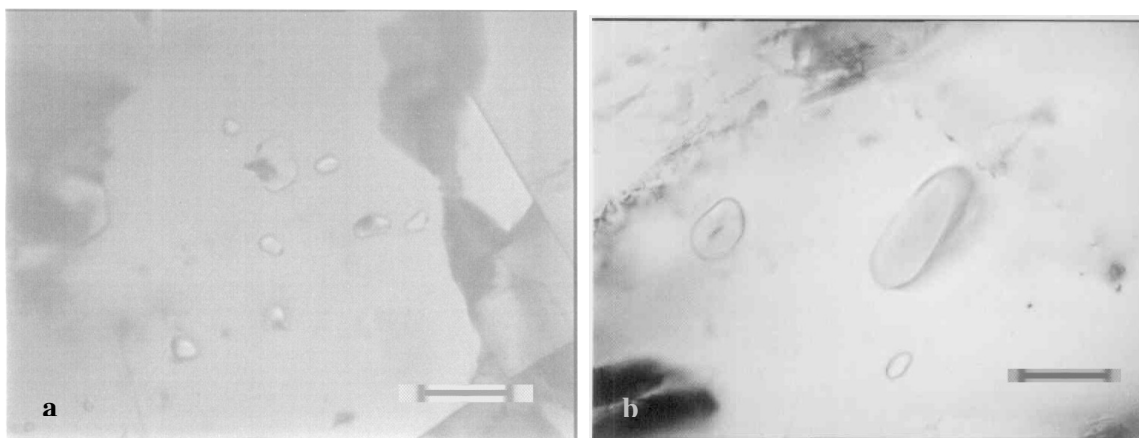


FIG. 20 **a-** Inclusões sólidas em piroxênio. Amostra 03jun2601-2. A barra equivale a $\sim 20 \mu\text{m}$. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio. **b-** Inclusões sólidas de albita em piroxênio. Amostra 03jun2515-2. A barra equivale a $\sim 20 \mu\text{m}$. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio.

Discussão dos dados obtidos na petrografia das IF

Algumas das IF classificadas como primárias encontradas nos piroxênios são semelhantes à algumas IF primárias encontradas por Fuzikawa & Alves (1988) em piroxênios desta mesma jazida. Foi constatada, no entanto pelo menos uma diferença entre as IF

estudadas por aqueles autores e as aqui estudadas. Fuzikawa & Alves (1988) não relatam fases sólidas birrefringentes em inclusões primárias em piroxênios.

As fases sólidas birrefringentes dentro das inclusões poderiam apresentar a composição de carbonato. Uma hipótese é de que estas representem carbonatos aprisionados ocasionalmente. Uma outra hipótese seria que estas fases se tratem de minerais de saturação. Ambas hipóteses carecem de mais dados

Resultado e discussão da análise por microsonda eletrônica das inclusões sólidas em piroxênio

A análise das inclusões sólidas (que estavam na superfície da amostra) presentes nos piroxênios revelou, em alguns casos, que se tratavam de albita (FIG. 21, TABELA 1 e TABELA 9). O recálculo das análises das inclusões foi feito utilizando o software Minpet (RICHARD, 1996) que recalcula as análises para que possam ser apresentadas no diagrama ternário Ab-An-Or (Albita, Anortita, Ortoclásio).

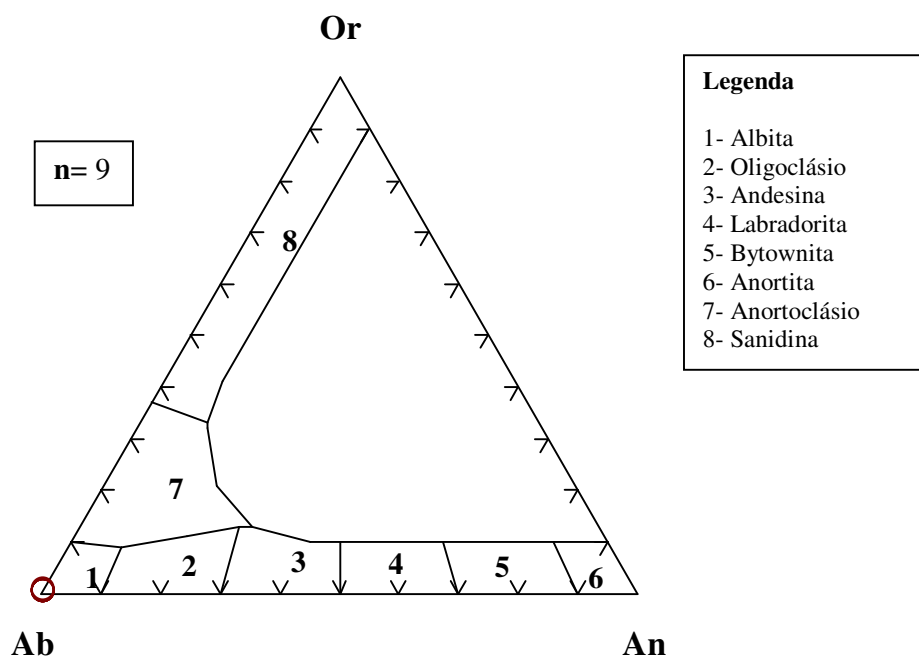


FIG. 21 Classificação de inclusões superficiais (indicada pelo círculo) em piroxênio e de um mineral vizinho (também indicado pelo círculo) ao piroxênio. Amostra 03jun2515-2. **n**= número de pontos representados. **Ab**- Albita, **An**- Anortita; **Or**- Ortoclásio. Dados provenientes da TABELA 9. Classificação realizada com o software Minpet (RICHARD, 1996).

TABELA 1 – Parte das análises, de inclusões de albita (melt) e de um mineral vizinho (Albita) ao hospedeiro, representadas na FIG. 21. (Calibração para albita). Esta tabela corresponde a uma parte da TABELA 9.

Amostra	Área	Ponto	Na₂O	SiO₂	K₂O	Al₂O₃	Total
03jun2515-2	X	melt-6	11,89	69,14	0,14	19,5	100,67
03jun2515-2	X	melt-4	11,47	69,43	0,14	20,64	101,69
03jun2515-2	X	metl-1	11,72	68,8	0,13	19,49	100,15
03jun2515-2	X	melt-2	11,17	67,6	0,11	20,08	98,96
03jun2515-2	X	Albita	12,25	70,2	0,14	19,71	102,3

A palavra “melt” foi utilizada como designação no decurso das análises, não tendo necessariamente um significado técnico.

O fato de as inclusões de albita (FIG. 21, TABELA 1) estarem dentro de diopsídios (TABELA 2) sugere que estas albitas sejam anteriores a estes piroxênios.

TABELA 2 - Análises da massa de piroxênio hospedeiro das inclusões de albita (melts) da área X (Calibração para piroxênio)

Amostra	Área	Ponto	Na₂O	FeO	CaO	SiO₂	MnO	TiO₂	MgO	Al₂O₃	Total
03jun2515-2	X	px-6	2,22	9,38	21,49	51,88	0,27	0,01	12,70	1,37	99,31
03jun2515-2	X	px-5	1,95	9,20	22,02	51,94	0,26	0,04	12,78	1,19	99,39

Para outras inclusões superficiais não foi determinada a composição de maneira precisa (ver TABELA 8 no APÊNDICE A) embora o hospedeiro tenha sido analisado (ver TABELA 6 no APÊNDICE A) e classificado. Isto ocorreu porque, ao analisar estas últimas inclusões, foi utilizada uma calibração da microsonda para piroxênio, e não foi obtido um bom fechamento da análise. Estas últimas inclusões se apresentaram ora ricas em Ti, Si, Ca, Fe, Al, ora ricas em Si, Ca, Fe, Al ora ricas em Si, Al e Na.

Podem ser aventadas algumas possibilidades para a ocorrência das inclusões sólidas que encontramos nos piroxênios:

1- São resquícios de minerais que durante a formação do piroxênio foram aprisionados, em processo semelhante ao de porfiroblastos de albita e cordierita que podem aprisionar outros minerais durante seu crescimento (WILLIAMS et al., 1970).

Esta hipótese tem a seu favor o fato das inclusões estudadas apresentarem, na análise por microsonda eletrônica, composição diferente de seu mineral hospedeiro (piroxênio) e semelhante ao de um mineral vizinho não classificado (como pode ser visto nas

TABELAS 1 e 2 e na TABELA 3), muito embora, em alguns casos, a análise não tenha apresentado fechamento (Total) satisfatório.

TABELA 3 - Análises (por microsonda eletrônica) selecionadas, do mineral hospedeiro (Px), de algumas de suas inclusões (Tap M1 e M2) e de um mineral vizinho (ao hospedeiro) rico em TiO₂ (Tap T2). (Calibração para piroxênios).

Amostra	Área	Ponto	Na ₂ O	FeO	CaO	SiO ₂	MnO	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Total
03jun2601-2	TA	Px	2,54	16,04	19,86	50,49	0,26	0,04	9,54	1,17	99,95
03 jun 2601-2	TA	TapM1	0,05	3,03	27,46	28,80	0,05	30,43	0,05	2,54	92,41
03 jun2601-2	TA	TapM2	0,02	3,35	27,76	28,36	0,06	29,15	0,02	2,89	91,61
03 jun 2601-2	TA	TapT2	0,02	2,70	27,46	28,46	0,04	29,28	0,03	2,84	90,83

2- Estas inclusões sólidas são inclusões fundidas.

Enfraquece esta hipótese o fato de os piroxênios estudados não serem magmáticos mas sim, metassomáticos. Ainda que inclusões fundidas secundárias em rochas metassomáticas já tenham sido descritas (por exemplo, SCHIANO et al., 1994), as inclusões sólidas estudadas no presente trabalho não formavam trilhas nas rochas hospedeiras como as mencionadas no artigo de Schiano et al. (1994).

As hipóteses formuladas sobre a origem destas inclusões sólidas carecem de maior número de dados e de estudo de maior número de inclusões.

8 USO DE LUZ SÍNCROTRON PARA ESTUDO DE IF

8.1 Introdução

Luz síncrotron pode ser entendida como uma designação ampla para todos os tipos de luz gerados por partículas relativísticas em trajetórias curvas (CASTRO, 2001). A radiação síncrotron compreende uma faixa de energia que varia do ultravioleta até raios-X moles, podendo chegar, mediante uso de dispositivos de inserção, até raios-X duros. (VANKO & MAVROGENES, 1998).

Atribui-se a Frantz et al. (1988) o mérito de terem sido os primeiros a demonstrar o potencial da microsonda de raios-X, originados de luz síncrotron, para análise elementar de IF (SAMSON et al., 2003). Frantz et al. (1988) realizaram testes em inclusões fluidas sintéticas utilizando a luz síncrotron, obtendo dados semiquantitativos da concentração de elementos dentro da inclusão. Após estes autores, vários outros utilizaram a luz síncrotron para estudar IF (por exemplo, MAVROGENES et al., 1995; PHILIPPOT et al., 2001; HAYASHI & IIDA, 2001, ALVES et al., 2001; RIOS et al., 2002).

Nos artigos pesquisados, diversas siglas foram empregadas relacionadas ao estudo de IF por luz síncrotron. Pode citar-se: XRF – X-ray fluorescence (FRANTZ et al. 1988); micro-SXRF- micro-Synchrotron X-Ray Fluorescence (ALVES et al. 2001); SXRFM- Synchrotron-Source X-ray Fluorescence Microprobe (VANKO & MAVROGENES, 1998). A designação mais adequada para o estudo de IF por luz síncrotron é SXRFM (Synchrotron-Source X-ray Fluorescence Microprobe ou microsonda por fluorescência de raios-X originados de luz síncrotron), porque esclarece de maneira breve o que é a técnica.

Em todos os artigos consultados foi utilizado, para estudo de IF, um feixe de luz síncrotron de dimensões reduzidas e, portanto, serão todos considerados como tratando do mesmo assunto. É importante, no entanto, que o leitor esteja atento para o fato que as afirmações feitas neste texto são relativas às técnicas utilizadas por autores específicos, não querendo dizer, necessariamente, que sejam expansíveis a todas as montagens experimentais possíveis.

Poucos pesquisadores brasileiros realizaram experimento com IF na linha D09B XRF Fluorescência de Raios-X do Laboratório Nacional de Luz síncrotron (LNLS) (por

exemplo, ALVES et al., 2001; RIOS et al., 2002). A literatura brasileira, em português, a respeito da utilização de luz síncrotron para o estudo de IF é escassa. Em função disto, este texto procurará abordar de maneira mais detalhada, tópicos desta metodologia.

8.2 Aplicações do método

A SXRFM é geralmente uma técnica não destrutiva, podendo ser aplicada para identificar o sistema químico que está presente nas IF e, também, para análise de elementos traço, tais como os elementos de transição (VANKO & MAVROGENES, 1998). Segundo Philippot et al. (2001), as fontes de luz síncrotron de terceira geração são uma técnica promissora para "localizar" metais traço em inclusões individuais (até o nível de dezenas de ppm) e, portanto, constituem uma ferramenta importante para reconstruir a cronologia relativa de eventos paleo-hidrotermais, responsáveis pela concentração de recursos econômicos.

Além de permitir análise qualitativa, o estudo por luz síncrotron possibilita análise semiquantitativa (FRANTZ et al, 1988; VANKO & MAVROGENES, 1998), quantitativa (MAVROGENES et al., 1995, VANKO & MAVROGENES, 1998) e elaboração de mapas de distribuição espacial de um elemento dentro da inclusão (PHILIPPOT et al., 2000; PHILIPPOT et al., 2001; HAYASHI & IIDA, 2001). Deve-se observar, no entanto, que a SXRFM é uma técnica complementar a outras metodologias de estudo de IF, como por exemplo, a microtermometria e a microsonda com laser Raman (VANKO & MAVROGENES, 1998).

Segundo Vanko & Mavrogenes (1998) a SXRFM baseada em análise por dispersão de energia de raios-X apresenta limitações que incluem o fato de só elementos com número atômico maior ou igual a 14 serem detectáveis, e de os limites de detecção de um determinado elemento variarem de um síncrotron para o outro.

8.3 Aspectos Práticos da Análise com Luz Síncrotron

Para análise por luz síncrotron, o material para estudo deve ser preparado de maneira específica. Podem ser confeccionadas lâminas bipolidas (HAYASHI & IIDA, 2001; MAVROGENES et al., 1995; VANKO & MAVROGENES, 1998) que serão posteriormente afixadas, mediante fita adesiva, em um porta-amostra, de maneira que os raios-X incidam somente sobre o material a ser analisado (VANKO & MAVROGENES, 1998).

O mapeamento prévio da inclusão fluida a ser estudada é também muito importante, a fim de permitir sua localização rápida, repetição de análises e estudo de sua geometria (MAVROGENES et al., 1995).

8.3.1 Mineral hospedeiro das IF

Segundo Vanko & Mavrogenes (1998) o feixe de raios-X produzido em um SXRFM penetra profundamente na maioria das amostras e, portanto, quando uma inclusão fluida é atingida um volume substancial do hospedeiro vizinho é também fluorescido. Ainda segundo estes autores, para algumas aplicações o estudo de IF em minerais, além do quartzo, pode ser possível, desde que se colete um espectro controle do mineral hospedeiro.

8.3.2 Tamanho das inclusões a serem estudadas

A determinação do tamanho e da geometria da inclusão é muito importante em estudos de microsonda, pois erros analíticos em função de determinações imprecisas no volume das IF podem ser substanciais (VANKO & MAVROGENES, 1998). Este fato é bem evidente no caso de estudos quantitativos, em que a determinação do volume analítico dentro da inclusão pode ser fonte de incerteza (MAVROGENES et al., 1995).

O tamanho da inclusão pode ser calculado utilizando uma ocular graduada de um microscópio petrográfico (VANKO & MAVROGENES, 1998). Para obter medidas mais precisas sobre as dimensões e a profundidade de uma inclusão fluida, uma “spindle stage” adaptada (que permite visualizar a inclusão fluida em três dimensões), pode ser utilizada (ANDERSON & BODNAR, 1993). Outros autores (por exemplo, MAVROGENES et al., 1995, VANKO et al., 2001) já utilizaram este equipamento para o estudo de IF com luz síncrotron.

8.3.3 Profundidade das IF a serem estudadas

A profundidade em que se encontra a inclusão fluida, relativamente à superfície da amostra, influencia o espectro que será obtido (VANKO & MAVROGENES, 1998). Ao

analisar IF com microsonda de raios-X, as radiações características de elementos mais pesados são menos absorvidas que a dos elementos mais leves (VANKO & MAVROGENES, 1998). Sendo assim, a profundidade deve ser medida com o máximo de precisão possível. Para tanto, pode ser utilizado o micrométrico, calibrado, de um microscópio convencional (FRANTZ et al., 1988; VANKO & MAVROGENES, 1998), ou uma “spindle stage” adaptada (ANDERSON & BODNAR, 1993).

8.3.4 Montagens experimentais

Duas abordagens para análise de IF com SXRF podem ser usadas, sendo que cada uma tem seus méritos (VANKO & MAVROGENES, 1998). Ambas podem fornecer uma composição química total para a inclusão fluida, desde que procedimentos de correção adequados sejam efetuados (VANKO & MAVROGENES, 1998).

Em uma abordagem, mais adequada para IF que contém minerais de saturação, cada inclusão fluida é irradiada em sua totalidade pelo feixe de luz síncrotron (FIG. 22) e os raios-X fluorescentes são entendidos com uma análise química total da inclusão (VANKO & MAVROGENES, 1998).

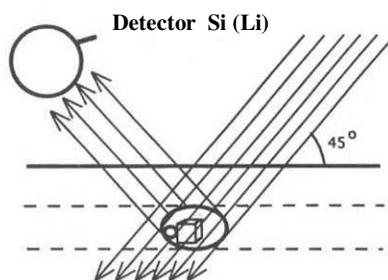


FIG. 22 Abordagem para estudo de inclusão fluida irradiando a inclusão inteira. Adaptado de Vanko & Mavrogenes (1998)

Uma outra abordagem, que é mais adequada para inclusões grandes ricas em líquido e que tem baixas concentrações de soluto, consiste em focalizar apenas uma porção da inclusão com um feixe bem pequeno (FIG. 23) (VANKO & MAVROGENES, 1998). Excita-se, assim, um volume em forma de prisma de uma fase homogênea (e.g. solução aquosa) dentro da inclusão fluida (VANKO & MAVROGENES, 1998). Neste caso, considera-se que a fluorescência de raios-X representa o número de átomos dentro desse volume excitado (VANKO & MAVROGENES, 1998).

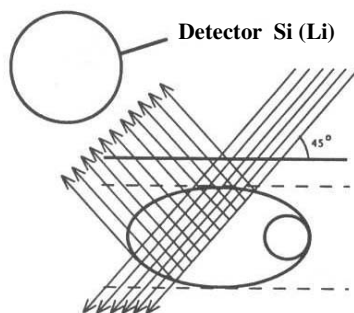


FIG. 23 Abordagem para estudo de inclusão fluida irradiando apenas parte da inclusão.
Adaptado de Vanko & Mavrogenes (1998)

8.4 Estudo dos Dados

De acordo com Vanko & Mavrogenes (1998) a análise dos dados de IF obtidos com a luz síncrotron inclui o estudo da intensidade dos picos referentes a cada elemento, a comparação do espectro obtido sobre a inclusão com o espectro controle (área “branca”) e a identificação dos picos de difração presentes.

Em se tratando de análise quantitativa, Rickers et al. (2004) mencionam que existe, a princípio, uma relação proporcional entre a intensidade da linha de fluorescência de um elemento exposto à luz síncrotron e a sua concentração. Segundo estes autores, esta relação pode possibilitar uma análise quantitativa, desde que sejam consideradas variáveis como a absorção energia-específica do feixe primário e a radiação fluorescente no meio circundante (por exemplo a amostra). Para análise quantitativa de IF usando luz síncrotron podemos citar, como fonte principal de incerteza, a determinação do volume analítico dentro das IF (MAVROGENES et al., 1995).

Philippot et al. (1998) realizaram estudos que indicaram que a relação $K\alpha / K\beta$, extraída diretamente do espectro de raios-X, pode ser utilizada como um termo acurado para cálculos de correção da absorção, ocorrida durante o trajeto do feixe de luz síncrotron em estudos quantitativos de IF. Ainda segundo estes autores, a única incerteza associada com o procedimento de correção baseado na relação $K\alpha / K\beta$ deriva da estimativa da espessura da inclusão, incerteza esta que pode ser minimizada quando a salinidade da inclusão é considerada.

Rickers et al. (2004) concluíram que a utilização das simulações com o método Monte Carlo, constituiu um avanço na análise quantitativa de inclusões fluidas, utilizando a

fluorescência de raios-X por radiação síncrotron (SR XRF). Segundo estes autores, esta simulação pode ser aplicada sem o uso de padrões internos (elementos dentro da inclusão) ou externos, proporcionando, no entanto, a mesma acurácia de protocolos de análise dos dados que são dependentes do uso de tais padrões.

8.5 A linha XRF do LNLS

O Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS) é um centro nacional de pesquisa do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), que por sua vez, faz parte do Ministério de Ciência e Tecnologia do Brasil (PÉREZ et al., 1999). Está localizado em Campinas - SP e, em suas instalações, apresenta uma linha de luz que possibilita estudos por fluorescência de raios-X (PÉREZ et al., 1999). Em nossos trabalhos utilizamos esta linha de luz.. A energia dos elétrons dentro do anel de armazenamento é 1,37 GeV com um campo magnético dipolar de 1,65 T (PÉREZ et al., 1999).

Na linha pode ser utilizado um feixe branco ou um feixe monocromático; uma janela de berilo de 125 μm para isolar o vácuo da linha, do vácuo do anel principal, um cristal monocromador channel-cut e um conjunto de fendas motorizadas controladas por computador para limitar o tamanho do feixe de luz, antes e depois do monocromador, fazem parte da linha de luz (PÉREZ et al., 1999). Detectores por dispersão de energia Si (LI) e HPGe integram o sistema de detecção da linha de luz (PÉREZ et al., 1999). Para maiores detalhes, sobre características técnicas desta linha de luz, o leitor é referido a Pérez et al. (1999)

Alguns detalhes sobre a montagem experimental que utilizamos no LNLS serão fornecidos mais adiante neste texto.

8.6 Montagem Experimental e Análises Realizadas

8.6.1 Montagem Experimental

Inicialmente as IF que preenchem os critérios para serem analisadas (localização e profundidade adequadas) foram estudadas microscopicamente e mapeadas no laboratório de Inclusões Fluidas e Metalogênese (LIFM) do CDTN através de fotografias e desenhos.

Nos piroxênios e no quartzo procuramos por inclusões grandes e que estivessem o mais superficial possível. Foi selecionado número expressivo de amostras para análise. Entretanto, em função de uma série de fatores que serão descritos em detalhe no item “8.6.3”, apenas algumas das IF foram analisadas.

Para a realização das medidas foi utilizada a linha D09B XRF Fluorescência de Raios-X do Laboratório Nacional de Luz síncrotron (LNLS) (FIG. 24). A luz síncrotron foi colimada, mediante uso de um capilar, para o tamanho de aproximadamente 20 X 25 μm . O deslocamento da amostra na linha de luz foi feito mediante motores de passo. A visualização da amostra foi feita mediante o uso de um microscópio óptico de aumento praticamente fixo (que podia ser modificado manualmente) ligado a uma câmera de vídeo que apresentava a imagem em um monitor de vídeo.

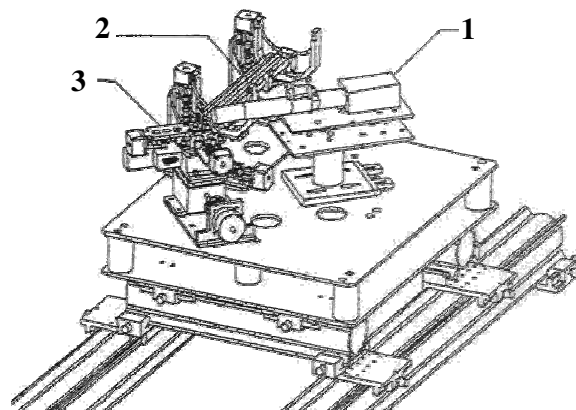


FIG. 24 Esquema simplificado, mostrando partes da linha de luz D09B XRF do LNLS. 1: Microscópio; 2: Mesa de alinhamento do capilar; 3: Equipamento para posicionamento da amostra. Adaptado de Pérez et al. (1999).

A amostra foi afixada em um porta-amostra de tamanho adequado para ser utilizado na linha de luz (FIG. 25). Inicialmente, foi utilizada, para precisar o local onde a luz síncrotron estava incidindo sobre a amostra, uma fita que se tornava fluorescente quando da incidência da luz síncrotron. Posteriormente, em função de problemas na localização da amostra (veja item 8.6.3), fixamos um fragmento dessa fita no porta-amostra juntamente com a amostra em estudo. Tal montagem propiciou um posicionamento mais preciso do feixe de luz sobre a área de interesse. O ajuste dos dados do espectro foi realizado, pelo pesquisador do LNLS Carlos Alberto Pérez, utilizando um software específico.

O software para ajuste dos dados forneceu valores da intensidade dos picos de alguns elementos, juntamente com o sigma (desvio padrão) para cada um deles. Esses dados foram analisados segundo o procedimento sugerido pelo pesquisador Carlos Alberto Pérez (2004, comunicado pessoal), que consiste em:

1 - **Subtração**: espectro da área que contém a inclusão fluida - espectro da área “branca”:

$$F - Br \quad (1)$$

2 - **Soma**: sigma do espectro da área que contém a inclusão fluida + sigma do espectro da área “branca”:

$$\text{Soma sigma} \quad (2)$$

3 - **Subtração** de (1) - (2) (3)

O passo de número (3) é executado se o passo número (1) fornece valor maior que zero. Caso o valor da subtração realizada em (3) seja superior a 0 (zero), considera-se que o elemento se apresentou em maior quantidade na área que contém a inclusão fluida, em relação à área “branca”. Tal situação, sugere que o elemento analisado esteja dentro da inclusão fluida.

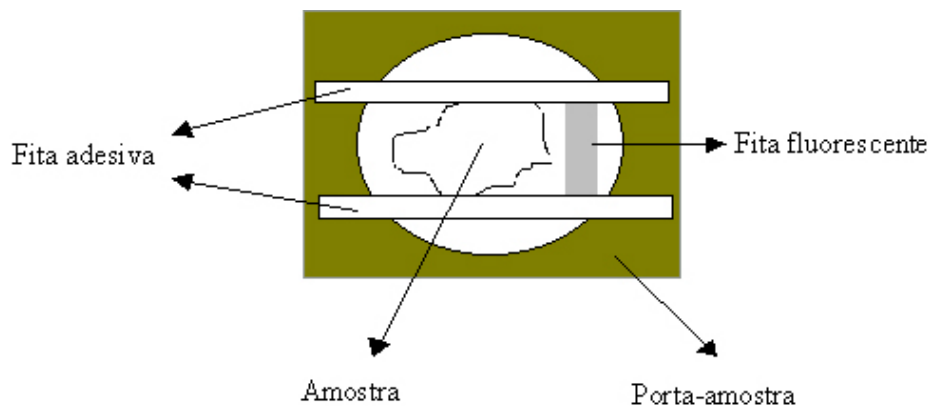


FIG. 25 Representação esquemática da montagem do porta-amostra + amostra utilizado no LNLS. O tamanho aproximado do porta-amostra é 46 X 35 mm. O diâmetro do orifício circular é de aproximadamente 25 mm.

8.6.2 Análises Realizadas

PIROXÊNIO

Durante os estudos foram obtidos dezenas de espectros de pontos sobre inclusões em piroxênio, procurando, inclusive, fazer o mapeamento de IF com luz síncrotron. Entretanto, em função de problemas ocorridos durante as medidas (veja item 8.6.3), a maioria dos espectros foi descartada, tendo restado, quatro espectros.

Os quatro espectros obtidos foram nomeados p1a008, p1a009, p1a010 e p1a011, sendo que p1a008 e p1a009 foram obtidos principalmente da área que continha uma inclusão fluida, p1a010 foi obtido da área que continha outra e p1a0011 foi obtido de uma área “branca”. As IF analisadas estavam presentes na lâmina bipolar da amostra 03jun25-13. Foram classificadas (após as análises) como primárias, utilizando para tanto o mesmo critério aplicado às demais inclusões primárias deste trabalho (no caso das inclusões analisadas por luz síncrotron, os limites do cristal também não eram nítidos). O fragmento de amostra no qual se encontravam estas inclusões foi submetido a resfriamento quando do estudo preliminar de inclusões vizinhas às estudadas neste trabalho.

As inclusões analisadas e aqui apresentadas eram constituídas pelo menos de bolha e de fase sugestiva de líquido. Existe a possibilidade de serem IF salinas, pois são originárias da mesma jazida onde Fuzikawa & Alves (1988) estudaram IF parecidas em piroxênios, tendo encontrado salinidade variável.

Foi escolhida como área “branca”, uma região do piroxênio, próxima às inclusões alvo, que estivesse o mais livre possível de IF. A localização aproximada das áreas irradiadas com luz síncrotron pode ser vista na FIG. 26.

A profundidade aproximada, medida nas instalações do LNLS, destas inclusões, foi de 15 μm (veja item 8.6.3).

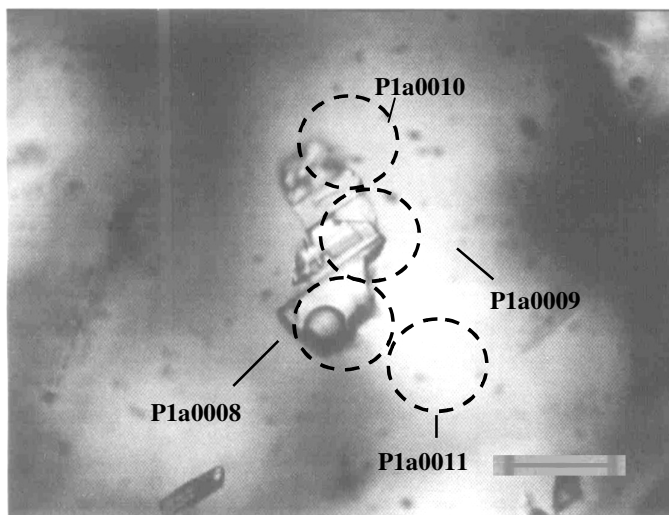


FIG. 26 Inclusões Fluidas e área “branca” analisadas em piroxênio, no LNLS. A posição, forma e tamanho das áreas irradiadas (círculos pontilhados) é apenas aproximada, para efeito esquemático. Considerar que o feixe de luz síncrotron incide em um ângulo de 45° sobre a superfície da amostra. Amostra 03jun25-13. A barra equivale a $\sim 20 \mu\text{m}$. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio.

Espectros p1a0008 e p1a0011

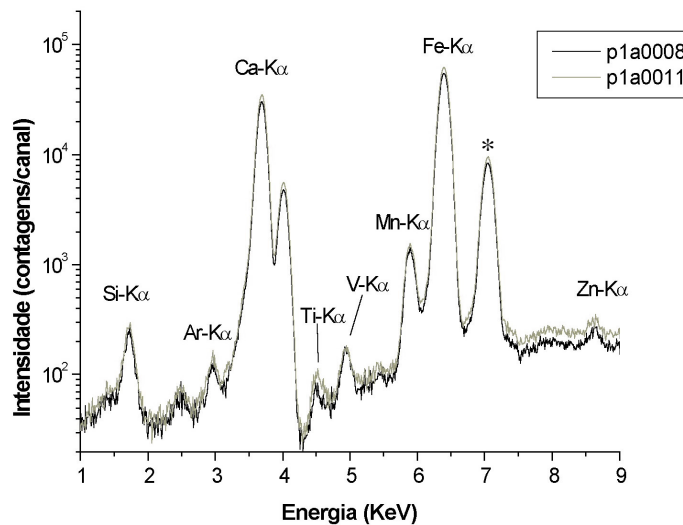


FIG. 27 Espectros p1a0008 e p1a0011. * = pico não nomeado.

Pode-se observar, na FIG. 27, que há sobreposição praticamente completa de todos os picos dos espectros, sendo que em alguns pontos o espectro p1a0011 (área “branca”)

supera as medidas do p1a0008. Os elementos evidenciados pelos picos sobrepostos referem-se provavelmente ao mineral hospedeiro (VANKO & MAVROGENES, 1998).

Elementos como o cloro, que poderiam estar presentes caso se tratasse de IF salinas, não foram detectados, o que pode ser relacionado à profundidade em que se encontravam as inclusões (VANKO & MAVROGENES, 1998) ou a uma localização inadequada do feixe de luz síncrotron sobre a amostra (veja item 8.6.3).

Na análise matemática dos dados (TABELA 4), seguindo o procedimento sugerido por Carlos A. Perez (2004, Comunicado pessoal) é possível observar que apenas o pico referente ao Vanádio teve contagem superior no espectro da área que contém a inclusão (p1a0008) que no da área “branca”, já considerado o desconto da soma dos sigmas.

Uma primeira hipótese para explicar este dado, seria que o V está presente dentro da inclusão fluida. Entretanto, algumas considerações devem ser feitas ao avaliar esta hipótese.

A maior intensidade do pico de Vanádio pode estar relacionada a uma variação da concentração deste elemento dentro do próprio mineral, uma vez que, ao irradiar uma inclusão fluida, parte do hospedeiro é também fluorescida (VANKO & MAVROGENES, 1998). Este aspecto é importante no caso das IF que analisamos, pois estas apresentavam diâmetro inferior ao tamanho do feixe de luz síncrotron. A presença de inclusões na vizinhança ou mesmo sob o feixe de luz síncrotron, que poderiam ter sido fluorescidas inadvertidamente, pode também ter influenciado o resultado. Existe ainda, a possibilidade de contaminação da amostra, o que poderia causar resultados imprevisíveis.

Os elementos evidenciados nos espectros (p1a0008 e p1a0011) - Si, Ca, Ti, Mn, Fe - após ajuste dos dados pelo pesquisador Carlos Alberto Pérez, são elementos típicos de um piroxênio (KLEIN, 2002). O elemento Ar provavelmente é originado do ar assim como mencionado por Hayashi & Iida (2001).

Caso o estudo por luz síncrotron tivesse detectado, nas inclusões, de maneira inequívoca, elementos como o Ca e o Cl, estes dados poderiam ser cruzados com dados oriundos de determinação do ponto eutético da solução da inclusão fluida, o que produziria um dado confiável a respeito da composição salina da inclusão.

Espectros p1a0009 e p1a0011

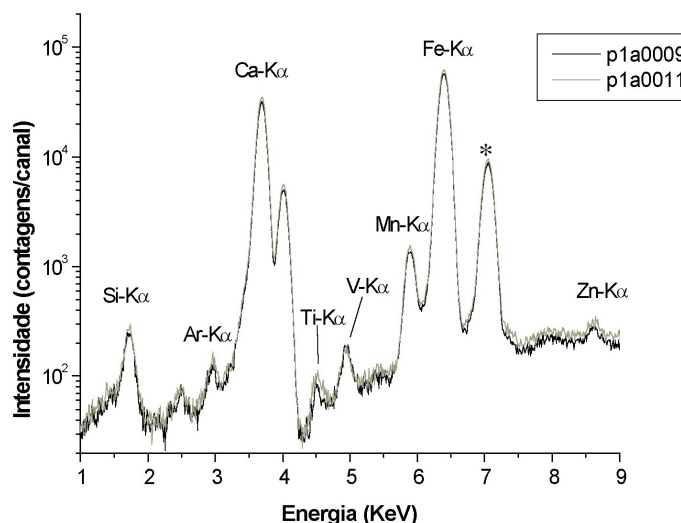


FIG. 28 Espectros p1a0009 e p1a0011. * = pico não nomeado.

Podemos notar na FIG. 28 que o espectro p1a0009 também apresenta uma sobreposição importante ao espectro da área “branca”, p1a0011. A análise matemática (TABELA 4) revela que apenas pico referente ao Vanádio teve contagem superior no espectro da área que contém a inclusão (p1a0009) em relação ao da área “branca” já considerados o desconto da soma dos sigmas, tendo a mesma interpretação do Vanádio verificado no espectro p1a0008. Os demais elementos evidenciados no espectro p1a0009, após o ajuste dos dados, são os mesmos que os evidenciados no espectro p1a0008 tendo também, a mesma interpretação.

Espectros p1a0010 e p1a0011

Podemos notar, na FIG. 29, que o espectro p1a0010 também apresenta uma sobreposição importante ao espectro da área “branca”, p1a0011. A análise matemática (TABELA 4) revela, assim como no caso do p1a0008 e p1a0009, que apenas o pico referente ao Vanádio teve contagem superior no espectro da área que contém a inclusão (p1a0010) que no da área “branca” (já considerados o desconto da soma dos sigmas), tendo a mesma interpretação do Vanádio identificado nos espectros p1a0008 e p1a0009. Os demais elementos evidenciados no espectro p1a0010, após o ajuste dos dados, são os mesmos que os evidenciados no espectro p1a0008 tendo também, a mesma interpretação.

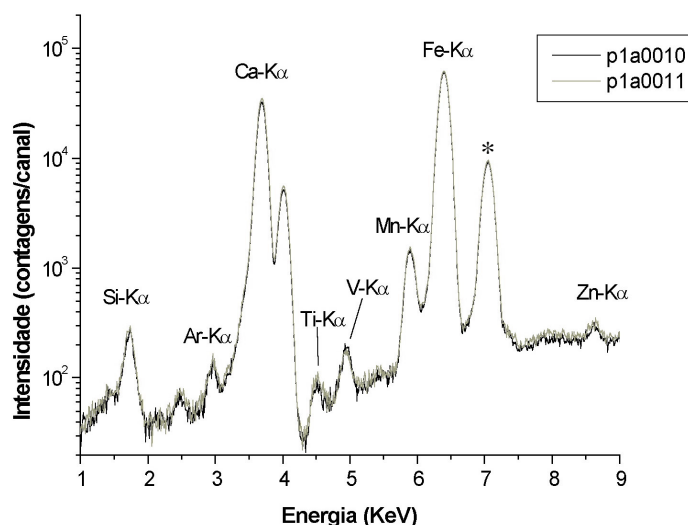


FIG. 29 Espectros p1a0010 e p1a0011. *= pico não nomeado.

QUARTZO

Dois espectros foram obtidos, um (c1a0001) da área que continha uma inclusão bifásica de origem indeterminada, outro de área “branca”, (c1a0002) (FIG. 30). A inclusão localizava-se na lâmina bipolarida da amostra 03jun25-13. A inclusão encontrava-se, segundo medida no LNLS, a $\sim 21 \mu\text{m}$ de profundidade (veja item 8.6.3).

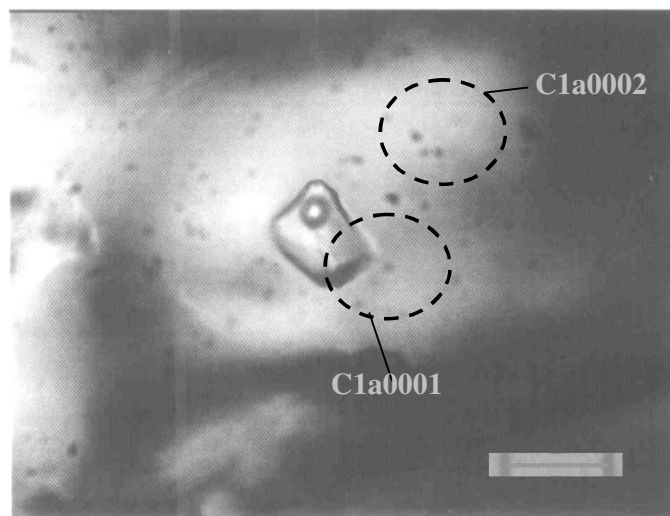


FIG. 30 Inclusão fluida e área “branca” analisadas em quartzo, no LNLS. A posição das áreas irradiadas (círculos pontilhados) é apenas aproximada, para efeito esquemático. A barra equivale a $\sim 20 \mu\text{m}$. Considerar que o feixe de luz síncrotron incide em um ângulo de 45° sobre a superfície da amostra. Amostra 03jun25-13. Imagem invertida (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio.

Espectros c1a0001 e c1a0002

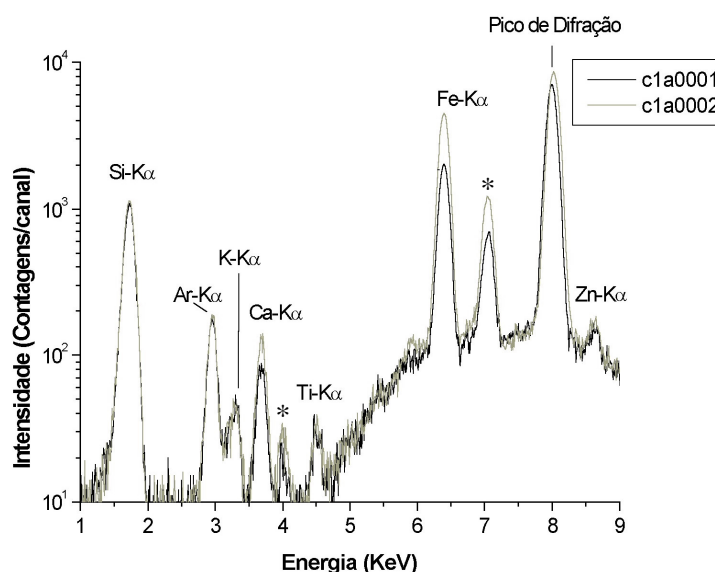


FIG. 31 Espectro c1a0001 e c1a0002. *= picos não nomeados.

Podemos observar, na FIG. 31, que há sobreposição praticamente completa dos espectros sendo que em alguns pontos o espectro c1a0002 supera as medidas do c1a0001. Os elementos evidenciados pelos picos sobrepostos referem-se provavelmente ao mineral hospedeiro (VANKO & MAVROGENES, 1998). Poderiam ter contribuído para este resultado da análise, a profundidade acentuada da inclusão estudada (VANKO & MAVROGENES, 1998) e/ou um posicionamento incorreto do feixe de luz síncrotron sobre a amostra.

O mineral hospedeiro da inclusão fluida é o quartzo, mas outros elementos (Ar, K, Ca, Ti, Fe, Zn) apareceram no espectro além do silício e oxigênio. Isto pode ter ocorrido por vários motivos. O elemento Ar é provavelmente do ar como mencionado por Hayashi & Iida (2001). Para os outros elementos identificados, algumas hipóteses são possíveis: podem representar elementos traço no quartzo ou podem ter sido identificados devido ao fato de o feixe de luz síncrotron ter penetrado profundamente na amostra (VANKO & MAVROGENES, 1998), podendo ter atingido em seu trajeto um mineral adjacente ao quartzo.

Realizando a análise matemática dos espectros (TABELA 5), foi verificado que nenhum dos elementos apresenta concentração maior na área irradiada, que inclui a inclusão

fluida, do que na área “branca”. Embora os elementos Ar, K e Ti apresentem, inicialmente, valores superiores na área que contém a inclusão fluida, quando se considera a soma dos sigmas essa vantagem desaparece.

8.6.3 Problemas detectados durante a realização dos experimentos - Fontes de imprecisão dos dados

Durante a realização dos experimentos, vários problemas foram detectados. Estes problemas serão mencionados com o intuito de esclarecer alguns aspectos da metodologia que utilizamos e dos resultados que obtivemos.

Os principais problemas detectados foram:

- Vibração significativa da mesa onde se encontrava o equipamento utilizado para realizar as medidas com a luz síncrotron. Tal vibração provocou pequena oscilação da imagem no monitor de estudo e provavelmente oscilação na posição do feixe de luz síncrotron sobre a amostra. Este problema tornou imprecisa a localização da área atingida por nosso feixe de luz, dificultando a interpretação dos dados.

- Dificuldades para posicionar o feixe de luz. Durante a movimentação da amostra, mediante a utilização de um motor de passo, percebemos que o feixe de luz síncrotron era também deslocado para uma região indesejável. Tal movimentação tornava imprecisa a definição da área sobre a qual o feixe estava incidindo. Para contornar este problema, afixamos um fragmento de fita fluorescente no porta-amostra, juntamente com a amostra, a fim de que a posição do feixe pudesse ser conferida antes e após cada medida (veja FIG. 25).

- A localização das IF a serem estudadas também foi problemática. O equipamento óptico do LNLS naquela linha de luz proporcionava um aumento praticamente fixo (cuja mudança era manual e trabalhosa). Isto fez com que o processo de localização das IF para estudo na amostra fosse lento e desgastante. O fato de nosso equipamento de fotografia ter fornecido imagens invertidas (efeito fotográfico) em relação à imagem visualizada na ocular do microscópio também contribuiu para a que o processo de localização das IF fosse lento.

- A determinação da profundidade das IF em relação à superfície da amostra foi imprecisa. Ao final dos experimentos, foi verificado que a profundidade na qual as IF estudadas se encontravam era superior a profundidade determinada no LIFM-CDTN, mediante o uso do micrométrico padronizado de um microscópio petrográfico comum. Para o caso da inclusão fluida no quartzo, por exemplo, a diferença foi de ~13 μm . É importante,

também, considerar que o equipamento do LNLS para realizar estas medidas não se encontrava em condições ótimas de utilização. Um outro aspecto relevante é que, para aferir com maior precisão a profundidade em que se encontra a inclusão, esta profundidade deve ser corrigida em função índice de refração do mineral hospedeiro (VANKO & MAVROGENES, 1998), correção que não foi realizada neste trabalho.

TABELA 4 – Análise Matemática dos Espectros obtidos no piroxênio (Parte 1)

Espectros	Z=14	sigma14	Z=18	Sigma18	Z=20	sigma20	Z=22	sigma22	Z=23	sigma23	Z=25	sigma25
p1a0008	3,77E-02	8,75E-04	1,46E-02	6,59E-04	6,31E-00	9,26E-03	3,20E-03	5,38E-04	2,74E-02	7,80E-04	2,40E-01	2,37E-03
p1a0011	4,77E-02	9,44E-04	1,73E-02	7,31E-04	7,24E-00	9,85E-03	7,41E-03	6,25E-04	2,09E-02	8,51E-04	2,95E-01	2,29E-03
Elementos	Si		Ar		Ca		Ti		V		Mn	
F – Br	-9,99E-03		-2,71E-03		-9,34E-01		-4,20E-03		6,49E-03		-5,47E-02	
Soma Sigma		1,82E-03		1,39E-03		1,91E-02		1,16E-03		1,63E-03		4,66E-03
(F-Br) - Soma Sigma									4,86E-03			
Espectros												
P1a0009	3,93E-02	8,97E-04	1,38E-02	6,56E-04	6,58E-00	9,43E-03	3,11E-03	5,49E-04	3,06E-02	8,03E-04	2,30E-01	2,54E-03
P1a0011	4,77E-02	9,44E-04	1,73E-02	7,31E-04	7,24E-00	9,85E-03	7,41E-03	6,25E-04	2,09E-02	8,51E-04	2,95E-01	2,29E-03
F – Br	-8,43E-03		-3,49E-03		-6,57E-01		-4,30E-03		9,67E-03		-6,52E-02	
Soma Sigma		1,84E-03		1,39E-03		1,93E-02		1,17E-03		1,65E-03		4,83E-03
(F-Br) – Soma Sigma									8,02E-03			
Espectros												
P1a0010	4,06E-02	9,09E-04	1,54E-02	6,81E-04	6,76E-00	9,54E-03	5,12E-03	5,75E-04	3,08E-02	8,15E-04	2,54E-01	2,43E-03
P1a0011	4,77E-02	9,44E-04	1,73E-02	7,31E-04	7,24E-00	9,85E-03	7,41E-03	6,25E-04	2,09E-02	8,51E-04	2,95E-01	2,29E-03
F – Br	-7,10E-03		-1,88E-03		-4,85E-01		-2,29E-03		9,84E-03		-4,13E-02	
Soma Sigma		1,85E-03		1,41E-03		1,94E-02		1,20E-03		1,67E-03		4,72E-03
(F-Br) - Soma Sigma									8,17E-03			

F-Br = Diferença entre o espectro obtido da área que contém a inclusão fluida e o obtido da área “branca”

Soma sigma = Soma dos sigmas do espectro da área que contém a inclusão e do sigma do espectro obtido da área “branca”

(F –Br) – Soma Sigma = Termo que verifica se a diferença F-Br é significativa, e que é aferido se $F-Br > 0$. Caso este termo tenha valor maior que zero a diferença F-BR é significativa (o elemento, segundo análise dos espectros, está em maior quantidade na área irradiada que contém a inclusão fluida). Podemos observar que nos espectros obtidos este termo ((F-Br) – Soma Sigma) é positivo apenas para o V.

TABELA 4 (Continuação)

Espectros	Z=26	sigma26	Z=30	sigma30
p1a0008	1,21E+01	1,31E-02	1,83E-02	1,14E-03
p1a0011	1,36E+01	1,36E-02	2,06E-02	1,26E-03
Elementos	Fe		Zn	
F – Br	-1,58E-00		-2,32E-03	
Soma Sigma		2,66E-02		2,41E-03
(F-Br) - Soma Sigma				
Espectros				
P1a0009	1,25E+01	1,33E-02	1,47E-02	1,21E-03
P1a0011	1,36E+01	1,36E-02	2,06E-02	1,26E-03
F – Br	-1,13E-00		-5,93E-03	
Soma Sigma		2,69E-02		2,47E-03
(F-Br) - Soma Sigma				
Espectros				
P1a0010	1,32E+01	1,36E-02	1,79E-02	1,22E-03
P1a0011	1,36E+01	1,36E-02	2,06E-02	1,26E-03
F – Br	-4,60E-01		-2,77E-03	
Soma Sigma		2,72E-02		2,48E-03
(F-Br) - Soma Sigma				

TABELA 5 - Análise Matemática dos Espectros obtidos no quartzo (Parte 1)

Espectros	Z=14	sigma14	Z=18	sigma18	Z=19	Sigma19	Z=20	sigma20	Z=22	sigma22	Z=26	sigma26
c1a0001	2,25E-01	1,78E-03	3,51E-02	6,90E-04	8,34E-03	4,11E-04	1,70E-02	5,31E-04	2,84E-03	3,32E-04	4,17E-01	2,52E-03
c1a0002	2,33E-01	1,80E-03	3,51E-02	6,96E-04	8,30E-03	4,07E-04	2,61E-02	6,31E-04	2,79E-03	3,55E-04	9,32E-01	3,65E-03
Elementos	SI		Ar		K		Ca		Ti		Fe	
F - Br	-7,60E-03		6,00E-05		4,00E-05		-9,04E-03		5,40E-05		-5,15E-01	
Soma Sigma		3,58E-03		1,39E-03		8,19E-04		1,16E-03		6,86E-04		6,17E-03
(F-Br) - (Soma Sigma)			-1,33E-03		-7,79E-04				-6,32E-04			

TABELA 5 – (Continuação)

Espectros	Z=30	sigma30
c1a0001	1,26E-02	8,76E-04
c1a0002	1,54E-02	8,93E-04
Elemento	Zn	
F - Br	-2,79E-03	
Soma Sigma		1,77E-03
(F-Br) - (Soma Sigma)		

F-Br = Diferença entre o espectro obtido da área que contém a inclusão fluida e o obtido da área “branca”.

Soma sigma = Soma dos sigmas do espectro da área que contém a inclusão e do sigma do espectro obtido da área “branca”.

(F - Br) – Soma Sigma = Termo que verifica se a diferença F-Br é significativa, e que é aferido se **F-Br > 0**. Caso este termo tenha valor maior que zero a diferença entre F-BR é significativa (o elemento, segundo análise dos espectros, está em maior quantidade na área irradiada que contém a inclusão fluida). Podemos observar que para nenhum elemento este termo ((F-Br) – Soma Sigma) foi maior que zero.

9 DISCUSSÃO FINAL

O presente estudo procurou colocar em discussão assuntos relacionados à piroxênios associados à mineralização uranífera, da Jazida Cachoeira. Foram abordadas, de forma criteriosa, as características mineralógico-paragenéticas da associação mineral e a microscopia de inclusões fluidas e sólidas presentes nos piroxênios associados à mineralização. Da mesma forma foi abordada criticamente a metodologia de estudo de inclusões fluidas mediante luz síncrotron.

Os piroxênios analisados na microsonda eletrônica foram selecionados em lâmina espessa, o que fez com que o mineral fosse identificado principalmente por sua cor. Em função dessa limitação da amostra, não pode ser descartada totalmente a possibilidade de alguns dos cristais que classificamos como piroxênios, serem outro mineral de composição próxima (por exemplo o anfibólio). A classificação desses minerais como piroxênio ficou fortalecida devido a pouca quantidade de anfibólio identificada na lâmina delgada correspondente e, ao bom fechamento das análises de microsonda. As análises realizadas em piroxênios de amostras mineralizadas puderam ser classificadas ora como augita, ora com diopsídio e ora aegirina-augita. Entretanto, foi verificada a presença de termos de composição intermediária, por exemplo, entre diopsídio e augita.

Nas lâminas estudadas, foi encontrada uma fase cálcica (piroxênio diopsídico) já descrita em estudos anteriores (LOBATO & FYFE, 1990). A aegirina-augita também já havia sido descrita em estudos anteriores (por exemplo, LOBATO & FYFE, 1990; CRUZ, S., 2004). Com relação à fase augítica, não foram encontrados relatos anteriores. Um metassomatismo cálcico, poderia explicar a formação do piroxênio rico em cálcio.

Os resultados aqui apresentados permitiram identificar duas fases de plagioclásio. Um plagioclásio fortemente alterado, e um outro, menos alterado. O primeiro é provavelmente contemporâneo ao piroxênio. O plagioclásio fortemente alterado aparece restritamente nas lâminas estudadas, porém associado ao piroxênio, formando faixas em torno dele (embora não em todos os casos).

No presente estudo foram encontrados indícios de mineralização uranífera posterior à formação do piroxênio. Esta proposta está baseada na ocorrência de cristais de uraninita nas bordas, ou em trilhas que cortam estes cristais, ou acompanhando a clivagem do mineral. A

análise por luz síncrotron pode também ser útil na confirmação desse tipo de dado. Nas análises realizadas no LNLS não foi identificado U no piroxênio, entretanto, tratava-se de uma amostra de mineralização duvidosa. A pesquisa em amostras fortemente mineralizadas é tema interessante.

Algumas das principais feições petrográficas observadas nas amostras estudadas podem ser observadas na FIG. 32.

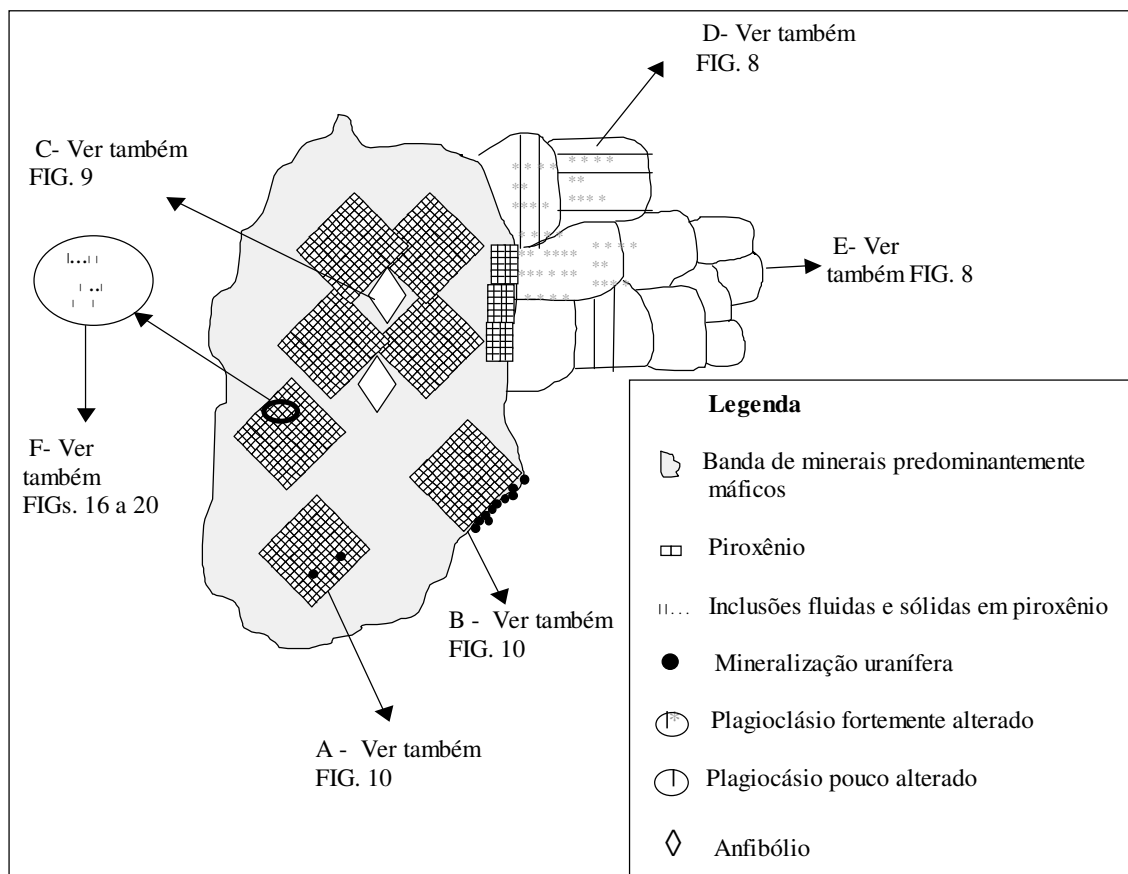


FIG. 32 Representação esquemática de algumas das principais observações petrográficas nas lâminas estudadas. Imagem fora de escala. A - Mineralização no interior do cristal de piroxênio; B- Mineralização nas bordas do piroxênio; C - Anfibólio incluído na massa de piroxênio. D- Plagioclásio fortemente alterado contornado piroxênio; E - Plagioclásio pouco alterado; F- IF alinhadas e inclusões sólidas, em piroxênio.

Com relação ao estudo microscópico das inclusões fluidas nos piroxênios, foram verificadas feições interessantes. Surpreende, por exemplo, a quantidade de IF encontradas nos cristais. O piroxênio é um mineral anidro (não apresenta grupo OH – KLEIN, 2002). Por isso, seria de esperar que apresentasse poucas ou nenhuma inclusão fluida aquosa. A explicação para a presença do elevado número de inclusões classificadas como primárias observadas no piroxênio pode ser procurada na provável origem desse mineral.

Um anfibólio reagindo com a sílica por ventura presente no sistema, poderia ter originado piroxênio e uma fase aquosa. Essa fase aquosa remanescente poderia estar parcial ou totalmente representada pelas inclusões fluidas classificadas como primárias do piroxênio. A reação abaixo (MARUÉJOL, 1989) mostra um exemplo de anfibólio em presença de sílica, dando origem à piroxênio e fluido (água):



É importante considerar, também, que alguns dos cristais que foram aqui classificados como piroxênios, poderiam ser anfibólios, o que também, poderia justificar a presença de inclusões aquosas.

A microscopia de inclusões fluidas desenvolvida neste trabalho permitiu reconhecer tipos morfológicos presentes nos cristais de piroxênio. Foram encontradas inclusões que foram classificadas como primárias, do tipo bifásica e do tipo trifásica, sendo que estas últimas, além da bolha e da fase sugestiva de líquido, apresentavam fases sólidas geralmente amorfas, que em alguns casos mostravam-se birrefringentes.

Algumas das IF encontradas são semelhantes às relatadas em estudos anteriores em piroxênios (FUZIKAWA & ALVES, 1988) da Jazida Cachoeira. Foi constada, no entanto, pelo menos uma diferença entre as IF estudadas por aqueles autores e as aqui estudadas. Fuzikawa & Alves (1988) não relatam fases sólidas birrefringentes em inclusões primárias de piroxênios.

As fases sólidas birrefringentes dentro das inclusões poderiam apresentar a composição de carbonato. Aspectos como a determinação precisa da composição dessa fase sólida, e de sua origem, são importantes uma vez que o carbonato é citado como relacionado ao transporte do U em Lagoa Real (FUZIKAWA, 1980; MARUÉJOL, 1989).

A pesquisa detalhada de IF em outros minerais da jazida, como o anfibólio e a granada, será muito interessante, visto que esses minerais, assim como o piroxênio, associam-se à mineralização uranífera (LOBATO & FYFE, 1990).

Foram encontradas várias inclusões sólidas nos piroxênios. Algumas delas, em diopsídio, foram analisadas com a microsonda eletrônica e apresentaram composição inequivocamente albítica. Tais inclusões são, muito provavelmente, anteriores ao seu hospedeiro.

As inclusões sólidas poderiam representar:

(1) Resquícios de minerais englobados pelo piroxênio durante sua formação (cristais arrancados das paredes das encaixantes dos albititos); ou

(2) Inclusões fundidas. Esta hipótese carece de dados e, é bem improvável. Enfraquece esta hipótese, por exemplo, o fato de as características petrográficas dessas inclusões não serem compatíveis com inclusões fundidas descritas em ambientes metassomáticos por Schiano et al. (1994).

Estudos mais detalhados sobre estas inclusões sólidas serão relevantes. Estudos em inclusões sólidas em outros minerais além do piroxênio, também serão muito esclarecedores. No caso de se tratarem de inclusões fundidas o estudo em outros minerais é importante pois, segundo Samson et al. (2003), os piroxênios não são muito adequados para o estudo de inclusões fundidas, em função da dificuldade de determinar quanta cristalização ou “melting” ocorreu após o aprisionamento do “melt”.

A metodologia de análise de IF por Luz Síncrotron constitui ferramenta poderosa de análise apresentando, como algumas de suas propriedades, capacidade de propiciar a elaboração de mapas de distribuição espacial de um elemento dentro da inclusão (PHILIPPOT et al., 2000; PHILIPPOT et al., 2001; HAYASHI & IIDA, 2001), e capacidade de detectar elementos traços (VANKO & MAVROGENES, 1998). Neste trabalho, objetivou-se estudar a metodologia de estudo de inclusões fluidas utilizando luz síncrotron, considerando que a literatura brasileira (em língua portuguesa), abordando esta metodologia é escassa.

Os estudos de IF realizados na linha de luz XRF do LNLS serão facilitados e fornecerão resultados mais precisos mediante otimização de aspectos de seu funcionamento. Tais aspectos incluem redução das dimensões do feixe de luz síncrotron, melhor controle do equipamento de deslocamento da amostra e redução da vibração dos aparelhos de medida.

A determinação precisa da profundidade em que se encontra a inclusão fluida é um outro fator indispensável para obtenção de dados significativos (VANKO & MAVROGENES, 1998), sendo recomendado ao pesquisador que deseje estudar IF mediante estudos de luz síncrotron que obtenha este dado de maneira confiável.

A análise realizada no LNLS indicou a provável presença de vanádio em inclusões fluidas em piroxênio de Lagoa Real.

A confirmação da presença do V nas IF do piroxênio requer estudos mais detalhados. Em Lagoa Real, a associação de V com rochas mineralizadas em urânio é descrita (LOBATO

& FYFE, 1990), o que é fator de estímulo para a pesquisa, em maior escala, de V em IF de minerais altamente mineralizados em U.

Um outro aspecto muito importante, que futuramente poderá ser verificado com estudos luz síncrotron, é a presença de U dentro de IF primárias. Tal achado poderia estabelecer uma correlação genética importante entre o mineral hospedeiro desta inclusão fluida e a mineralização uranífera. É fator de estímulo para esse trabalho o fato de o U já ter sido identificado em IF de um depósito de urânio (na Rússia), utilizando luz síncrotron (PHILIPPOT et al., 2000).

A obtenção de dados nas IF do quartzo, mediante uso da luz síncrotron, foi prejudicada por limitações da amostra analisada. Provavelmente a profundidade acentuada em que a inclusão se encontrava, impediu que dados relativos à inclusão fluida pudessem ser obtidos de maneira inequívoca. A importância da profundidade na obtenção de resultados utilizando luz síncrotron, já foi descrita por outros autores (por exemplo, VANKO & MAVROGENES, 1998; ALVES et al., 2001; RIOS et al., 2002).

10 CONCLUSÕES

1- A análise por microsonda eletrônica permitiu classificar os piroxênios estudados nesta dissertação ora como augita ora como diopsídio e ora como aegirina-augita, ocorrendo também termos intermediários, por exemplo entre augita e diopsídio.

2- No piroxênio foram encontradas IF possivelmente primárias do tipo bifásica e do tipo trifásica, sendo que algumas delas, são semelhantes às relatadas em estudos anteriores na Jazida Cachoeira.

3- A presença de fases sólidas birrefringentes dentro de algumas IF possivelmente primárias é indicadora da presença de carbonatos.

4- A possível presença de V nas IF analisadas no piroxênio é de difícil interpretação.

5- Os dados obtidos indicam que o piroxênio estudado está relacionado a uma importante fase de metassomatismo cálcico.

6- A precipitação uranífera, pelo menos nas amostras estudadas, não estaria totalmente relacionada com a precipitação do piroxênio rico em cálcio. Portanto não estaria totalmente relacionada ao metassomatismo cálcico que originou esse piroxênio.

7- O estudo por luz síncrotron não detectou a presença de U nos fluidos e no hospedeiro (piroxênio) estudado. A pesquisa do U em amostras altamente mineralizadas será interessante para esclarecer melhor a relação entre o U e os piroxênios.

9- Neste estudo foi possível diferenciar claramente duas gerações de plagioclásios. Uma mais velha, fortemente alterada, e uma mais nova, menos alterada. Não foi encontrada uma explicação para o fato dos plagioclásios fortemente alterados formarem coroas em torno de alguns dos cristais de piroxênio.

10- A presença de inclusões sólidas de albita em piroxênios sugere que estas representam uma fase de metassomatismo sódico precoce ou sejam cristais incorporados pelo fluido antes da formação do diopsídio. Trabalhos mais detalhados envolvendo inclusões sólidas seriam recomendáveis.

11- A abordagem crítica da metodologia de análise de IF por Luz síncrotron (Linha de luz, D09B XRF Fluorescência de Raios-X do LNLS) constitui uma importante contribuição já que, não foram encontradas abordagens de autores brasileiros (em língua portuguesa) similares na área das Geociências no Brasil. Essa metodologia apresenta-se como ferramenta poderosa de análise.

12- A determinação precisa da profundidade em que se encontra a inclusão é fator indispensável para obtenção de dados significativos na área estudada. Recomenda-se ao pesquisador que deseje estudar IF mediante luz síncrotron, que obtenha a medida da profundidade da inclusão de maneira confiável.

13- Trabalhos mais detalhados das inclusões fluidas em piroxênios seriam interessantes a fim de esclarecer de maneira mais precisa o processo de mineralização de urânio nos albititos. O estudo em outros minerais da jazida, como anfibólios e granadas, também seria muito enriquecedor.

14- A gênese da Província Uranífera de Lagoa Real é assunto de grande complexidade cuja resolução completa, apesar dos extensos estudos já realizados na área, demandará, ainda, trabalhos rigorosos.

15- Esta dissertação mostra que, no atual estágio do conhecimento, é interessante desenvolver estudos pontuais e que contribuam para esclarecer, peça por peça, o quebra-cabeça da gênese da Província Uranífera de Lagoa Real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIN, F.F.DE. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as Revelações Almeidianas ao delimitá-lo. In: MANTESSO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C.D.R.; BRITO-NEVES, B.B.DE (Organizadores). **Geologia do Continente Sul-Americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. cap. 1.

ALVES, J.V.; FUZIKAWA, K. O estudo de inclusões fluidas da jazida uranífera de Cachoeira, Caetité, BA - resultados preliminares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1984, p. 1503-1517.

ALVES, J.V.; PÉREZ, C.A.; FUZIKAWA, K. The use of micro-SXRF in fluid inclusion analyses. In: Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. **Activity Report: 2000**. Campinas: ABTLuS, 2001, p. 13-14.

ANDERSON, A.J.; BODNAR, R.J. An adaptation of the spindle stage for geometric analysis of fluid inclusions. **American Mineralogist**, v. 78, p. 657-664, 1993.

ARCANJO, J.B.; MARQUES-MARTINS, A.A.; LOUREIRO, H.S.C.; VARELA, P.H.L. 2000. Projeto vale do Paramirim, escala 1:100.000. Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, CD-ROOM, apud CRUZ, S.C.P. **A interação tectônica entre o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuaí-Oeste Congo**. Tese (Doutorado). 2004. 503 p. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

BRITO, W.DE; RAPOSO, C.; MATOS, E.C.DE. Os albititos Uraníferos de Lagoa Real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1475-1488.

CAMPBELL, A.R.; HACKBARTH, C.J.; PLUMLEE, G.S.; PETERSEN, U. Internal features of ore minerals seen with the infrared microscope. **Economic Geology**, v. 79, n. 6, p. 1387-1392, 1984.

CAMPBELL, A.R.; ROBINSON-COOK, S. Infrared fluid inclusion microthermometry on coexisting wolframite and quartz. **Economic Geology**, v. 82, n. 6, p.1640-1645, 1987

CASTRO, A.R.B.DE. Synchrotron Light and its Applications. **Revista Physicae**, n. 2, 2001.

COSTA, P.H.DE.O.; ANDRADE, A.R.F.DE; LOPES, G.A.; SOUZA, S.L.DE. **Projeto Lagoa Real: mapeamento geológico, 1:25.000, texto e mapas**. Salvador: Companhia Baiana de Pesquisa Mineral, v.1, 1985.

CRUZ, M.J.M. **Introdução ao uso da microssonda eletrônica**. Salvador: Curso de Pós-graduação em Geologia da UFBA, 1995.

CRUZ, S.C.P. **A interação tectônica entre o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuaí-Oeste Congo**. Tese (Doutorado). 2004. 503 p. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

CRUZ, S.C.P.; ALKMIM, F.F. The tectonic interaction between the Paramirim Aulacogen and the Araçuaí Belt, São Francisco Craton region, Easter Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, no prelo, 2005.

CUNHA, J.C.; LOPES, G.A.C.; SABATÉ, P. Estrutura do Bloco do Gavião no Cráton do São Francisco (Bahia, Brasil): Exemplo de tectogênese diacrônica do Proterozóico Inferior a Superior de um segmento continental Arqueano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 38, 1994, Balneário Camboriú. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 381-382.

ELETRONUCLEAR. Eletrobrás Termonuclear. Energia Nuclear no Brasil. Disponível em: <http://www.eletronuclear.gov.br/novo/sys/interna.asp?IdSecao=50&secao_mae=2> Acesso em 23 de fev. de 2005

FERNANDES, P.E.C.A.; MONTES, M.L.; BRAZ, E.R.C.; SILVA, L.L.; OLIVEIRA, F.L.L.; GHIGNONE, J.I.; SIGA JR., O.; CASTRO, H.E.F. 1982. Geologia. In: BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL. Folha SD.23 Brasília: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, p. 25-204 apud CRUZ, S.C.P. **A interação tectônica entre o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuaí-Oeste Congo**. Tese (Doutorado). 2004. 503 p. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

FERNANDEZ, D.C.; FUERTES-FUENTE, M.; MARTIN-IZARD, A. Fluid Inclusions in the Ortosa Au-Skarns, Asturias (Northwestern of Spain). In: European Current Research on Fluid Inclusions (ECROFI), 16, 2001, Porto, Portugal. **Abstracts...** Faculdade de Ciências do Porto, Departamento de Geologia, 2001, Memória no. 7, p. 49-52.

FRANTZ, J.D.; MAO, H.K.; ZHANG, Y-G; WU, Y.; THOMPSON, A.C.; UNDERWOOD, J.H.; GIAUQUE, R.D.; JONES, K.W.; RIVERS, M.L. Analysis of fluid inclusions by x-ray fluorescence using synchrotron radiation. **Chemical Geology**, v. 69, p. 235-244, 1988.

FREZZOTTI, M.-L. Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: applications to petrology. **Lithos**, v. 55, p. 273-299, 2001.

FUZIKAWA, K. Estudos preliminares de inclusões fluídas em albita dos albititos do projeto Lagoa Real, Caetité, Ba, Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Balneário de Camboriú. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p.2038-2049.

FUZIKAWA, K. Inclusões fluídas: métodos usuais de estudo e aplicações. In: **Contribuições à Geologia e à Petrologia**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais, 1985. p. 29-44. (Boletim especial).

FUZIKAWA, K.; ALVES, J.V. **Estudos de Inclusões fluídas da Província Uranífera de Lagoa Real**. Belo Horizonte: NUCLEBRÁS, 1988. Relatório Técnico Específico (Inédito).

FUZIKAWA, K.; ALVES, J.V.; MARUÉJOL, P.; CUNEY, M.; KOSTOLANYI, C.; POTY, B. The Lagoa Real Uranium Province, Bahia State, Brazil: some petrographic aspects and fluid inclusion studies. **Geochimica Brasiliensis**, v.2, n.2, p.109-118, 1988.

GEISEL SOBRINHO, E. **Apresentação de uma Hipótese Genética para o Distrito Uranífero de Lagoa Real**. Belo Horizonte: NUCLEBRÁS, 1981. Nota Técnica, EBHO.PM n. 3.

GEISEL SOBRINHO, E.; RAPOSO, C.; ALVES, J.V.; BRITO, W.DE; VASCONCELOS, T.G. O Distrito Uranífero de Lagoa Real, Bahia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Balneário de Camboriú. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1499-1512.

GOMES, C.B. Microsonda Eletrônica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Balneário de Camboriú. **Anais...** Sociedade Brasileira de Geologia Núcleo RS/SC. p. 89-111. (Boletim n. 4 – Técnicas analíticas instrumentais aplicadas à geologia).

HAYASHI, K.-I.; IIDA, A. Preliminary study on the chemical mapping of individual fluid inclusion by synchrotron X-ray fluorescence microprobe. **Resource Geology**, v.51, n.3, p.259-262, 2001.

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES. Centro de Combustível Nuclear. Disponível em: <<http://www.ipen.br/ccn/index.html>>. Acesso em 28 de jun. de 2005.

KLEIN, C. **Manual of Mineral Science** (after James D. Dana). 22 ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.

LOBATO, L.M.; FYFE, W.S. Metamorphism, metasomatism, and mineralization at Lagoa Real, Bahia, Brazil. **Economic Geology**, v. 85, p. 968-989, 1990.

LOPES, G.A.C. 1991. Investigação da metalogênese de granitóides da região de Vitória da Conquista. SME/CBPM, volume 1, textos e mapas. 70p apud CRUZ, S.C.P. **A interação tectônica entre o Aulacógeno do Paramirim e o Orógeno Araçuaí-Oeste Congo**. Tese (Doutorado). 2004. 503 p. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

MARUÉJOL, P. **Métasomatose alcaline et minéralisations uranifères**: les albitites du gisement de Lagoa Real (Bahia, Brésil) et exemples complémentaires de Xihuashan (SE Chine), Zheltorechensk (Ukraine) et Chhuling Khola (Népal central). 1989. 428 p. Tese (Doutorado)- Centre de Recherches sur la Géologie de l'uranium [S.l.].

MARUÉJOL, P.; CUNEY, M.; FUZIKAWA, K.; NETTO, A.M.; POTY, B. The Lagoa Real subalkaline granitic complex (South Bahia, Brazil): a source for uranium mineralizations associated with Na-Ca metasomatism. **Revista Brasileira de Geociências**, v.17, n. 4, p 578-594, 1987.

MATOS, E.C.DE. **Província Uranífera de Lagoa Real – Bahia**: considerações gerais, situação atual e perspectivas. [S.L.]: Industrias Nucleares do Brasil, 1995. Relatório técnico (Inédito).

MAVROGENES, J.A.; BODNAR, R.J.; ANDERSON, A.J.; BAJT, S.; SUTTON, S.R.; RIVERS, M.L. Assessment of the uncertainties and limitations of quantitative elemental analysis of individual fluid inclusions using synchrotron X-ray fluorescence (SXRF). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 59, n. 19, p. 3987-3995, 1995.

MINPET for Windows. Version 2.02. **Reference Manual**, [SI], [entre 1988 e 1996].

MORIMOTO, N.; FABRIES, J.; FERGUSON, A.K.; GINZBURG, I.V.; ROSS, M.; SEIFERT, F.A.; ZUSSMAN, J.; AOKI, K.; GOTTARDI, G. Nomenclature of pyroxenes. **American Mineralogist**, v. 73, n. 9-10 p. 1123-1133, 1988.

PÉREZ, C.A.; RADTKE, M.; SÁNCHEZ, H.J.; TOLENTINO, H.; NEUENSHWANDER, R.T.; BARG, W.; RUBIO, M.; BUENO, M.I.S.; RAIMUNDO, I.M.; ROHWEDDER, J.J.R. Synchrotron radiation X-ray fluorescence at the LNLS: Beamline Instrumentation and Experiments. **X-Ray Spectrometry**, v. 28, p. 320-326, 1999.

PHILIPPOT, P.; MÉNEZ, B.; DRAKOPOULOS, M.; SIMIONOVICI, A.; SNIGIREV, A.; SNIGIRIEVA, I. Mapping trace-metal (Cu, Zn, As) distribution in a single fluid inclusion using a third generation synchrotron light source. **Chemical Geology**, v.173, p.151-158, 2001.

PHILIPPOT, P.; MÉNEZ, B.; SIMIONOVICI, A.; CHABIRON, A.; CUNEY, M.; SNIGIREV, A.; SNIGIRIEVA, I. X-ray imaging of uranium in individual fluid inclusions. **Terra Nova**, v.12, n. 2, p. 84-89, 2000.

POTY, B.; PAGEL, M. Fluid inclusions related to uranium deposits: a review. **Journal of the Geological Society, London** v. 145, p.157-162, 1988.

RIBEIRO, C.I.; CAVALHO FILHO, C.A.DE.; HASHIZUME, B.K. As jazidas de urânio de Lagoa Real. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, 1984, Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p. 1463-1474.

RICHARD, L.R. Minpet – Mineralogical and petrological data processing system. Version, 2.02. 1996. 3 disquetes.

RICKERS, K.; THOMAS, R.; HEINRICH, W. Trace-element analysis of individual synthetic and natural fluid inclusions with synchrotron radiation XRF using Monte Carlo simulations for quantification. **European Journal of Mineralogy**, v. 16, p. 23-35, 2004.

RIOS, F.J.; ALVES, J.V.; PEREZ, C.A.; FUZIKAWA, K.; NEVES, J.M.C. The use of micro-SRXRF in fluid inclusions of epithermal mineralized veins and other geological samples. In. Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. **Activity report**: 2001. Campinas: ABTLuS, 2002, p. 23-24.

RIOS, F.J.; FUZIKAWA, K.; ALVES, J.V.; NEVES, J.M.C. Aplicação da luz Infravermelha (IV) no estudo petrográfico e de inclusões fluidas em minerais opacos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n.4, p. 783-784, 2000.

ROCHA, E.B. **Dispersão e redistribuição de urânio e acompanhadores em mineralizações uraníferas submetidas a alteração lateritizante: exemplo da Jazida Laranjeiras, Província Uranífera de Lagoa Real, Bahia**. 1992. 153 p. Tese (Doutorado) – Departamento de Geofísica, Instituto Astronômico e Geofísico, USP, São Paulo.

ROEDDER, E. **Fluid inclusions**. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 1984. (Reviews in Mineralogy, v.12).

ROSIÈRE, C.A.; RIOS, F.J. The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: the example of the Conceição mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Economic Geology**, v. 99, p. 611-624, 2004.

SAMSON, I.; ANDERSON, A.; MARSHALL, D. (Editors). **Fluid Inclusions: analysis and interpretation**. Vancouver, British Columbia: Mineralogical Association of Canada, 2003. (Short Course, 32).

SCHIANO, P.; CLOCCHIATTI, R.; SHIMIZU, N.; WEIS, D.; MATTIELLI, N. Cogenetic silica-rich and carbonate-rich melts trapped in mantle minerals in Kerguelen ultramafic xenoliths: implications for metasomatism in the oceanic upper mantle. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 123, p. 167-178, 1994.

SHEPHERD, T.J.; RANKIN, A.H.; ALDERTON, D.H.M. **A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies**. Glasgow: Blackie & Son, 1985.

SORBY, H.C. 1858. On the microscopic structure of crystals, indicating the origin of minerals and rocks. *Quart. Jour. Geol. Soc. London* 14(1): p.453-500 apud FUZIKAWA, K. Inclusões fluidas: métodos usuais de estudo e aplicações. In: **Contribuições à Geologia e à Petrologia**. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais, 1985. p. 29-44. (Boletim especial).

STEIN, J.H.; NETTO, A.M.; DRUMMOND, D.; ANGEIRAS, A.G. Nota preliminar sobre os processos de albitização uranífera de Lagoa Real (Bahia) e sua comparação com os da URSS e Suécia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31, 1980, Balneário de Camboriú. **Anais...** São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, p.1758-1775.

TAIOLI, F. Recursos Energéticos. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M.C.M.DE; FAIRCHILD, T.R.; TAIOLI, F. (Organizadores). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000, p. 471-492.

TUGARINOV, A.I.; NAUMOV, V.B. Thermobaric conditions of formation of hydrothermal uranium deposits. **Geochemistry International**, v.6, n.1, p.89-103, 1969.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. The melt inclusion page. Disponível em : <http://wrgis.wr.usgs.gov/lowenstern/Melt%20Inc%20Page/melt_inclusion_page.html> Acesso em 20 de fev. de 2005.

VANKO, D.A.; BONNIN-MOSBAH, M.; PHILIPPOT, P.; ROEDDER, E.; SUTTON, S.R. Fluid inclusions in quartz from oceanic hydrothermal specimens and the Bingham, Utah porphyry-Cu deposit: a study with PIXE and SXRF. **Chemical Geology**, v.173, p.227-238, 2001.

VANKO, D.A.; MAVROGENES, J.A. Synchrotron-source X-ray fluorescence microprobe: analysis of fluid inclusions. In: MCKIBBEN, M.A.; SHANKS III, W.C.; RIDLEY, W.I. (Editors). **Applications of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes**. Knoxville: Society of Economic Geologists, 1998. p. 251-263. (Reviews in Economic Geology, v.7).

WILLIAMS, H.; TURNER, F.J.; GILBERT, C.M. **Petrografia**: uma introdução ao estudo das rochas em seções delgadas. Tradução de Ruy Ribeiro Franco. São Paulo: Polígono, 1970. Título do original: Petrography: an introduction to the study of rocks in thin sections.

APÊNDICE A - Análises por microsonda eletrônica

TABELA 6 - Análises (selecionadas) de Piroxênios da Jazida Cachoeira

Amostra	Área	Ponto	Na ₂ O	FeO	CaO	SiO ₂	MnO	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Total
03jun-2601-2	TA	Piro-1	2,54	16,04	19,86	50,49	0,26	0,04	9,54	1,17	99,95
03jun-2601-2	TA	Piro-2	2,58	15,06	19,86	50,99	0,26	0,08	10,00	1,23	100,07
03jun-2601-2	TA	Piro-3	2,31	15,13	20,49	51,76	0,25	0,00	10,73	1,21	101,88
03jun-2601-2	TA	Piro-4	2,81	16,27	19,24	51,15	0,24	0,05	9,53	1,44	100,72
03jun-2601-2	W	PXA-1	2,41	15,10	19,78	51,35	0,28	0,03	10,33	1,15	100,42
03jun-2601-2	W	PXA-2	3,06	16,60	18,92	51,35	0,28	0,02	9,59	1,37	101,19
03jun-2601-2	W	PX-2a	3,00	16,71	18,80	50,88	0,32	0,03	9,47	1,41	100,61
03jun-2601-2	W	PX-2b	2,73	16,21	19,27	50,41	0,28	0,07	9,78	1,31	100,07
03jun-2601-2	H1	PX	2,24	14,10	20,03	50,98	0,24	0,03	10,98	1,17	99,76
03jun-2601-2	C	PX-1	2,09	12,78	20,80	52,03	0,25	0,01	10,66	0,54	99,15
03jun-2601-2	C	PX-2	1,87	11,86	20,61	52,99	0,30	0,01	10,93	0,51	99,08
03jun-2601-2	C	PX-3	2,10	13,12	19,90	52,65	0,26	0,01	10,24	0,95	99,23
03jun-2601-2	X	PX-1	2,48	13,18	19,70	52,00	0,24	0,02	10,07	1,21	98,90
03jun-2601-2	X	PX-2	2,39	13,67	19,75	51,73	0,24	0,03	9,91	1,29	99,01
03jun-2601-2	X	PX-3	2,96	14,81	18,53	51,50	0,27	0,03	8,89	1,50	98,49
03jun-2601-2	H3	PX-1	2,72	13,92	19,05	52,25	0,32	0,03	9,61	1,34	99,23
03jun-2601-2	H3	PX-2	2,47	12,95	19,63	52,44	0,24	0,00	10,22	1,33	99,28
03jun-2601-2	H3	PX-3	2,67	13,96	19,11	52,02	0,20	0,00	9,62	1,34	98,92
03jun-2601-2	MG	PX-1	3,02	18,81	18,06	50,73	0,27	0,04	8,51	1,49	100,93
03jun-2601-2	MG	PX-2	3,04	18,38	17,85	51,29	0,29	0,06	8,84	1,45	101,20
03jun-2601-2	MG	PX-3	2,53	16,86	18,92	51,55	0,23	0,04	9,58	1,30	101,00
03jun-2601-2	MG	PX-4	3,17	18,86	17,94	50,78	0,25	0,01	8,43	1,59	101,03
03jun-2601-2	O	PX-1	2,93	16,59	18,47	51,59	0,25	0,04	9,60	1,36	100,83
03jun-2601-2	O	PX-2	2,44	15,08	19,14	52,62	0,23	0,02	10,66	1,22	101,42
03jun-2601-2	O	PX-3	3,05	17,74	18,03	51,63	0,24	0,02	8,73	1,54	100,98
03jun-2601-2	ZA	PX-1	2,12	16,25	19,28	52,19	0,21	0,00	10,07	0,92	101,03
03jun-2601-2	ZA	PX-2	2,71	16,11	18,68	51,91	0,24	0,05	9,64	1,31	100,65
03jun-2601-2	ZA	PX-3	2,56	17,01	18,99	51,41	0,28	0,05	9,63	1,19	101,12
03jun-2601-2	ZA	PX-4	2,70	16,32	18,96	51,21	0,26	0,03	9,52	1,25	100,25
03jun2515-2	B	PX2	3,16	10,97	19,81	51,51	0,28	0,07	11,19	2,09	99,08
03jun2515-2	B	PX2-2	3,06	10,88	20,13	49,51	0,24	0,05	11,31	2,02	97,19
03jun2515-2	B	PX2-3	3,15	11,23	20,07	51,90	0,25	0,06	11,33	2,06	100,05
03jun2515-2	X	PX-6	2,22	9,38	21,49	51,88	0,27	0,01	12,70	1,37	99,31
03jun2515-2	X	PX-5	1,95	9,20	22,02	51,94	0,26	0,04	12,78	1,19	99,39
03jun2515-2	J	PX-2	0,88	6,82	24,31	52,09	0,50	0,00	14,59	0,18	99,37

Os pontos realizados em uma mesma área são, em geral, pontos próximos uns dos outros, não representado, necessariamente, cristais diferentes. A análise do ponto 03jun2515-2, área B, ponto px2-2 não foi classificada na FIG. 21 porque está com fechamento (total) baixo.

TABELA 7 - Análise do piroxênio que continha as inclusões analisada por luz síncrotron

Amostra	Área	Ponto	Na ₂ O	FeO	CaO	SiO ₂	MnO	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Total
03jun25-13	C	px3-1	1,60	20,38	10,31	48,04	0,25	0,17	12,45	5,42	98,63
03jun25-13	C	px3-1-2	1,31	14,07	20,81	52,13	0,29	0,00	11,17	0,54	100,31
03jun25-13	C	px3-2	2,21	14,76	19,49	52,59	0,23	0,02	10,75	0,92	100,97

TABELA 8 - Análises por microsonda de inclusões sólidas em piroxênios (calibração para piroxênio)

Amostra	Área	Ponto	Na ₂ O	FeO	CaO	SiO ₂	MnO	TiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Total
03 jun2601-2	TA	Tap M1	0,05	3,03	27,46	28,80	0,05	30,43	0,05	2,54	92,41
03 jun2601-2	TA	Tap M2	0,02	3,35	27,76	28,36	0,06	29,15	0,02	2,89	91,61
03 jun2601-2	H1	melt 05	0,00	28,26	31,16	34,38	0,65	0,28	0,11	2,46	97,30
03 jun2601-2	H1	melt 6	0,02	28,19	30,87	34,14	0,64	0,31	0,09	2,46	96,71
03 jun2601-2	MG	PLG	11,62	0,47	0,49	67,31	0,00	0,00	0,00	19,87	99,76
03 jun2601-2	MG	PLG	11,42	0,43	0,49	66,61	0,01	0,02	0,01	19,69	98,66

A palavra “melt” foi utilizada como designação no decurso das análises, não tendo necessariamente um significado técnico.

TABELA 9 - Análises de inclusões de albita em piroxênio (calibração para albita)

Amostra	Área	Ponto	Na ₂ O	SiO ₂	K ₂ O	Al ₂ O ₃	Total
03jun2515-2	X	melt-6	11.89	69.14	0.14	19.5	100.67
03jun2515-2	X	melt-6	11.85	69.66	0.17	19.64	101.32
03jun2515-2	X	melt-4	11.47	69.43	0.14	20.64	101.69
03jun2515-2	X	melt-4	12.01	67.94	0.13	19.95	100.03
03jun2515-2	X	melt-1	11.72	68.8	0.13	19.49	100.15
03jun2515-2	X	melt-2	11.4	67.83	0.13	20.27	99.63
03jun2515-2	X	melt-2	11.17	67.6	0.11	20.08	98.96
03jun2515-2	X	Albita	12.27	70.34	0.13	19.34	102.08
03jun2515-2	X	Albita	12.25	70.2	0.14	19.71	102.3

Os pontos com mesmo nome referem-se a pontos próximos sobre uma mesma inclusão ou sobre um mesmo mineral. A palavra “melt” foi utilizada como designação no decurso das análises, não tendo necessariamente um significado técnico.