



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

**MINERALOGIA E GEMOLOGIA DA OPALA LARANJA DE BURITI  
DOS MONTES (PIAUÍ, BRASIL).**

TESE APRESENTADA POR

**ÉRICO RODRIGUES GOMES**

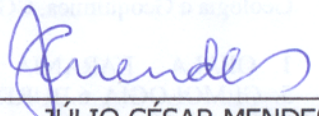
Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências  
na Área de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.

Data de Aprovação: **28 / 02 / 2002**

**Comitê de Tese:**

  
\_\_\_\_\_  
MARCONDES LIMA DA COSTA (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
ANTÔNIO LUCIANO GANDINI

  
\_\_\_\_\_  
JÚLIO CÉSAR MENDES

**À minha esposa Helani e ao meu filho Érico Henrique,  
inspirações para minha conduta pessoal e profissional,  
que me deram tanto em troca de tão pouco,  
e que tiveram que me partilhar em tempo quase integral com este estudo.**

**Aos meus pais Benedito e Socorro,  
e irmãos Conceição, Tito Flávio, Adriana e Patrícia;  
especialmente ao meu pai que me acompanhou em todas as viagens de campo,  
pelo seu exemplo, companhia e amizade.**

## **AGRADECIMENTOS**

Com o término de mais esta etapa, agradeço a todas as pessoas e instituições que de alguma forma contribuíram para o êxito deste estudo, destacando-se:

O professor Dr. Marcondes Lima da Costa, pela orientação, leituras, sugestões, incentivos e amizade de longa jornada;

O prof. Dr. Rômulo Angélica, pelo acompanhamento, leituras, sugestões, acolhida e amizade;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro da bolsa de mestrado;

Ao Centro de Geociências e ao Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, pela oportunidade de poder realizar esta pesquisa;

Ao Grupo de Mineralogia Aplicada, Departamento de Geoquímica e Petrologia, do Centro de Geociências da Universidade Federal do Pará pela possibilidade de utilização de sua infra-estrutura laboratorial;

Aos colegas mestrandos Carmen Silvia Galvão da Rocha (a *Carmita*), Nélio das Graças Andrade da Mata Resende e o doutorando Oscar Jesus Choque Fernandez pelas suas amizades, companheirismo e *espírito de time* que ocorreu durante os dois anos da realização desse curso de mestrado;

Ao prof. Dr. Thomas Scheller, sempre prestativo, pelas orientações no que se refere às análises térmicas, espectroscopia de absorção no infravermelho e difração de raios x;

Minha gratidão ao prof. Dr. Carlos Eduardo Mesquita Barros, pela leitura e sugestões nas descrições petrográficas;

À profa. Dra. Ana Maria Góes, pelas sugestões nas descrições petrográficas dos arenitos;

Ao professor Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas, pelas discussões a respeito dos processos genéticos;

À geóloga e técnica em espectroscopia de absorção no infravermelho e difração de raios-x, Walmeire Alves de Melo Costa pelo apoio laboratorial;

Ao técnico do Laboratório de Petrografia Sedimentar / IG/USP, Douglas Vivona, pela orientação e acompanhamento durante minha permanência no referido laboratório para a obtenção das imagens digitais;

Ao Dr. Hilton Costi, responsável pelo Laboratório de Microscopia Eletrônica / DEL/MPEG, onde realizei as análises de MEV/SED, pela acolhida enquanto desenvolvíamos, pelas muitas tentativas, a metodologia para obtenção das imagens das opalas no MEV;

Ao geólogo Osmar Guedes Jr., técnico responsável pelo Laboratório de Computação Aplicado às Geociências (COMAP), pela digitalização do mapa de pontos;

À família Soares dos Montes pela acolhida durante os trabalhos de campo;

À Prefeitura Municipal de Buriti dos Montes, pelo apoio logístico durante algumas viagens ao campo;

À estudante de graduação em geologia, Maria Carolina da Cruz Miranda bolsista de iniciação científica, integrante do Projeto “Mineralogia de pedras preciosas (gemas) e do artesanato mineral: opalas, calcedônias e jaspes”, processo PROINT número 0201/2000;

Ao químico Natalino Valente Moreira de Siqueira pelo apoio no laboratório de química;

A Cleida Maria Ferreira de Freitas, secretária do Departamento de Geoquímica e Petrologia, sempre sorridente e pronta a ajudar;

A todos os funcionários do Centro de Geociências e a todas pessoas aqui não citadas, mas que colaboraram para que as atividades do projeto de pesquisa fossem realizadas plenamente, contribuindo direta e/ou indiretamente para o êxito dessa jornada;

A Deus, pela possibilidade de estar aqui agradecendo a todos e poder também contribuir para o desenvolvimento do nosso país, o Brasil.

## SUMÁRIO

<b>DEDICATÓRIA</b> .....	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	ii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> .....	vii
<b>RESUMO</b> .....	1
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	5
1.1 GENERALIDADES .....	5
1.2 OBJETIVOS .....	7
1.3 LOCALIZAÇÃO, ACESSOS E ASPECTOS FÍSIOGRÁFICOS .....	7
1.4 MATERIAIS E MÉTODOS .....	9
1.4.1 <b>Trabalhos pré-campo</b> .....	9
1.4.1.1 Revisão bibliográfica .....	9
1.4.1.2 Interpretação fotogeológica .....	9
1.4.2 <b>Trabalhos de campo</b> .....	9
1.4.2.1 Mapeamento geológico e coleta de amostras .....	9
1.4.3 <b>Trabalhos laboratoriais</b> .....	10
1.4.3.1 Generalidades .....	10
1.4.3.2 Análises químicas .....	11
1.4.3.3 Análises mineralógicas .....	12
1.4.3.4 Análises gemológicas .....	14
<b>2. GEOLOGIA REGIONAL</b> .....	15
2.1 GENERALIDADES .....	15
2.2 GRUPO SERRA GRANDE .....	15
2.3 GRUPO CANINDÉ .....	15
2.4 FORMAÇÃO SARDINHA .....	15
2.5 A OPALA NO ESTADO DO PIAUÍ .....	17
2.5.1 <b>Origem intempérica</b> .....	18
2.5.2 <b>Origem hidrotermal</b> .....	18

2.6	A COR NA OPALA .....	19
2.6.1	<b>Generalidades</b> .....	19
2.6.2	<b>A opala preciosa</b> .....	19
2.6.3	<b>A opala comum</b> .....	23
2.6.4	<b>A opala laranja</b> .....	23
3.	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	26
3.1	<b>GEOLOGIA DAS OCORRÊNCIAS DE OPALAS LARANJAS</b> .....	26
3.1.1	<b>Generalidades</b> .....	26
3.1.2	<b>Grupo Serra Grande</b> .....	26
3.1.2.1	<b>Características petrográficas</b> .....	26
3.1.3	<b>Formação Sardinha</b> .....	30
3.1.3.1	<b>Características petrográficas</b> .....	30
3.1.4	<b>Aluviões</b> .....	32
3.2	<b>AS OCORRÊNCIAS DE OPALAS LARANJAS</b> .....	32
3.2.1	<b>Generalidades</b> .....	32
3.2.2	<b>Ocorrência Tranqueira 1</b> .....	34
3.2.3	<b>Ocorrência Tranqueira 2</b> .....	34
3.2.4	<b>Ocorrência Tranqueira 3</b> .....	34
3.3	<b>CARACTERIZAÇÃO GEMOLÓGICA</b> .....	35
3.3.1	<b>Generalidades</b> .....	35
3.3.2	<b>Características Gerais</b> .....	35
3.3.3	<b>A cor na opala laranja</b> .....	36
3.3.4	<b>Inclusões</b> .....	41
3.3.4.1	<b>Generalidades</b> .....	41
3.3.4.2	<b>As inclusões nas opalas laranjas</b> .....	41
3.3.4.3	<b>Classificação temporal das inclusões</b> .....	58
3.4	<b>CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA</b> .....	62
3.4.1	<b>Generalidades</b> .....	62
3.4.2	<b>Resultados difratométricos</b> .....	62
3.4.3	<b>Resultados da espectroscopia de infravermelho</b> .....	73

3.4.4	<b>Resultados da análise térmica</b> .....	73
3.5	<b>CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA</b> .....	75
3.5.1	<b>Generalidades</b> .....	75
3.5.2	<b>As opalas</b> .....	75
3.5.3	<b>As inclusões</b> .....	78
4.	<b>CONCLUSÕES</b> .....	80
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	84

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

### FIGURAS

Figura 1	Mapa de localização e acessos .....	8
Figura 2	Vista geral do povoado Tranqueira .....	8
Figura 3	Vista panorâmica do povoado Tranqueira .....	8
Figura 4	Mapa geológico regional .....	16
Figura 5	Mapa da Bacia Sedimentar do Parnaíba .....	16
Figura 6	Representação esquemática da de uma opala bandada .....	20
Figura 7	Arranjo regular, ordenado, de esferas de sílica .....	20
Figura 8	Imagem obtida pelo microscópio eletrônico de varredura de uma opala .....	20
Figura 9	Difração da luz em uma opala preciosa .....	22
Figura 10	Representação dos comprimentos de onda do espectro visível .....	22
Figura 11	Representação esquemática da estrutura ordenada .....	22
Figura 12	Representação das cores vistas numa opala .....	24
Figura 13	“Grãos de cores” numa opala preciosa .....	24
Figura 14	Arranjo regular das esferas de sílica .....	24
Figura 15	Arranjo irregular das esferas de sílica .....	24
Figura 16	Mapa mostrando a distribuição das ocorrências .....	27
Figura 17	Textura geral do arenito .....	29
Figura 18A	Imagens mostrando a zonação de um veio .....	29
Figura 18B	Veio contendo óxido de ferro e opala .....	29
Figura 19A	Imagem destacando a textura intersetal .....	31
Figura 19B	Imagens destacando o pórfiro de feldspato intensamente saussuritizado .....	31
Figura 20	Ressalta a zonação definida pelo óxido de ferro e a caulinita .....	31
Figura 21	Cristais de ametistas com distribuição irregular de cor .....	33
Figura 22	Drusa de quartzo.....	33
Figura 23	Concreção com fraturas preenchidas pelo quartzo .....	33
Figura 24	Concreções com fraturas preenchidas pela opala .....	33
Figura 25	Dique de rocha básica com padrão escalonado para a esquerda .....	37

Figura 26A	Vista panorâmica da ocorrência Tranqueira 3.....	37
Figura 26B	Vista lateral do morrote que contém a mineralização .....	37
Figura 27	Paleocanal com o capeamento estéril removido por um trator de esteira .....	37
Figura 28A	Detalhe da lente mineralizada na base do paleocanal .....	37
Figura 28B	Pepita de opala .....	37
Figura 29	Diferentes cores básicas da opala laranja .....	38
Figura 30	Imagens de opalas laranjas obtidas pelo MEV .....	39
Figura 31	Imagens de opalas laranjas obtidas pelo MEV .....	39
Figura 32	Imagens destacando o aspecto homogêneo das opalas laranjas .....	39
Figura 33	Imagens destacando o aspecto homogêneo das opalas laranjas .....	39
Figura 34A	Destaque para uma estrutura formada pelas esferas de sílica opalina .....	40
Figura 34B	Destaca-se a distribuição das esferas de sílica .....	40
Figura 34C	Destaca-se a distribuição das esferas de sílica .....	40
Figura 35	Imagem mostrando a formação das inclusões de arenitos .....	43
Figura 36	Imagem mostrando a formação das inclusões de arenitos .....	43
Figura 37	Detalhe externo de uma inclusão tipo tubo .....	43
Figura 38	Inclusão tipo vermicular .....	43
Figura 39	Inclusão tipo coral, destacando o “cenário de banco de coral”.....	44
Figura 40	Inclusão tipo coral .....	44
Figura 41	Inclusão tipo coral .....	44
Figura 42	Detalhe da figura anterior, ressaltando a “morfologia do coral” .....	44
Figura 43	Inclusão tipo estalagmite .....	45
Figura 44	Inclusão tipo estalagmite .....	45
Figura 45	Inclusões tipo coluna .....	45
Figura 46	Inclusões tipo coluna .....	45
Figura 47	Formação de inclusão tipo bolha .....	46
Figura 48	No detalhe, notar uma película que envolve a inclusão .....	46
Figura 49	Detalhe do interior de uma bolha .....	46
Figura 50	Inclusão tipo bolha .....	46
Figura 51	Inclusão tipo bolha .....	47
Figura 52	Inclusão tipo bolha .....	47

Figura 53	Inclusão tipo bolha com estruturação externa .....	47
Figura 54	Inclusão tipo bolha com fissuras .....	47
Figura 55	Inclusão tipo botrioidal .....	48
Figura 56	Inclusão tipo irregular .....	48
Figura 57	Início do craqueamento .....	48
Figura 58	Mostra o craqueamento distribuído por toda a amostra .....	48
Figura 59	Mostram estágios avançados de craqueamento .....	50
Figura 60	Notar relicto da opala vermelha no centro da amostra .....	50
Figura 61	Estruturas de fluxo .....	50
Figura 62	Estruturas de fluxo .....	50
Figura 63	Opala com cor básica vermelha contendo fratura cicatrizada .....	51
Figura 64	No detalhe à direita, uma segunda geração de cimento opalino .....	51
Figura 65	Opala de cor básica laranja com fratura cicatrizada pela opala incolor .....	51
Figura 66	Fratura contendo preenchimento do tipo dendrítico .....	51
Figura 67	Fratura de tensão, tipo disco, com inclusão no centro .....	51
Figura 68	Fratura de tensão seca .....	51
Figura 69	Duas direções dos planos de concentração da deformação .....	52
Figura 70	Vista perpendicular aos planos de concentração da deformação .....	52
Figura 71	Detalhe da estruturação anterior .....	52
Figura 72	Contorno retilíneo dos planos de concentração de deformação .....	52
Figura 73	Contorno irregular dos planos de concentração de deformação .....	52
Figura 74	Terminação botrioidal dos planos de concentração da deformação .....	54
Figura 75	Terminação botrioidal dos planos de concentração da deformação .....	54
Figura 76	Terminação botrioidal dos planos de concentração da deformação .....	54
Figura 77	Inclusão tipo mancha de cor .....	54
Figura 78	Inclusão tipo mancha de cor .....	54
Figura 79A	Inclusão de hornblenda na opala laranja mexicana .....	55
Figura 79B	Inclusão de hornblenda na opala laranja mexicana .....	55
Figura 80A	Inclusão protogenética, tipo teia, de hematita .....	55
Figura 80B	Inclusão protogenética, tipo teia, de hematita .....	55
Figura 81	Inclusão tipo teia, de hematita .....	56

Figura 82	Detalhe da inclusão anterior .....	56
Figura 83	Inclusão tipo teia .....	56
Figura 84	Inclusão tipo teia .....	56
Figura 85	Inclusão tipo teia .....	56
Figura 86	Imagem de uma inclusão tipo teia obtida ao MEV .....	57
Figura 87	Inclusão tipo quartzo, mostrando a zonação de um veio .....	57
Figura 88	Inclusão tipo quartzo, mostrando a zonação de um veio .....	57
Figura 89	Opala de cor básica amarela-laranja cobrindo veio de quartzo .....	57
Figura 90	Detalhe do cristal de quartzo envolvido pela opala .....	57
Figura 91	Destaca o cenário tipo egípcio das pirâmides .....	60
Figura 92	Ressalta o contato entre os cristais de quartzo e a opala .....	60
Figura 93	Inclusão tipo quartzo - caulinita .....	60
Figura 94	Inclusão tipo quartzo - caulinita .....	60
Figura 95	O cristal de quartzo foi solubilizado pela solução opalina .....	60
Figura 96	Detalhe dos pseudomorfos .....	61
Figura 97	Detalhe dos pseudomorfos .....	61
Figura 98	Imagem obtida pelo MEV de uma inclusão de caulinita .....	61
Figura 99	Detalhe da imagem anterior mostrando as plaquetas de caulinita .....	61
Figura 100	Aspecto morfológico da inclusão de caulinita .....	61
Figura 101	Difratogramas de amostras com diferentes cristalinidades da opala laranja ..	64
Figura 102	Difratogramas das opalas após serem submetidas a 1.100 °C .....	66
Figura 103	Difratogramas das inclusões de arenito tipo bolha .....	68
Figura 104	Difratogramas das inclusões de quartzo-caulinita .....	69
Figura 105	Difratogramas das baritas .....	70
Figura 106	Difratogramas do arenito integrante de uma brecha .....	71
Figura 107	Difratogramas das concreções .....	72
Figura 108	Espectro de IV das opalas laranjas .....	74
Figura 109	Curvas das ATDs das opalas .....	76
Figura 110	Curvas das ATGs das opalas .....	76
Figura 111	Imagem MEV/SED da inclusão de hematita .....	79

## TABELAS

<b>Tabela 1</b>	<b>Classificação da opala laranja em função da cor básica e transparência .....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 2</b>	<b>Classificação das inclusões encontradas nas opalas laranjas de Buriti dos Montes ..</b>	<b>59</b>
<b>Figura 3</b>	<b>Distâncias interplanares das opalas; sua cor básica e cristalinidade .....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 4</b>	<b>Distâncias interplanares das opalas pós-AT e sua cristalinidade .....</b>	<b>65</b>
<b>Figura 5</b>	<b>Conjuntos de bandas obtidas pelos espectros de IV .....</b>	<b>74</b>
<b>Figura 6</b>	<b>Composição química média semiquantitativa das opalas laranjas .....</b>	<b>77</b>
<b>Figura 7</b>	<b>Composição química das inclusões de hematita com transição até a opala .....</b>	<b>79</b>

## RESUMO

A caracterização das opalas laranjas encontradas nas proximidades do povoado Tranqueira, município de Buriti dos Montes, 230 km a leste da capital do estado do Piauí, Teresina, é o objetivo desta dissertação de mestrado. Estas opalas são garimpadas/exploçadas nessa região desde 1946, sendo hoje considerada como a principal área produtora desta gema no Brasil.

A opala laranja ocorre principalmente em depósitos primários, na forma de vênulas e veios encaixados discordantemente em arenitos pertencentes ao Grupo Serra Grande, integrante da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Junto com a opala, localmente encontram-se veios de quartzo, calcedônia, barita e hematita/goethita.

As cores básicas das opalas laranjas são amarelo-claro água, amarelo-claro, amarelo, amarelo-laranja, laranja, laranja-avermelhado, vermelho, vermelho-escuro e vermelho-amarronzado, além de azul-claro (somente foi observado jogo de cores nessa opala) e branca, com boa transparência; dureza 6,5; densidade oscila entre 2,08 e 2,20; índice de refração é 1,455 (+0,005, -0,015); isotrópicas; não foi observado reação à fluorescência sob luz ultravioleta, sendo inerte também sob o filtro Chelsea.

As inclusões identificadas foram classificadas como: arenito (tubo ou canal, vermicular, banco de coral, estalactite, estalagmite, coluna, bolha, botrioidal e irregular); craqueamento; estrutura de fluxo; fraturas (cicatrizada, dendrítica, de tensão e seca); mancha de cor; plano de concentração de deformação; teia (hematita); quartzo, caulinita e hematita.

As análises por difração de raios-x permitiram classificá-las como opala amorfa (opala-A) com diversos estágios intermediários até opala cristobalita-tridimita (opala-CT). Já em relação às análises por espectroscopia de absorção no infravermelho, as bandas de absorção apresentam grandes faixas de variação dentro do espectro da opala. Na curva da análise gravimétrica diferencial, o teor de água dessas opalas está entre 3,7 e 10%. As amostras de opala-A e de níveis intermediários de cristalinidade, após serem submetidas à temperatura de 1.100 °C nas análises térmicas, mostram um rearranjo estrutural com aumento da cristalinidade.

Do ponto de vista químico, a análise dos elementos maiores revelaram teores muito semelhantes às outras opalas da literatura, com a predominância de SiO<sub>2</sub>, na ordem de 98,53%, enquanto para os elementos-traço merecem destaque as concentrações de bário, entre 323 e

4.500 ppm.

Em 24 meses de observações em diferentes amostras, na temperatura ambiente, observou-se que quanto maior o estágio de cristalinidade, maior a probabilidade de apresentar craqueamento, sendo que as amostras de opala-A permaneceram estáveis.

Quando observadas ao microscópio eletrônico de varredura, apresentam uma estrutura homogênea, caracterizada pela intensa cimentação por sílica opalina, dos interstícios localizados entre as esferas constituintes da opala. Este fato pode explicar a ausência de jogo de cores e a boa transparência destas opalas laranjas.

Embora não exerçam o fascínio das opalas preciosas de Pedro II (PI), as opalas laranjas encontradas no município de Buriti dos Montes têm sido bastante apreciadas pelas suas cores básicas, transparência, dureza e estabilidade, apresentando-se como mais uma variedade de opala gemológica piauiense, diferenciando-se pelo seu quimismo e inclusões. Isso mostra que a atividade termal resultante das manifestações subvulcânicas básicas em contato com os sedimentos paleozóicos da Bacia do Parnaíba, proporcionou um ambiente hidrotermal especial para formação de opalas, tendo distribuição regional.

## ABSTRACT

The characterization of the orange opals found in the vicinity of the Tranqueira village, which belongs Buriti dos Montes municipality, 230 km east of Teresina, the capital of Piauí State, is the main objective of this work. These opals occurrences have been exploited in that area since 1946 and are considered until now as the main producing area of this gem in Brazil.

The orange opal occurs mainly in primary deposits, in small veins that cut discordantly sandstones of the Serra Grande Group, as part of the Parnaíba Sedimentary Basin. Quartz, chalcedony, barite and hematite/goethite are also found in such veins associated with opal.

The basic colors of the orange opals are yellow-clear water, yellow-clear, yellow, yellow-orange, orange, orange-red, red, red-darkness and brown-red, besides blue-clear (play of colors was only observed in that opal) and white, with good transparency. Other physical properties are described as follow: hardness 6,5; density ranges between 2,08 and 2,20; refraction index is 1,455 (+0,005, -0,015); fluorescence was not observed under ultraviolet radiation. They are also inert under the Chelsea filter.

The identified inclusions were classified as follow: sandstone (tube or channel, vermicular, chorale bank, stalactite, stalagmite, column, bubble, botrioidal and irregular); crazing; flow structure; fractures (scarred, dendritic, tension and dry); color stain; plane of deformation's concentration; web (hematite); quartz, kaolinite and hematite.

X-ray diffraction analyses allowed to classify them as amorphous opal (A-opal) with several intermediary stages up to cristobalite-tridimite opal (CT-opal), according to the degree of cristalinity. Concerning Infrared Absorption Spectroscopic analysis, the absorption bands also revealed different patterns for the studied opals. Thermal-gravimetric analysis were carried out and helped identifying water contents that ranged from 3.7 to 10%. Amorphous and low-cristalline opal samples exhibited strong recrystalization after heating at 1,100° C.

Major-element geochemistry revealed contents very similar to the other opals described in the literature, with the domain of SiO<sub>2</sub>, around 98,53%. Trace-element contents are usually very low except for Ba whose concentrations ranged between 323 and 4.500 ppm.

After 24 months observing opals behavior at room-temperature one concludes that opals with higher degree of cristallization are more suitable for crazing while the amorphous samples remain stable.

When observed under the scanning electronic microscope, they present a homogeneous structure, characterized by the intense cementation by opaline silica which come from the voids between the opal spheres. This fact can explain the absence of play of colors and the good transparency of these orange opals.

Although the orange opals from Buriti dos Montes do not exhibit the fascination and the beauty of the Pedro II precious opals, the former have been enough appreciated by their basic colors, transparency, hardness and stability and are considered as another "made in Piauí" gemological product.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 GENERALIDADES

O tesouro de povos pré-colombianos no México e América Central, egípcios, romanos, e de diversas dinastias reais européias, expresso em jóias, coroas, cetros, estátuas de deuses, dentre outros, mostram a beleza, o encantamento e o fascínio que as gemas, e particularmente as opalas, exercem sobre os seres humanos.

Uma estátua do "Deus Sol" e uma escultura do último imperador azteca, Cuahtemoc, feita de um riolito negro intensamente incrustado de diminutas opalas vermelhas, verdes, azuis e amarelas, pesando 16.875 ct., mostra a importância e a presença da opala na cultura daquela civilização (Zeitner 1989; Bariant *et al.* 1992). Em uma caverna no Quênia foram encontrados antigos artefatos de opala, datados em cerca de 4.000 anos antes de Cristo, provavelmente oriundos da Etiópia, enquanto os romanos, por volta do ano 100 a.C., extraíam opala de minas na antiga Hungria, hoje parte da República Eslováquia (Ward 2000).

O encantamento pela opala foi traduzido pelo imperador romano Plínio, que é considerado como o primeiro gemólogo do mundo, quando declamou: "o vermelho apaixonado do rubi, o verde magnífico da esmeralda, o amarelo dourado do topázio, o azul profundo da safira e as ricas cores púrpuras da ametista se encontram em uma única opala preciosa" (Suwa, 1994), sendo considerada a mais linda de todas as gemas (Anderson 1988).

O nome opala é derivado da palavra *upala*, do sânscrito - língua sagrada dos antigos sacerdotes hindus - que significa pedra preciosa. Na época do império romano, seu valor era superado somente pelo valor da esmeralda. O seu brilho e a variedade de lampejos de cores exibidos são inigualáveis no reino mineral.

Sua classificação é bastante complexa e subjetiva, sendo que opala laranja e opala preciosa são muito raras. Há ocorrências nos Estados Unidos e Honduras (ambas sem expressão atualmente). Na Austrália, foram descobertas em 1870, e desde então respondem pela maior parte da produção mundial. Mais recentemente, em 1994, foi descoberta opala preciosa na Etiópia. No México, as ocorrências de opalas preciosas e opalas laranjas já eram conhecidas dos astecas (entre os anos 1320 e 1520) (Bariant *et al.* 1992; Downing 1992; Spencer *et al.* 1992; Johnson *et al.* 1996).

No Brasil, na região do município de Pedro II, estado do Piauí, estão localizadas as únicas áreas produtoras de opala preciosa, que são trabalhadas desde os anos 60 (Sauer 1982). A

região do município de Buriti dos Montes produz opala laranja, em períodos irregulares, desde os anos 40 (W. S. MONTE, informação verbal 1999). Também são conhecidas outras pequenas ocorrências de opala laranja nos estados do Rio Grande do Sul (Sauer 1982), Ceará (Delaney 1996), Pará (Collyer *et al.* 1994), Rondônia e diversas outras ocorrências no Piauí (Rosa 1988; Gomes 1990; Gomes & Costa 1992; 1994; 2000a; 2000b).

Destas ocorrências do Piauí, somente aquelas localizadas na região de Pedro II já tinham sido objeto de investigação científica (Nem & Urbano Filho 1974; Oliveira *et al.* 1979; Moura 1982; Bartoli *et al.* 1983; Martins Jr. 1983; Oliveira & Soares Filho 1983; Souza 1985; Rosa 1988; Gomes 1990; Gomes & Costa 1992; 1994; 2000b; 2001b; 2001e, 2001h e 2002b). Essas opalas apresentam excelentes propriedades gemológicas (Souza 1985; Rosa 1988; Gomes 1990; Downing 1992), sendo consideradas assim como as melhores opalas preciosas do mundo.

Por outro lado, ainda não são conhecidas as características das opalas laranjas de Buriti dos Montes, sendo o alvo de estudo desta tese, pois são desconhecidas na comunidade geológica e gemológica brasileira e internacional, o que torna muito oportuno este trabalho de caracterização gemológica, mineralógica, química e geológica. As primeiras informações geológicas a respeito das mesmas devem-se a Rosa (1988) que fez uma breve descrição no seu modo de distribuição, além de Johnson & Koivula (1999) que fizeram o registro de uma pequena nota de laboratório.

A primeira descoberta dessas opalas laranjas deve-se a um morador de uma fazenda da região que saiu atrás do gado seguindo a trilha deixada pelo pisoteio dos animais, quando encontrou algumas pedras amarelas e laranjas no caminho, posteriormente identificadas como opalas (W. S. MONTE, informação verbal 1999).

Há notícias informais de que essas opalas tenham sido exploradas, de forma intermitente, desde 1946, alternadamente por empresários e/ou garimpeiros piauienses, cearenses e mineiros. Historicamente, nos diversos períodos em que isso aconteceu, foram utilizadas técnicas e equipamentos rudimentares. Atualmente, uma empresa do estado de Minas Gerais, Orion Gemas Ltda, detém os direitos de pesquisa mineral e lavra. A lavra é feita utilizando-se um trator com retroescavadeira, que abre trincheiras em busca da mineralização; esta, ao ser localizada, tem o seu capeamento estéril retirado com um trator de esteira. Em seguida lavra-se a zona mineralizada, sendo o minério peneirado e lavado, quando então é realizada a catação manual da opala.

O jogo de cores da opala preciosa foi revelado ao microscópio eletrônico como resultante de uma rede de difração natural, tridimensional, formada por uma massa regular de esferas de sílica amorfa (Sanders 1964; Nassau 1976; Manson 1978; Schwarz 1984; Klein, & Hurlbut Jr. 1993). As cores básicas das opalas laranja - sem jogo de cores - apresentam as tonalidades: amarelo-claro água, amarela-clara, amarela, amarela-laranja, laranja, laranja-avermelhada, vermelha, vermelha-escura, e vermelha-amarronzada (segundo a proposta de classificação de Downing 1992); Smallwood (1997) propõe a denominação de opala comum, enquanto o Instituto Gemológico Americano denomina-a de opala *jelly* (GIA 2001) e; no meio comercial, de um modo geral, é conhecida como opala de fogo. Neste trabalho, seguiremos a proposição de Downing (1992).

## 1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos desta dissertação de mestrado são:

- ❖ A caracterização geológica, mineralógica, gemológica e química das ocorrências de opalas laranjas da região do município de Buriti dos Montes, principalmente daquelas localizadas no entorno do povoado Tranqueira;
- ❖ Conhecer o potencial gemológico destas opalas e sua aplicabilidade para o uso pela indústria de jóias e artesanato mineral;
- ❖ O entendimento da(s) causa(s) das cores;
- ❖ Identificar os processos que influenciaram na gênese dessas opalas laranjas.

## 1.3 LOCALIZAÇÃO, ACESSOS E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS

Buriti dos Montes localiza-se na porção nordeste do estado do Piauí, estando a sede do município cerca de 230 km a Leste da capital, Teresina. A partir desta cidade segue-se pela BR-343 com sentido nordeste, para Fortaleza, por 90 km, quando toma-se a sudeste, pela rodovia PI-115, até o posto fiscal estadual, localizado após a cidade de Castelo do Piauí. Neste local inicia uma estrada de revestimento primário, a PI-322, percorrida por 24 km até a área de estudo (Figura 01). As principais ocorrências de opalas laranjas encontram-se nos arredores do povoado Tranqueira (coordenadas 5° 19' 02" S e 41° 12' 48" W; Figuras 02 e 03). Sua altitude média é de 400 metros. Seu clima é semi-árido com chuvas nos meses de verão e estação seca nos demais meses do ano. A vegetação é de caatinga e cerrado (Baptista 1981). As drenagens são

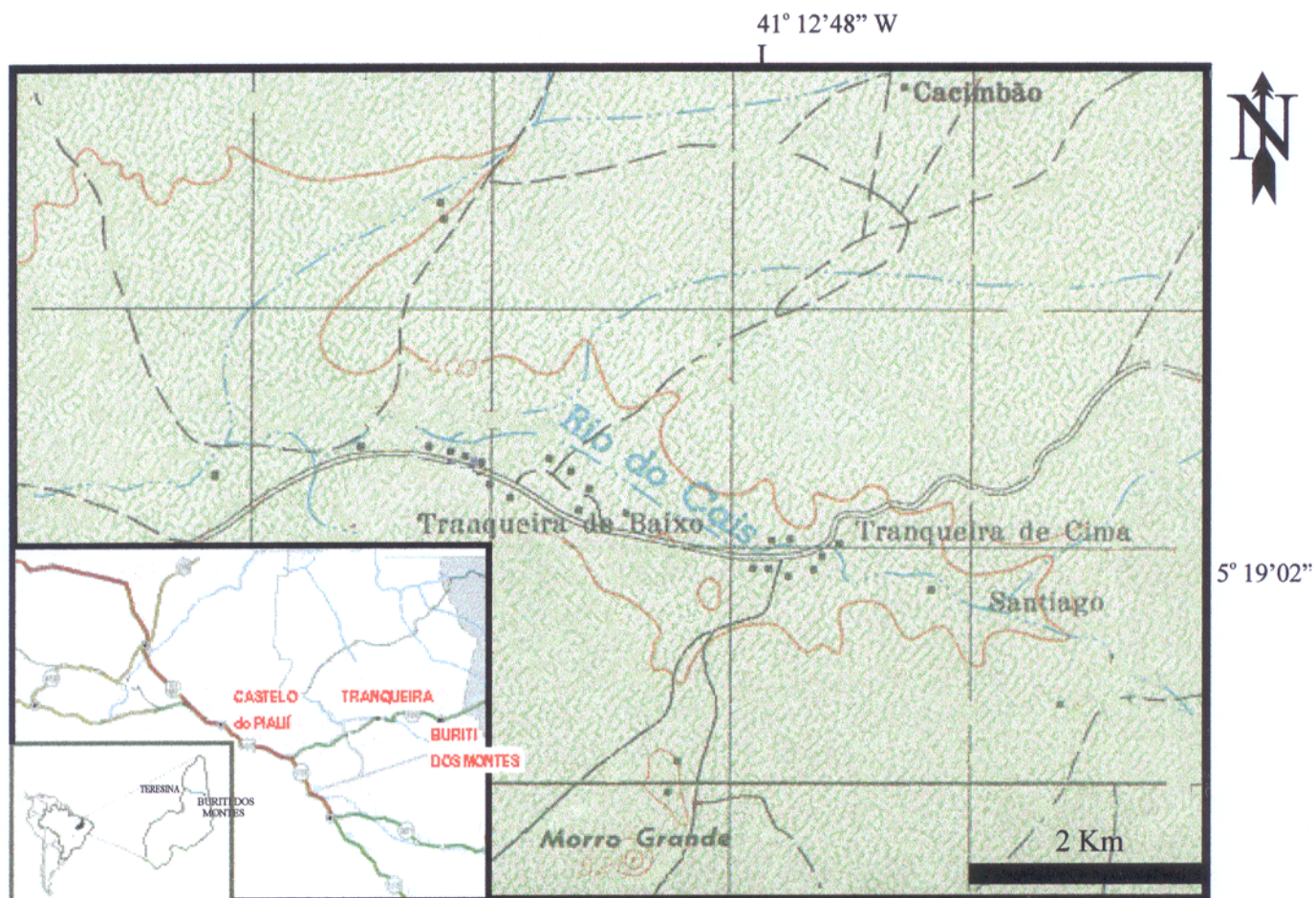


Figura 01 - Localização e acesso à área de estudo.



Figura 02 - Vista geral do povoado Tranqueira.

Figura 03 - Vista panorâmica do povoado Tranqueira, tendo em primeiro plano e ao fundo os arenitos do Grupo Serra Grande.



intermitentes, sendo representadas pelo riacho Seco e rio do Cais, ambos pertencentes à Bacia Hidrográfica do rio Poti.

## **1.4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Durante o desenvolvimento desta dissertação de mestrado, foram executadas as seguintes atividades:

### **1.4.1 Trabalhos pré-campo**

#### **1.4.1.1 Revisão bibliográfica**

Esta atividade foi contínua durante todo o período do mestrado. No início foram pesquisados artigos e trabalhos específicos de cunho geológico sobre a área de estudo, posteriormente, a respeito das opalas de Pedro II e sobre outras ocorrências mundiais de opalas. Após essa etapa os temas foram relacionados com os objetivos da proposta de estudo (técnicas instrumentais de análises mineralógicas e químicas, gemologia, mineralogia, cores das opalas, etc). No primeiro semestre do ano de 2.000 foram analisados os mapas geológicos (1: 1.000.000; CPRM 1995), plani-altimétrico (Folha SB.24-V-C-II; 1:100.000; SUDENE 1972) e político-rodoviário (1: 1.000.000; PIAUÍ 1998) abrangendo o estado do Piauí e a região do município de Buriti dos Montes. No segundo semestre desse mesmo ano foram adquiridas as fotografias aéreas (1:60.000) da área de estudo.

#### **1.4.1.2 Interpretação fotogeológica**

Foi feita cópia das fotografias aéreas existentes sobre a região; as mesmas estavam no acervo do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), residência de Teresina, na escala de 1: 60.000, sendo identificadas como: FAIXA 4100A/ USAF 7103, números 37.621 a 37.623; FAIXA 4100A/ USAF 7179, números 37.615 a 37.619; FAIXA 4110B/ USAF 7103, números 34.918 a 34.920 e FAIXA 4110B/ USAF 7179, números 34.913 a 34.917.

### **1.4.2 Trabalhos de campo**

#### **1.4.2.1 Mapeamento geológico e coleta de amostras**

As amostras de opalas representativas das diversas qualidades e tonalidades de cores foram obtidas em diversas viagens realizadas durante os meses de agosto a dezembro de 1998,

nos períodos entre março a junho e entre setembro a dezembro de 1999. Além de coletas de amostras e elaboração do mapa de pontos e geológico no segundo semestre de 2000. A partir do mapa resultante da interpretação fotogeológica e sua integração com os mapas plani-altimétrico e político-rodoviário, os pontos descritos e/ou amostrados foram plotados.

As amostras selecionadas, representativas para esse estudo, são resultantes de vários lotes que juntos totalizaram, aproximadamente, 50 kg de opalas brutas e outro lote com cerca de 300 opalas lapidadas tanto na forma de cabochões (oval, gota e coração) como facetadas (brilhante, oval, gota, coração, quadrada, esmeralda, briloete, *trillion* e navete). Foram coletadas também amostras das rochas - os arenitos e os diques apliticos básicos - provenientes da zona de transição entre estas e a mineralização de opala.

#### 1.4.3 Trabalhos laboratoriais

Com exceção das análises realizadas por espectrometria de emissão atômica com plasma de acoplamento Induzido (ICP-AES), microscopia eletrônica de varredura/ sistema de energia dispersiva (MEV/SED), e a obtenção das imagens das inclusões, todas as demais atividades foram realizadas nos laboratórios do Grupo de Mineralogia Aplicada/ Departamento de Geoquímica e Petrologia, do Centro de Geociências, na Universidade Federal do Pará.

##### 1.4.3.1 Generalidades

Dentre as amostras previamente selecionadas, 17 amostras de opalas com as diferentes cores e aspectos texturais, provenientes principalmente da ocorrência Tranqueira 3, foram separadas para as análises de difração de raios-x (DRX), espectroscopia de absorção no infravermelho (IV), análise termo-diferencial/ termo-gravimétrica (ATD/ATG) e microscopia eletrônica de varredura com sistema de energia dispersiva (MEV/SED); após a realização dessas análises, seis amostras foram encaminhadas para análises químicas (ICP-AES). Duas amostras de concreções de goethita e seis amostras de inclusões sólidas foram encaminhadas para DRX, enquanto outras nove amostras de rochas foram encaminhadas para a confecção de lâminas delgadas. Um lote com 239 amostras, selecionadas com uma lupa de mão acromática e aplanática (10X) e outra lupa binocular (20X), em função de conterem inclusões sólidas, foram separadas para caracterização das mesmas. Outros lotes usados: 48 amostras lapidadas, representando todas as cores encontradas foram utilizadas nos testes de densidade, índice de

refração, polariscópio, filtro chelsea, fonte ultravioleta e testes de estabilidade; 15 amostras brutas foram usadas para o teste de dureza.

#### 1.4.3.2 Análises químicas

Objetivam a obtenção de dados químicos que permitissem não só caracterizar as opalas, como subsidiar o entendimento das transformações mineralógicas e geoquímicas que culminaram na origem dessas opalas. Para tanto foram efetuadas as seguintes análises:

##### - Via úmida

Os métodos da gravimetria, volumetria e colorimetria foram empregados para a determinação dos seguintes elementos:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$  e  $\text{TiO}_2$ ;

##### - Microscopia eletrônica de varredura/sistema de energia dispersiva (MEV/SED)

Foram efetuadas 72 análises químicas semiquantitativas no Laboratório de Microscopia Eletrônica, integrante do Departamento de Ecologia do Museu Paraense Emílio Goeldi (LME/DEL/MPEG), num equipamento marca IXRF Systems, modelo 500 DP, acoplado a um MEV marca LEO, modelo 1450 VP.

As amostras de opalas foram previamente lavadas em ultra-som por trinta minutos para a retirada de impurezas externas, em seguida foram secas numa estufa a  $80^\circ\text{C}$  durante uma hora; em seguida foram trituradas num gral de ágata; estes fragmentos então foram levados para uma lupa binocular onde foram selecionados diferentes formatos, sendo colocados num porta-amostra com fita adesiva de carbono. A etapa seguinte foi a metalização com ouro metálico durante 60 segundos, numa corrente de 25 mA.

##### - Espectroscopia de absorção no infravermelho

Foram elaboradas pastilhas com 0,7 mg de opala e 200 mg de KBr, sob vácuo e à pressão de 8 toneladas. Os espectros foram obtidos num equipamento modelo Perkin Elmer FT-IR Spectrômetro 1760X acoplado a um microcomputador Perkin Elmer 7700, sendo registrados na região entre  $4.000$  e  $400\text{ cm}^{-1}$ ; o aplicativo Infra foi usado para o trabalho com os espectros. Duas varreduras foram repetidas com pastilhas contendo 0,8 mg de opalas para aplicação na

determinação do índice de cristalinidade das opalas, segundo a metodologia desenvolvida por Shoval *et. al.* (1991).

- Espectroscopia de emissão atômica / plasma acoplado induzido (ICP / AES)

Foram encaminhadas seis amostras de opalas laranjas, em amostra total, para determinação de Ag, Ba, Be, Cd, Cr, Cu, Li, Mo, Ni, Sc, Sr, Zn, Zr, Y, As, Co, Pb, Sb, V, Bi, Sn, W, La, B, Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, Na, P e Ti, nos laboratórios da empresa Lakefield- Geosol Ltda, em Belo Horizonte (MG);

#### 1.4.3.3 Análises mineralógicas

- microscopia ótica

Foram investigadas nove lâminas delgadas: cinco de arenitos e quatro de diques de rochas básicas; são amostras coletadas preferencialmente nas zonas de contatos entre estas litologias e a mineralização de opala. As descrições foram feitas em microscópio petrográfico da marca Zeiss.

As amostras de opalas que continham inclusões mineralógicas foram selecionadas usando-se uma lupa binocular Zeiss, descrevendo-as e classificando-as, preliminarmente, para uma etapa de estudo posterior.

- difratometria de raios-x

Para essas análises foi utilizado o método do pó. As amostras foram pulverizadas em gral de ágata e montadas em lâmina de quartzo, sendo analisadas em difratômetro Philips, modelo PW 3710, com goniômetro PW 1050, tubo anodo de Cu, tensão de 45 Kv, corrente de 40 mA, fenda de divergência automática, varredura contínua, *steps* de  $0,02^\circ(2\theta)$ , em intervalo de  $5^\circ$ - $65^\circ(2\theta)$ . Na interpretação dos difratogramas foi usado o *software* APD (*Automated Powder Diffraction*), também da Philips, e foi seguida a proposição de Flörke (1995) para a determinação do estágio de cristalinidade das opalas. Após serem submetidas à temperatura de  $1.100^\circ\text{C}$  durante a corrida de ATD/ATG, 14 amostras foram novamente submetidas à DRX. Os difratogramas foram ainda tratados com os programas Plotit 3.2 e Origin 5.0.

- análise térmica diferencial / gravimétrica (ATD/ATG)

Utilizou-se um equipamento modelo Stanton PL-STA, com plataforma termoeletrica; um termopar de platina pura e outro termopar constituído de uma liga com platina (87%)-Ródio (13%); com 18 mg de opala aquecida até 1.100 °C num cadinho cilíndrico de coríndon, e uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. As análises térmicas foram realizadas simultaneamente. As curvas de ATD/ATG foram analisadas com os aplicativos Stancal e Stanplot, ambos desenvolvidos pelo prof. Dr. Thomas Scheller.

- microscópio eletrônico de varredura (MEV)

Além da preparação anteriormente descrita no item trabalhos laboratoriais, MEV/SED, as amostras utilizadas para a obtenção de imagens das inclusões mineralógicas, foram previamente selecionadas numa lupa binocular, enquanto que as amostras destinadas à visualização da estrutura da opala, foram previamente submetidas a uma imersão no vapor de ácido fluorídrico. Diversos autores (Jones *et al.* 1964; Jones & Segnit 1969; Akizuki 1970; Ball 1982; Moura 1982; Ball 1983; Bartoli *et al.* 1983; Rosa 1988; Wollaert *et al.* 1990 e Nagase & Akizuki 1997) relatam vários parâmetros de preparação, como tempo da imersão ao vapor, diluição do HF, altura da amostra em relação ao becker de teflon contendo o ácido fluorídrico, além dos diferentes parâmetros em função das variadas marcas e modelos dos equipamentos analíticos. Todas estas preparações foram tentadas. Posteriormente, soube-se que somente a variedade de opala hidrofana, porosa, permite uma boa visualização da estrutura das esferas de sílica amorfa (F. de F. MOURA, informação verbal 2001).

Foram realizadas várias etapas de MEV; inicialmente na NUPEGEL/ESALQ/USP, em Piracicaba (SP), aos cuidados do prof. Dr. Marcondes Costa; em Halle (Alemanha), com o prof. Dr. Herbert Pöllman; e em Belém, no LME / DEL / MPEG, foram tentadas 36 diferentes preparações nas amostras de opalas laranjas, nos períodos de maio, novembro e dezembro de 2001. Estas preparações variaram de um minuto até 90 (noventa) minutos de exposição das lamínulas com as amostras de opalas ao vapor de HF; amostras distando desde 1 cm até 30 cm do becker de teflon que continha o HF para o banho de vapor ácido e; concentração de 1% até 10% de ácido fluorídrico.

Diversas imagens das inclusões mineralógicas contidas nas opalas foram obtidas, assim como das opalas, mas sem uma nítida visualização das esferas de sílica amorfa que constituem seu arcabouço.

#### 1.4.3.4 Análises gemológicas

- microscópio gemológico e outros equipamentos gemológicos

Equipamentos utilizados: microscópio gemológico, lupa binocular, refratômetro, polariscópio, filtro Chelsea, pontas de dureza, fonte ultravioleta e balança para determinação da densidade.

As imagens das inclusões foram obtidas no Laboratório de Petrografia Sedimentar/IG/USP, nos meses de julho e agosto de 2001, utilizando-se do programa para captação de imagens Leica QWIN 550 e câmera SONY XC-003P para captação de imagens a partir do estereomicroscópio SV11, da Zeiss.

- testes de estabilidade e durabilidade

No início do período de estudo, um lote com 197 opalas laranjas provenientes da ocorrência Tranqueira 3 foram lapidadas com facetas ou cabochão, e acondicionadas em papélotes sem qualquer cuidado especial de manuseio e/ou de armazenamento. Este lote foi guardado, sendo aberto algumas vezes durante os últimos 24 meses, para a verificação se havia alguma alteração física, como a presença de craqueamento.

## 2. GEOLOGIA REGIONAL

### 2.1 GENERALIDADES

As opalas laranjas estão alojadas em litologias que fazem parte da Bacia Sedimentar do Parnaíba, os Grupos Serra Grande e Canindé, além da Formação Sardinha (Figuras 4 e 5; Góes *et al.* 1993; Góes 1995).

### 2.2 GRUPO SERRA GRANDE

De idade Siluriana, é constituído de arenitos, siltitos, folhelhos, conglomerados e raros diamictitos. As fácies presentes nesta seqüência são indicativas de deposição em ambiente continental, transicional e marinho raso, eventualmente com influência glacial, e controlados por sistemas fluviais, deltáicos e plataformais, sendo representada estratigraficamente pelas Formações Ipu, Tianguá e Jaicós. Trata-se de um ciclo transgressivo-regressivo completo, que é sobreposto em discordância, pelos sedimentos devonianos do Grupo Canindé. Nos arredores da cidade de São Miguel dos Tapuios, principalmente numa faixa de contato com os folhelhos da Formação Pimenteiras (Grupo Canindé), destaca-se pela incidência de fosfatos e barita.

### 2.3 GRUPO CANINDÉ

Corresponde à Formação Pimenteiras, depositada em ambiente de plataforma dominada por tempestades, sendo constituída de folhelhos cinza-escuros, e pela Formação Cabeças, de ambiente periglacial-flúvio-deltáico, constituída predominantemente de arenitos. Além dos fosfatos, possui diversas ocorrências de urânio, além de barita e várias ocorrências de quartzo e opala, estes contidos principalmente na Formação Cabeças.

### 2.4 FORMAÇÃO SARDINHA

Intrudidos nos sedimentos dos grupos citados anteriormente ocorrem rochas ígneas básicas, que se relacionam a três pulsos magmáticos principais (Caldasso & Hama 1978; Góes *et al.* 1993). O mais antigo (entre 215 e 180 Ma.), está possivelmente relacionado com os movimentos de abertura do Oceano Atlântico Norte. O segundo pulso (entre 180 e 150 Ma.), aparentemente mais expressivo, estaria relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Equatorial. O terceiro pulso (entre 150 e 110 Ma.), correspondente à Formação Sardinha, seria relacionado com a abertura do Oceano Atlântico Sul. Este último pulso seria o responsável pelas

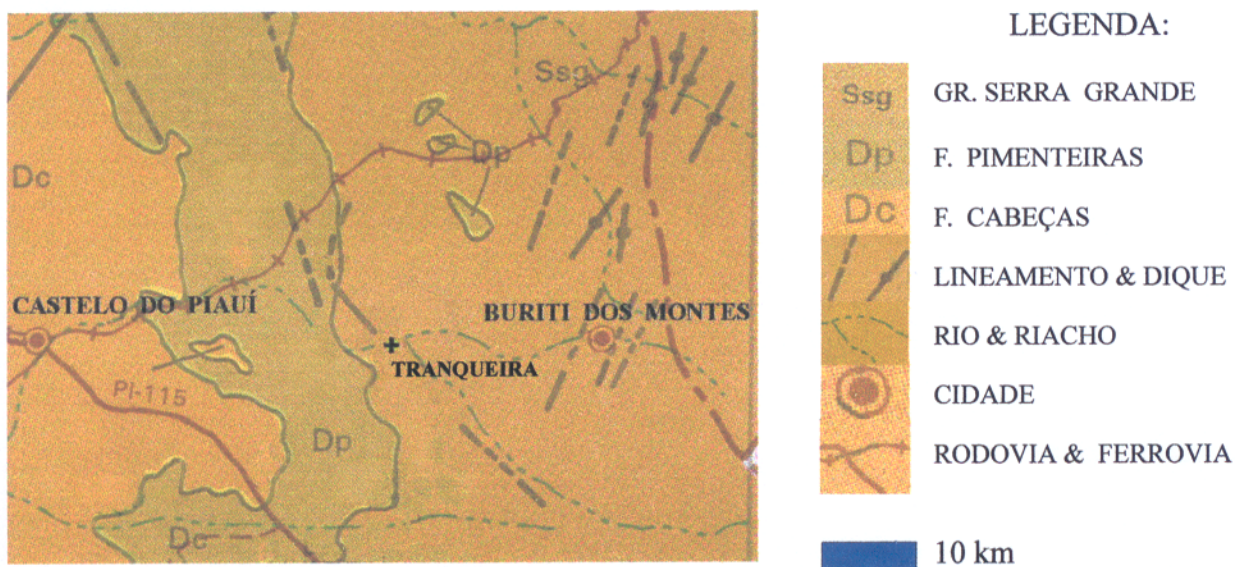


Figura 04 - Mapa geológico regional, destacando no centro da área (+), a localização do povoado Tranqueira (coordenadas: 41° 12'48" W e 5° 19'02" S).

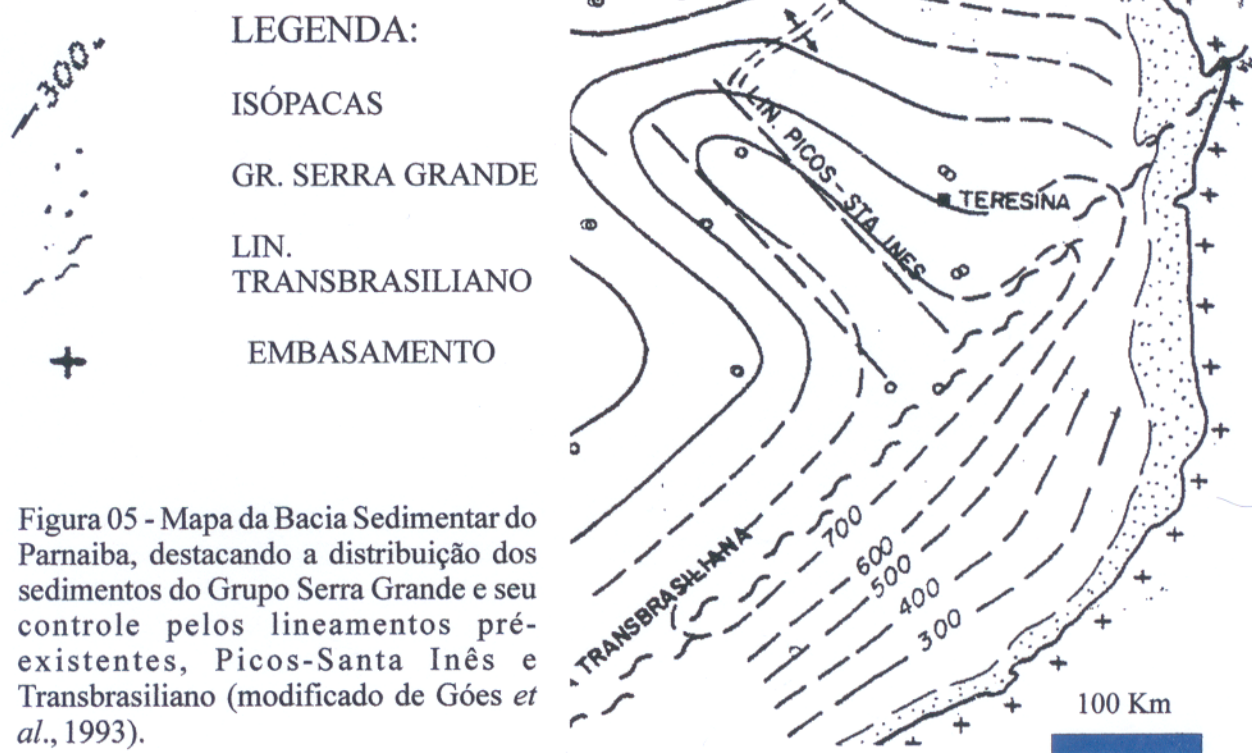


Figura 05 - Mapa da Bacia Sedimentar do Parnaíba, destacando a distribuição dos sedimentos do Grupo Serra Grande e seu controle pelos lineamentos pré-existentes, Picos-Santa Inês e Transbrasiliano (modificado de Góes *et al.*, 1993).

rochas ígneas básicas presentes na região em estudo. Dessa maneira, a atividade ígnea na Bacia Sedimentar do Parnaíba seria a mais longa entre todas as bacias brasileiras (Amazonas, Solimões, Paraná e Parnaíba), tendo ascendido através de reativações de falhas e zonas de cisalhamentos pretéritas (Almeida *et al.*, 1988), estando preferencialmente alojadas no Grupo Canindé.

Durante os trabalhos do “Projeto Platina no Piauí-Maranhão”, Oliveira (1995) identificou diques de microgranitos, leucita-fonólito e granófiros cortando o topo do diabásio (Formação Sardinha) e arenitos dos Grupos Canindé (Formação Cabeças) e Serra Grande, nos municípios de Pedro II, Campo Maior, Castelo e Buriti dos Montes. Os aluviões estão localizados nas drenagens da região, sendo constituídos de areia de granulometria média a grossa, com coloração branca a creme, contendo seixos de quartzo e arenito.

## 2.5 A OPALA NO ESTADO DO PIAUÍ

No México e na Etiópia, a opala é encontrada preenchendo amígdalas na rocha matriz, riolítica (Sanders 1975; Hoover *et al.* 1996; Johnson *et al.* 1996), enquanto que na Austrália, a opala preciosa seria de origem supergênica, ligada à variação do lençol freático sob clima árido, o que teria provocado a lixiviação da sílica de uma seqüência sedimentar. Esta sílica seria acumulada sobre uma camada argilosa, localizada 40 metros abaixo da superfície, levando ao aumento gradual na concentração até a sua saturação, culminando na precipitação da mesma como opala (Rosa 1988; Ward 2000).

No Piauí (Brasil), a região mineralizada está sob os domínios do Lineamento Transbrasiliano (L.T.). A maioria dos estudos indica que esse lineamento teria controlado a deposição dos sedimentos dos Grupos Serra Grande (Figura 5) e Canindé (Góes *et al.* 1993). A partir de reativações do referido lineamento, originou-se o vulcanismo básico fissural, presente por toda a Bacia Sedimentar do Parnaíba, preferencialmente alojados nos sedimentos do Grupo Canindé (Góes *et al.* 1993). A colocação de um *sill* na região de Pedro II, com 150 metros de espessura (Oliveira *et al.* 1979), no melhor aquífero da Bacia do Parnaíba (Neves *et al.* 1990), que são as rochas siliciclásticas da Formação Cabeças, teria originado o ambiente hidrotermal que desestabilizou os silicatos das rochas envolvidas, liberando a sílica formadora da opala, calcedônia e quartzo (Gomes 1990; Gomes & Costa 1992; 1994). Assim, as diversas ocorrências primárias de opalas no estado do Piauí, estão inseridas num contexto marcado pela associação litológica arenito-diabásio.

Até o presente, já foram identificadas ocorrências de opalas nos municípios de Alto Longá, Angical, Beneditinos, Barra d'Alcântara, Buriti dos Montes, Campo Maior, Capitão de Campos, Castelo, Domingos Mourão, Floriano, Lagoa de São Francisco, Oeiras, Pedro II, Picos, Piripiri, São Félix do Piauí, São Miguel dos Tapuios, Tanque e Várzea Grande, sendo as mais importantes aquelas localizadas em Pedro II e Buriti dos Montes.

Os diversos trabalhos realizados em Pedro II - onde estão as únicas ocorrências de opalas que até então foram objetos de estudos - apontam duas hipóteses que têm dividido as opiniões a respeito da gênese da opala de qualidade gemológica: uma associada a processos intempéricos e outra, ligada a processos hidrotermais.

### 2.5.1 Origem intempérica

Segundo Oliveira *et al.* (1979) o diabásio teria funcionado como *trap* impermeável para as águas subterrâneas, promovendo a dissolução da sílica do próprio diabásio. A precipitação da opala seria controlada pelas oscilações climáticas. Rosa (1988), justificou a concentração de opalas nobres como resultante de uma grande circulação de água saturada em sílica, em função de mudanças climáticas associadas à fase de peneplanização correspondente ao Ciclo de Erosão Velhas.

### 2.5.2 Origem hidrotermal

Nem & Urbano Filho (1974) postulam que as opalas seriam resultantes da precipitação das soluções finais do diabásio. Martins Jr. (1983) associa as opalas com as soluções finais resultantes dos diabásios e às temperaturas elevadas em ambiente altamente confinado, gerando assim as condições necessárias para mobilizar a sílica das rochas adjacentes, principalmente do arenito. Oliveira & Soares Filho (1983) afirmam que as opalas têm sua origem correlacionada às soluções silicosas emanadas das intrusões básicas. Gomes (1990) e Gomes & Costa (1992; 1994) sustentam que a gênese da opala está associada a um ambiente hidrotermal relacionado à colocação dos diabásios nas rochas siliciclásticas da Formação Cabeças, na região de Pedro II. Estas rochas, sob ação termal do diabásio, teriam tido seus silicatos desestabilizados, liberando a sílica que formou a opala. Oliveira (1995) supõe que a gênese das mineralizações de opala e ametista possa estar relacionada com microgranitos, leucita-fonólitos e granófiros.

Bartoli *et al.* (1983), no entanto, admitem ambas as hipóteses para a gênese dessas opalas, estando relacionadas às circulações de águas quentes ligadas aos *sills* de diabásio ou devido à migração de sílica de uma antiga superfície laterítica.

## 2.6 A COR NA OPALA

### 2.6.1 Generalidades

Para um melhor entendimento a respeito das cores da opala laranja aqui estudada – que variam do amarelo-claro ao vermelho-marrom – sua transparência e ausência do jogo de cores, se faz necessário uma síntese a respeito dos processos envolvidos na origem destas características, que tornam as opalas tão belas, raras e admiradas por todos.

Diversos autores, destacando-se Jones *et al.* (1964), Sanders (1964), Darragh *et al.* (1966), Jones (1975), Sanders (1975), Nassau (1976), Ball (1982), O’Donoghue (1983), Wollaert *et al.* (1990), Ward (2000), Jiang *et al.* (2001), identificaram as várias etapas do processo que leva à formação de uma opala. Observaram que num gel menos viscoso, rico em sílica amorfa, as partículas têm mais liberdade de movimento do que num gel mais viscoso, resultando em agregados de esferas de sílica mais semelhantes, proporcionando formas mais perfeitas para as esferas de sílica. Este agregado irá continuar crescendo em suspensão até que esteja mais denso do que as partículas em suspensão. Neste ponto, ocorre a precipitação das esferas de sílica amorfa. (Figura 6).

### 2.6.2 A opala preciosa

O jogo de cores é produzido pela estrutura da opala, constituída por uma rede de difração natural, tridimensional, de sílica amorfa com formas perfeitamente esféricas e tamanho uniforme, que se unem num arranjo regular. Neste caso, os interstícios entre as esferas também apresentam um arranjo tridimensional regularmente ordenado. A opala preciosa em sua forma mais bela consiste de um empacotamento de esferas perfeitas, de igual tamanho, cujos espaços entre as esferas são vazios. Este empacotamento perfeito pode ocorrer de dois modos diferentes: hexagonal e/ou cúbico. (Figuras 7 e 8).

Segundo Wollaert *et al.* (1990), a estrutura da opala de diferentes qualidades, claramente indica que a origem do jogo de cores deverá ser encontrada na microestrutura da opala. Somente um perfeito empacotamento de esferas perfeitamente idênticas em tamanho, nas  
 iam preenchidos com sílica, admitem jogo de cores. Se os

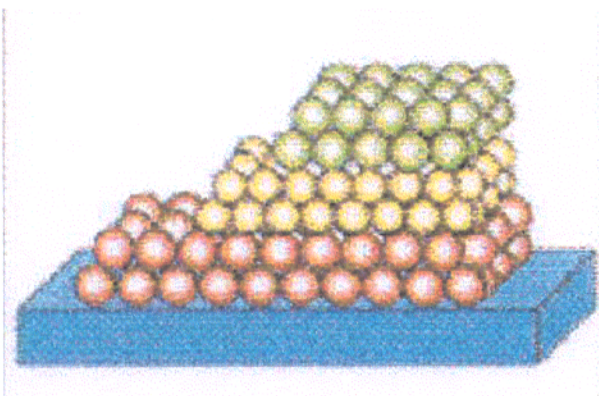


Figura 6 - Representação esquemática de uma opala bandada, com as camadas formadas pela precipitação de esferas com diâmetros diferentes (modificado de Jiang *et al.*, 2001).

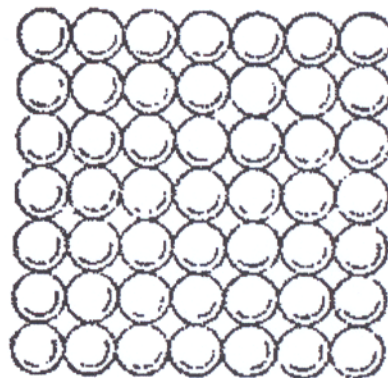
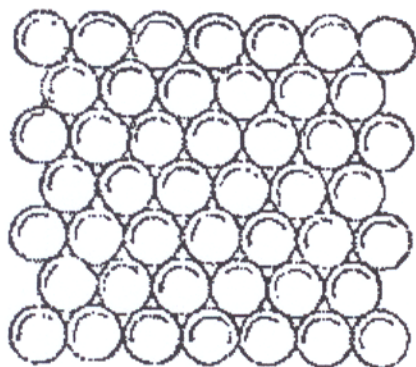
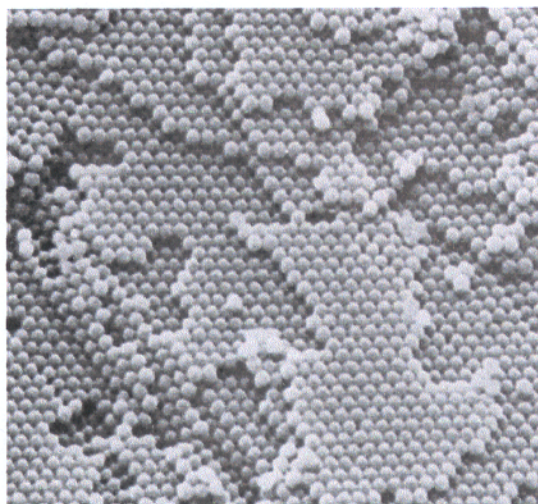


Figura 7 - Arranjo regular, ordenado, de esferas de sílica, formando uma estrutura, respectivamente, com empacotamento hexagonal e cúbico (Schwarz, 1984).

Figura 8 - Imagem obtida pelo microscópio eletrônico de varredura de uma opala, mostrando um empacotamento hexagonal das esferas de sílica. Esferas com aproximadamente 300 nm de diâmetro. (Darragh *et al.*<sup>1</sup>, citado por Klein & Hurlbut Jr., 1993).



<sup>1</sup>Darragh, P.J; Gaskin, A.J.; Sanders, J.V. 1976. Opals.

agregados de esferas de sílica não são perfeitamente esféricos ou não são todos do mesmo tamanho ou se o empacotamento não é perfeito ou se os vazios entre as esferas são preenchidos com sílica, então não ocorre o jogo de cores. Ou seja, os espaços não preenchidos entre as esferas são cruciais para o jogo de cores da opala preciosa e o grau de intensidade com os quais estes vazios são preenchidos irá determinar a qualidade da opala.

As esferas de sílica são opticamente transparentes, mas devido ao índice de refração das esferas, que fica entre 1,435 e 1,455, ser muito maior do que o índice de refração da água, vapor ou ar, os quais preenchem os interstícios entre as esferas, a luz poderá ser difratada na superfície dos interstícios. Assim, há uma quebra na continuidade óptica, agindo como uma rede de difração óptica tridimensional. (Figura 9).

Segundo Ward (2000), o jogo de cores da opala depende de vários fatores: diâmetro das esferas de sílica, uniformidade e alinhamento das esferas, ângulo da luz incidente, ângulo de visão e orientação da gema. Já Schwarz (1984), acredita que a intensidade do jogo de cores dependerá do arranjo regular das esferas e interstícios, da dimensão e preenchimento dos interstícios.

Wollaert *et al.* (1990), explicam que o comprimento máximo de onda que pode ser produzido pela difração da luz na rede tridimensional das esferas no empacotamento mais denso é dado por:

$$1,71D \leq \lambda \leq 2,37D$$

Isto significa que a cor da luz difratada depende diretamente do tamanho das esferas de sílica formadora da opala. As melhores opalas são aquelas que apresentam todas as cores do arco-íris. Para isso, são necessárias esferas com um diâmetro entre 222 e 329 nm, que mostrarão em função dos diferentes pontos de incidência da luz, independentemente do ângulo de incidência da luz branca, as diversas cores do espectro visível. Espécimes com esferas de diâmetro entre 160 a 222 nm e 329 a 455 nm podem apresentar jogo de cor sob determinado ângulo de incidência da luz. Para produzir reflexos vermelhos as esferas têm diâmetro em torno 300 nm. As esferas menores só têm condição de mostrar uma parte das cores do arco-íris: as de um tamanho em torno de 200 nm apresentam cor verde como cor máxima e aquelas de um diâmetro de cerca de 175 nm ficam azuis. (Figuras 10 a 12).

Os “grãos de cores” que aparecem nas opalas são o resultado de diferentes orientações dos planos formados pela junção das esferas que constituem o espécime de opala.

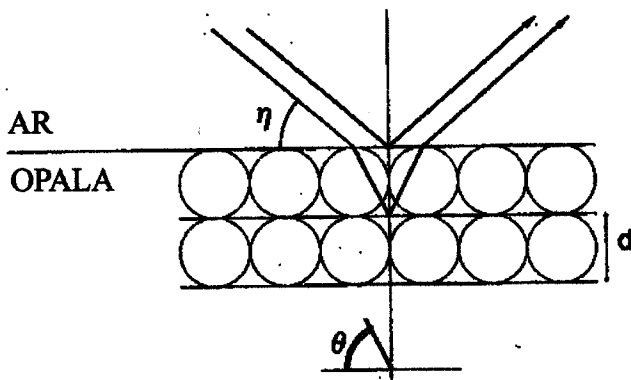
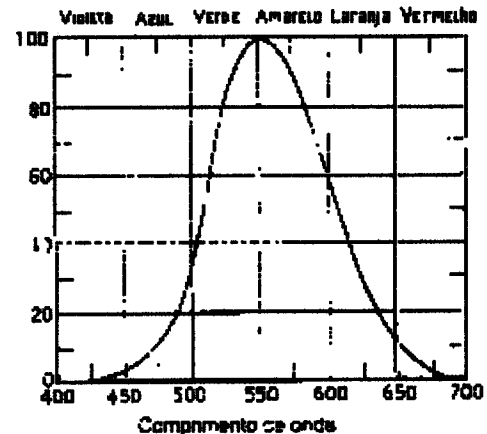


Figura 9 - Difração da luz incidente numa opala preciosa. (Wollaert *et al.*, 1990).

Figura 10 - Representação dos comprimentos de onda do espectro visível e suas cores equivalentes (Resnick & Halliday, 1996).



A sensibilidade relativa do olho humano em função do comprimento de onda

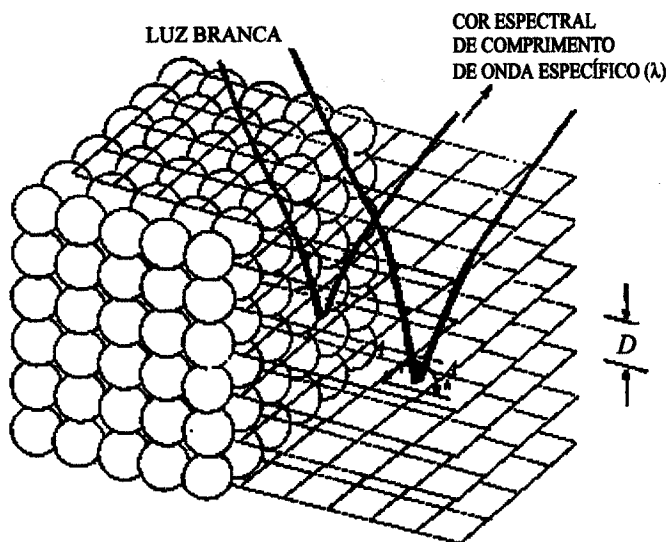


Figura 11 - Representação esquemática da estrutura ordenada, regular, tridimensional de uma opala preciosa. Destaque para a luz branca incidente e a cor espectral de comprimento de onda específico ( $\lambda$ ) que é observado pelo olho humano. Esta(s) cor(es) depende(m) do ângulo de incidência ( $A$ ) e do diâmetro das esferas ( $D$ ). (Modificado de Darragh *et al.*<sup>1</sup>, 1976, citado por Manson, 1978).

<sup>1</sup>Darragh, P.J; Gaskin, A.J.; Sanders, J.V. 1976. Opals. *Scientific American*, 234:84-95.

Devido suas diferentes orientações, as esferas de sílica formam domínios de uma orientação determinada do empacotamento. Desta forma os espectros de cores resultantes variarão e, de planos adjacentes, apresentarão cores diferentes numa determinada direção. Assim são produzidos os grãos de cores, que apresentam cores diferentes, embora as esferas sejam do mesmo tamanho. Tais padrões são como grãos num policristal e suas diferenças no tamanho e distribuição produzem a grande variedade de aparências nas diferentes amostras de opalas. (Figura 13).

Para O'Donoghue (1983) e Schwarz (1984), as partículas sendo mais uniformemente orientadas, dão largas bandas de cores, em vez de padrões menores vistos em outros tipos de opalas, ou seja, a orientação das esferas de uma maneira mais regular produz um "largo domínio de cor" em vez de grãos de cores. Essa distribuição origina os padrões *flash fire* e *broad flash fire* (Figura 14).

### 2.6.3 A opala comum

Sanders (1964), Darragh *et al.* (1966), Schwarz (1984) e Wollaert *et al.* (1990), mostram que quando o empacotamento das esferas não é regular, conseqüentemente há muitos espaços intersticiais com arranjo irregular e desordenado, ocorrendo uma dispersão geral da luz branca. As irregularidades são assim grandes interferências, originando uma variedade leitosa, geralmente com cor básica branca, denominada de opala comum (Figura 15).

A opala de qualidade média pode ser vista como uma mistura de ambas as variedades (opala preciosa e opala comum).

### 2.6.4 A opala laranja

Sanders (1964), estudando as opalas vistas ao microscópio eletrônico, revelou que as esferas constituintes das mesmas, com forma quase perfeita, sugerem que a sílica presente nos interstícios, entre as esferas, teria sido depositada numa fase seguinte ao empacotamento destas esferas, cimentando-as na posição em que se encontravam.

Para Darragh *et al.* (1966), no processo de cimentação das esferas por uma solução contendo sílica residual, as esferas tornaram-se mais duras e densas. A qualidade do jogo de cores é então fortemente influenciada pela extensão na qual os poros entre as esferas foram preenchidos. Se as esferas foram deformadas e comprimidas num contato completo ou se quase

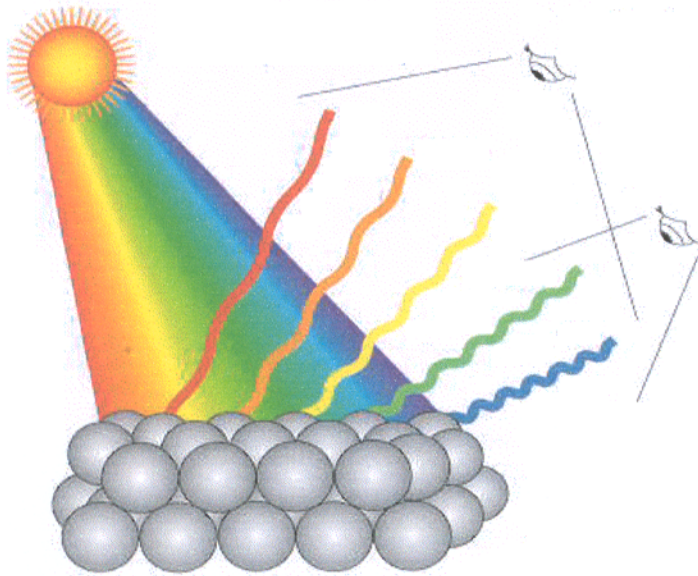


Figura 12 - Representação das cores vistas numa opala. Quando o diâmetro das esferas é cerca de 300nm, todas as cores são observadas. Quando o diâmetro tem entre 150 e 200 nm, são visíveis somente as cores verde e azul (modificado de Ward, 2000).

Figura 13 - “Grãos de cores” numa opala preciosa. O diâmetro das esferas é o mesmo, mas com diferentes arranjos, que tem suas direções indicadas pelas setas. (Schwarz, 1984).

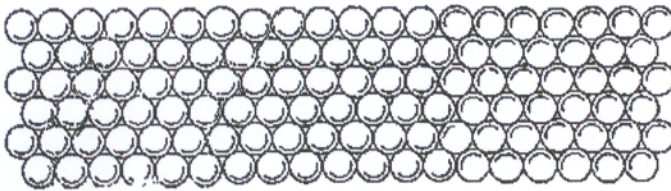
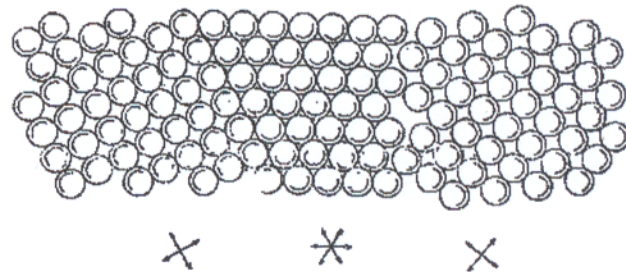
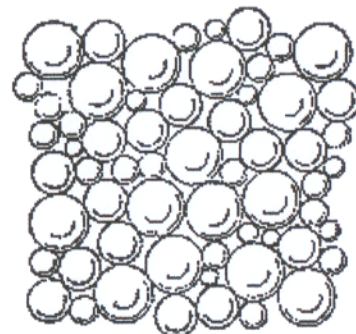


Figura 14 - Arranjo regular das esferas de sílica, resultando num “largo grão de cor”. (Schwarz, 1984).

Figura 15 - Arranjo irregular das esferas de sílica, formado por esferas com diâmetros diferentes, numa opala comum. (Schwarz, 1984).



todas as descontinuidades ópticas foram eliminadas pela deposição de sílica intersticial, a intensidade do jogo de cores é fraca, como na opala laranja e na opala mexicana. A completa eliminação das descontinuidades produz uma massa vítrea. A extensão na qual os poros são preenchidos, determinará o fator de dispersão e a intensidade da luz difratada. Se muito cimento for precipitado, os poros serão completamente preenchidos, originando uma opala transparente e sem jogo de cores. O'Donoghue (1983) afirma que nas opalas de ambiente vulcânico, os vazios entre as esferas são pequenos e isto proporciona uma maior transparência para a gema, enquanto que para Schwartz (1984), a transparência da opala varia com a dimensão dos interstícios: interstícios menores resultam numa transparência maior da gema.

Steffen (2000) menciona que como consequência do cimento de sílica que preenche os interstícios existentes entre as esferas de sílica amorfa, a opala laranja exibe ao MEV, uma imagem homogênea, não sendo possível a visualização do ordenamento regular, tridimensional, das esferas de sílica amorfa. Este autor supõe que a cor dessa variedade de opala estaria relacionada à presença do ferro.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 GEOLOGIA DAS OCORRÊNCIAS DE OPALAS LARANJAS

##### 3.1.1 Generalidades

Na região do município de Buriti dos Montes foram catalogadas diversas ocorrências de opalas laranjas, sendo descritas 33 ocorrências deste mineral, e ainda outras 10 de quartzo hialino, 3 de ametista, uma de citrino, 4 de calcedônia e 3 de barita. As ocorrências de opalas foram classificadas em primárias e secundárias, estas últimas, ligadas a depósitos aluvionares, estando todas hospedadas pelos arenitos do Grupo Serra Grande (Figura 16).

##### 3.1.2 Grupo Serra Grande

Seus arenitos têm granulometria fina a grossa, coloração branca a creme, são localmente micáceos, contendo por vezes níveis conglomeráticos intercalados, sendo constituídos por seixos de quartzo; estratificações cruzadas de grande porte e plano-paralelas são observadas.

##### 3.1.2.1 Características petrográficas

Estes arenitos foram agrupados em duas categorias distintas:

##### - Arenito em contato com os veios de quartzo e opala

Macroscopicamente, é uma rocha de granulação fina a média, com coloração creme, cortada por veios de quartzo e/ou opala laranja e/ou óxido de ferro. Estes veios mostram-se zonados, tendo da borda para o centro, quartzo, em cristais com tamanho entre 1 e 3 mm, cobertos por outro nível de cristais de quartzo, com tamanho entre 4 e 10 mm ou por uma camada de opala laranja no centro do veio.

Microscopicamente, este arenito apresenta um arcabouço fechado, constituído essencialmente de grãos de quartzo, sendo definido como um quartzo-arenito (Figura 17); subordinadamente ocorre feldspato (microclínio) e como minerais acessórios estão presentes caulinita, zircão, titanita e opacos.

O quartzo, principal constituinte da rocha, é em grande parte monocristalino, ocorrendo ainda alguns grãos policristalinos. Apresentam-se subarredondados, com extinção ondulante e contatos predominantemente do tipo retilíneo, mostrando algumas vezes, feições de sobrecrescimento e junção tríplice associada. Contatos suturados e côncavo-convexos também

41° 12' 48" W

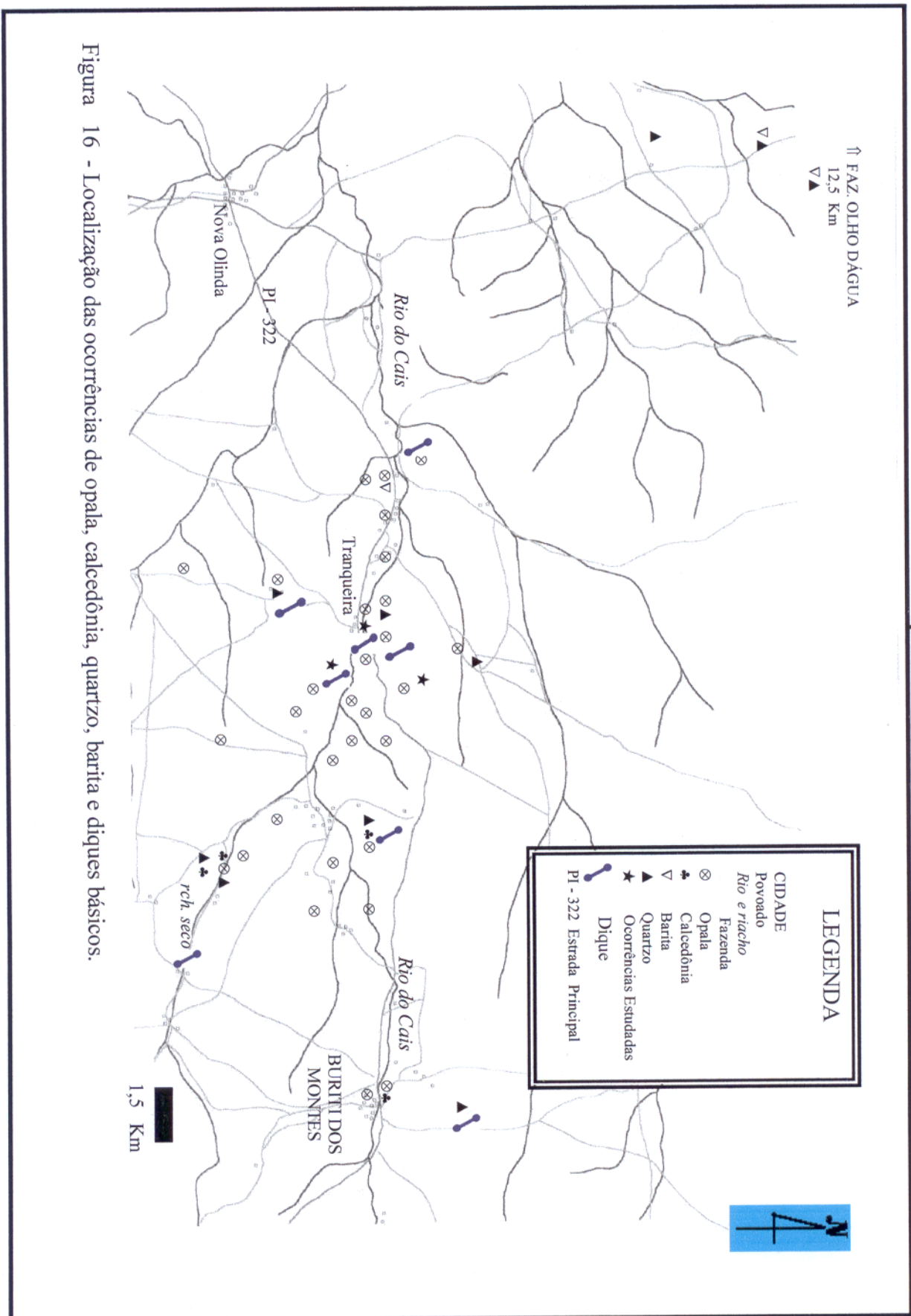


Figura 16 - Localização das ocorrências de opala, calcedônia, quartzo, barita e diques básicos.

são observados. Tanto o contorno destes grãos de quartzo como a porosidade, foram mascarados pelo intenso sobrecrecimento.

No veio, o quartzo apresenta-se em cristais euédricos a subédricos, com contatos retilíneos característicos, apresentando extinção ondulante, tendo uma zona de granulação mais fina na borda, em contato com o arenito encaixante, e no centro, cristais maiores, bem desenvolvidos.

O veio de opala, de cor básica amarelo-claro água a amarelo-claro, recobre totalmente os cristais de quartzo. Entre os cristais prismáticos de quartzo e a opala, encontra-se uma película cinza-clara, algo como uma zona de contato, possivelmente uma película de quartzo e caulinita. A opala ocorre ainda, preenchendo interstícios dos grãos de quartzo, desenvolvendo feições de corrosão nas bordas dos grãos circundantes, chegando até a envolver relictos desse mineral. O óxido de ferro ocorre tanto envolvendo grãos de quartzo secundário nas proximidades das fraturas como preenchendo estas estruturas rúpteis, que por sua vez são cortadas pelos veios de opala. Neste caso, a opala também envolve porções reliquiares de óxido de ferro (Figuras 18A e 18B).

O feldspato (microclínio), ocorre em grãos anédricos a subédricos, intensamente saussuritizados, tanto em suas bordas como ao longo de seu maclamento.

A caulinita apresenta-se em diminutas plaquetas deformadas, posicionadas entre os grãos de quartzo. O zircão, a titanita, o epídoto e os opacos, ocorrem em grãos anédricos, dispersos pelo arenito. Localmente observa-se uma película de óxido de ferro envolvendo os grãos de quartzo detríticos.

#### - Arenito próximo aos veios de quartzo e opala

Macroscopicamente, trata-se de um arenito de granulação fina, com coloração creme a cinza-claro.

Sob o microscópio, é uma rocha constituída principalmente de grãos de quartzo, com arcabouço fechado, tendo como mineral subordinado o feldspato (microclínio), e como minerais acessórios, caulinita, zircão, titanita, estilpnomelano e opacos.

O quartzo ocorre tanto na forma de grãos monocristalinos, predominantemente, como em grãos policristalinos, com extinção ondulante, subangulosos a subarredondados, tendo contatos do tipo côncavo-convexo, suturado e retilíneos.

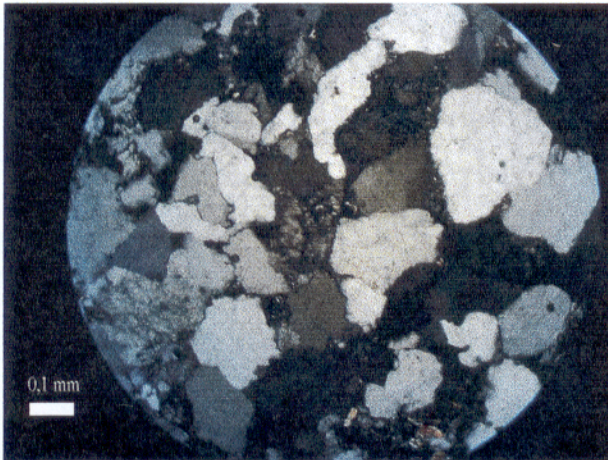


Figura 17 - Textura geral do quartzo arenito, destacando seu arcabouço fechado.

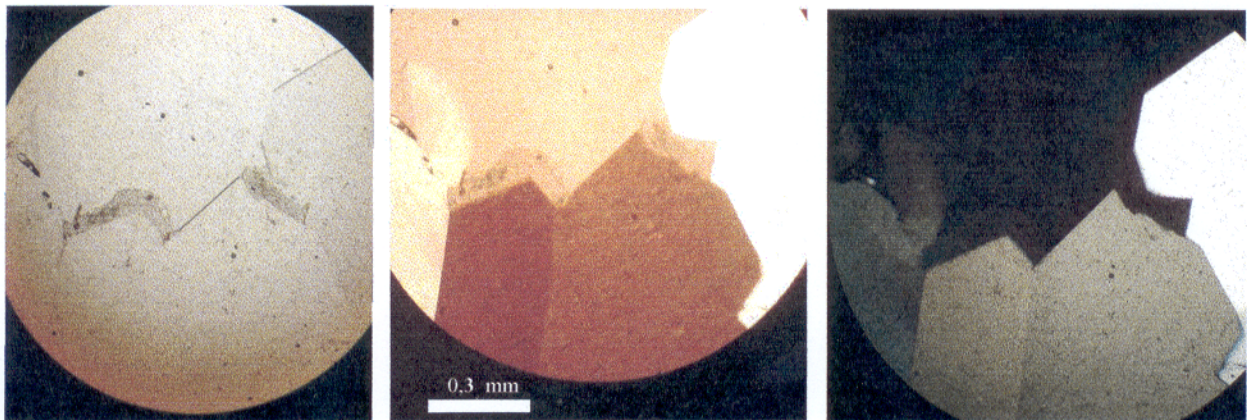
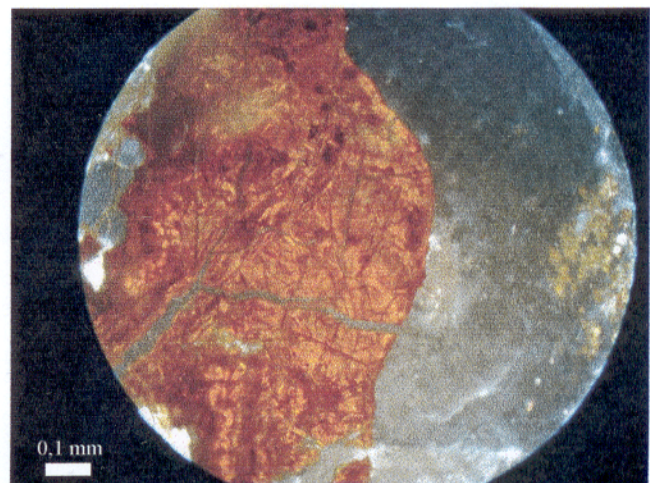


Figura 18 A - Imagens mostrando a zonação de um veio que tem nas bordas, cristais de quartzo parcialmente recobertos por uma película de quartzo e caulinita; estes minerais por sua vez são completamente envolvidos pela opala que ocupa a porção central do veio. A esquerda, luz paralela; a direita, nicóis cruzados e; a imagem do centro, com luz em um estágio de transição entre os dois anteriores.

Figura 18 B - Veio contendo óxido de ferro e opala, destacando a opala que preenche fraturas no óxido de ferro e envolve porções reliquiares do mesmo.



O feldspato (microclínio), ocorre em grãos anédricos a subédricos, bastante saussuritizados em suas bordas e ao longo de seu maclamento.

A caulinita apresenta-se em plaquetas deformadas, posicionadas entre os grãos de quartzo. O estilpnomelano, de coloração amarelo-alaranjada, apresenta-se com disposição fibro-radial, próximo dos grãos de minerais opacos, sendo possivelmente resultante da transformação destes. O zircão, a titanita, o epídoto e os opacos, (estes, por vezes, formam uma película que envolve os grãos de quartzo) anédricos, ocorrem dispersos pelo arenito.

### 3.1.3 Formação Sardinha

Na área de estudo, essa unidade estratigráfica é representada pelos diques de rochas básicas, aplíticos, porfíricos, de coloração esverdeada a creme, apresentando-se bastante alterados. Foram mapeados 8 (oito) diques com espessura entre um e dois metros.

#### 3.1.3.1 Características petrográficas

Macroscopicamente, as rochas básicas são afaníticas, leucocráticas, de coloração creme a cinza-claro, contendo pórfiros de feldspato, estando em geral bastante alteradas. Mostram-se bastante brechadas e fraturadas no contato com o arenito encaixante, contendo vênulas preenchidas pela opala e/ ou quartzo e/ou óxido de ferro e/ou caulinita.

Microscopicamente, exibem textura intersetal, (MacKenzie *et al.*, 1982) definida pelos pseudomorfos de feldspato envolvidos por piscinas de matriz vítrea (Figura 19A). No contato com a rocha encaixante, apresentam-se intensamente fraturadas contendo vênulas preenchidas pela opala e/ ou óxido de ferro e/ou caulinita que conferem à rocha um aspecto brechóide.

A matriz vítrea, de coloração amarronzada, é formada por cristalitos fibrosos a fibroradiais. Localmente, observam-se pórfiros intensamente saussuritizados (pseudomorfos de feldspato) dispersos aleatoriamente e alguns cristais esqueléticos (Figura 19B).

As fraturas preenchidas pelo óxido de ferro apresentam localmente uma zonação, onde este se concentra nas suas bordas e a caulinita ocupa a zona central. São veios com bordas irregulares, característicos de dissolução da mineralogia primária (do diabásio) e substituição pelos minerais precipitados, neste caso, a hematita e a caulinita, (Figura 20).

O estilpnomelano ocorre próximo as fraturas preenchidas por óxido de ferro, sendo

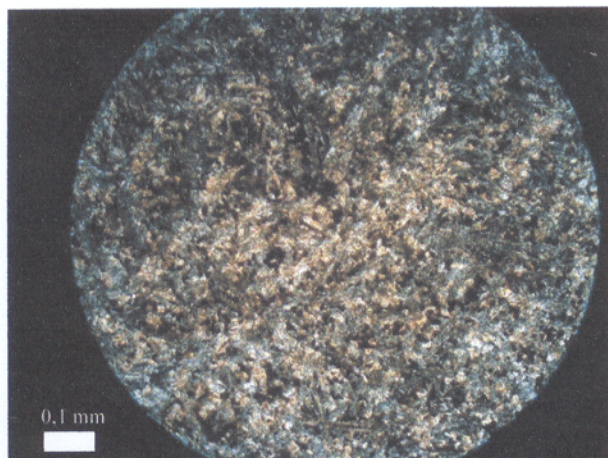


Figura 19 A - Imagem destacando a textura intersetal, definida pelos pseudomorfos de feldspatos envolvidos pelas piscinas de matriz vítrea (NX, 25X).

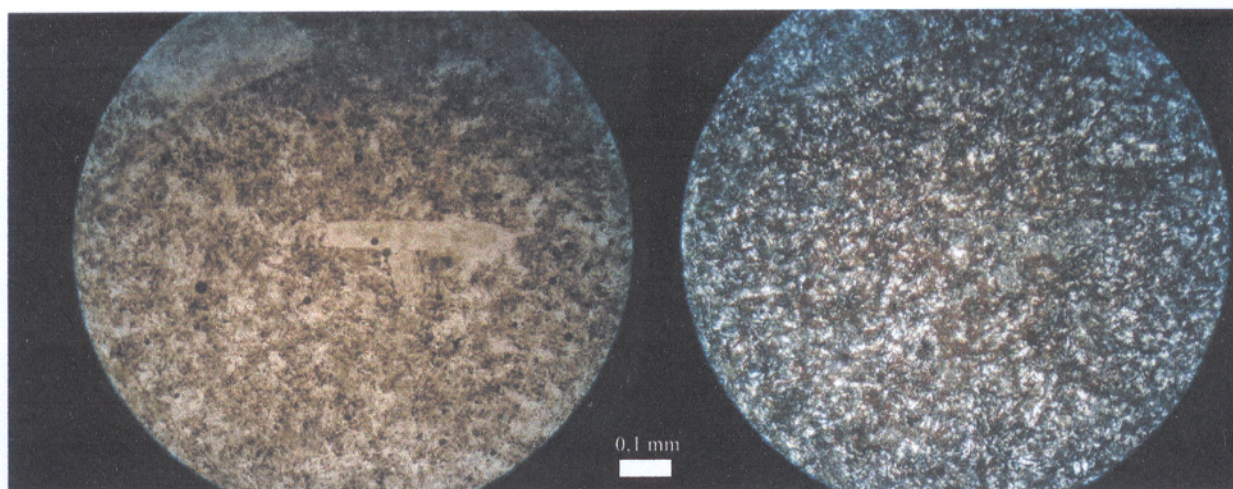


Figura 19 B - Imagens destacando o pórfiro de feldspato intensamente saussuritizado (pseudomorfo). Respectivamente com luz paralela e com nicóis cruzados.

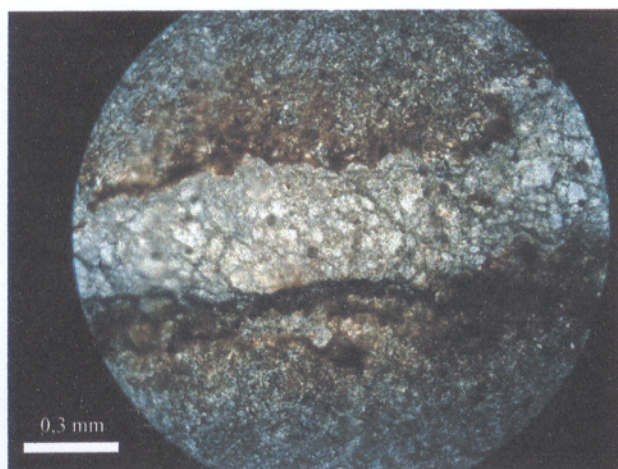


Figura 20 - Veio com caulinita e óxido de ferro. Ressalta a zonação definida pelo óxido de ferro nas bordas e a caulinita no centro do veio. Destaca ainda o contorno irregular de suas bordas.

resultante da alteração deste.

### 3.1.4 Aluviões

Foi identificado um único depósito secundário, do tipo *placer*. É um paleocanal mineralizado, que na base de sua porção central, apresenta uma lente com seixos e blocos de arenito, quartzo e opala, dentro de uma camada arenosa que grada para areno-argilosa no topo. A lente mineralizada se situa a uma profundidade que varia de 0,5 a 2,0 metros.

## 3.2 AS OCORRÊNCIAS DAS OPALAS LARANJAS

### 3.2.1 Generalidades

Nas ocorrências primárias, principal modo de apresentação, a opala está na forma de vênulas e veios. As vênulas normalmente têm entre 0,4 cm e 3,0 cm de espessura e 5,0 e 20,0 cm de comprimento, enquanto que localmente, um veio apresenta aproximadamente 150 metros de extensão. Destaca-se, em comum entre as vênulas e o veio, o mesmo tipo de opala laranja.

Associados à opala, localmente encontram-se veios de quartzo, calcedônia, barita, hematita (e/ou goethita). Tanto a hematita como a goethita estão localizadas entre os cristais de quartzo e a opala ou recobrimdo parcialmente a base dos cristais de quartzo ou, principalmente, formando concreções entre o dique de rocha básica e o arenito encaixante. Na região são encontrados ainda veios de ametista (Figuras 21 e 22).

No caso em que as concreções são formadas, com agregado botrioidal, tamanho entre 10 e 20 cm, as mesmas são constituídas de camadas paralelas a subparalelas, por vezes com aspecto maciço, normalmente brechadas, apresentando opala ou calcedônia ou quartzo entre as camadas e/ou cimentando a brecha. As concreções, ao serem quebradas, algumas vezes mostram uma película de opala transparente, com cor básica azul, vermelha, laranja ou amarelo, recobrimdo uma base de hematita ou goethita (constituintes da concreção), como numa opala *bolder*, tendo uma aparência semelhante à opala *bolder* negra (Figuras 23 e 24).

Nos arredores do povoado Tranqueira, foram mapeadas diversas ocorrências de opalas, sendo selecionadas as três principais, em função da quantidade e qualidade de opala que continham. As duas primeiras estão associadas em campo, a diques de rochas básicas aplíticas, sendo descritas a seguir.

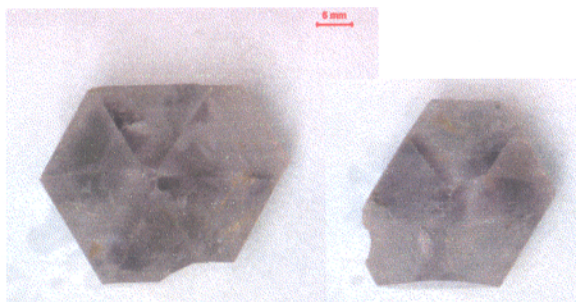


Figura 21 (acima) - Cristais de ametistas com distribuição irregular de cor; característicos na região.



Figura 22 (no alto, a direita) - Drusa de quartzo mostrando uma associação de romboedros formando pseudopirâmides.



Figura 23 (a direita) - Concreção com fraturas preenchidas pelo quartzo hialino, ametista e citrino.



Figura 24 - Concreções com fraturas preenchidas pela hematita (e/ou goethita) e opala, respectivamente de cor básica azul e vermelha.

### 3.2.2 Ocorrência Tranqueira 1

Localizada no início do caminho que leva à fazenda Santiago, a opala ocorre associada a um dique com direção N 330°, constituída de uma rocha básica, com 1,5 a 2,0 metros de espessura, aplítica, porfiritica, bastante alterada, com coloração creme, intensamente microfahado e fraturado, principalmente nas proximidades do contato com o arenito encaixante. A opala apresenta-se nas cores amarelo-claro e azul-claro, preenchendo feições rúpteis.

### 3.2.3 Ocorrência Tranqueira 2

Dista aproximadamente 500 metros da primeira ocorrência, sendo provavelmente uma continuação da mesma. A opala, além das tonalidades descritas anteriormente, também se apresenta nas cores vermelha e branca (leitosa). Preenchem fraturas e, também se apresentam cimentando tanto uma brecha escura, densa, constituída de concreções de hematita ou goethita, como preenchendo vênulas em concreções desse mesmo material, dispostos na zona de contato entre o dique de rocha básica e a rocha hospedeira.

Em seção vertical, este dique mostra um padrão escalonado para a esquerda, definido pelos saltos laterais (*dyke jumps*) do mesmo. Paralelos aos limites do dique com a rocha encaixante existem fraturas, ora no arenito, ora numa faixa de contato entre ambos. Estas fraturas tanto podem estar secas, como preenchidas pela mineralização (opala, quartzo, calcedônia, hematita ou goethita), (Figura 25).

### 3.2.4 Ocorrência Tranqueira 3

É a mais importante de todas as ocorrências, distando cerca de 2 km do povoado Tranqueira. Esse veio ressalta-se na topografia como um morrote alinhado, resultante da silicificação da rocha encaixante nas bordas do mesmo (Figura 26). Internamente, esse veio mostra uma espessura de 1 a 1,5 metros, com a rocha encaixante, o arenito, intensamente brechada; as fraturas apresentam mergulhos verticais, contendo em seus planos, por vezes, cristais de quartzo com dimensões entre 0,3 e 3,0 cm, na variedade hialino, podendo exibir um aspecto leitoso e/ou esverdeado, em função da grande quantidade de inclusões; localmente esses cristais apresentam-se recobertos pela opala.

Nesta ocorrência inicia um paleocanal, apresentando uma lente mineralizada com seixos de opala na base de sua porção central, sobreposta por uma camada arenosa que grada para

areno-argilosa no topo. Este depósito secundário é o principal garimpo de opala na região (Figuras 27 e 28), e de onde foi explorada uma das maiores opalas do mundo, uma pepita pesando 23.000,00 ct. (4.600,00 gramas), (Gomes & Costa, 2001).

Não foi encontrado opala preciosa nas ocorrências catalogadas, embora Johnson & Koivula (1999) citem uma ocorrência de opala com jogo de cores localizada a 5 km sudoeste do povoado Tranqueira, e que aparentemente encontra-se exaurida.

### 3.3 CARACTERIZAÇÃO GEMOLÓGICA

#### 3.3.1 Generalidades

Dentre os aproximadamente cinquenta quilos de opalas descritos no capítulo trabalhos laboratoriais, sub-ítem generalidades, as amostras utilizadas neste estudo foram selecionadas aleatoriamente (provenientes principalmente dos veios e do colúvio da ocorrência Tranqueira 3), mas levando-se em conta sua representatividade de cor, textura, inclusão, e/ou por conter alguma peculiaridade dentro do conjunto, sendo caracterizadas a seguir:

#### 3.3.2 Características gerais

**Jogo de Cores** - Nenhuma amostra de opala laranja estudada exhibe jogo de cores. Somente foi observado um suave e delicado jogo de cores na variedade azul-clara, cristal, mas sem padrão de jogo de cores definido, com cor azulada a lilás.

**Cores básicas** - Registra-se uma grande diversidade de cores básicas, variando de amarela-clara a vermelha-amarronzada, apresentando as tonalidades amarelo-claro água (este termo é aqui usado como uma tradução de *clear water*), amarelo-claro, amarelo, amarelo-laranja, laranja, laranja-avermelhado, vermelho, vermelho-escuro e vermelho-amarronzado, além de azul-clara (rara) e branca leitosa (opala comum), (Tabela 01 e Figura 29).

**Diafaneidade** - Essas opalas, de um modo geral, têm boa transparência, sendo que as de cores vermelha escura e vermelho amarronzada são menos transparentes. Do total de amostras analisadas, aproximadamente 95% apresentam transparência *clear* a *very clear* (Tabela 01).

**Dureza** - 6,5

**Densidade** - Oscila entre 2,08 e 2,20

**Índice de Refração** - 1,455 (+0,005, -0,015).

**Fluorescência sob luz ultravioleta** - Foram analisadas amostras de todas as cores, brutas e lapidadas, e em nenhuma delas observou-se qualquer reação à fluorescência sob luz ultravioleta, permanecendo inerte tanto sob ondas curtas como sob ondas longas.

**Reação sob o filtro Chelsea** - Inerte

**Polariscópio** - Todas as amostras analisadas mostraram-se isotrópicas.

Tabela 01 - Classificação da opala laranja segundo a cor básica e transparência (Downing, 1992).

<i>COR BÁSICA</i>	<i>TRANSPARÊNCIA</i>		
	<i>HAZY</i>	<i>CLEAR</i>	<i>VERY CLEAR</i>
AMARELO-CLARO ÁGUA	COMERCIAL	COMERCIAL	COMERCIAL
AMARELO-CLARO	COMERCIAL	COMERCIAL	COMERCIAL
AMARELO	COMERCIAL	COMERCIAL	BOA
AMARELO-LARANJA	COMERCIAL	BOA	BOA
LARANJA	BOA	BOA	EXCELENTE
LARANJA- AVERMELHADO	BOA	EXCELENTE	EXTRA
VERMELHO	BOA	BOA	EXCELENTE
VERMELHO-ESCURO	COMERCIAL	BOA	BOA
VERMELHO- AMARRONZADO	COMERCIAL	COMERCIAL	BOA

### 3.3.3 A cor na opala laranja

Pelo exposto anteriormente no item “A cor na opala”, para as opalas laranjas aqui estudadas, investigadas no MEV sob diferentes formas de preparações (descritas no capítulo materiais e métodos/ caracterização mineralógica/ MEV), a grande maioria das imagens obtidas mostram uma estrutura homogênea, com aspecto maciço, sem uma perfeita individualização das esferas formadoras da opala. (Figuras 30 a 33). Quando observadas ao MEV, as esferas de sílica constituintes da opala apresentam os seus espaços intersticiais completamente preenchidos de sílica (Figura 34).

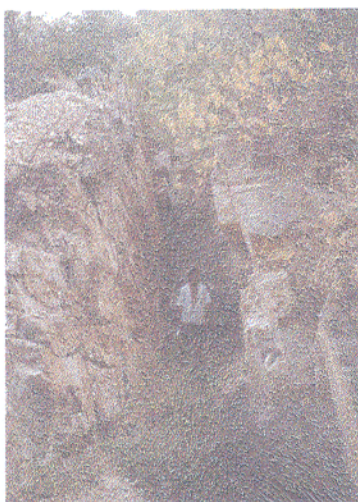


Figura 25 - Dique de rocha básica com padrão escalonado para a esquerda. Apresenta mineralização de opala no contato com o arenito encaixante (Ocorrência Tranqueira 2).

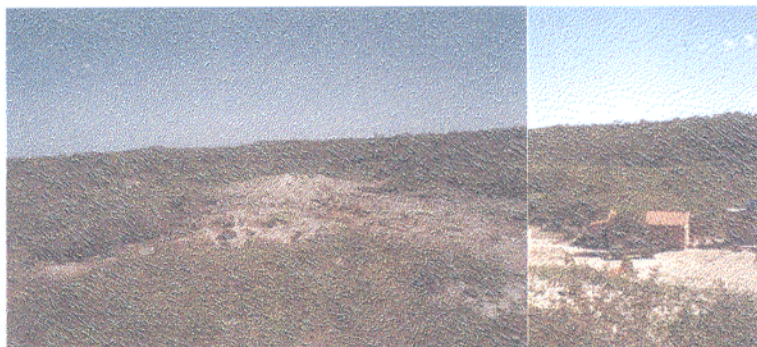


Figura 26A - Vista panorâmica do principal garimpo de opala de Buriti dos Montes. Visão paralela ao veio de opala (Ocorrência Tranqueira 3).



Figura 26B - Vista lateral do morrote alinhado que contém o veio de opala. (Ocorrência Tranqueira 3).



Figura 27 - Paleocanal com o capeamento estéril removido por um trator de esteira. Ocorrência secundária e principal garimpo de opala da região.



Figura 28A - Detalhe da lente mineralizada na base do paleocanal, contendo blocos de arenito, seixos de quartzo e opala.



Figura 28B - Pepita de opala medindo 22,5 x 15,0 x 12,5 cm.

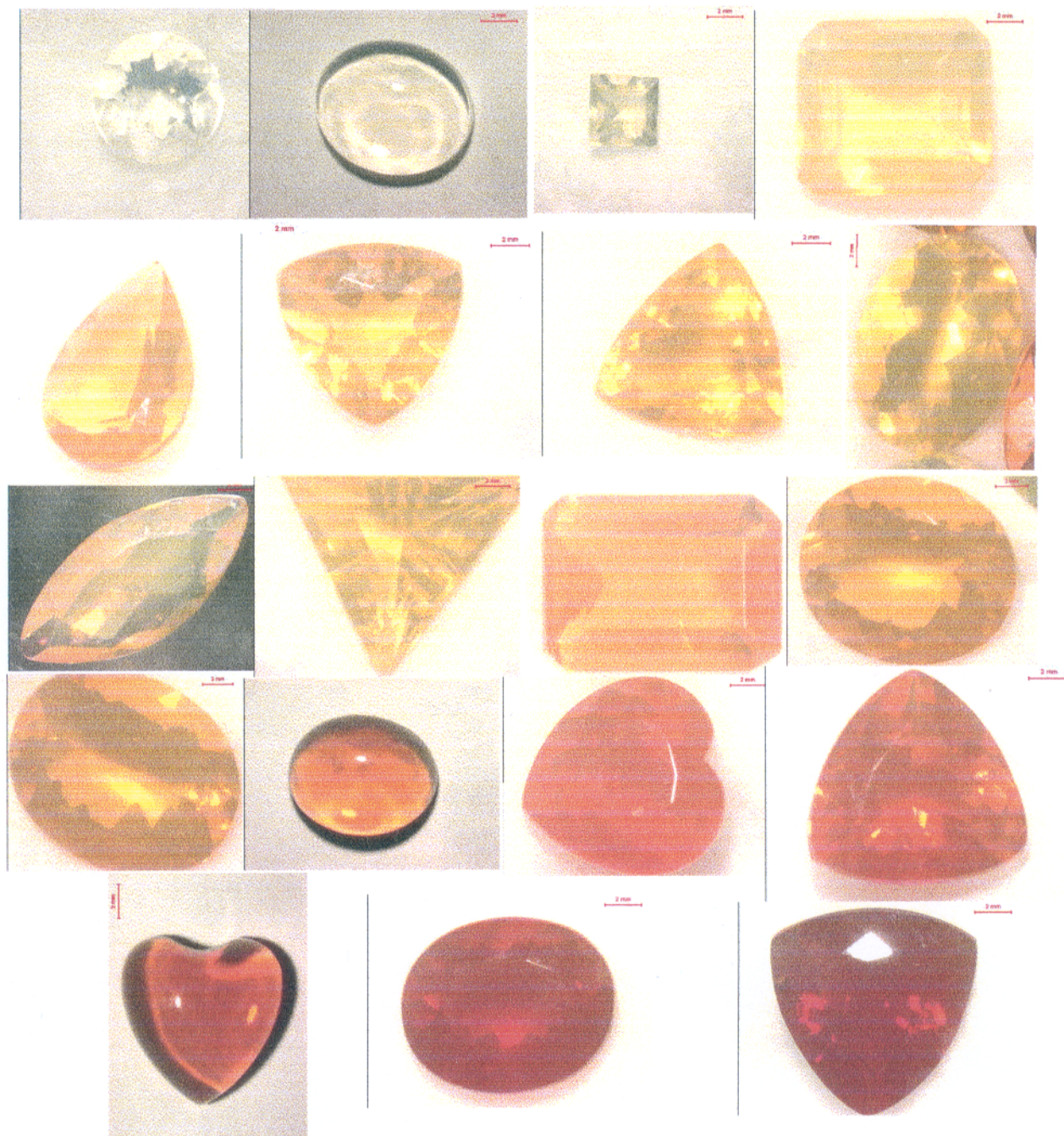
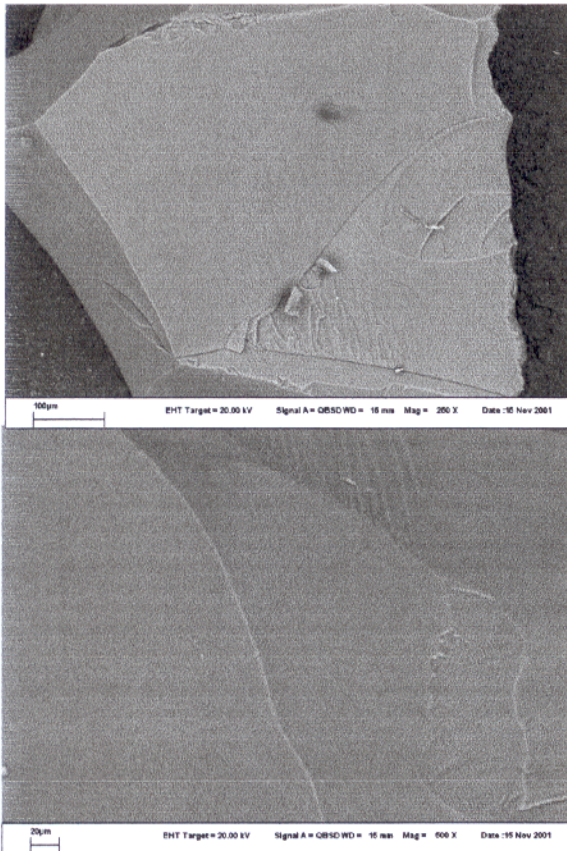
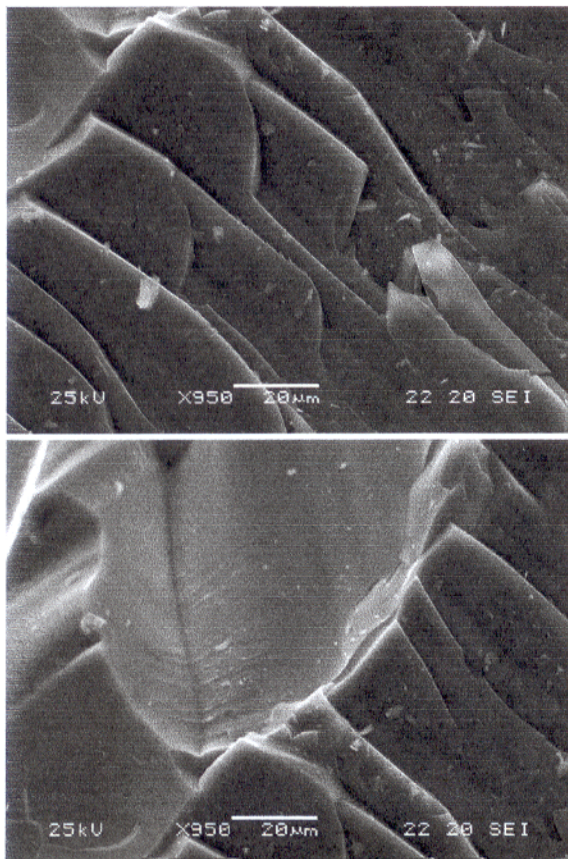


Figura 29 - Diferentes cores básicas da opala laranja, variando do amarelo-claro água ao vermelho-amarronzado. Mostra ainda vários tipos de lapidação, tanto como cabochão como facetadas (todas as imagens tem a mesma escala com 2mm).



Figuras 30 e 31 - Imagens de opalas laranjas obtidas pelo MEV, sem a individualização de sua estrutura interna, mostrando aspecto homogêneo, maciço. Notar fratura conchoidal.



Figuras 32 e 33 - Imagens obtidas pelo MEV, destacando o aspecto homogêneo, maciço, destas opalas laranjas.

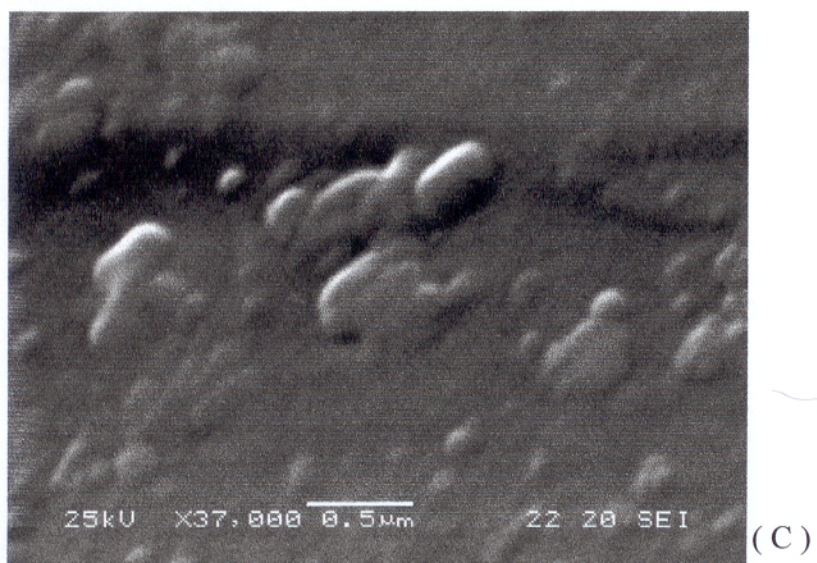
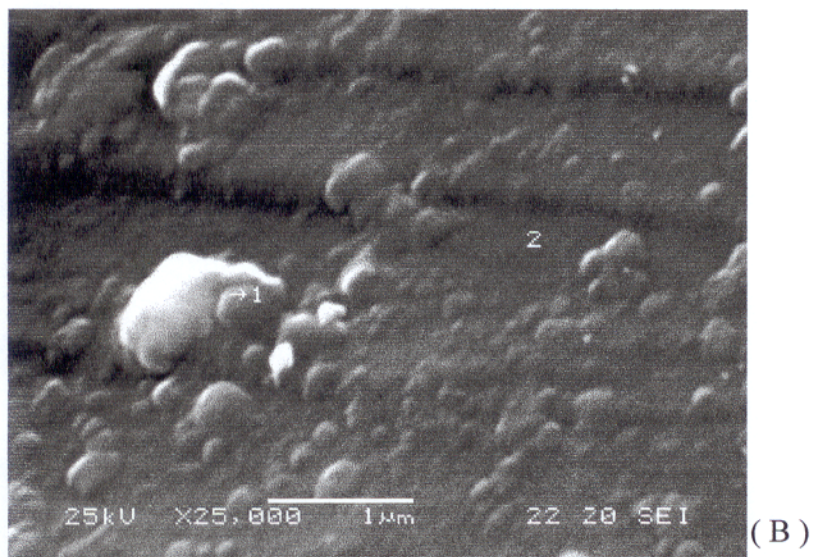
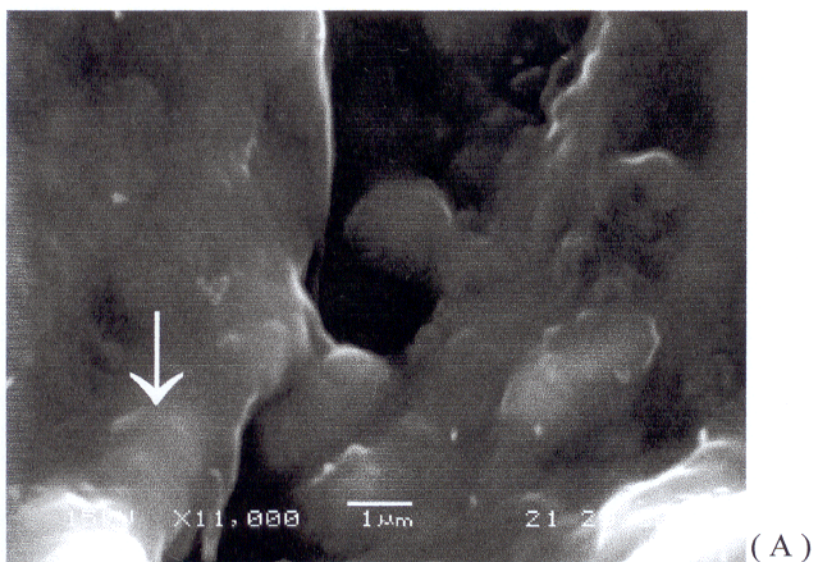


Figura 34 - Imagens da amostra Ergbd10. Em (A), destaque para uma estrutura formada pelas esferas de sílica opalina, com diâmetro aproximado de 300 nm, imersas num cimento de mesma composição. Em (B) e (C), destaca-se a distribuição das esferas de sílica e vários “nódulos” formados pela união de diversas esferas, apresentando formas e diâmetros diferentes.

### 3.3.4 Inclusões

#### 3.3.4.1 Generalidades

O conhecimento do conjunto de inclusões características de determinada gema é um importante instrumento para sua diferenciação das demais ocorrências mundiais. No caso da opala laranja, a única ocorrência expressiva conhecida encontra-se no México (Zeitner 1989; Spencer *et al.* 1992; Downing 1992).

Em função da grande maioria das opalas encontradas em todo o mundo não ter inclusões ou estas não puderem ser observadas devido a gema envolvente não apresentar boa transparência (Gübelin & Koivula, 1986 e 1992), somente em 1983 é que foram descritas inclusões em opalas.

Foram identificadas inclusões de bravoíta em opala preciosa brasileira; partículas finas do arenito encaixante, em opalas australianas e, principalmente, identificadas inclusões de hornblenda, quartzo, goethita e inclusões bi e trifásicas em opalas laranjas mexicanas (Gübelin & Koivula 1986; Gübelin & Koivula 1992 e Spencer *et al.* 1992). Smith (1990), analisou uma amostra de opala laranja preciosa, possivelmente mexicana, contendo uma inclusão atípica, com o formato de ovo. Johnson *et al.* (1996) caracterizaram uma nova ocorrência de opala preciosa e laranja na Etiópia, com inclusões de fraturas de tensão, tubos, estrutura de fluxo, pirita (?) e hematita (?). Knigge & Milisenda (1997) identificaram inclusões de pirita em amostras de opalas preciosas provenientes da mina do Boi Morto, em Pedro II.

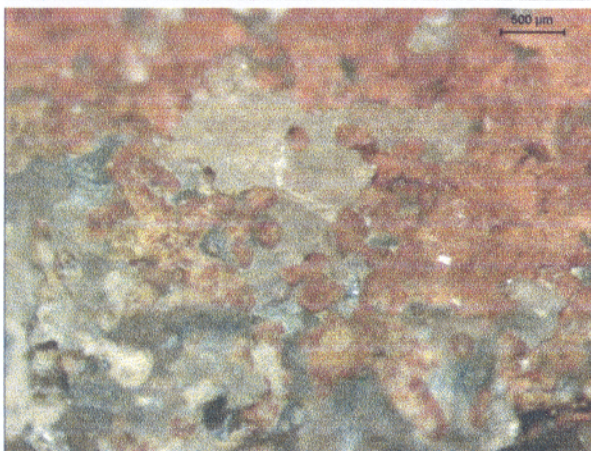
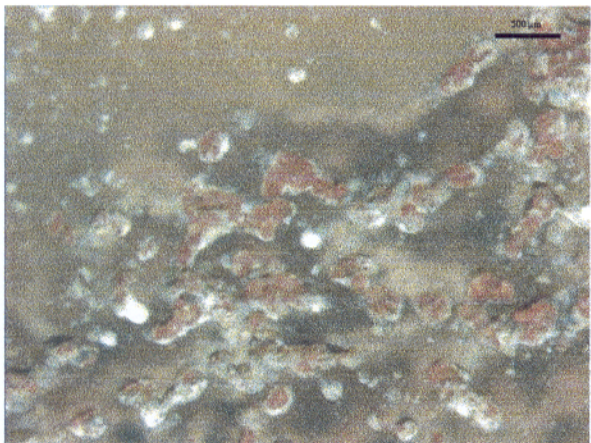
#### 3.3.4.2 As inclusões nas opalas laranjas

As inclusões identificadas neste estudo, parcialmente publicadas em Gomes & Costa (2001b; 2001c e 2001f) foram obtidas de 239 amostras de opalas laranjas contendo inclusões, todas provenientes da ocorrência Tranqueira 3, sendo classificadas como:

- Arenito: porções do arenito encaixante aprisionadas pela opala. Tem granulometria fina, coloração normalmente creme a avermelhada, constituída de quartzo, caulinita e hematita (ou goethita), sendo comumente envolvido por uma fina camada branca. Estas inclusões são classificadas morfológicamente como:

➤ Tubo ou canal: conduto alongado, recurvado, mais ou menos cilíndrico, podendo estar vazio ou parcialmente preenchido pelo arenito (Figuras 35 a 37);

- **Vermicular:** caracteriza-se pela presença de uma grande quantidade de tubos preenchidos pelo arenito (Figura 38);
  - **Banco de coral:** estruturas semelhantes aos bancos de corais, com aspecto botrioidal, nas cores vermelha, branco, cinza, amarronzado e negro; geralmente é encontrado quando grandes porções (acima de 1,0 cm) do arenito são envolvidas pela opala (Figuras 39 a 42);
  - **Estalactite, estalagmite e coluna:** são semelhantes às estruturas colunares formadas respectivamente no teto ou no solo ou pela junção destas, no interior das cavidades subterrâneas pelo gotejamento da água subterrânea rica em materiais dissolvidos da rocha hospedeira (Figuras 43 a 46);
  - **Bolha:** com forma arredondada ou ovalada, com diâmetro entre 5 e 20 mm, translúcidas a opacas, com coloração branca ou creme ou cinza-claro, podendo encontrar-se fraturada, exibindo coloração avermelhada na fratura. Às vezes são envolvidas por uma fratura que circunda toda a bolha, tipo uma “redoma”, sendo encontradas também associadas, fraturas de tensão e microconcreções gretadas. É uma estrutura zonada, tendo um núcleo avermelhado, de arenito menos alterado, e uma fina zona de borda ou de contato ou de reação com a opala, que confere cor à bolha. A identificação de duas amostras por DRX revelou quartzo, caulinita e hematita, enquanto que outra amostra contendo uma inclusão encontrada aberta, em contato com o meio, indicou quartzo, caulinita e goethita; a fina camada branca que envolve a bolha é constituída, segundo a DRX, de quartzo e caulinita (Figuras 47 a 54);
  - **Botrioidal:** são as inclusões formadas por um conjunto de formas arredondadas agrupadas aleatoriamente, mas com uma tendência geral da inclusão como um todo, para um arredondamento (Figura 55);
  - **Irregular:** são aquelas inclusões com aspecto terroso, granular, onde o arenito encaixante apresenta-se de modo característico, como tal (Figura 56);
- **Craqueamento:** é um conjunto de diminutas fraturas que iniciam na borda de uma opala; vão tornando-se mais intensas, maiores, e ao mesmo tempo avançam em direção ao núcleo da amostra, chegando até, em alguns casos, a fragmentar toda a amostra. São resultantes da desidratação da opala (Figuras 57 a 60);
- **Estrutura de fluxo:** uma estrutura normalmente concêntrica ou com tendência a essa



Figuras 35 e 36 - Imagens mostrando a formação das inclusões de arenitos, quando a opala envolve porções da rocha encaixante. Destaque para as porções reliquiares do arenito encaixante que dão origem aos tubos, espaços não totalmente preenchidos pelo arenito.

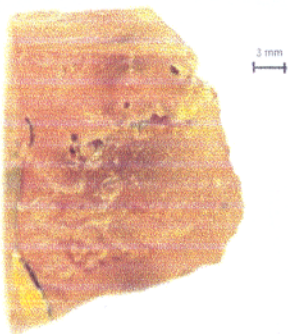


Figura 37 - Detalhe externo de uma inclusão tipo tubo.

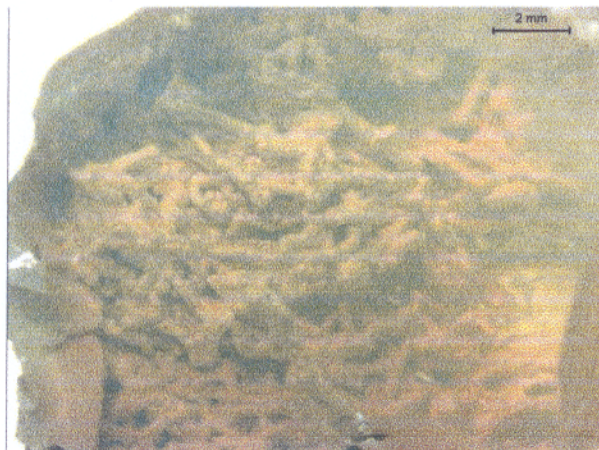
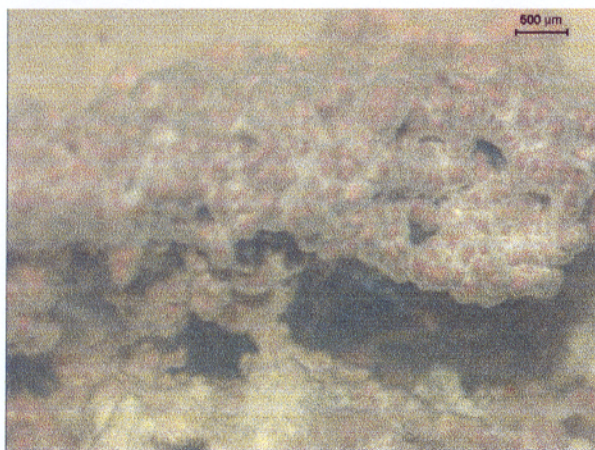
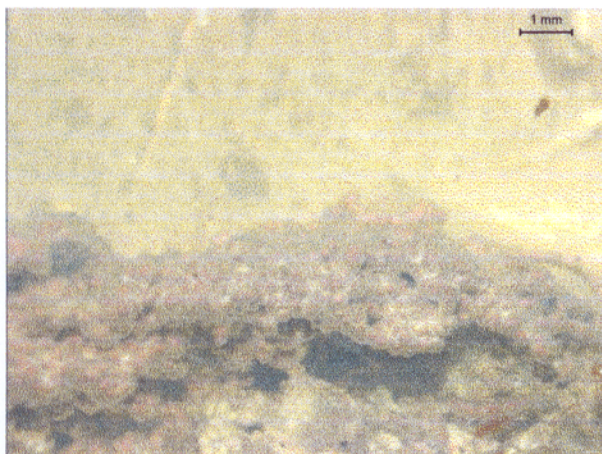
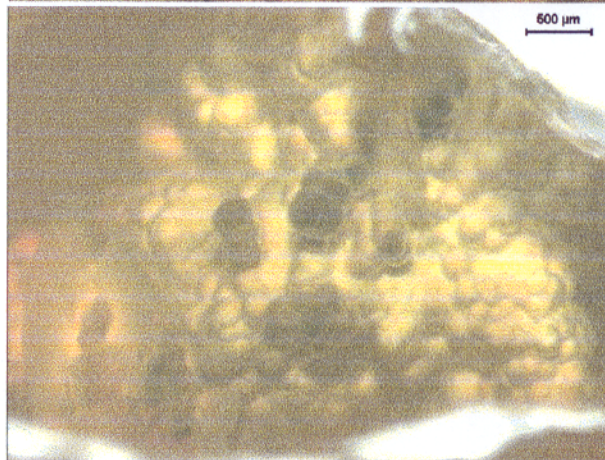
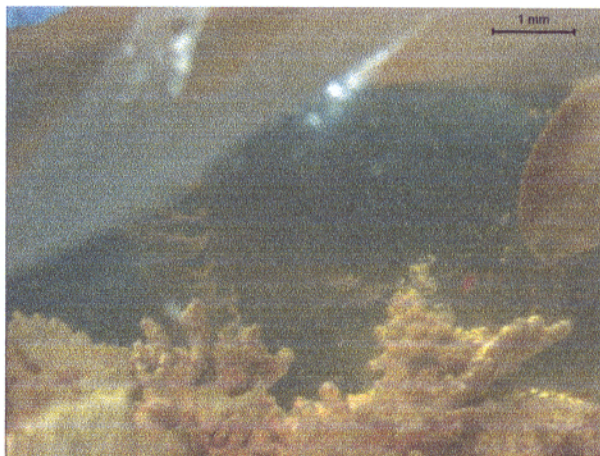


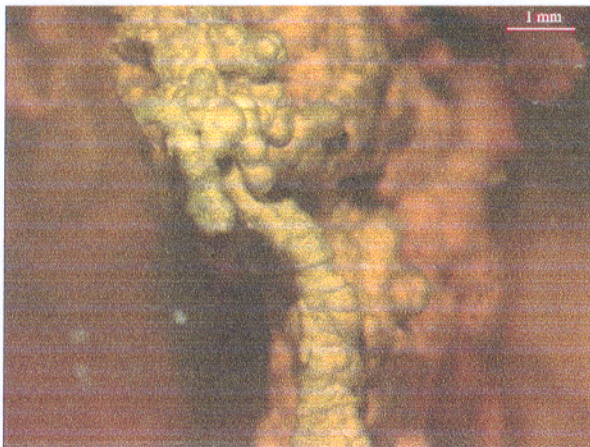
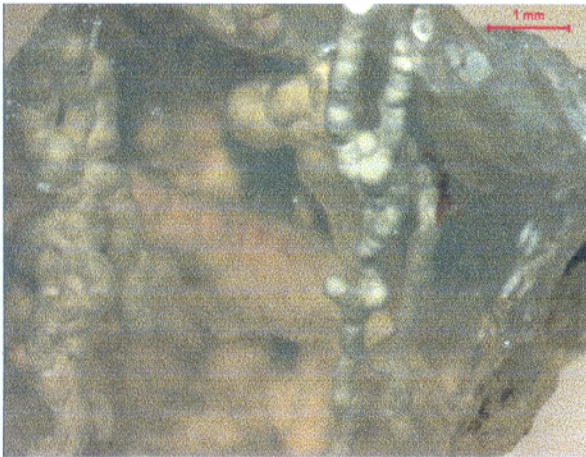
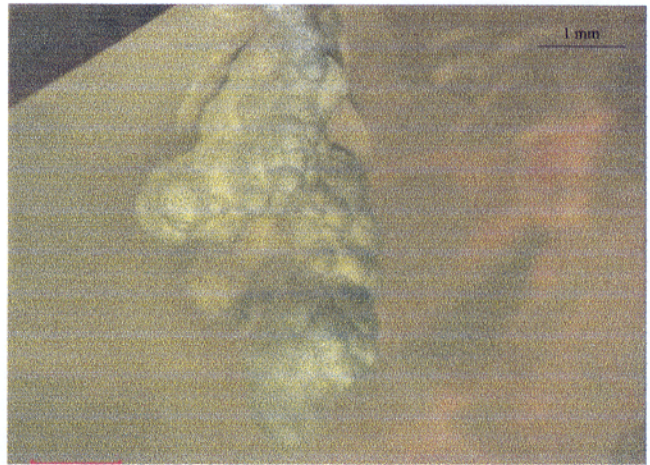
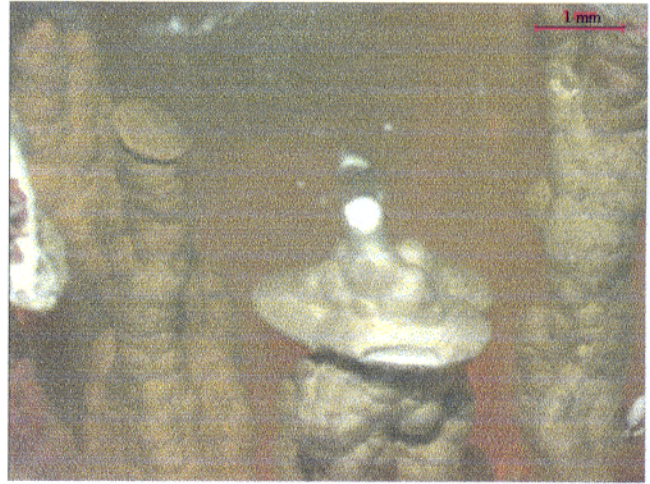
Figura 38 - Inclusão tipo vermicular.

Figuras 39 e 40 - Inclusões tipo coral. Na figura 39, destaque para o “cenário de banco de coral” enquanto que na figura 40 destacam-se os corais com cores brancas, cinzas e marrons.



Figuras 41 e 42 - Inclusões tipo coral. Na figura 42, detalhe da figura anterior, ressaltando a “morfologia do coral”.

Figuras 43 e 44 - Respectivamente inclusões tipo estalagmite e estalactite.



Figuras 45 e 46 - Inclusões tipo coluna, formada pela junção da estalagmite com a estalactite no interior de uma caverna.

Figuras 47 e 48 (a direita)- Formação de inclusão tipo bolha, constituída de quartzo, caulinita e hematita. No detalhe (figura 48), notar a película branca de quartzo e caulinita que envolve a inclusão.

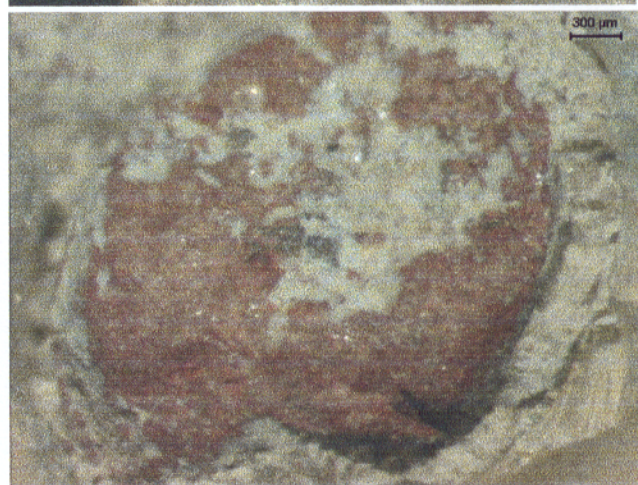
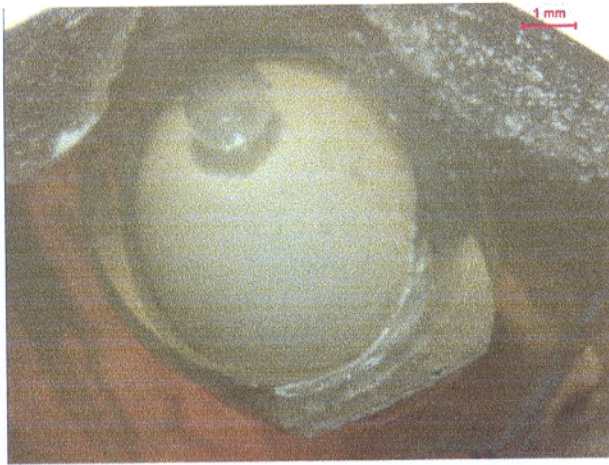


Figura 49 (a esquerda) - Detalhe do interior de uma bolha parcialmente preenchida por material arenoso.



Figura 50 - Inclusão tipo bolha.



Figuras 51 e 52 - Inclusões tipo bolha. Destaque para as fraturas que acompanham o contorno da inclusão.

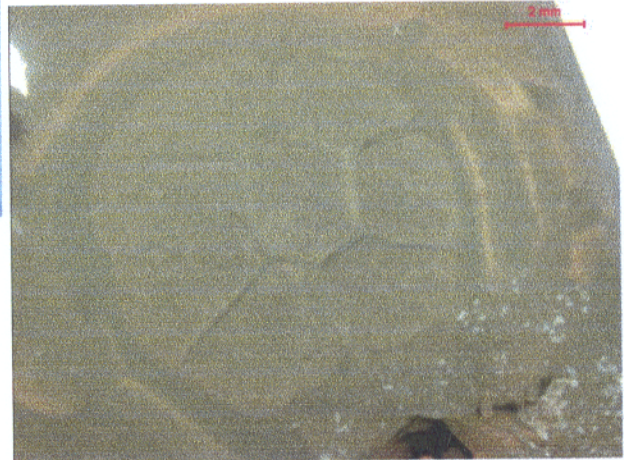
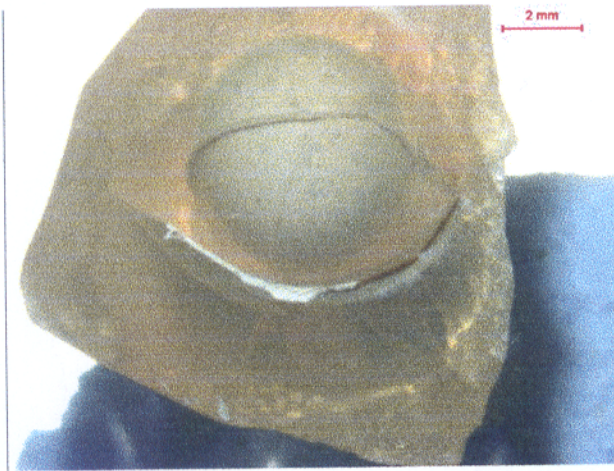


Figura 53 (a direita) - Inclusão tipo bolha com estruturação externa semelhante a microconcreções gratadas.

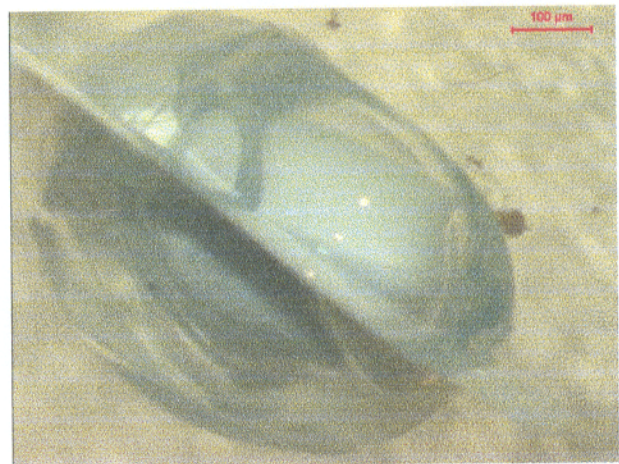


Figura 54 - Inclusão tipo bolha com fissuras que romperam a película branca envolvente da inclusão, deixando aparecer o interior da mesma. Notar fratura de tensão seca.

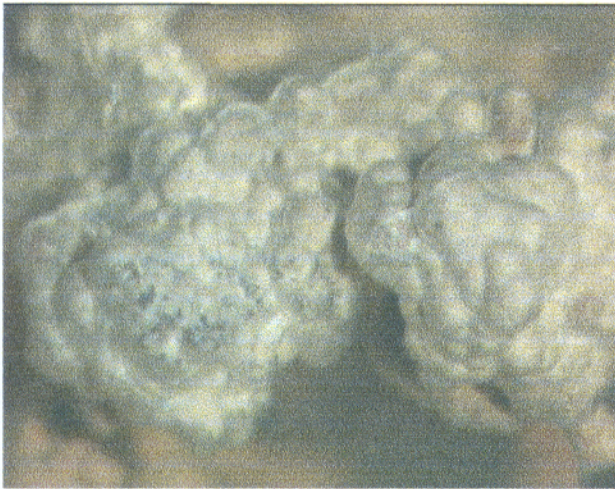


Figura 55 - Inclusão tipo botrioidal.

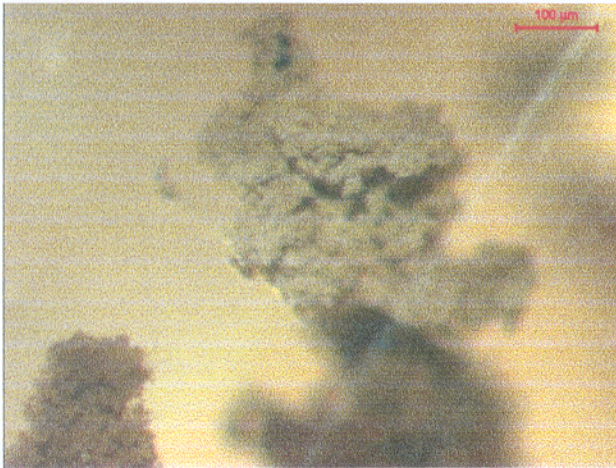


Figura 56 - Inclusão tipo irregular.

Figura 57 - Início do craqueamento.

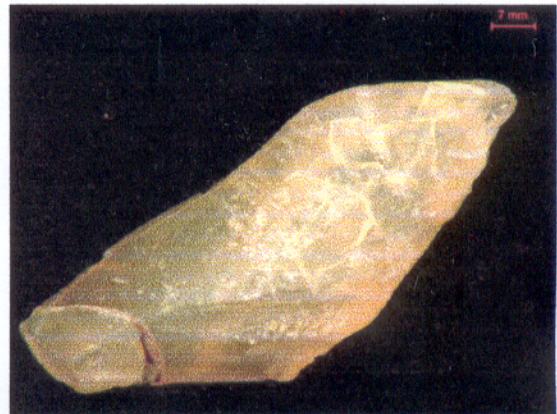


Figura 58 - Mostra o craqueamento distribuído por toda a amostra.



estruturação, resultante do fluxo da solução rica em sílica, com alta viscosidade, pela fratura do arenito encaixante; externamente essas amostras exibem um aspecto curvo, retorcido (Figuras 61 e 62);

- Fraturas: foram classificadas em:

➤ Cicatrizadas: estas fraturas são totalmente preenchidas pela opala incolor (raramente com cor básica branca ou vermelha), com espessura normalmente de um milímetro, mas podendo alcançar até 4 mm. Algumas amostras apresentam duas direções de fraturamento que formam um ângulo de 40° a 60° entre si. Localmente esse cimento presente na fratura está microfraturado, sendo seus fragmentos cimentados pela opala com cor básica vermelha (Figuras 63 a 65);

➤ Dendrítica: são fraturas onde a solução infiltrante, de composição química diferente da composição da opala, distribui-se de forma irregular no plano da fratura, mas mantendo uma mesma estruturação, geralmente já individualizando pequenas porções do material infiltrante e, exibindo uma textura geral dendrítica (Figura 66);

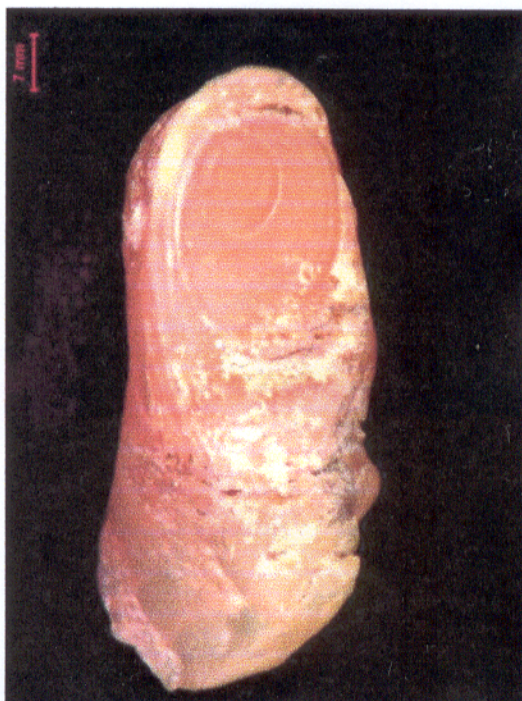
➤ De tensão: são aquelas fraturas, circulares ou com tendência a tal, com formato de disco, podendo estar seca ou apresentar preenchimento tipo dendrítico, associadas a uma inclusão de arenito no seu centro (tendo sido identificado os tipos bolha, botrioidal e irregular) (Figura 67);

➤ Secas: estas fraturas não contêm qualquer preenchimento; geralmente são retilíneas, sendo sua origem mais comum associada aos impactos sofridos pela opala ou ainda a fraturas de tensão. (Figura 68).

- Planos de concentração de deformação: feição caracterizada por planos descontínuos e retilíneos, normalmente associados a vários outros planos, geralmente paralelos, formando um conjunto deles, aqui denominado de *feixe*; uma amostra exhibe duas direções principais, que formam ângulo de 80 graus entre as mesmas. Em seção polida, perpendicular ao plano de concentração de deformação, apresenta uma linha de coloração branca a creme, translúcidos, como se houvesse cuminuido o arranjo ordenado das esferas de sílica formadoras da opala. A linha de contorno desse plano pode ser bem definida, reta ou irregular ou com aspecto botrioidal (Figuras 69 a 76);

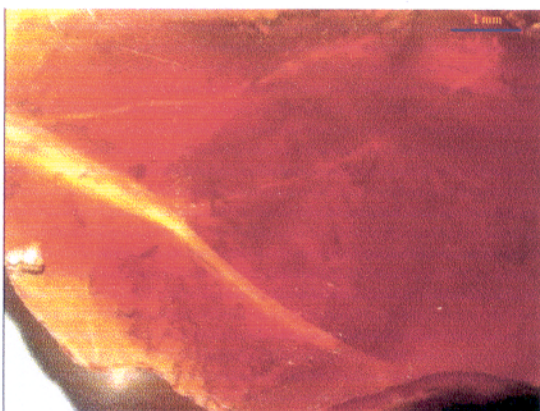


Figuras 59 e 60 (a esquerda) - Mostram estágios avançados de craqueamento. Notar relicto da opala vermelha no centro da amostra (figura 60).



Figuras 61 e 62 - Apresentam estruturas de fluxo.





Figuras 63 e 64 - Opala com cor básica vermelha contendo fraturas cicatrizadas pela opala incolor. No detalhe à direita, uma segunda geração de cimento opalino, de cor básica vermelha, cicatrizando as microfraturas da primeira cicatriz, incolor.

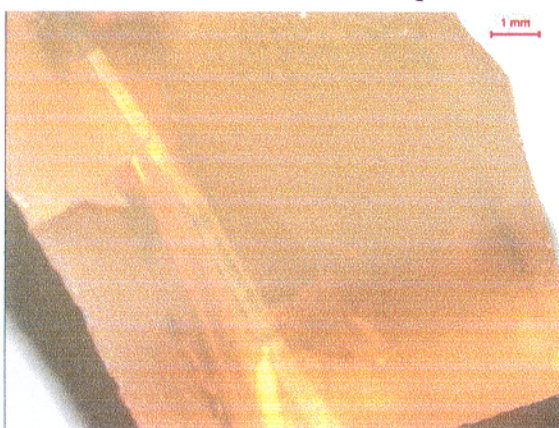


Figura 65 - Opala de cor básica laranja com fratura cicatrizada pela opala incolor.



Figura 66 - Fratura contendo preenchimento do tipo dendrítico.

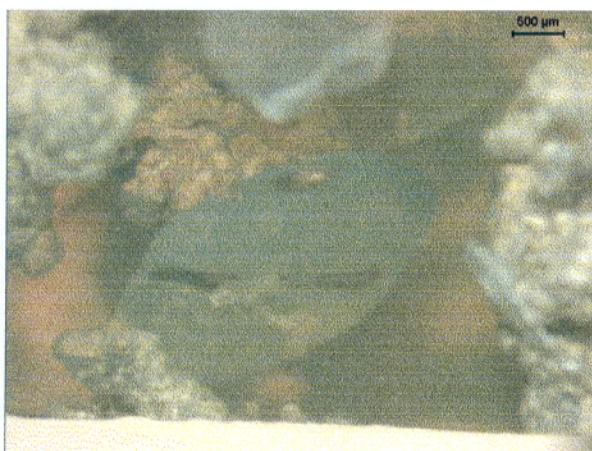


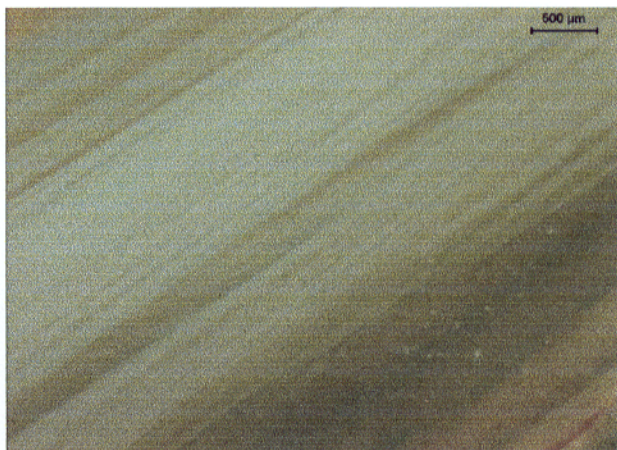
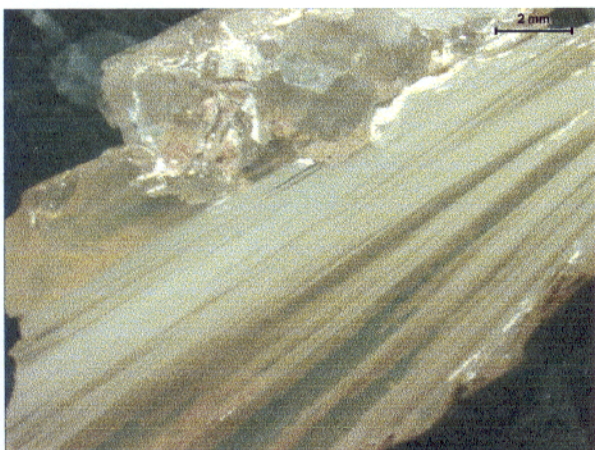
Figura 67 - Fratura de tensão, tipo disco, com inclusão no centro. Notar o preenchimento tipo dendrítico.



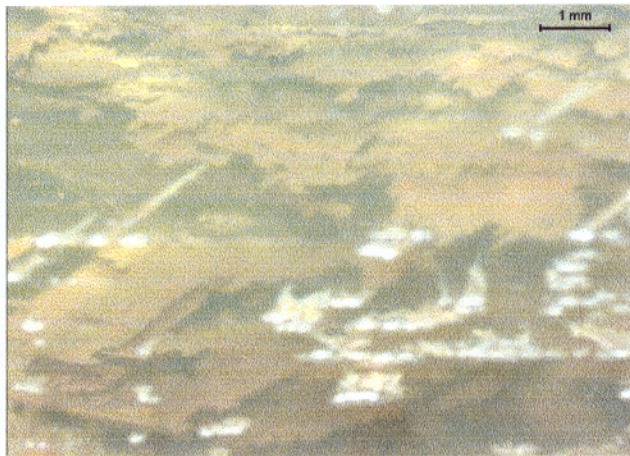
Figura 68 - Fratura de tensão seca.



Figura 69 - Destaque para as duas direções dos planos de concentração da deformação.



Figuras 70 e 71 - Vista perpendicular aos planos de concentração da deformação, mostrando o feixe de planos paralelizados. Na imagem da direita, notar detalhe da estruturação.



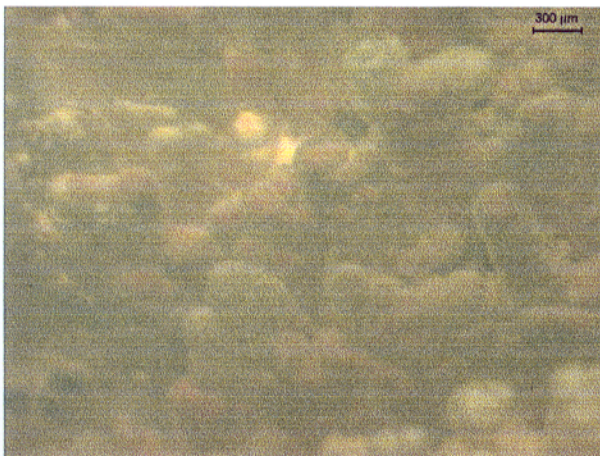
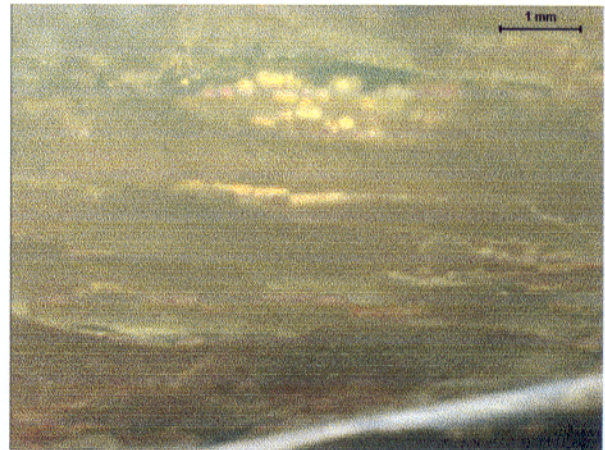
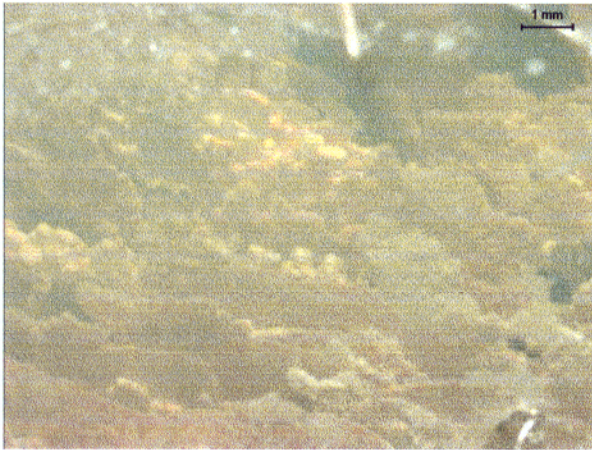
Figuras 72 e 73 - Contorno, respectivamente, retilíneo e irregular dos planos de concentração de deformação.

- Mancha de cor: é uma variação na cor básica predominante de uma determinada amostra de opala. Foram identificadas as combinações: de uma porção de opala laranja junto com opala amarela; opala laranja com opala vermelha-amarronzada; opala vermelha com opala amarela; opala vermelha com marrom-avermelhada, e ainda, por porções de opala vermelha envolvidas pela opala amarela. (Figuras 77e 78);

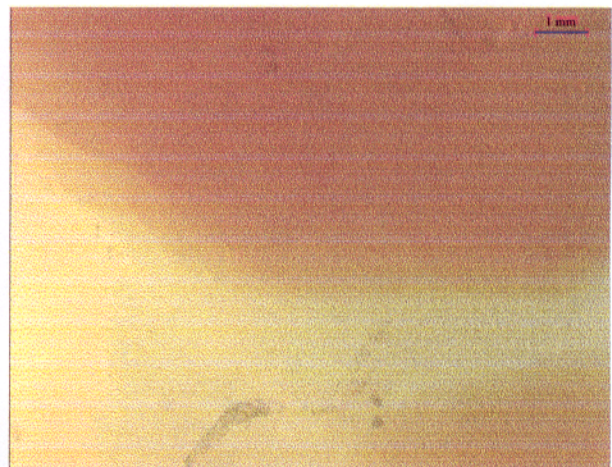
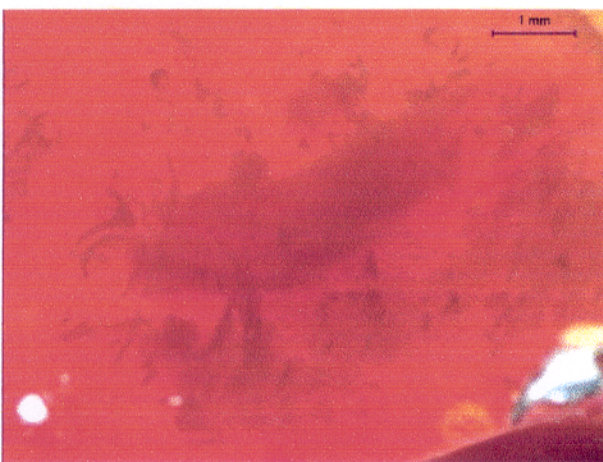
- Teia: estrutura constituída de hematita, com cor amarronzada a avermelhada, disposta de forma "fios de cabelo" ou alongada ou acicular, localmente radiais, entrelaçados, sem direção predominante, semelhante a uma teia, sendo que algumas vezes pequenas pontuações opacas, sem hábito definido, foram observadas. Vistas no MEV, confirmou-se serem de hematita. Localmente, a teia aparece parcialmente envolvida por uma "película" branca. Segundo Gübeline & Koivula (1992), estudando as opalas laranjas mexicanas, identificaram cristais de hornblenda e agulhas de goethita cobertas num primeiro estágio, com uma fina camada superficial de uma "névoa" branca, identificada como opala branca, comum (Figuras 79 e 80). Algo como uma camada de contato ou borda de reação entre a inclusão mineralógica protogenética e a solução rica em sílica que deu origem a opala, para depois serem completamente envolvidas pela opala laranja. Inclusões morfológicamente semelhantes foram encontradas, mas neste caso a hematita foi envolvida inicialmente pela "névoa" branca de opala comum, com a opala de cor básica laranja, por sua vez, envolvendo todo o conjunto (Figuras 81 a 86);

- Quartzo: na ocorrência em que estas amostras foram coletadas, associados aos veios de opala, encontram-se veios de quartzo; quando juntos num mesmo veio, este se mostra zonado, sendo que o quartzo ocupa a zona externa, às vezes, em drusas centimétricas, em contato com o arenito encaixante, enquanto que a opala ocupa a zona central do veio, recobrando os cristais de quartzo. Frequentemente, entre a opala e o quartzo há uma película de quartzo e caulinita. Essas características são mostradas aqui, representadas pelos cristais de quartzo imersos na opala (Figuras 87 a 92 );

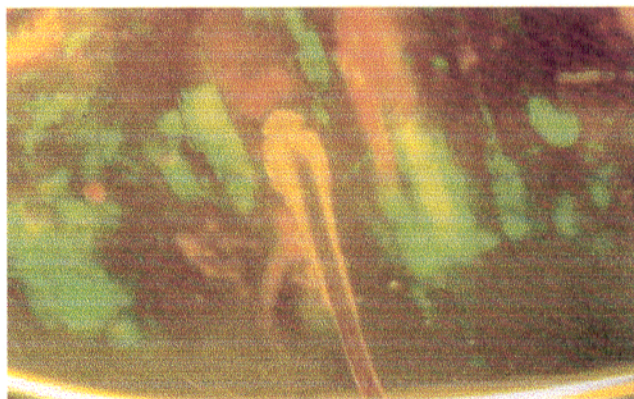
- Quartzo-caulinita: normalmente dispostos juntos como uma película de coloração branca a bege, posicionada entre os cristais de quartzo e a opala ou entre a opala e inclusões reliquiares do arenito encaixante. Apresenta-se geralmente em formas tendendo para o arredondamento, algo



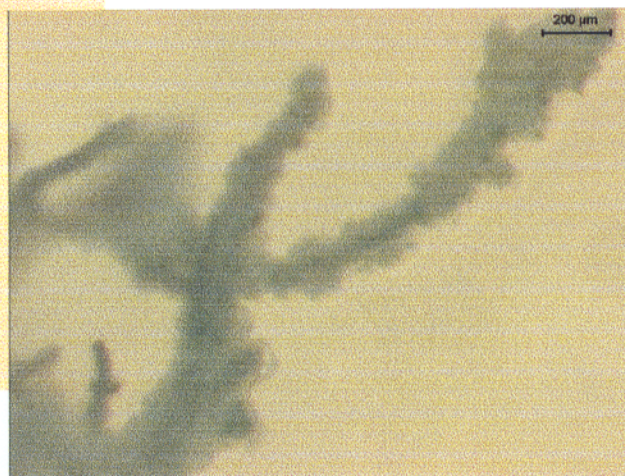
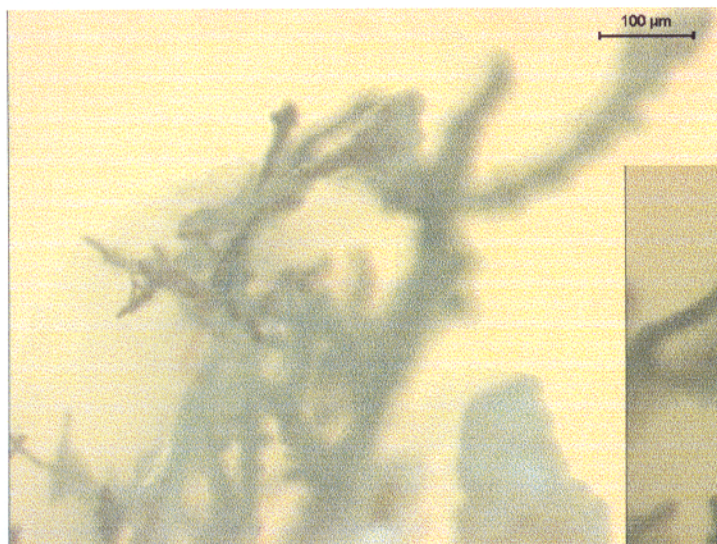
Figuras 74 a 76 - Terminação botrioidal dos planos de concentração da deformação. Ao lado, detalhe da figura 74.



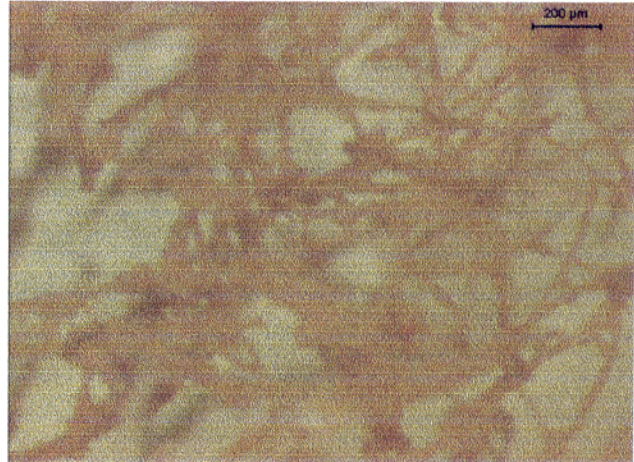
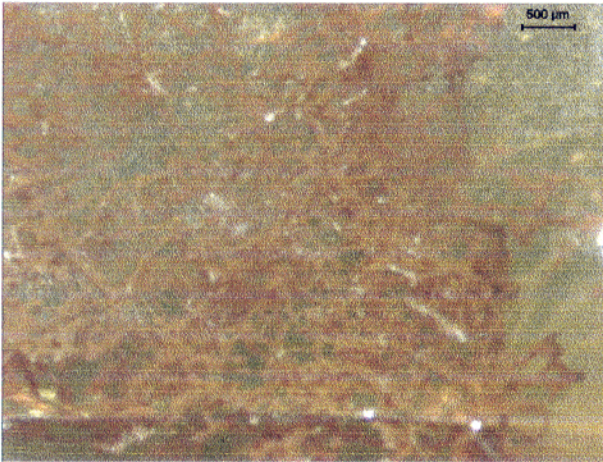
Figuras 77 e 78 - Inclusões tipo mancha de cor. A esquerda, mancha de cor vermelha-amarronzada imersa na opala de cor básica vermelha. A direita, porções vermelhas envolvidas pela opala de cor básica amarela.



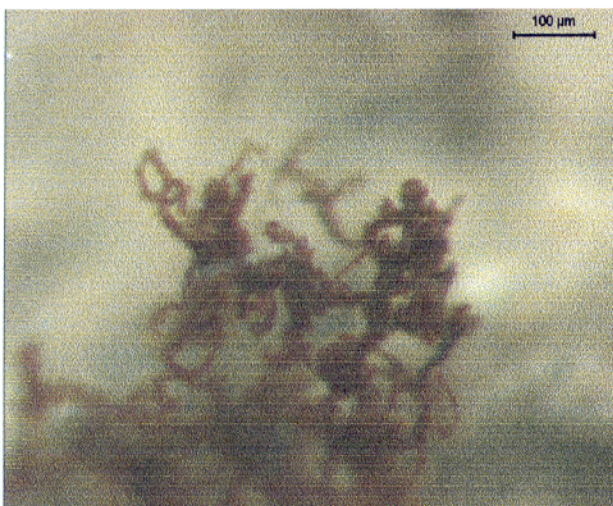
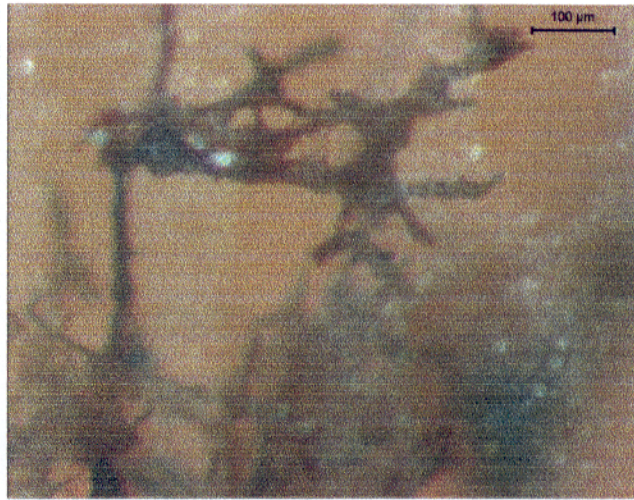
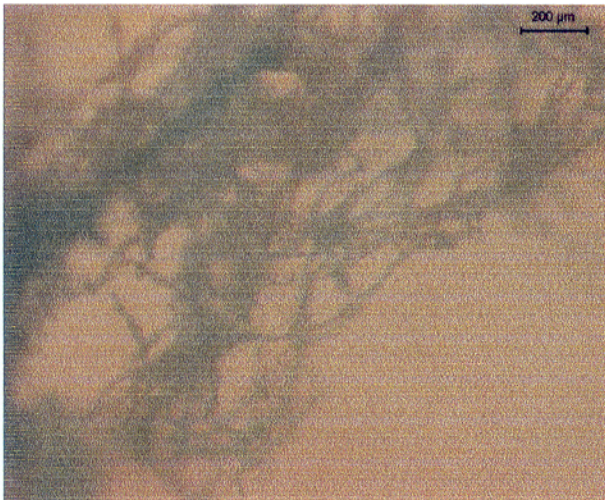
Figuras 79 A (a esquerda) e B (acima) - Inclusões de hornblenda, aciculares, protogenéticas, envolvidas inicialmente por uma fina “névoa” de opala branca, comum. Ambas estão envolvidas pela opala laranja mexicana (Gügelin & Koivula, 1992).



Figuras 80 A e B - Inclusões protogenéticas, tipo teia, de hematita, aciculares, envolvidas em um primeiro momento pela fina película de opala comum, branca, semelhante à “névoa” definida por Gügelin & Koivula (1992). Tanto a hematita como a opala comum encontram-se envolvidas pela opala laranja.

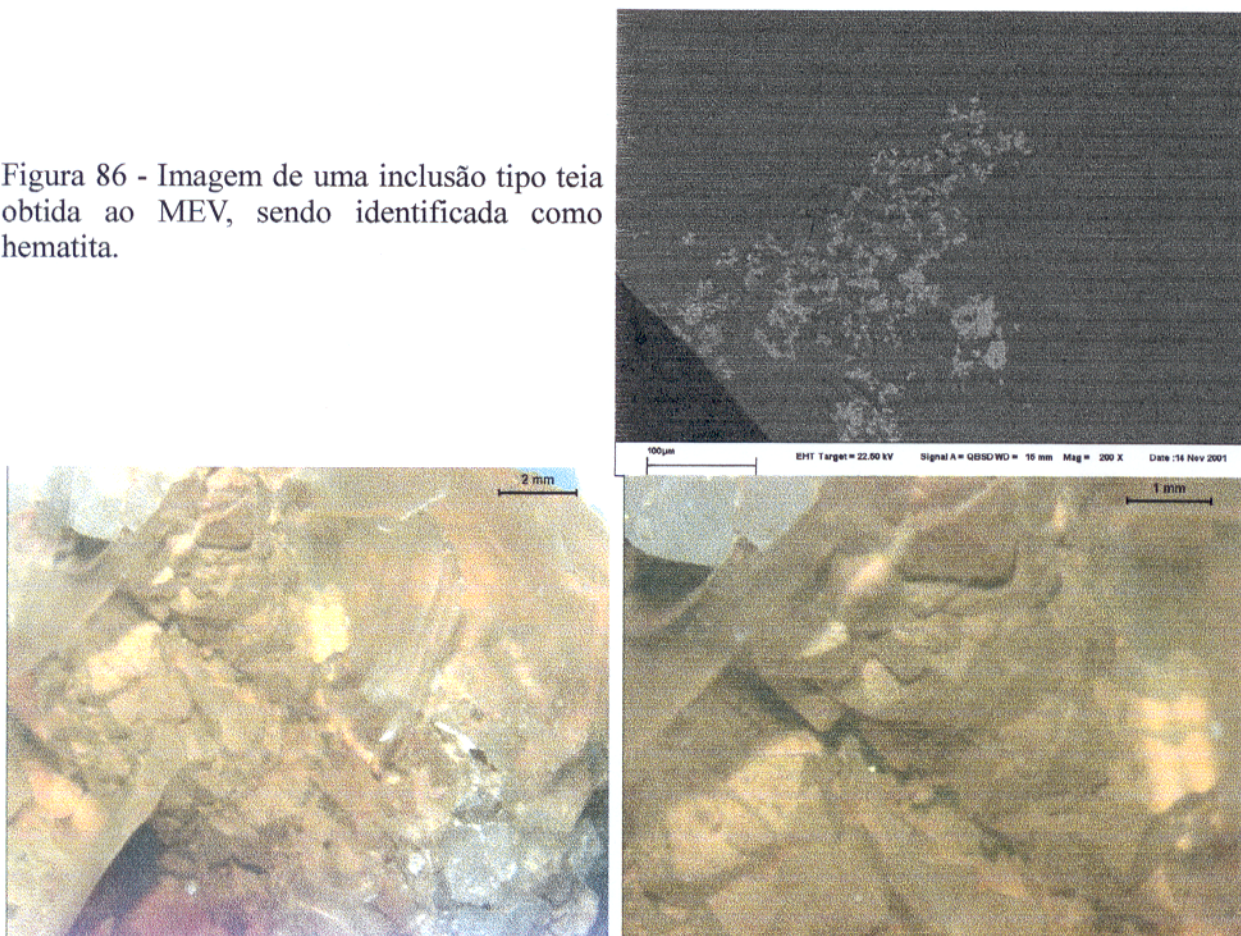


Figuras 81 e 82 - Inclusão tipo teia (hematita) disposta aparentemente sem orientação. A direita, detalhe da estruturação.

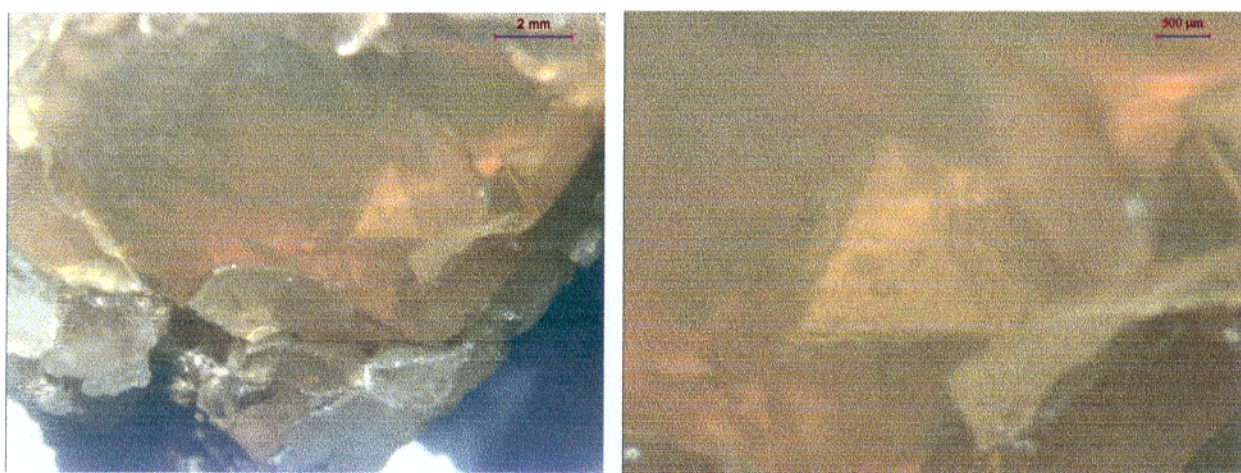


Figuras 83 a 85 - Inclusões tipo teia. Em cima, a esquerda, observar no centro da imagem uma estruturação ligeiramente radiada. Acima, notar nódulos nos encontros entre várias direções. Ao lado, a esquerda, lembram duas figuras humanas montadas.

Figura 86 - Imagem de uma inclusão tipo teia obtida ao MEV, sendo identificada como hematita.



Figuras 87 e 88 - Inclusões tipo quartzo. Mostram a zonação de um veio mineralizado com quartzo e opala. A esquerda nas extremidades superior esquerda e inferior direita da imagem, aflora o veio de quartzo, que tem a opala ocupando uma zona central. Na imagem da direita, detalhe dos cristais de quartzo.



Figuras 89 e 90 - Opala de cor básica amarela-laranja cobrindo veio de quartzo. A direita, detalhe do cristal de quartzo envolvido pela opala, lembrando uma pirâmide.

ligeiramente botrioidal. Ocorrem também formadas pela união de pequenas “plaquetas”, com uma suave rugosidade, apresentando um contorno sugestivo de formato hexagonal, tendo em sua borda diminutas concreções exibindo um agregado botrioidal. É comumente encontrada como pseudomorfos de cristais de quartzo, onde a sílica formadora do quartzo foi solubilizada, permanecendo a película de quartzo e caulinita que recobria esse cristal, com o formato do mesmo. Observa-se ainda com terminações de formas irregulares, com reentrâncias semelhantes a bordas de corrosão ou relíctos de dissolução (Figuras 93 a 97);

- **Caulinita:** apresenta-se em agregados de plaquetas dispostas, aparentemente, sem uma orientação predominante, sendo encontradas plaquetas típicas com hábito hexagonal; destaca-se nestes conjuntos, um grande número de tubos ou vazios, que são parcialmente preenchidos da borda para o centro, por diversas plaquetas de caulinita, formando cristais maiores e com contorno mais bem definidos. O contorno destes agregados é do tipo botrioidal (Figuras 98 a 100).

### 3.3.4.3 Classificação temporal das inclusões

O conjunto das inclusões identificadas neste estudo está representado esquematicamente na Tabela 02, sendo classificadas como:

#### - Protogenéticas:

São as inclusões que tem sua gênese anterior à formação das opalas laranjas, sendo envolvidas e aprisionadas no interior das opalas durante o processo que deu origem às mesmas, podendo ser assimiladas (total ou parcialmente) ou não, pela solução formadora da opala. Foram identificadas as seguintes inclusões: tipo arenito (hematita/caulinita/quartzo), tipo teia (hematita), quartzo-caulinita (película que envolve as inclusões de arenito e os cristais de quartzo), pseudomorfos de quartzo, cristais de quartzo e a caulinita.

#### - Singenéticas:

São aquelas inclusões que foram formadas simultaneamente às opalas. Estão representadas pela mancha de cor, estruturas de fluxo, opala branca (que envolve a hematita) e fraturas cicatrizadas (tardi).

- Epigenéticas:

Foram originadas posteriormente à formação das opalas laranjas. São: o craqueamento, as fraturas secas, dendríticas e de tensão, Arenito com goethita (o arenito é protogenético, mas a goethita é singenética), além dos planos de concentração da deformação.

Tabela 02 - Classificação das inclusões encontradas nas opalas laranjas de Buriti dos Montes

<i>Tipo de Inclusão</i>	<i>Sub-tipo de inclusão</i>	<i>Classificação temporal</i>
Arenito (quartzo, caulinita e hematita)	Tubo ou canal	Protogenética
	Vermicular	
	Banco de coral	
	Estalactite, estalagmite e coluna	
	Bolha	
Arenito (quartzo, caulinita e goethita)	Botrioidal	Epigenética (a goethita)
	Irregular	
Craqueamento		Epigenética
	Estrutura de fluxo	Singenética
Fraturas	Cicatrizadas	Singenética
	Dendríticas	Epigenética
	De tensão	
	Secas	
Plano de concentração da deformação		Epigenética
Mancha de cor		Singenética
Teia	Hematita	Protogenética
	Hematita com opala comum	Singenética (a opala comum)
Quartzo		Protogenética
Quartzo-caulinita	Película que envolve as inclusões de arenito	Protogenética
	Pseudomorfo do cristal de quartzo	Protogenética
Caulinita		Protogenética

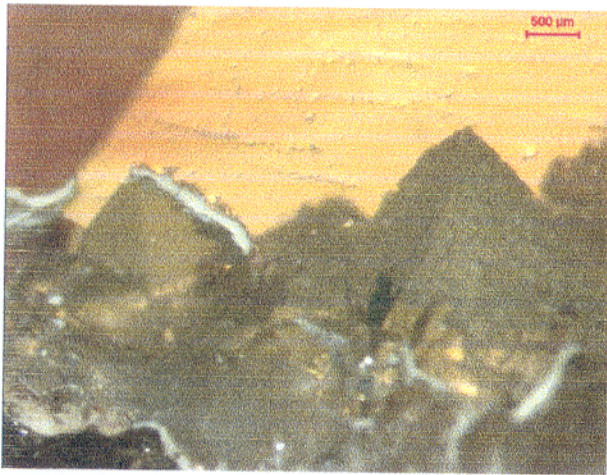


Figura 91 - Destaca o cenário tipo egípcio, ao pôr-do-sol, das pirâmidas de Guizé, Keops e Mikerinos.

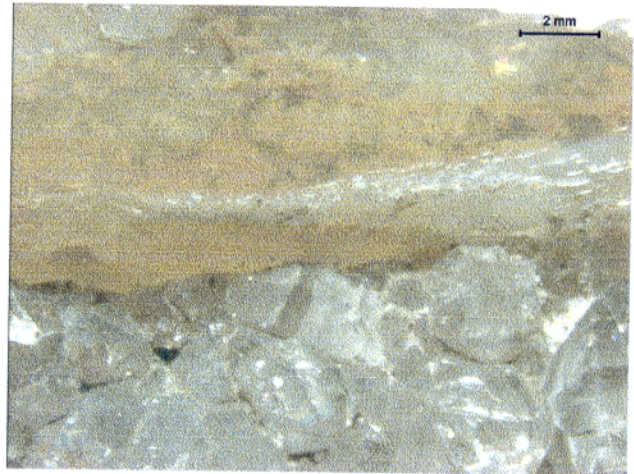


Figura 92 - Ressalta num veio, o contato entre os cristais de quartzo e a opala.



Figuras 93 e 94 - Inclusão tipo quartzo-caulinita, formando uma película que envolveu cristais de quartzo, dando origem aos pseudomorfos destes.

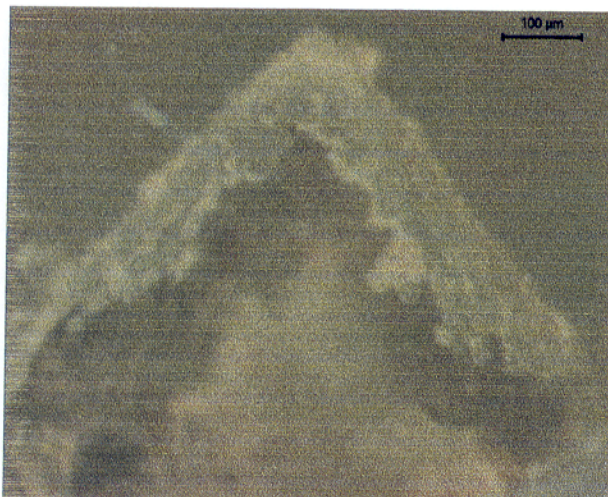
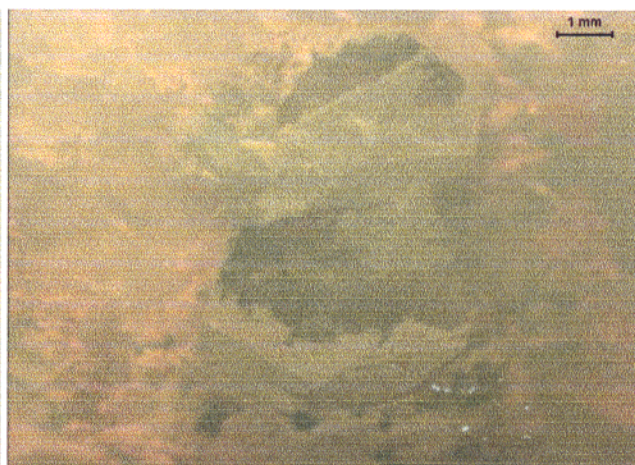
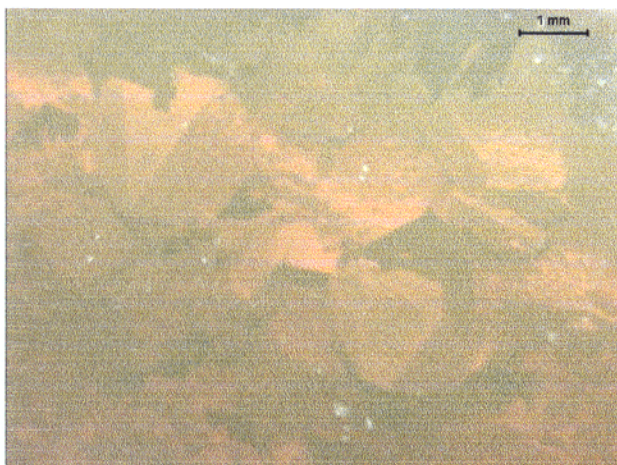


Figura 95 - O cristal de quartzo foi solubilizado pela solução opalina, permanecendo somente a película de quartzo-caulinita. Detalhe da parte interna do pseudomorfo.



Figuras 96 e 97 (acima) - Detalhes dos pseudomorfos, mostrando feições de corrosão inclusive na película de quartzo-caulinita.

Figura 98 - Imagem obtida pelo MEV, mostrando o aspecto textural de uma inclusão identificada como um agregado de plaquetas de caulinita.

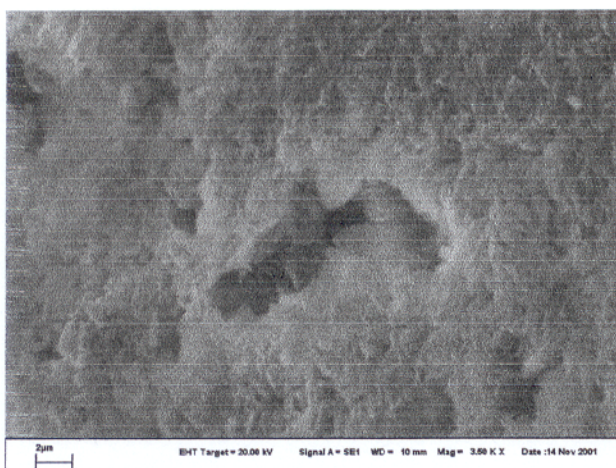
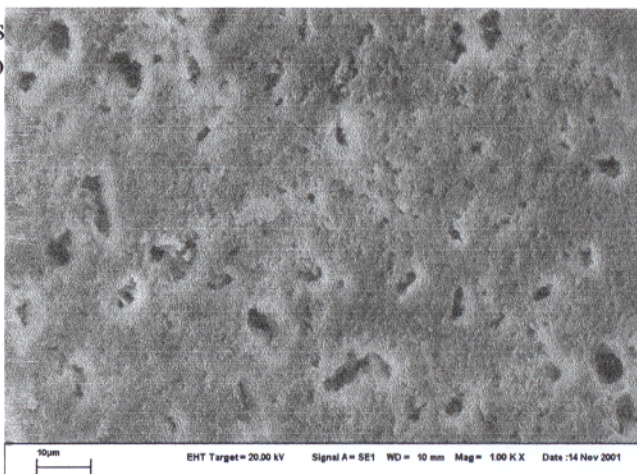


Figura 99 - Detalhe da imagem anterior mostrando as plaquetas de caulinita.

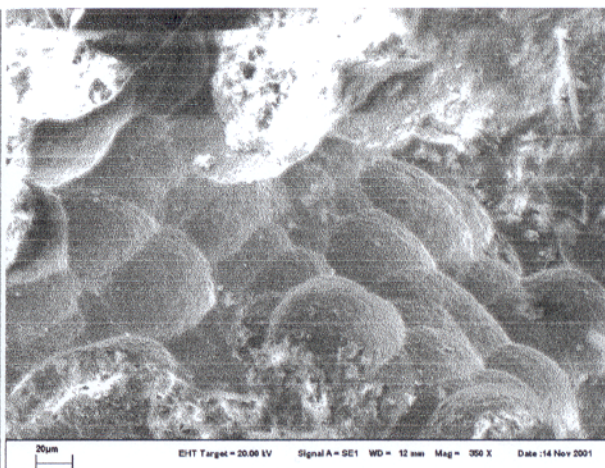


Figura 100 - Aspecto morfológico da inclusão de caulinita, com característica botrioidal.

### 3.4 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA

#### 3.4.1 Generalidades

Os resultados da caracterização mineralógica aqui apresentados (parcialmente discutidos por Gomes & Costa 2000a; 2001a; 2001d; 2001g; e 2002a), foram comparados com os dados encontrados na literatura técnica, relativos a outras ocorrências mundiais de opalas. Dentre as amostras usadas neste estudo, destacam-se aquelas provenientes da ocorrência Tranqueira 3, que iniciam sua identificação com a sigla “ergbd”, oriundas principalmente da ocorrência secundária.

#### 3.4.2 Resultados difratométricos

As análises de DRX, listadas na Tabela 03, permitiram classificar as opalas laranjas aqui estudadas como opala amorfa (opala-A) e diversos estágios intermediários de cristalinidade, até opala cristobalita-tridimita (opala-CT), segundo a proposta de Flörke (1995), sendo ordenadas da menos cristalina para a de maior cristalinidade. A opala-A caracteriza-se por uma banda larga e difusa ( $d=4,10\text{Å}$ ; e um incipiente pico em  $2,51\text{Å}$ ; amostra ergbd4); a amostra ergbd3 já apresenta um estágio intermediário para opala-CT, indicado pelas distâncias interplanares  $d=4,34\text{Å}$ ;  $4,11\text{Å}$ ;  $2,50\text{Å}$  e fracos picos em  $2,05\text{Å}$  e  $1,62\text{Å}$ ; por sua vez na amostra ergbd7 estão individualizadas as principais distâncias interplanares da opala-CT ( $d=4,30\text{Å}$ ;  $4,10\text{Å}$  e  $2,50\text{Å}$ ), bem definidos, e ainda picos em  $2,05\text{Å}$  e  $1,62\text{Å}$ , com menor definição; estes estão todos mais intensos na amostra ergbd8; enquanto que a opala ergvtr-2, a mais típica opala-CT, além de todas as distâncias interplanares acima, observa-se também  $d = 3,84\text{Å}$  e  $1,61\text{Å}$  (Figura 101).

Do conjunto de 17 amostras analisadas pela DRX e ATD/ATG (neste método as amostras de opalas foram submetidas a tratamento térmico com aquecimento do pó até aproximadamente  $1.100\text{ °C}$ ), 14 dessas amostras foram submetidas depois da análise térmica, novamente à DRX. O objetivo é observar as possíveis modificações estruturais após esse aquecimento. Assim, o difratograma da amostra ergbd4 passa a mostrar distâncias interplanares da opala-CT ( $d = 4,30\text{Å}$ ;  $4,10\text{Å}$ ;  $2,50\text{Å}$ ;  $2,05\text{Å}$  e  $1,64\text{Å}$ ). Enquanto que a opala ergvtr2 não apresentou alteração significativa ( $d = 4,31\text{Å}$ ;  $4,09\text{Å}$ ;  $3,87\text{Å}$ ;  $2,49\text{Å}$ ;  $2,09\text{Å}$ ;  $2,05\text{Å}$ ;  $1,63\text{Å}$  e  $1,61\text{Å}$ ), a amostra ergbd7, agora é uma típica opala-CT, com todos os picos bem definidos ( $d = 4,31\text{Å}$ ;  $4,08\text{Å}$ ;  $3,85\text{Å}$ ;  $2,50\text{Å}$ ;  $2,05\text{Å}$  e  $1,64\text{Å}$ ), (Tabela 04; Figura 102).

Uma amostra de inclusão sólida com forma de bolha (já aberta, em contato com o

Tabela 03 - Distâncias interplanares obtidas nos DRX das opalas, sua cor básica e cristalinidade.

Amostra	d (Å)			Cor básica	Cristalinidade
Ergbd5	7,10	4,10	3,34	V. A.	A
Ergbd4	7,33	4,15	2,51	V.	A
Ergbd6	15,26	4,19	3,59	A	A
Ergbd23		4,31	2,50	V.	a-ct
Ergbd2a		4,11	2,51	A. L.	ct
Ergbd3	14,90	4,35	2,51	L	ct
Ergbd26.24		4,34	2,50	L	ct
Ergbd12.08		4,33	2,51	L. Av.	ct
Ergbd7	7,15	4,32	3,57	Az.	CT
Ergbd11.38		4,33	X	A	CT
Ergtrc-1a	7,15	4,32	3,56	Amr.	CT
Ergbd8	X	4,32	X	A	CT
Ergbd9		4,33	2,51	B.	CT
		4,07	2,05	1,45	
Ergtr-3a		4,32	X	B.	CT
		4,08	3,87		
Ergbd1		4,31	2,50	A. cl.	CT
		4,11	2,05		
Ergvtr2		4,32	2,50	V.	CT
		4,17	3,85		
Ergpi03	16,79	4,33	2,50	V.	CT
		4,09	X		

Onde: X= pico incipiente; A= amarelo; V= vermelho; Az= azul; V.A.=vermelho-amarronzado; A.L.= amarelo-laranja; Amr.= amarronzado; A.cl.= amarelo-claro; B.= branco-leitoso; L.Av= laranja-avermelhado; L= laranja; A= opala amorfa; a-ct= transição entre opala amorfa e opala cristobalita-tridimita; ct= opala-CT incipiente; CT= típica opala cristobalita-tridimita.

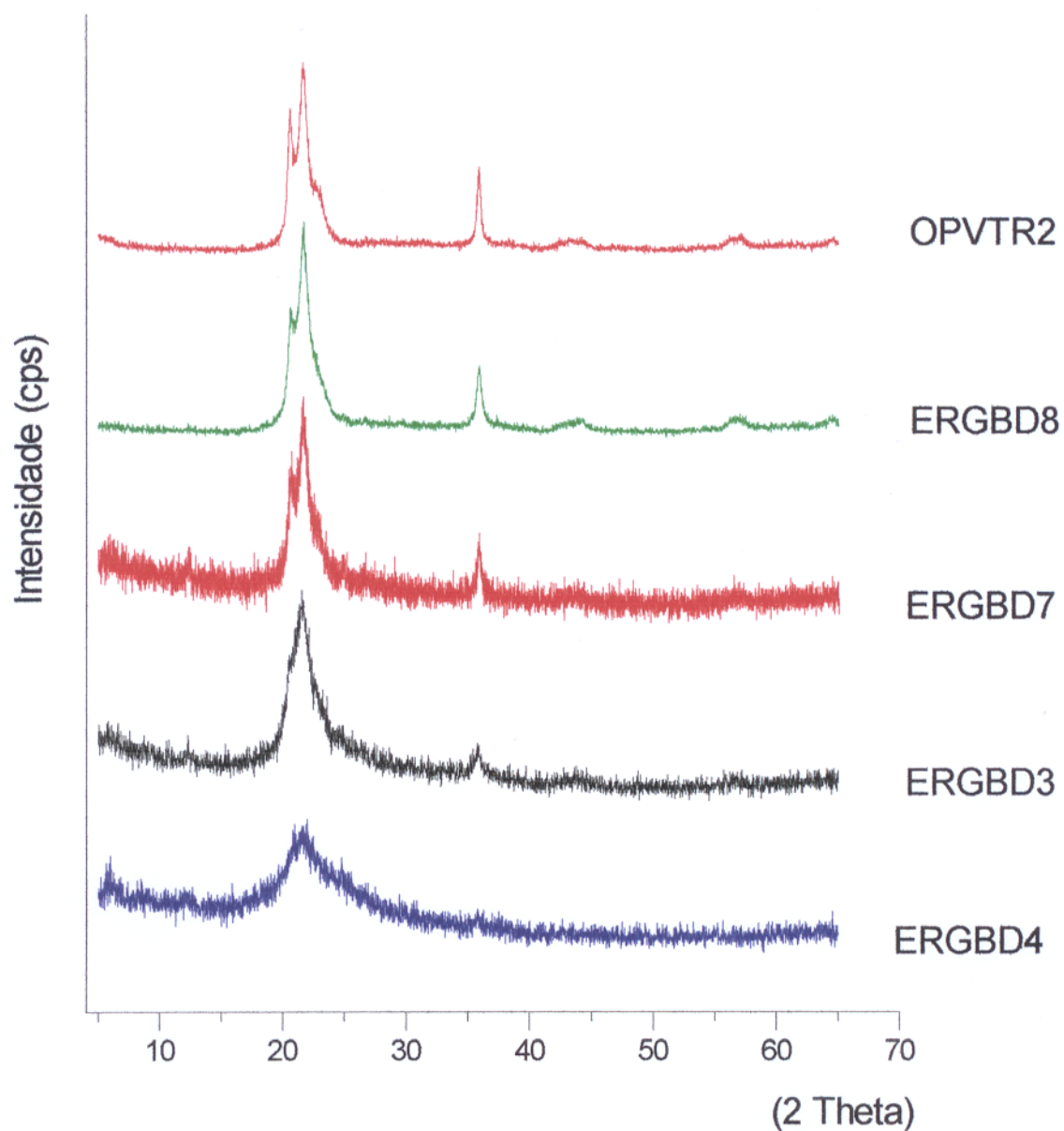


Figura 101 - Difrátogramas de amostras representativas das diferentes cristalinidades da opala laranja, indo da opala-A, passando por estágios intermediários, até a opala-CT.

Tabela 04 - Distâncias interplanares obtidas nos DRX das opalas pós-aquecimento a 1.100 °C e a cristalinidade anterior e posterior à análise térmica (AT).

Amostra	d.(Å)		Cristalinidade	
	Pré AT	Pós AT	Pré AT	Pós AT
Ergbd5	4,28	2,51	A	a-ct
Ergbd4	4,30	2,50	X	a-ct
Ergbd6	4,31	2,52	X	a-ct
Ergbd23	7,28	3,34	2,50	a-ct
Ergbd2a	4,31	2,50	2,50	ct
Ergbd26.24	4,32	3,34	2,50	ct
Ergbd12.08	4,32	3,34	2,06	ct
Ergbd7	4,32	3,85	2,05	ct
Ergtrc-1a	4,30	2,50	2,06	ct
Ergbd8	4,30	2,49	2,04	ct
Ergbd9	4,32	2,50	2,06	ct
Ergtr-3a	7,12	3,82	2,50	ct
Ergbd1	4,31	3,87	2,05	ct
Ergvtr2	4,32	3,87	2,09	ct
			2,05	ct

Onde: X= pico incipiente; A= opala amorfa; a-ct= transição entre opala amorfa e opala cristobalita-tridimita; ct= opala-CT incipiente; CT= típica opala cristobalita-tridimita.

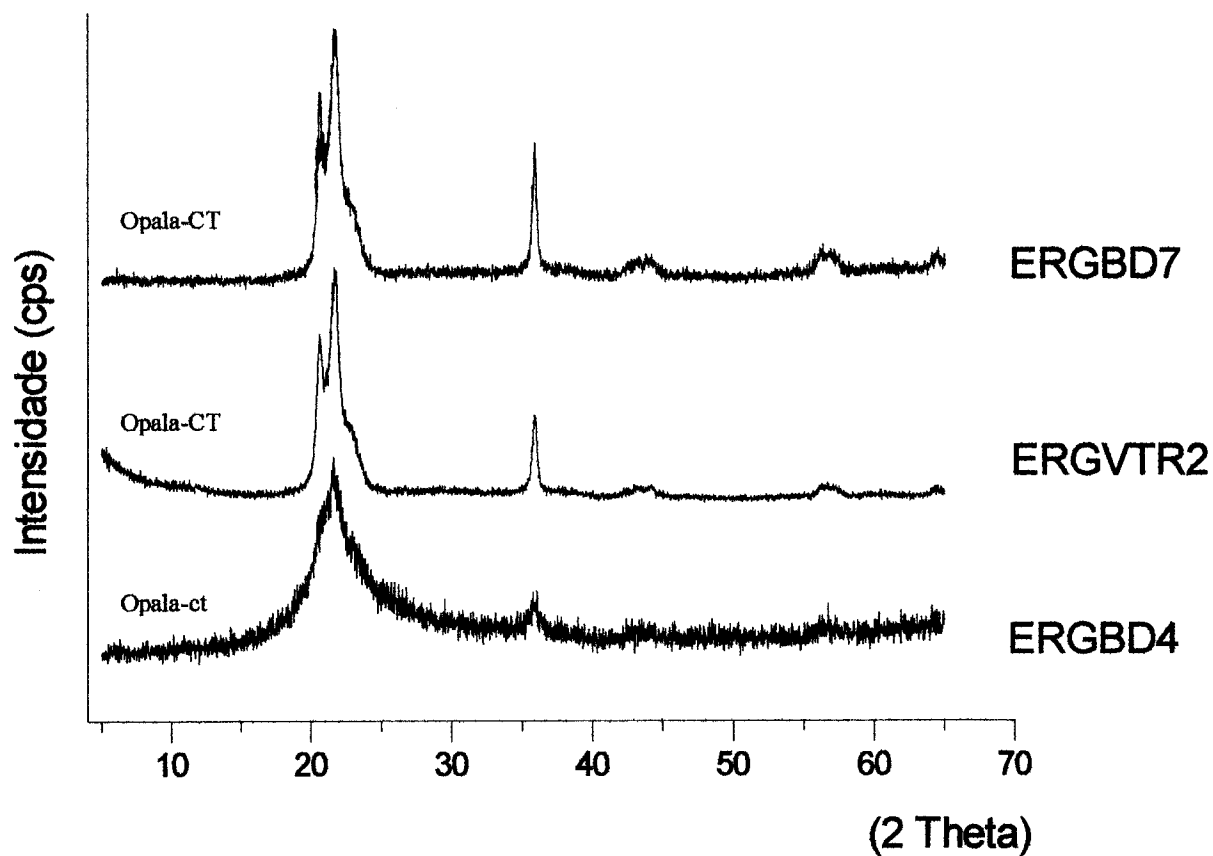


Figura 102 - Difractogramas das opalas após serem submetidas à 1.100 °C tratamento térmico, ressaltando o aumento na cristalinidade das opalas. Destaque para a amostra ergbd-7, que passa a ter a maior cristalinidade, o que foi refletido na ATD.

ambiente externo) teve seu conteúdo extraído e encaminhado para a DRX, sendo identificado o quartzo ( $d = 4,24\text{\AA}; 3,33\text{\AA}; 2,46\text{\AA}; 2,28\text{\AA}; 1,82\text{\AA}$  e  $1,54\text{\AA}$ ), a goethita ( $d = 2,69\text{\AA}; 2,49\text{\AA}; 2,45\text{\AA}; 1,69\text{\AA}$ ) e a caulinita ( $d = 7,15\text{\AA}; 3,57\text{\AA}; 1,62\text{\AA}; 1,58\text{\AA}; 1,49\text{\AA}$ ). Posteriormente, duas outras amostras de opalas contendo inclusões de arenito (ergbdi2 e ergbdi4), tipo bolha, de coloração avermelhada, também foram analisadas pela DRX, sendo identificados os minerais: quartzo ( $d = 4,26\text{\AA}; 3,34\text{\AA}; 2,45\text{\AA}; 2,28\text{\AA}; 2,12\text{\AA}; 1,81\text{\AA}$  e  $1,54\text{\AA}$ ), caulinita ( $d = 7,19\text{\AA}; 4,45\text{\AA}; 4,26\text{\AA}; 3,57\text{\AA}; 2,56\text{\AA}; 2,49\text{\AA}; 2,34\text{\AA}$ ; dentre outros) e hematita ( $d = 2,70\text{\AA}; 2,52\text{\AA}; 1,84\text{\AA}$  e  $1,69\text{\AA}$ ), além de um incipiente pico, possivelmente da goethita com  $d = 2,69\text{\AA}$ , este na amostra ergbdi2, que apresentava uma fratura de comunicação com o ambiente externo (Figura 103).

Normalmente, entre as inclusões de arenito e a opala envolvente, há uma película branca que bordeja toda a inclusão (Figura 47). Analisadas pela DRX (amostra ergbdi3; Figura 48), foram identificados quartzo e caulinita como minerais constituintes desta camada. Uma feição comum às amostras de opalas laranjas que recobrem os cristais dos veios de quartzo é a existência de uma película entre ambos, (Figuras 93 a 97). Esta ao ser identificada pela DRX mostrou quartzo e caulinita como seus integrantes (Figura 104).

Uma amostra de inclusão mineralógica, tipo teia, não sendo possível identificá-la por DRX, foi analisada pelo MEV/SED, que identificou ferro e oxigênio como elementos principais, interpretados como partes da hematita.

No entorno do povoado Tranqueira foi mapeado uma ocorrência de opala associada com barita. A opala apresenta coloração creme, translúcida, intensamente craqueada, enquanto a barita mostra-se em cristais transparentes, com hábito tabular, de coloração verde-claro a incolor (ergbar). Esses minerais estão cimentando ou preenchendo cavidades no arenito, que apresenta-se intensamente brechado. Em duas outras ocorrências, a barita (ergbar2) encontra-se associada com o quartzo (hialino e tipo leitoso). Esta apresenta-se em cristais de cor laranja, transparente, com hábito tabular, tendo qualidade gemológica. A determinação das baritas (ergbar e ergbar2) foi confirmada por DRX ( $d = 3,56\text{\AA}; 3,54\text{\AA}; 3,41\text{\AA}; 3,29\text{\AA}; 3,07\text{\AA}; 2,81\text{\AA}; 2,70\text{\AA}; 2,11\text{\AA}; 2,10\text{\AA}$ ; Figura 105).

As amostras do arenito, de coloração creme, granulometria média, intensamente brechados, cimentados pela opala, foram investigadas sob a DRX, mostrando quartzo e albita (Figura 106).

As concreções que se concentram entre o dique de rocha básica e o arenito

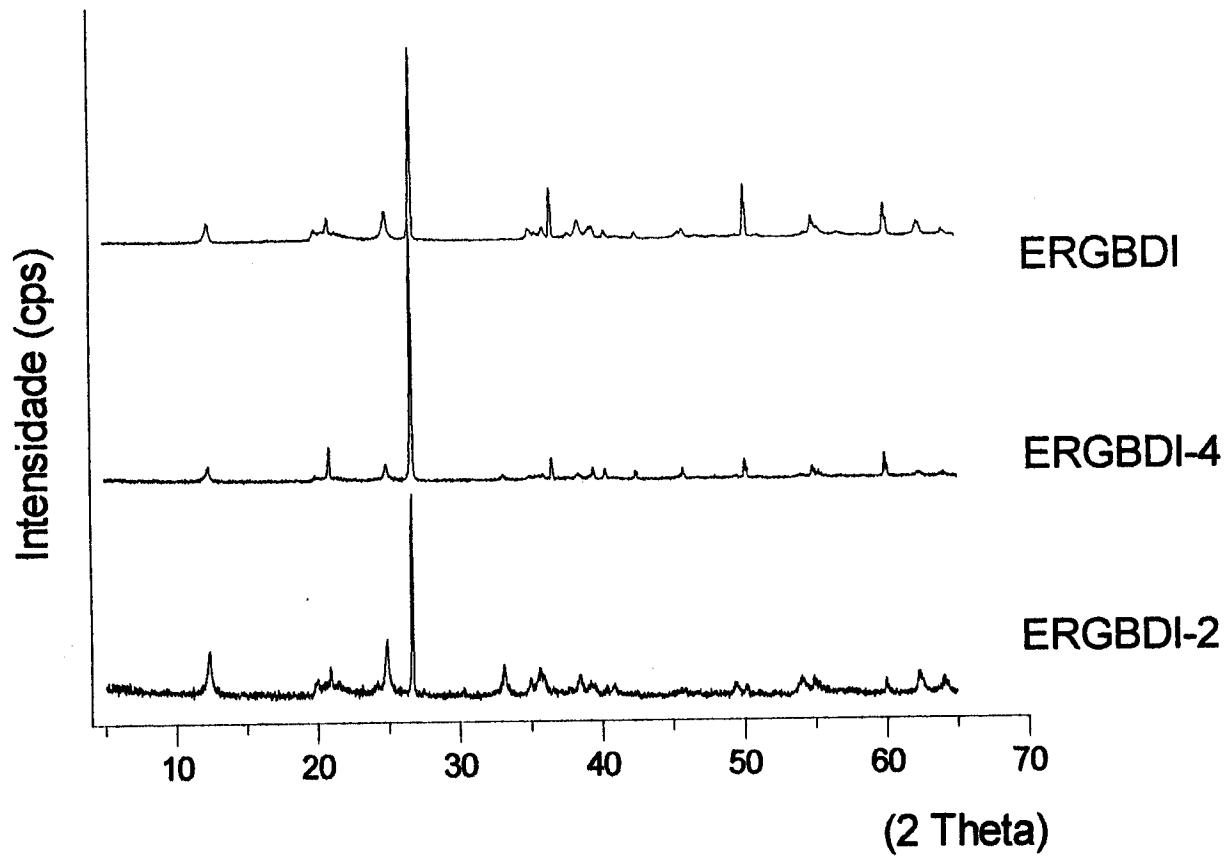


Figura 103 – Difratomogramas da inclusões de arenito tipo bolha contendo quartzo, caulinita e hematita (e/ou goethita).

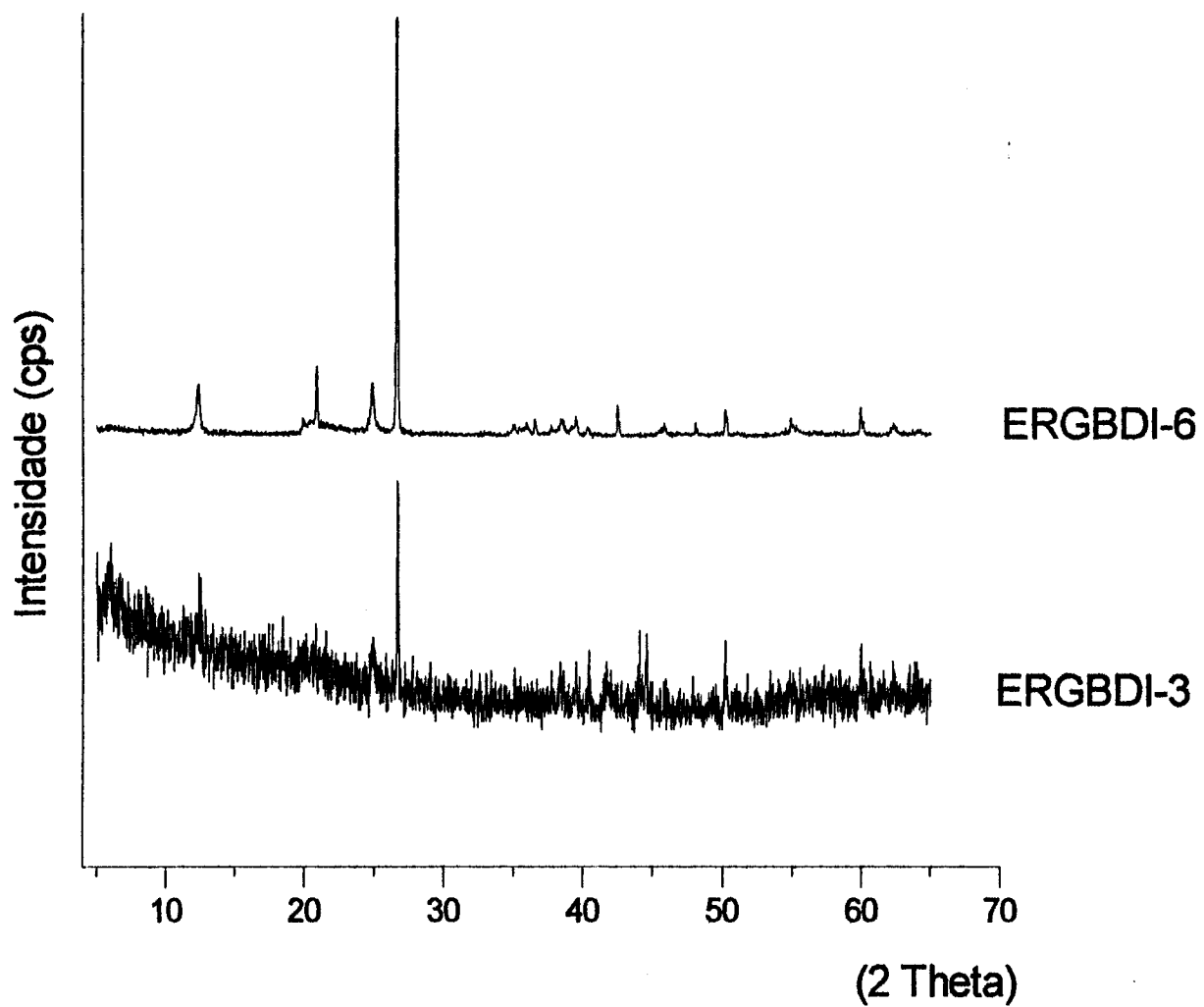


Figura 104 – Difratoogramas das inclusões de quartzo-feldspato. Em ergbdi-3, película branca que envolve as inclusões de arenito (figura 48, página 46); em ergbdi-6, película entre cristal do veio de quartzo e a opala.

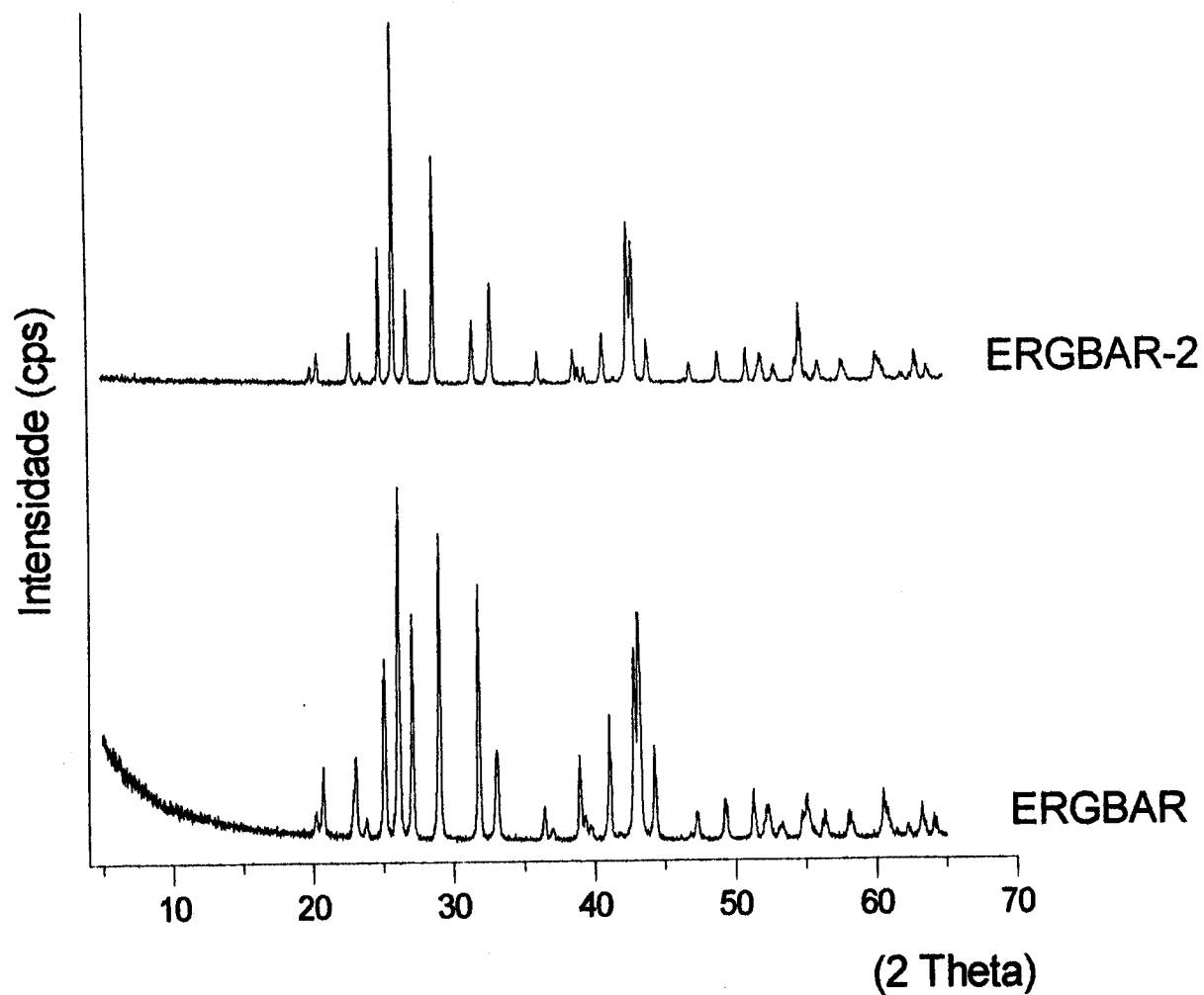


Figura 105 – Difractogramas de barita. Em ergbar, barita gemológica associada ao veio de quartzo; ergbar-2 é a barita associada ao veio de opala.

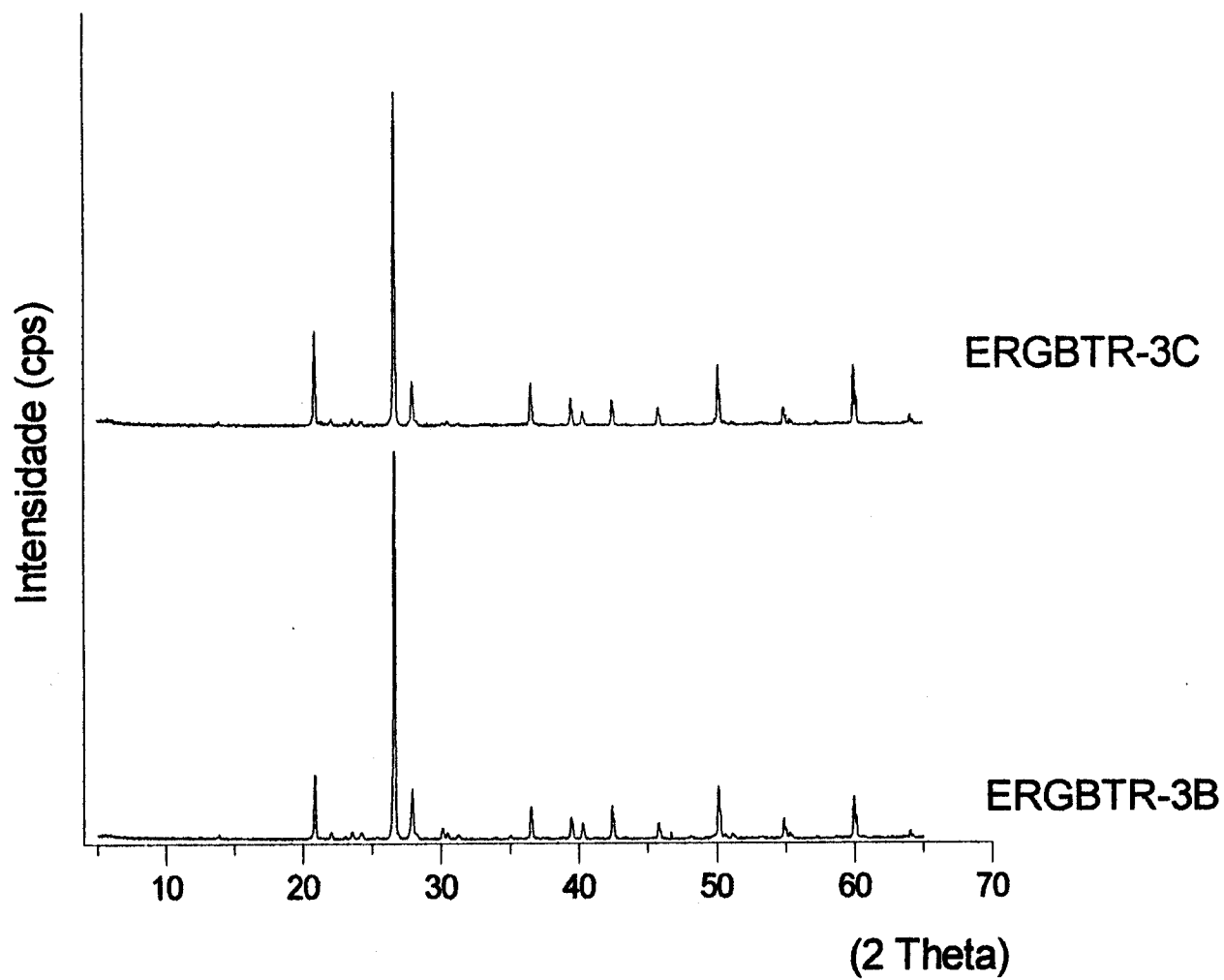


Figura 106 - Difractogramas do arenito integrante de uma brecha cimentada pela opala (ergtr-3a). É constituído de quartzo e albita.

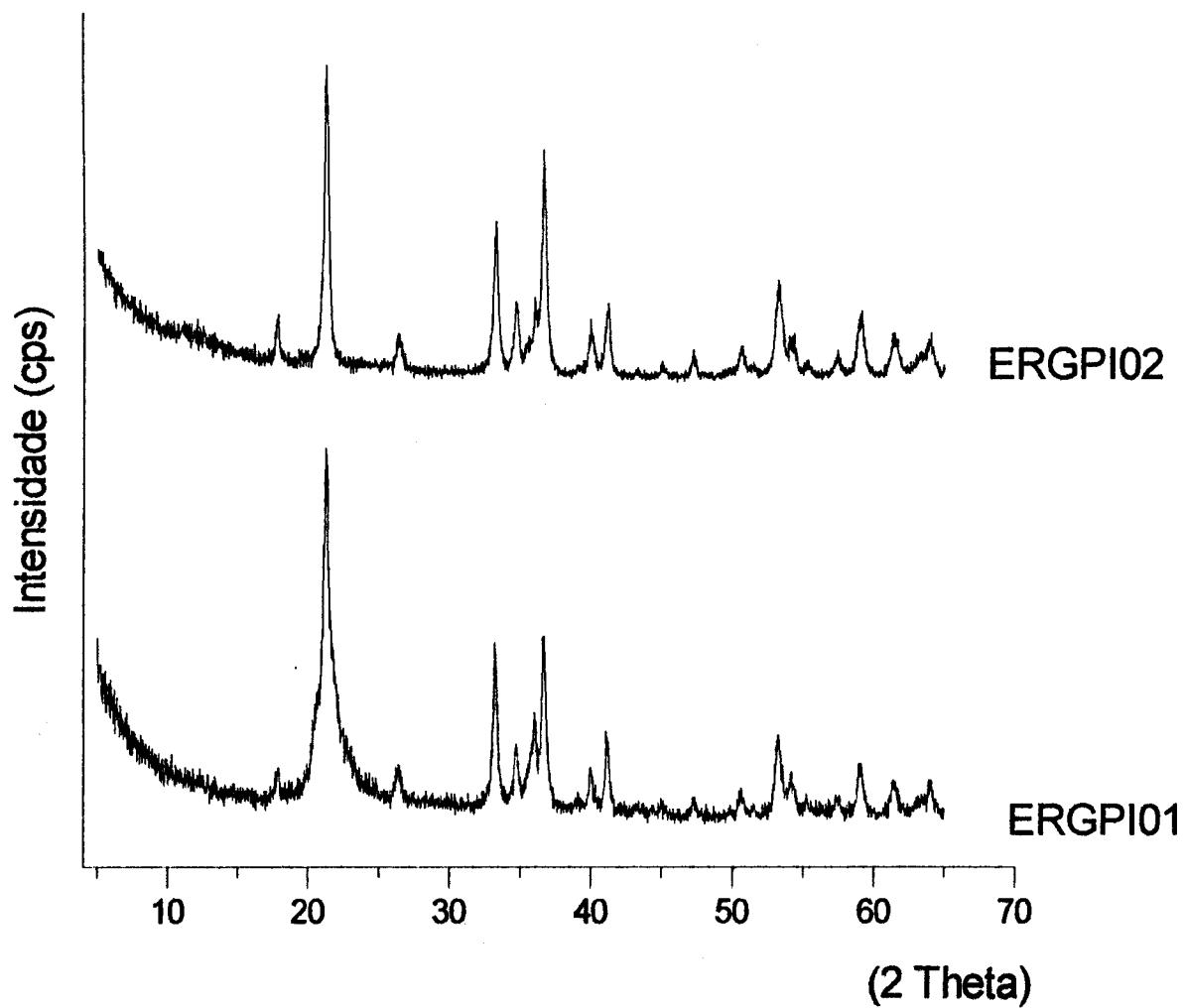


Figura 107 – Difractogramas das concreções encontradas entre o dique de rocha básica e o arenito encaixante, constituídas de goethita.

encaixante (duas amostras escuras, densas, ora fraturadas ora brechadas, com opala ou quartzo ou calcedônia preenchendo as fraturas), também foram analisadas por DRX, sendo identificado a goethita, (Figuras 23, 24 e 107).

### 3.4.3 Resultados da espectroscopia de absorção no infravermelho

Em relação às análises por espectroscopia de absorção no infravermelho, todas as amostras apresentaram espectros característicos aos das opalas descritos na literatura (Lyon 1967; Jones & Segnit 1969 e 1971; Farmer 1974; Gadsden 1975; Marel & Beutelspacher 1976; Povarennykh 1978; Moura 1982; Bartoli *et al.* 1983; Russell & Fraser 1994; Flörke 1995), exibindo os seguintes conjuntos de bandas: de vibração de estiramento da água livre (de 3.447 a 3.462  $\text{cm}^{-1}$ ), de vibração de deformação da água livre (de 1.637 a 1.640  $\text{cm}^{-1}$ ), e as três bandas do SiO (vibração de estiramento entre 1.099 e 1.104  $\text{cm}^{-1}$ , vibração de estiramento entre 787 e 790  $\text{cm}^{-1}$ , e vibração de deformação entre 472 e 474  $\text{cm}^{-1}$ ), (Figura 108).

Segundo Jones & Segnit (1971), estudando as opalas australianas, há uma tendência de aumento na banda de vibração de deformação do SiO, da opala-A para opala-CT, passando respectivamente de 465  $\text{cm}^{-1}$  para 475  $\text{cm}^{-1}$ . Essa tendência também é observada nas opalas aqui estudadas, mas com uma variação peculiar da opala-A para opala-CT, respectivamente de 471 para 474  $\text{cm}^{-1}$ . Essa tendência também é sugestiva para a banda de vibração de estiramento, neste caso há uma diminuição da opala-A para opala-CT, respectivamente de 792 para 788  $\text{cm}^{-1}$ , enquanto que a outra banda de vibração de estiramento apresenta, como regra geral, da opala-A para a opala-CT, de 1.104 até 1.099  $\text{cm}^{-1}$ , conforme é visto na Tabela 05, que mostra todas as bandas identificadas nas amostras de opalas estudadas, obtidas pelos espectros de absorção no infravermelho.

### 3.4.4 Resultados da análise térmica

As curvas das análises térmicas exibem padrões similares às análises de opalas encontradas na literatura (Jones *et al.* 1963; Bayliss & Males 1965; Mackenzie 1970; Smykatz-Kloss 1974; Moura 1982; Pearson 1985). As curvas das ATDs do conjunto de amostras estudadas, mostram um padrão semelhante caracterizado por um pico endotérmico principal entre 100 e 200 °C, representando a fase principal de perda de água. Neste conjunto, curvas distintas podem ser individualizadas: uma banda simétrica (ergbd8), com pico em 100 °C; uma banda

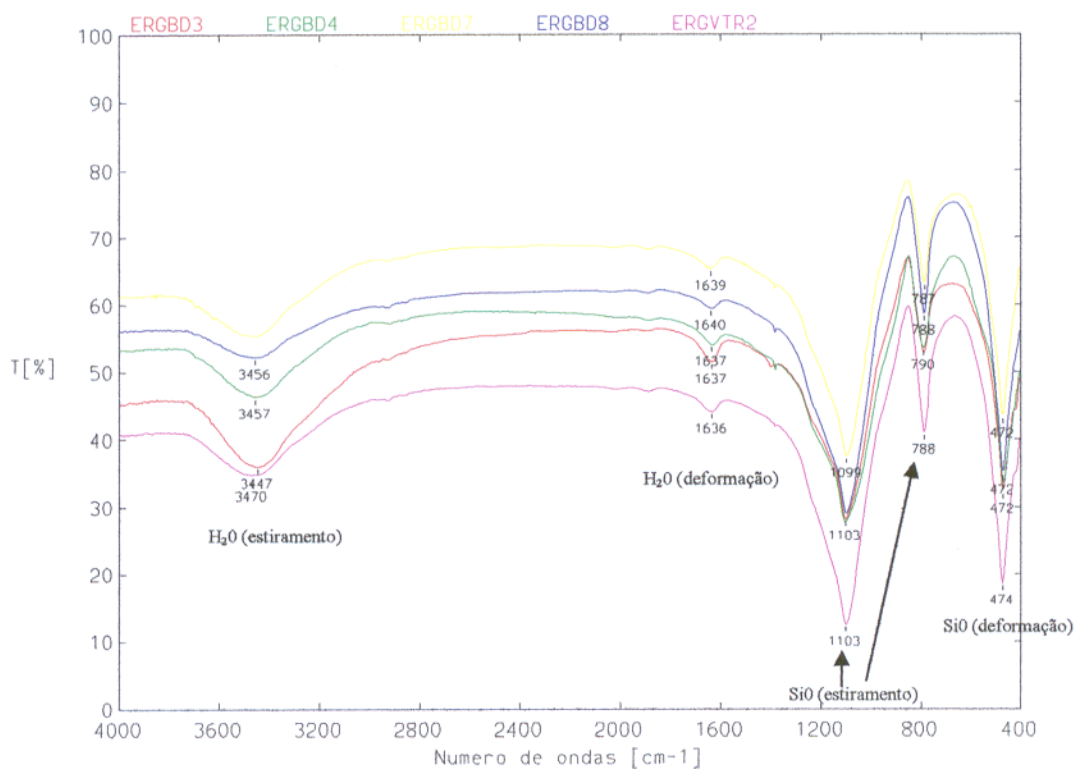


Figura 108 – Espectros de absorção no infravermelho das opalas laranjas, destacando a uniformidade dos mesmos.

Tabela 05 Conjuntos de bandas obtidas pelos espectros de IV.

Amostra	$\text{cm}^{-1}$								
Ergbd5			3.470	1.638	1.104	792	471	414	
Ergbd4			3.457	1.637	1.104	790	472		
Ergbd6			3.460	1.641	1.103	794	472		
Ergbd23			3.456	1.634	1.104	790	471		
Ergbd2a			3.462	1.636	1.104	790	471		
Ergbd3			3.447	1.637	1.103	790	472		
Ergbd12.08			3.471	1.635	1.103	789	473	415	
Ergbd7			3.462	1.639	1.099	787	472		
Ergbd11.38			3.447	1.641	1.103	788	474		
Ergtrc-1a	3.700	3.622	3.442	1.638	1.103	912	788	696	473
Ergbd8			3.456	1.640	1.099	788	472		
Ergbd9			3.462	1.640	1.099	787	471		
Ergtr-3 <sup>a</sup>			3.469	1.640	1.099	790	474	414	
Ergbd1			3.452	1.639	1.099	790	472		
Ergvtr2			3.470	1.636	1.103	788	474		

larga e arredondada (amostras ergbd3, ergbd4 e ergbd7) com pico em aproximadamente 150 °C; e uma banda larga e assimétrica (amostra ergvtr2) com pico em 200 °C. No entanto, a curva da amostra ergbd7 apresenta um segundo estágio de perda de água, evidenciado por um pico endotérmico menor, em 350 °C. Nas amostras ergbd3 e ergbd7, entre 400 e 600 °C, observa-se um alto, mas que não chega a configurar claramente um pico exotérmico, podendo estar relacionado a um aumento da cristalinidade destas opalas logo após a perda de água (Figura 109).

As curvas das ATGs mostram uma perda contínua de massa, tendo nos pontos de inflexão destas curvas, o pico da perda de água. Os teores de água dessas opalas oscilam entre aproximadamente 3,7 e 10% (Figura 110).

### 3.5 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

#### 3.5.1 Generalidades

Foram realizadas análises químicas nas opalas laranjas e nas inclusões de hematita e caulinita, sendo discutidas a seguir:

#### 3.5.2 As opalas

Em análise de amostra total, por via úmida, além de SiO<sub>2</sub>, (92,76 %), as opalas contém H<sub>2</sub>O como P. F. (5,69 %) e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,19 %), enquanto os teores de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiO<sub>2</sub> encontram-se na ordem de 0,2 %.

Análises pontuais realizadas ao MEV / SED, de caráter semi-quantitativo, revelaram teores médios na ordem de 98,5% de SiO<sub>2</sub>, 0,4% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 0,3 % de Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, e 5.000 ppm de BaO, sendo praticamente desprovida de Ca e Na (Tabela 06). Os valores aparentemente mais elevados de SiO<sub>2</sub> são por conta dos cálculos a 100 %, que não considera a água.

Seis análises realizadas por ICP / AES em amostra total indicam em média: Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,04%), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,5%) e BaO (323 ppm); CaO, NaO, K<sub>2</sub>O e MgO, estão na ordem de 0,03 %. Entre os elementos traços, apenas Sr (9,2 ppm), Be (5,2 ppm) e Cr (4,7 ppm) apresentam valores acima dos limites de detecção.

As diferenças dos teores apresentados acima, de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e BaO refletem os métodos analíticos utilizados. As análises por via úmida e ICP/ AES são realizadas com amostras totais, o que faz com que nos seus resultados, estejam incluídos os teores das inclusões. A MEV/ SED por ser um método pontual, é mais adequado para a identificação da composição

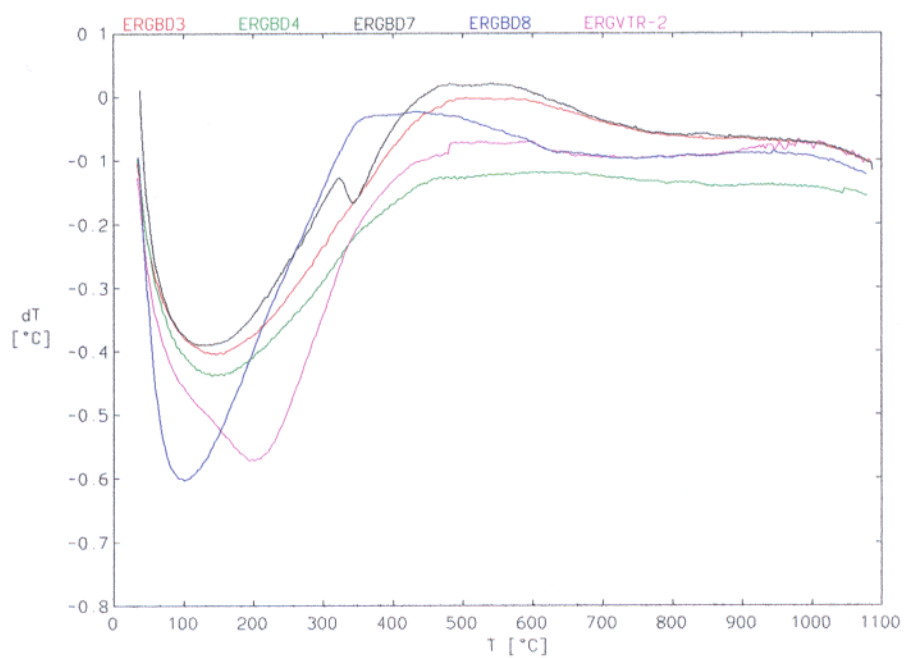


Figura 109 - Curvas das ATDs das opalas, destacando-se o pico endotérmico da amostra ergbd7 em 350 °C.

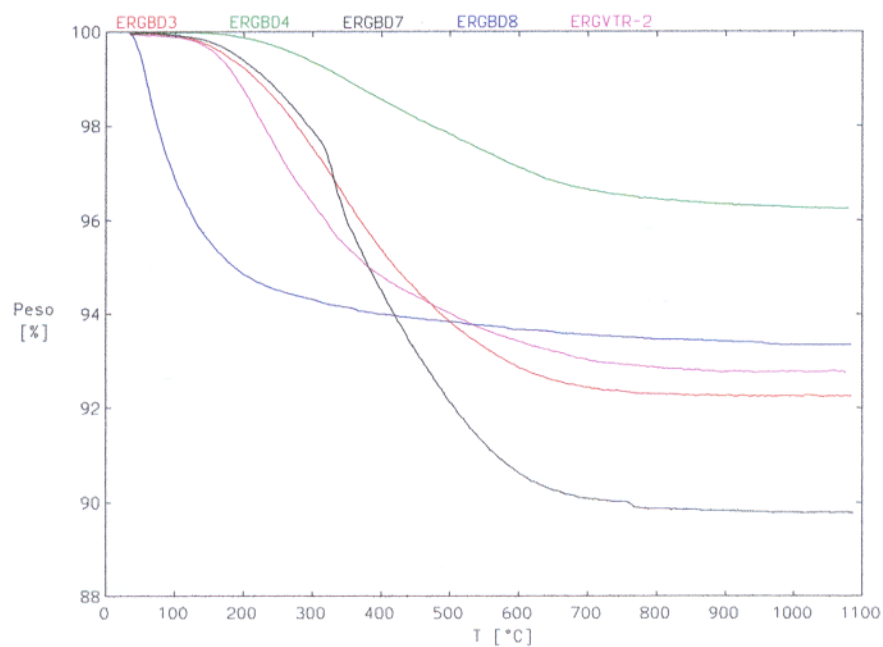


Figura 110 - Curvas de ATGs das opalas, destacando os teores de água entre aproximadamente 3,7 e 10%.

química dos minerais. Mas é importante fazer a ressalva que este método não leva em conta a água, além disso,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{BaO}$  mostram teores bastante baixos, próximos aos limites de detecção, pois são eliminados os pontos com inclusões.

Quando os teores das opalas laranjas são comparados com os dados das opalas preciosas de Pedro II, apresentam uma similaridade de  $\text{SiO}_2$ , (entre 86,62 % e 93,11 %); para o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  as opalas preciosas mostram teores superiores, com médias entre 1,20 % e 4,46 %. Os resultados do MEV / SED mostram uma similaridade para o  $\text{SiO}_2$ , com 98,58 %. Quanto aos teores dos elementos traços, estas opalas preciosas apresentam-se mais enriquecidas em Co, Cu, Ni, Be, B, Zn e Sr, (Souza 1985; Rosa 1988 e Gomes 1990), enquanto que as opalas laranjas mostram-se bastante enriquecidas apenas em Ba.

Tabela 6 - Composição química semiquantitativa, das opalas laranjas, obtidas pelo MEV/SED. Esses valores foram obtidos pela normatização a 100% sem considerar a água.

<i>Amostras</i>	<i>Composição (%)</i>					
	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{BaO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$
ErgAr3	98,1	0,7	ald	0,9	0,2	0,1
Ergbd28i	97,9	0,5	0,1	1,4	-	-
Ergbd5	98,4	0,8	0,2	0,5	-	-
Ergbd8	98,9	0,6	0,1	0,3	-	-
Ergbd7	99,4	0,2	0,1	0,3	-	-
Ergbd9	99,4	0,1	0,1	0,3	-	-
Ergbd6	99,5	0,1	0,1	0,3	-	-
Ergtrv2	99,0	0,4	0,2	0,4	-	-
Ergbd2	98,2	0,6	0,8	0,4	-	-
Ergbd3	99,1	0,3	0,1	0,4	-	-
Ergtrc1	94,1	5,1	0,2	0,6	-	-
Ergbd4	97,8	0,4	1,4	0,4	-	-
Ergbd1	99,2	0,4	0,1	0,4	-	-
Ergbd23	99,2	0,3	0,1	0,4	-	-

(ald) abaixo do limite de detecção; (-) Não analisado; O resultado de cada amostra representa a média de seis medidas.

### 3.5.3 As inclusões

Dentre as diversas amostras de opalas laranjas contendo inclusões de hematita, três inclusões foram analisadas pelo MEV/SED. As análises foram realizadas: 1) no centro da inclusão; 2) numa zona interna de transição entre a inclusão e a opala hospedeira; 3) numa zona externa de transição entre a inclusão e a opala hospedeira e; 4) na opala hospedeira. Os resultados obtidos, do núcleo da inclusão para a opala hospedeira, destacam-se pelo aumento brusco do conteúdo de  $\text{SiO}_2$ , de 9,4% até 98,7% e uma diminuição abrupta do teor de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , variando de 89,6% até valores inferiores ao limite de detecção (Tabela 07 e figura 111).

Uma inclusão sólida constituída de um agregado de diminutas plaquetas foi analisada semi-quantitativamente pelo MEV/ SED, que indicou 53,8% de  $\text{SiO}_2$ , 42,9% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3,5% de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e 0,1% de  $\text{K}_2\text{O}$ , (Figuras 98 a 100), correspondendo à caulinita.

Tabela 07 - Composição química semi-quantitativa da hematita com zonas de transição até a opala envolvente.

Amostras	Composição (%)				
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	ZnO
Ergbd 28.1	9,42	0,82	89,60	0,16	-
Ergbd 28.2	80,16	0,55	18,91	0,38	-
Ergbd 28.3	97,62	0,32	1,6	0,59	-
Ergbd 28.4	98,67	0,60	-	-	-
Ergbd 28.6	15,39	0,98	82,15	0,21	1,27
Ergbd 28.7	11,82	0,88	86,04	0,32	0,94
Ergbd 28.10	73,48	1,12	24,20	0,33	0,87
Ergbd 28.11	87,03	1,41	8,20	1,04	2,31
Ergbd 28.12	15,35	1,03	81,40	0,51	1,71
Ergbd 28.13	55,06	0,53	43,27	0,29	0,85
Ergbd 28.14	94,22	0,55	4,18	0,41	0,65
Ergbd 28.15	97,67	0,60	0,77	0,34	0,61

(-) Não detectado

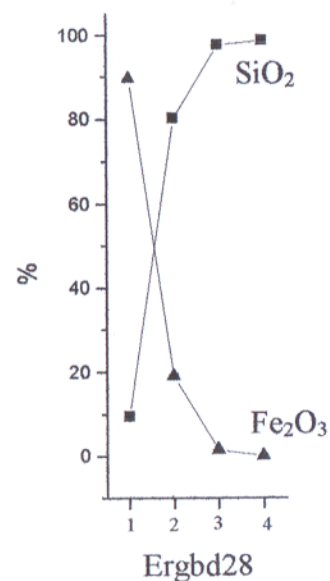
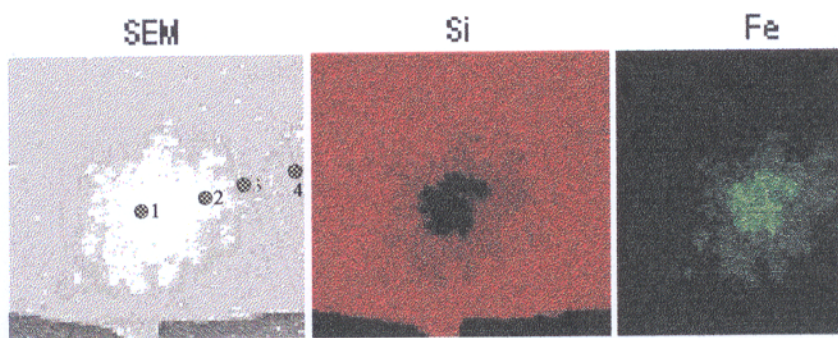


Figura 111 – Imagens MEV/SED da inclusão de hematita e do mapeamento dos elementos silício (cor vermelha) e ferro (cor clara), destacando a transição entre o núcleo da hematita e a opala envolvente. Os pontos analisados - 1, 2, 3 e 4 na imagem - estão representados no gráfico e listados na tabela acima (Ergbd28.1 a Ergbd28.4). Amostra proveniente da ocorrência Tranqueira 3.

#### 4. CONCLUSÕES

No contexto geológico, as mineralizações opalinas de Buriti dos Montes (PI) estão situadas na zona de contato entre os diques e o arenito encaixante controladas pelas fraturas paralelas ao corpo intrusivo. Estas fraturas são resultantes da contração originada pelo resfriamento e o alívio de pressão do sistema hidrotermal que originou estas opalas.

As fraturas cicatrizadas e planos de concentração da deformação, presentes nas opalas aqui estudadas e as concreções de hematita e/ou goethita brechadas, cimentadas pela opala, calcedônia ou quartzo, estão relacionadas com o modo de ocorrência das mesmas, que é associado às feições rúpteis resultantes de reativações do Lineamento Transbrasiliano (L.T.). Estas características são típicas dos jazimentos piauienses, e assumem uma importância maior quando se compara com os diferentes modos de ocorrências das opalas em diversas partes do mundo, destacadamente aquelas provenientes do México e Etiópia, que ocorrem preenchendo amígdalas na rocha hospedeira da mineralização, um riolito.

Mineralologicamente, encontram-se os diferentes estágios de cristalinidade (da opala-A até opala-CT) apresentando teores de água entre 3,7 e 10%.

As amostras de opala-CT após serem submetidas à temperatura de 1.100 °C nas análises térmicas diferenciais, permanecem estáveis, enquanto que nas opalas-A e de níveis intermediários de cristalinidade há um rearranjo estrutural com aumento na cristalinidade das mesmas, o que se poderia esperar de sua composição mineralógica.

Quanto às características gemológicas, os estudos realizados mostram que as opalas laranjas destacam-se por apresentar cores básicas que vão do amarelo-claro ao vermelho-amarronzado, sem jogo de cores (somente foi observado um suave jogo de cores na opala azul-claro), boa transparência e dureza 6,5. Esta dureza é superior aos dados da literatura mineralógica, que varia entre 5 e 6 (Klein & Hurlbut Jr. 1993).

Após acompanhar as condições de estabilidade física em diferentes amostras de opalas brutas e lapidadas durante 24 meses na temperatura ambiente, observou-se que algumas amostras craquearam e outras não. As análises mineralógicas evidenciaram que as amostras de opala-A permaneceram estáveis, enquanto que aquelas opalas de fases de cristalinidade intermediárias, foram seguidas de um craqueamento progressivamente mais intenso, quanto

maior era sua cristalinidade. Ou seja, quanto maior a cristalinidade, maior o craqueamento. Assim recomenda-se a opala-A para a indústria joalheira.

A origem de suas cores básicas está relacionada com a grande homogeneidade que estas opalas apresentam, quando examinadas ao MEV, mostrando uma intensa cimentação do espaço intersticial entre as esferas de sílica formadoras da estruturação desta gema, por um cimento constituído também de sílica. Este fato permite que a luz incidente tenha uma continuidade óptica entre as esferas de sílica constituintes da opala e estes poros, conseqüentemente conferindo às amostras de opalas laranjas aqui estudadas, sua excepcional transparência e ausência do jogo de cores. Como as diversas cores observadas nestas opalas laranjas são variações entre o amarelo e o vermelho, o diâmetro das esferas de opala amorfa, formadoras da estrutura destas opalas deve situar-se entre, aproximadamente, 240 e 300 nm, que respectivamente são característicos das faixas de comprimentos de ondas responsáveis pelas cores amarelo e vermelho. Esse aspecto foi baseado na imagem de MEV/SED (Figura 34).

Quimicamente, destaca-se na opala laranja aqui estudada o elevado teor de bário, entre 323 e 5.000 ppm. No entorno do povoado de Tranqueira foram identificados três veios que continham o mineral barita: em um deles a barita está associada com a opala e nos outros com o quartzo. O alto teor de bário presente nesta opala seria originário da rocha encaixante da mineralização, um arenito. O feldspato constituinte do arenito teria contribuído com o bário (onde estaria substituindo o cálcio na estrutura deste mineral). Este arenito segundo Góes *et al.* (1993), foi depositado em ambiente marinho, assim como os folhelhos da Formação Pimenteiras que ocorrem próximo à área estudada, favorável a bário. Assim, o bário teria sido carreado pelo sistema hidrotermal juntamente com a sílica, daí a grande quantidade de ocorrências de barita na região, às vezes, associada aos veios de quartzo, às vezes, associada aos veios de opala, sendo então uma "assinatura geoquímica".

As opalas aqui estudadas são ricas em inclusões do tipo: arenito (tubo ou canal, vermicular, banco de coral, estalactite, estalagmite, coluna, bolha, botrioidal e irregular), craqueamento, estruturas de fluxo, fraturas (cicatrizada, dendrítica, de tensão e seca), manchas de cor, plano de concentração da deformação, teia (hematita e hematita com opala comum), quartzo, quartzo-caulinita e caulinita.

Os minerais associados com a mineralização de opala laranja são: quartzo, calcedônia, hematita, estilpnomelano, caulinita e barita. A goethita é encontrada quando a hematita tem contato com o ambiente externo, sendo um produto de alteração intempérica da mesma.

Os dados apontados indicam que a opala encontrada no município de Buriti dos Montes tem uma origem de caráter hidrotermal, levando em consideração:

- A paragênese da mineralização;
- Os teores significativos de Ba;
- O contexto geológico da mineralização, marcado pela associação de diques de diabásio, tendo um a dois metros de espessura, com os arenitos do Grupo Serra Grande.

Estes parâmetros listados anteriormente, quando relacionados com as opalas preciosas de Pedro II, tem na mesma ordem:

- Uma paragênese definida por: por tremolita-actinolita, serpentina, carbonato, topázio, turmalina, clorita, epidoto, albita, titanita, hematita, caulinita, nontronita, pirita, barita, quartzo, calcedônia, opala-A, opala-C e opala-CT;
- Teores significativos de Co, Cu, Ni, Be, B, Zn e Sr;
- Contexto geológico da mineralização, marcado pela associação de um *sill* de rochas básicas, tendo até 150 m de espessura, com os arenitos da formação Cabeças.

Em função das diferentes paragêneses minerais associadas com as opalas – citadas anteriormente - percebe-se que em Buriti dos Montes o sistema hidrotermal atingiu uma temperatura menor que em Pedro II e que teve pouca influência química e mineralógica das rochas básicas.

Com base em feições tais como:

- Veios mostrando bordas irregulares com golfos de corrosão (Figura 20) e;
- Pseudomorfos de cristais de quartzo presentes nas paredes dos veios de opala, onde a sílica formadora do quartzo foi solubilizada, mostrando reentrâncias semelhantes a bordas de corrosão ou relictos de dissolução (Figuras 93 a 97);

O fluido hidrotermal formador desta mineralização opalina ao percolar pelas fraturas tanto no arenito como no diabásio, promoveu a dissolução de seus minerais - tanto primários como hidrotermais pré-existentes - que serviram como fonte de sílica para a formação da opala.

Pelo exposto pode-se delinear uma clara "assinatura de origem" para as opalas laranjas de Buriti dos Montes, baseado:

- No seu ambiente de formação, de caráter hidrotermal;
- Na geologia destas ocorrências, marcada pela associação dos arenitos com os diques básicos;
- Nas propriedades gemológicas e suas inclusões sólidas (arenito, craqueamento, estruturas de fluxo, fraturas, manchas de cor, plano de concentração da deformação, teia (hematita), quartzo, quartzo-caulinita e caulinita);
- Na mineralogia, representada por quartzo, calcedônia, hematita, estilpnomelano, caulinita, barita, opala-A e opala-CT;
- E a assinatura geoquímica: Ba – SiO<sub>2</sub>;

Embora não exerçam o fascínio das opalas preciosas de Pedro II, as opalas laranjas encontradas nos arredores do município de Buriti dos Montes têm sido bastante apreciadas pelas suas cores básicas, transparência, dureza e estabilidade. Apresentam-se como mais uma variedade de opala gemológica, distinguindo-se principalmente pelo seu conjunto de inclusões e quimismo, sendo hoje a única região produtora dessa gema no Brasil, e que ainda apresenta um potencial expressivo para novas áreas/ ocorrências. Isso mostra que a atividade termal resultante das manifestações subvulcânicas básicas em contato com os sedimentos paleozóicos da Bacia do Parnaíba, proporcionou um ambiente hidrotermal especial para formação de opalas, tendo distribuição regional.

Com base nos dados apresentados, conclui-se que as opalas de Buriti dos Montes têm características geológicas, gemológicas e geoquímicas que permitem distinguí-las das demais. Isto tem uma importância muito grande, pois é um instrumento para valorização da "marca Brasil" no mercado internacional de gemas.

Como sugestões para trabalhos posteriores ficam o estudo das inclusões fluidas e a datação das rochas básicas associadas à mineralização de opala.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKIZUKI, M. 1970. Fractured surface of opal. *Contr. Mineral. and Petrol.*, 28: 57-61.
- ALMEIDA, F.F.M. de; CARNEIRO, C.D.R.; MACHADO JR, D. de L.; DEHIRA, L. K. 1988. Magmatismo pós-paleozóico no nordeste oriental do Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 18: 451- 462.
- ANDERSON, B. W. 1988. *A identificação das gemas*. Rio de Janeiro, Ed. Livro Técnico. 462p.
- BALL, R. A. 1982. Common opal and potch opal. *The Austral. Gemmol.*, p.305-310.
- BALL, R. A. 1983. Precious opal from New Zealand. *The Austral. Gemmol.*, p.12-16.
- BAPTISTA, J. G. 1981. *Geografia física do Piauí*. 2<sup>a</sup> ed., Teresina, Comepi. 368p.
- BARIAND, P.; POIROT, J. P.; FRITSCHIE, E. 1992. *The Larousse Encyclopedia of precious gems*. New York, VNR Press. 248 p.
- BARTOLI, F.; MEYER, R.; MOURA, F. de F.; SAMAMA, J. C. 1983. Caractérisation chimico - minéralogique de l'opale noble des gisements de nord-est du Brésil. Paris, *Note. C. R. Acad. Sc. Paris*, 296: 625-630.
- BAYLISS, P. & MALES, P. A. 1965. The mineralogical similarity of precious and common opal from Australia. *Miner. Magazine*, 35: 429-431.
- CALDASSO, A.L.S. & HAMA, M. 1978. Posicionamento estratigráfico das rochas básicas da Bacia do Parnaíba. In: CONG. BRAS. GEOL., 30., Recife, 1978. *Anais...* Recife, SBG. v. 2, p.567-568.
- COLLYER, T. A.; KOTSCHOUBEY, B.; RODRIGUES, E. G. 1994. A opala do município de São Geraldo do Araguaia, estado do Pará. In: CONG. BRAS. GEOL., 38., Camboriú, 1994. *Anais ... Camboriú*, SBG. v.1, p.200.
- CPRM. 1995. *Mapa geológico do estado do Piauí*. Escala 1: 1.000.000. MME/SMM. Governo do estado do Piauí.
- DARRAGH, P. J.; GASKIN, A. J; TERREL, B. C.; SANDERS, J. C. 1966. Origin of precious opal. *Nature*, 5018:13-16.
- DELANEY, P. J. V. 1996. *Gemstones of Brazil - Geology and occurrences*. Ouro Preto. Ed. REM. 125p.
- DOWNING, P. B. 1992. *Opal - Identification and value*. Tallahassee, Majestic Press. 210p.
- FARMER, V.C. 1974. *The infrared spectra of minerals*. London, Min. Soc. Monograph. 540p.

- FLÖRKE, O. W. 1995. Silicodioxide-SiO<sub>2</sub> - minerals. *Mitt. Österr. Miner. Ges.*, 140: 9 -34.
- GADSDEN, J. A. 1975. *Infrared spectra of minerals and related inorganic compounds*. London, Ed. Butterworth. 276p.
- G.I.A. 2001. Opals. *The Guide Reference manual*. 9p.
- GÓES, A. M. 1995. *A Formação Poti da Bacia do Parnaíba*. São Paulo: Instituto de Geociências/ Univ. de São Paulo. 175p. (Tese Doutorado).
- GÓES, A. M. de O.; TRAVASSOS, W. A. S.; NUNES, K. C. 1993. *Projeto Parnaíba - Reavaliação da Bacia e Perspectivas Exploratórias*. Belém. PETROBRÁS/DENOR, 3 vols.
- GOMES, E. R. 1990. *Contribuição à mineralogia, geoquímica e gênese das opalas de Pedro II, Piauí*. Belém: Departamento de Geoquímica e Petrologia / Centro de Geociências, 94 p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- GOMES, E. R. & COSTA, M. L. da. 1992. Contribuição à gênese das opalas de Pedro II (Piauí). In: CONG. BRAS. GEOL., 37., São Paulo, 1992. *Anais ...* São Paulo, SBG. v.2, p.116.
- GOMES, E. R. & COSTA, M. L. da. 1994. Contribuição à gênese das opalas de Pedro II (Piauí). *Geochim. Brasil.*, 8: 79-98.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2000a. A opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE GEMAS, 1., Ouro Preto, 2000. *Resumos ...* Ouro Preto, UFOP, p.35.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2000b. Novo garimpo de opala preciosa em Pedro II, Piauí. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE GEMAS, 1., Ouro Preto, 2000a. *Resumos ...* Ouro Preto, UFOP, p.47.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001a. O fogo do Piauí: uma opala laranja com 23.000 ct., In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., Belém, 2001. *Resumos ...* Belém, SBG/NORTE. CD-ROM.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001b. Feições rúpteis na opala do Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., Belém, 2001. *Resumos ...* Belém, SBG/NORTE. CD-ROM.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001c. Inclusões na opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., Belém, 2001. *Resumos ...* Belém, SBG/NORTE. CD-ROM.

- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001d. Mineralogia da opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., Belém, 2001. *Resumos ...* Belém, SBG/NORTE. CD-ROM.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001e. Mineralogia da opala preciosa do garimpo Chã do Lambedor. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., Belém, 2001. *Resumos ...* Belém, SBG/NORTE. CD-ROM.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001f. Inclusões sólidas na opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA NORDESTE, 19., Natal, 2001. *Resumos ...* Natal, SBG/NORDESTE. p.214.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001g. Mineralogia da opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA NORDESTE, 19., Natal, 2001. *Resumos ...* Natal, SBG/NORDESTE. p.215.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2001h. Mineralogia da opala preciosa do garimpo Chã do Lambedor. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA NORDESTE, 19., Natal, 2001. *Resumos ...* Natal, SBG/NORDESTE. p.217.
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2002a. Orange opals from Buriti dos Montes, Piauí, Brazil. *Rev. Pesq. Pós-Grad.*, (no prelo).
- GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 2002b. A new garimpo of precious opal in Pedro II, Piauí, Brazil. *Rev. Pesq. Pós-Grad.*, (no prelo).
- GÜBELIN, E. & KOIVULA J. I. 1986. Inclusions in opal. *J. Gemm.*, 20: 139-144.
- GÜBELIN, E. & KOIVULA J. I. 1992. *Photoatlas of inclusions in gemstones*. Zurich, ABD Edition. 532p.
- HOOVER, D. B.; YOHANNES, T. Z.; COLLINS, D. S. 1996. Ethiopia: a new source for precious opal. *The Austral. Gemmol.*, 19:303 - 307.
- JIANG, P.; OSTOJIC, G. N.; NARAT, R.; MITTLEMAN, D. M.; COLVIN, V. L. 2001. The fabrication and bandgap engineering of photonic multilayers. *Adv. Materials*, 13: 389 - 393.
- JOHNSON, M. L. & KOIVULA, J. I. 1999. Opal in matrix from Brazil. *Gems & Gemology*, 35: 53.
- JOHNSON, M. L.; KAMMERLING, R. C.; DeGHIONMO, D. G.; KOIVULA, J. I. 1996. Opal from Shewa province, Ethiopia. *Gems & Gemology*, 32: 112-120.
- JONES, J. B. & SEGNET, E. R. 1969. Water in sphere-type opal. *Miner. Magaz.*, 37:357-361.

- JONES, J. B. & SEGNI, E. R. 1971. The nature of opal. Nomenclature and constituent phases. *J. Geol. Soc. Austr.*, 18: 57-68.
- JONES, J.B.; SANDERS, J.V.; SEGNI, E.R. 1964. Structure of opal. *Nature*, 205: 990-991.
- JONES, J. B.; SEGNI, E. R.; NICKSON, N.M. 1963. Differential thermal and x-ray analysis of opal. *Nature*, 4886:1191.
- JONES, J.V. 1975. Microstructure and crystallinity of gem opal. *Am. Mineral.*, 60:749-757.
- KLEIN, C. & HURLBUT JR., C. S. 1993. *Manual of mineralogy*. 21<sup>a</sup> ed. N. York, John Wiley & Sons. 683p.
- KNIGGE, J. & MILISENDA, C.C. 1997. Brazilianische opale aus Pedro II. *Z. Dt. Gemmol. Ges.*, 46:99-105.
- LYON, R. J. P. 1967. Infrared absorption spectroscopy. In: ZUSSMANN, J. *Physical methods in determinative mineralogy*. London, Academic Press. p.371-398.
- MACKENZIE, R. C. 1970. Basic Principles and historical development. In: MACKENZIE, R. C. (ed.) *Differential thermal analysis*. London, Academic Press Inc. p. 3-30.
- MACKENZIE, W. S.; DONALDSON, C. H.; GUILFORD, C. 1982. *Atlas of igneous rocks and their textures*. New York, Longman Sci. & Technology. 148p.
- MANSON, D. V. 1978. Plastic Impregnated Gem Opal. *Gems & Gemology*, 16: 49-57.
- MAREL, H. W. VAN DER & BEUTELSPACHER, H. 1976. *Atlas of infrared spectroscopy of clay minerals and their admixtures*. Amsterdam. Elsevier. 396p.
- MARTINS JR., F. L. 1983 *Aspectos genéticos das opalas preciosas de Pedro II, Piauí, Brasil*. Fortaleza, MBL - Mineração Brasileira Ltda, 10 p. (Relatório Interno).
- MOURA, F. de F. 1982. *Mineralogie des opales precieuses de Pedro II - Piauí*. C.E.S.E.V., 17p. (Repport de fin de cycle).
- NAGASE, T. & AKIZUKI, M. 1997. Texture and structure of opal-CT and opal-C volcanic rocks. *The Canadian Miner.*, 35: 947-958.
- NASSAU, K. 1976. A origem das cores dos minerais e das gemas. *Gemol.*, 22:17-52.
- NEM, L. H. B. & URBANO FILHO, C. 1974. A opala brasileira no Piauí. In: CONGR. BRAS. GEOL., 28, Porto Alegre, 1974. *Resumos...* Porto Alegre, SBG. p.593-595.
- NEVES, C. A. de O.; SILVA, A. B. E; GÓES, A. M. de O.; LIMA, M. P. de. 1990. *Projeto de Exploração, Bacia do Parnaíba*. Belém, PETROBRÁS/ DEPEX/ DENOR. 24 p. (Relatório Interno).

- O'DONOGHUE, M. 1983. *Identifying man-made gems - opal*. London, N.A.G. Press. p.171-178.
- OLIVEIRA, J. C. de. 1995. *Projeto Platina Piauí-Maranhão*. Teresina, CPRM /DRM/ RESTE, 36 p. (Relatório final).
- OLIVEIRA, J. C. de; CARDOSO, C. E. T.; QUINHO, J. de S.; AMORIM, H. J. 1979. *Projeto Opala em Pedro II*. Recife, DNPM/CPRM, 2 vols. (Relatório final).
- OLIVEIRA, J. F. & SOARES FILHO, A. R. 1983. Garimpos de opalas da região de Pedro II, Piauí. In: DNPM. *Garimpos do Brasil*. Brasília, DNPM/ DFPM, p.119-136.
- PEARSON, G. 1985. Role of water in cracking of opal. *The Austral. Gemm.*, 15: 435-445.
- PIAUI. 1998. *Mapa político-rodoviário do estado do Piauí*. Governo do estado do Piauí/ SOSP/DER. Escala 1: 1.000.000.
- POVARENENYKH, A. S. 1978 The use of infrared for the determination of minerals. *Am. Mineral.*, 63:956-959.
- RESNICK, R. & HALLIDAY, D. 1996. *Física*. Rio de Janeiro, Ed. Ao Livro Técnico. v.4, 320p.
- ROSA, D. B. 1988. *Les gisements d'opales nobles de la region de Pedro II, dans l'etat de Piauí*. Nancy: L' Institut National Polytechnique de Lorraine/ Ecole Nationale Superieure de Geologie de Nancy, 327 p. (These de Docteur).
- RUSSELL, J.D. & FRASER, A.R. 1994. Infrared methods. In: WILSON, M.J., *Clay mineralogy: spectroscopic and chemical determinative methods*. London, Chapman & Hall, p.11- 67.
- SANDERS, J. V. 1964. Colour of precious opal. *Nature*, 204:1151-1153.
- SANDERS, J.V. 1975. Microestruutura and crystallinity of gem opals. *Am. Miner.*, 60:749-757.
- SAUER, J.R. 1982. *Brazil, paradise of gemstones*. Rio de Janeiro, Ed. Riex. 136p.
- SCHWARZ, D. 1984. Gemas policristalinas e amorfas. *REM*, 27: 34-43.
- SHOVAL, S.; GINOTT, Y.; NATHAN, Y. 1991. A new method for measuring the crystallinity index of quartz by infrared spectroscopy. *Mineral. Magaz.*, 55:579-582.
- SMALLWOOD, A. 1997. A new era for opal nomenclature. *The Austral. Gemm.*, 19: 486-496.
- SMITH, C.P. 1990. Opal with an unusual inclusion. Lab Notes. *Gems & Gemology*, 26: 222.
- SMYKATZ-KLOSS, W. 1974. *Differential thermal analysis - Application and results in mineralogy*. Berlin, Springer-Verlag. 185p.
- SOUZA, W. C. 1985. *Perfil analítico da opala*. Brasília, DNPM, 44 p.

- SPENCER, R. J.; LEVINSON, A. A.; KOIVULA, J. I. 1992. Opal from Queretaro, México: Fluid inclusion study. *Gems & Gemology*, 28:28-34.
- STEFFEN, G. 2000. *Farbe und lumineszenz von mineralien*. Stuttgart, Ed. Enke. 150p.
- SUDENE. 1972. *Mapa plani-altimétrico da Folha SB 24-V-C-II*. Escala 1:100.000.
- SUWA, Y. 1994. *Gemstones - Quality and value*. Santa Monica, GIA and Suwo & Sons. 142 p.
- WARD, F. 2000. *Opals - the Fred Ward gem book series*. 2a ed. Bethesda, Gem Book Publishers. 66p.
- WOLLAERT, E.; VOCHTEN, R.; LANDUYT, J. VAN. 1990. Characterisation of gem opal and inferior qualities by means of electronmicroscopy. *Z. Dt. Gemmol. Ges.*, 39: 211- 223.
- ZEITNER, J. C. 1989. Opals that made history. *Lapydary Journal*, 43: 23-30.