Universidade Federal do Pará
Faculdade de Geologia
Instituto de Geociências

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GISELE TAVARES MARQUES

INCLUSÕES SÓLIDAS EM OPALAS LARANJA DE BURITI DOS MONTES (PIAUÍ – BRASIL): MORFOLOGIA, MINERALOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

BELÉM – PA
MARÇO – 2011

GISELE TAVARES MARQUES

INCLUSÕES SÓLIDAS EM OPALAS LARANJA DE BURITI DOS MONTES (PIAUÍ – BRASIL): MORFOLOGIA, MINERALOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.
Orientador: Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa.

Belém
2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

M357i Marques, Gisele Tavares

Inclusões sólidas em opalas laranja de Buriti dos Montes (Piauí – Brasil): morfologia, mineralogia e composição química / Gisele Tavares Marques; Orientador: Marcondes Lima da Costa – 2010

75 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2010.

1. Inclusões sólidas. 2. Opalas laranja. 3. Gênese. 4. Buriti dos Montes (PI). I. Costa, Marcondes Lima da, *orient*. II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20º ed.: 549.68098122

GISELE TAVARES MARQUES

INCLUSÕES SÓLIDAS EM OPALAS LARANJA DE BURITI DOS MONTES (PIAUÍ – BRASIL): MORFOLOGIA, MINERALOGIA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Geologia da Universidade Federal do Pará – UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

Data de aprovação: ____/____/____
Conceito: _____
Banca examinadora:

_____
Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa – Presidente
Doutor em Mineralogia e Geoquímica
Universidade Federal do Pará

_____
Prof. Dr. Márcio Dias Santos – Membro
Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará

_____
Prof. Dr. Raimundo Netuno Nobre Villas – Membro
Doutor em Geologia
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais, Maria Amélia Tavares Marques e Wilson dos Santos Marques, por todas as oportunidades que me ofereceram e pela confiança sempre depositada em mim. Às minhas queridas "Vó Zilda" e "Tia Laíde" por todo o apoio nas mais variadas circunstâncias da vida.

AGRADECIMENTOS

Com estas palavras, quero expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram não só ao desenvolvimento deste trabalho, mas durante a minha vida acadêmica de maneira geral.

Primeiramente ao CNPq pelo apoio financeiro através do projeto de pesquisa AGEOPAM (processo 471.949/2006-0) e pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (Quota do Pesquisador), os quais foram indispensáveis à minha formação.

Ao professor Marcondes Lima da Costa pela orientação nesses longos anos de caminhada, nos quais recebi conhecimento e experiência fundamentais ao desenvolvimento da minha carreira, mas principalmente pela confiança em meu potencial.

Aos amigos e colegas de trabalho do Grupo de Mineralogia e Geoquímica Aplicada (GMGA), especialmente Henrique, Flávia, Mônia, Glayce, Uibirá, Gilberto, Ecilene, Jucilene, Sérgio e Socorro, pelo companheirismo, alegria, compreensão, e é claro, pelos momentos de descontração que nos restauram do trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura da UFPA (LABMEV-UFPA), professor Claudio Lamarão, Elisamar e Ishi Macris, pela enorme contribuição no desenvolvimento desta e de outras pesquisas realizadas por mim durante o curso de graduação. Tenho certeza que esta parceria ainda renderá bons frutos no futuro.

Ao Dr. Hilton Túlio Costi do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG), pela gentileza e boa vontade de atender a mim e outros usuários nos momentos em que o MEV da UFPA encontrava-se com problemas.

Ao professor José Francisco Berrêdo e à geóloga Josiana Torres dos Santos por me receberem gentilmente e oferecerem a mim todo o conhecimento necessário ao desenvolvimento da minha pesquisa de Iniciação Científica.

À Faculdade de Geologia (FAGEO), incluindo a direção e demais funcionários, especialmente aos professores Raimundo Netuno Nobre Villas, Régis Munhoz Krás Borges, Evaldo Raimundo Pinto da Silva, Rômulo Simões Angélica, Roberto Vizeu de Lima Pinheiro e Maurício da Silva Borges.

Aos queridos amigos Jéssica, Rodrigo, Kamilla, Joseanna e Katucha que estiveram ao meu lado nos momentos bons e ruins, sempre em que precisei ao longo do curso de graduação.

Aos colegas da turma de 2005, que dividiram comigo diversas experiências do aprendizado acadêmico, profissional e social.

Aos amigos Jean e Iêda por tudo de bom que me proporcionaram, pelo carinho, amizade, alegria, incentivo, compreensão, e por terem me acompanhado desde o começo da minha caminhada.

À minha família, especialmente meus pais, pela confiança, respeito, incentivo, apoio e dedicação, pela minha educação e construção dos meus valores morais, que hoje são essenciais a mim.

E finalmente, ao meu amor, “meu B”. Companheiro de todas as horas, amigo, pai, irmão, filho... Aquele que me apoiou incondicionalmente nos últimos tempos dessa batalha e me fez uma pessoa mais feliz desde o começo da nossa união.

“O verdadeiro valor das coisas
não está no tempo em que elas duram,
mas na intensidade com que elas acontecem.
Por isso, existem momentos inesquecíveis,
fatos inexplicáveis e pessoas incomparáveis.”

Fernando Pessoa

RESUMO

As opalas laranja de Buriti dos Montes ocorrem principalmente na forma de vênulas e veios nos arenitos do Grupo Serra Grande, onde intrudiram diabásios da Formação Sardinha. Também cimentando brechas na zona de contato da encaixante com os diques, como depósitos secundários tipo coluvionar e fluvial. Essas opalas têm estrutura homogênea e maciça devido ao preenchimento dos interstícios das esferas de sílica por cimento opalino. As esferas seguem um arranjo irregular e os diâmetros variam de 150 a 500 nm. As inclusões sólidas observadas nas opalas foram agrupadas como: bolha (preenchida, vazia e microconcreção), botrioidal (banco de corais, estalactite, estalagmite e coluna), dendrítica, estrutura de fluxo, fratura (cicatrizada, seca, de tensão, superficial e craqueamento), lamelar, mancha de cor, microcristal, nodular, teia e tubo. As análises mineralógicas revelaram diferentes graus de cristalinidade, de opala-A (amorfa) à opala-CT (cristobalita-tridimita). A maioria das inclusões é constituída de caulinita, quartzo e hematita. O quartzo associado mostra padrões de zoneamento em catodoluminescência típicos de origem hidrotermal. As opalas apresentam 90,14 % de SiO_2, 1,32 % de Al_2O_3, 0,2 % de Fe_2O_3 e 8,03 % de água. Os elevados teores de Ba, 195 a 1373 ppm, estão relacionados à barita que ocorre em veios nos arenitos, um mineral típico da ambiência hidrotermal, e encontrado com freqüência na Bacia do Parnaíba. Com base nos dados discutidos, propõe-se um modelo geológico simplificado para sintetizar a formação das opalas laranja de Buriti dos Montes, onde os diabásios foram imprescindíveis como a fonte de calor que aqueceu as soluções hidrotermais, os arenitos contribuíram com a sílica necessária à saturação das soluções e as fraturas foram as armadilhas indispensáveis ao aprisionamento dos fluidos que formaram os veios mineralizados.

Palavras-chave: Inclusões sólidas. Opalas laranja. Gênese. Buriti dos Montes (PI)

ABSTRACT

The orange opals of Buriti dos Montes city occur mainly as veins and venules in Serra Grande Group sandstones, where intruded diabases of the Sardinha Formation. Also cementing breccias of the contact zone between host rock and dykes, as secondary deposits type colluvial and alluvial. These opals have homogeneous and massive structure because to filling of the silica spheres interstices by opaline cement. The spheres show an irregular arrangement and the diameters vary of 150 to 500 nm. The solids inclusions observed in the opals were grouped as: bouble (filled, empty and microconcretion), botrioidal (coral reefs, stalactite, stalagmite e column), dendritic, flow structure, fracture (filled, dry, tension, surface and cracking), lamellar, color patch, microcrystal, nodular, web and tube. The mineralogical analysis showed different degree of crystallinity, of opal-A (amorphous) to opal-CT (cristobalite–tridymite). Most inclusions is constituted of kaolinite, quartz and hematite. The associated quartz shows zoning patterns in cathodoluminescence characteristic of hydrothermal origin. The opals present 90,14 % of SiO_2, 1,32 % of Al_2O_3, 0,2 % of Fe_2O_3 and 8,03 % of water. The high contents of Ba, 195 to 1373 ppm, are related to occurrence of barite in veins within sandstones, a typical mineral of hydrothermal environment, and frequently find in the Parnaíba Basin. Based in the discussed data, a simplified geologic model is proposed to the formation of the orange opals of Buriti dos Montes city, where diabases intrusions were essential as the heat source, heating the hydrothermal solutions, the sandstones contributed with the necessary silica to saturation of the solutions, and the fractures were indispensable to trap fluids which formed the mineralized veins.

Keywords: Solid inclusions. Orange opals. Genesis. Buriti dos Montes (PI).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - Mapa de localização do município de Buriti dos Montes, Piauí, Brasil.... 17

FIGURA 2 - Coluna estratigráfica da Bacia do Parnaíba..... 18

FIGURA 3 - Mapa geológico do nordeste do Piauí, com destaque a região de Buriti dos Montes..... 22

FIGURA 4 - Arranjo irregular das esferas de sílica que constituem as opalas estudadas. Imagem de elétrons secundários obtida por MEV..... 30

FIGURA 5 - Esferas de sílica amorfa observadas em opalas laranja de Buriti dos Montes, com diâmetros variando de 150 a 500 nm. Imagem de elétrons secundários em MEV..... 31

FIGURA 6 - Opala laranja contendo diferentes tipos de inclusões, das quais, destacam-se as bolhas e formas botrioidais..... 33

FIGURA 7 - Opalas laranja contendo bolhas nas quais há revestimento interno por uma película branca. Em B, a bolha mais abaixo é semipreenchida..... 33

FIGURA 8 - Opalas laranja com bolhas revestidas internamente por películas brancas..... 34

FIGURA 9 - A – Seção transversal de uma opala laranja com bolha totalmente preenchida por opala branca e goethita (?) no centro. B – Detalhe da inclusão mostrando a bolha branca e o material ferruginoso (marrom), goethita, provavelmente. C – Detalhe da inclusão observada ao MEV, em imagem de elétrons secundários..... 34

FIGURA 10 - Amostras de opala laranja contendo bolhas. Em A, a bolha é revestida internamente por uma película branca, ausente em B..... 34

FIGURA 11 - Bolha com aspecto de microconcreção ou ainda micro-segmentada como se fosse seccionada por gretas de contração, ao lado de uma inclusão dendrítica..... 35

FIGURA 12 - Inclusão botrioidal em opala laranja, cujo conjunto parece descrever uma coluna..... 35

FIGURA 13 - Inclusão botrioidal lembrando um banco de corais..... 36

FIGURA 14 - Inclusões botrioidais colunares, à semelhança daquelas formadas no interior de cavernas. Algumas delas estão associadas a fraturas secas e de tensão (C e D)..... 36

FIGURA 15 - Opala laranja com inclusões botrioidais e dendríticas..... 37

FIGURA 16 - Inclusão dendrítica, fratura de tensão seca e iridescência..... 38

FIGURA 17 - Opala amarela contendo inclusão dendrítica cavernosa..... 38

FIGURA 18 - A – Cavidade na inclusão dendrítica mostrada na figura anterior. B – Cristais aciculares reticulados dentro de cavidade..... 39
FIGURA 19 - A – Inclusão dendrítica e fratura seca. B – Exemplar de opala amarela com inclusões dendríticas..... 39
FIGURA 20 - Inclusões dendríticas em amostras de opala laranja..... 39
FIGURA 21 - A – Fratura cicatrizada por opala incolor em opala com cor básica amarela. B – Fratura cicatrizada por opala incolor em opala vermelha... 41
FIGURA 22 - Fratura cicatrizada por opala laranja em opala vermelha..... 41
FIGURA 23 - A – Opala laranja com fratura seca e inclusões botrioidais. B – Opala laranja com fratura de tensão associada a uma bolha. C – Craqueamento em opala com cor básica amarela. D – Feições esferulíticas iridescentes nos polígonos delimitados pelas fraturas..... 42
FIGURA 24 - Inclusões lamelares com terminação botrioidal a estalactítica-estalagmítica..... 43
FIGURA 25 - Inclusões lamelares em amostras de opala com cor básica laranja..... 43
FIGURA 26 - Mancha de cor vermelha em exemplares de opala laranja, possivelmente formadas por plasma hematítico..... 45
FIGURA 27 - Inclusão de microcristais de quartzo em amostra de opala laranja..... 45
FIGURA 28 - Amostras de opala amarela com inclusões de microcristais de quartzo. 46
FIGURA 29 - Inclusões nodulares compostas por material arenoso e argilo-arenoso, as quais apresentam películas de oxi-hidróxidos de Fe externas..... 46
FIGURA 30 - A, B – Inclusões helicíticas em amostras de opala laranja. C, D – Inclusões helicíticas (teia), em imagens de ERE em MEV..... 47
FIGURA 31 - Microtubos com preenchimento arenoso em opala laranja..... 48
FIGURA 32 - Difratogramas de raios-x representando os diferentes estágios de ordem-desordem (cristalinidade) das opalas laranja, desde opala-A até opala-CT, com níveis intermediários. CT – cristobalita-tridimita, C – cristobalita e Qz – quartzo..... 49
FIGURA 33 - Termogramas de análises termodiferenciais e gravimétricas das opalas laranja de Buriti dos Montes, representados pelas cores vermelha e verde respectivamente..... 51
FIGURA 34 - Espectros de absorção no infravermelho das opalas estudadas..... 52
FIGURA 35 - Fragmento de opala com inclusão botrioidal formada por caulinita. Imagem obtida com elétrons retroespalhados em MEV..... 53
FIGURA 36 - Inclusão de hematita no centro de uma bolha preenchida por opala branca, mostrada no item 5.2.1. Imagem de ERE em MEV..... 54

FIGURA 37 - Inclusão do tipo teia composta por hematita, imagem de ERE em MEV. É possível observar o contorno da inclusão por uma borda de reação de opala, onde os teores de Fe são mais altos em relação à opala circundante, formada provavelmente pela interação entre a inclusão e o fluido, por dissolução parcial das bordas do material incluso..... 54
FIGURA 38 - Cristal de quartzo em imagens de elétrons secundários (ES), retroespalhados (ERE) e de catodoluminescência (CL), onde ele exibe as possíveis zonas de crescimento..... 55
FIGURA 39 - Prováveis agregados placosos de quartzo pseudomórficos segundo gipsita ou barita, inclusos em opalas laranja. Imagens de ES em MEV.. 56
FIGURA 40 - A e C – Amostras de opala laranja e cristais de quartzo. B e D – Detalhe dos cristais de quartzo..... 57
FIGURA 41 - A e B – Cristais de quartzo exibindo zoneamento. C e D – grãos de quartzo do arenito do Grupo Serra Grande sem zoneamento da simetria hexagonal observado nas imagens A e B. Imagens de catodoluminescência CL em MEV..... 58
FIGURA 42 - Inclusões de cristais de quartzo na opala. Imagem de elétrons secundários (A), retroespalhados (B) e catodoluminescência (C) em MEV, a partir da qual se pode distinguir a opala do quartzo..... 59
FIGURA 43 - A – Grãos de quartzo dos arenitos do Grupo Serra Grande, homogêneos e anédricos a subédricos. B – Diferentes tipos de quartzo na transição arenito-veio. Imagens de MEV-CL. 1 e 2 indicam, grãos de quartzo do sedimento e intermediário, respectivamente..... 61
FIGURA 44 - Diferentes tipos de quartzo associados às opalas laranja nos veios. Imagens de MEV-CL. 1, 2 e 3 indicam quartzo primário, intermediário, e neoformado, respectivamente..... 61
FIGURA 45 - Diagramas de dispersão binária entre SiO_2 e demais elementos determinados nas opalas de Buriti dos Montes..... 63
FIGURA 46 - Diagrama binário mostrando a distribuição dos elementos traços nas opalas das amostras GB 4, GB 7, GB 9 e GB 20..... 65
FIGURA 47 - Diagrama de ETR mostrando o padrão de distribuição destes nas opalas das amostras GB 4, GB 7, GB 9 e GB 20. Os valores, em ppm, foram normalizados pelo condrito segundo Taylor e McLennan (1985). 65
FIGURA 48 - Modelo geológico proposto para sintetizar a formação das opalas laranja de Buriti dos Montes..... 70

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**15**
1.1	APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA	15
1.2	CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL	16
1.3	CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL	19
1.3.1	**Grupo Serra Grande**	**19**
1.3.1.1	Formação Ipu	19
1.3.1.2	Formação Tianguá	20
1.3.1.3	Formação Jaicós	20
1.3.2	**Formação Sardinha**	**21**
1.3.3	**Modo de Ocorrência das Opalas**	**21**
1.4	O ESTUDO DE INCLUSÕES	23
2	**JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS**	**24**
3	**MATERIAIS E MÉTODOS**	**25**
3.1	MATERIAL UTILIZADO	25
3.2	REVISÃO BLIBLIOGRÁFICA	25
3.3	COLETA DE AMOSTRAS	25
3.4	DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA	26
3.5	DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA	26
3.6	IDENTIFICAÇÃO MINERAL POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX).	26
3.7	ANÁLISE TERMODIFERENCIAL (ATD) E GRAVIMÉTICA (TG)	27
3.8	ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)	27
3.9	ANÁLISES QUÍMICAS	28
3.10	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV/EDS/CL)	28
4	**RESULTADOS**	**29**
4.1	A ESTRUTURA DAS OPALAS E SUA INFLUÊNCIA NA COR	29
4.2	MORFOLOGIA DAS INCLUSÕES	31
4.2.1	**Bolha**	**32**
4.2.2	**Botrioidal**	**32**
4.2.3	**Dendrítica**	**37**
4.2.4	**Estrutura de Fluxo**	**37**

4.2.5 Fratura..... **40**
4.2.6 Lamelar ou Tabular..... **42**
4.2.7 Mancha de Cor..... **44**
4.2.8 Microcristal..... **44**
4.2.9 Nodular..... **44**
4.2.10 Teia ou Helicítica..... **47**
4.2.11 Tubo ou Canal..... **47**
4.3 MINERALOGIA DAS OPALAS E DE SUAS INCLUSÕES SÓLIDAS..... 48
4.3.1 Minerais identificados por Difração de Raios-X (DRX)..... **48**
4.3.2 Comportamento Termodiferencial (ATD) e Gravimétrico (TG).... **50**
4.3.3 Comportamento perante a Espectroscopia de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)..... **50**
4.3.4 Contribuições Mineralógicas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS/CL)..... **53**
4.4 O QUARTZO..... 57
4.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA..... 62
5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES..... **67**
REFERÊNCIAS..... **72**

1 INTRODUÇÃO

1.1 APRESENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA

O termo opala deriva de *upala*, do sânscrito, que significa pedra preciosa. Nada mais apropriado para denominar uma gema de beleza extraordinária e tão rara, porém apreciada em todo o mundo. A estátua do “Deus Sol” e a escultura do último imperador asteca *Cuahtemoc*, assim como outros achados descritos na literatura, comprovam o fascínio que esta gema exerce em grande parte das populações, desde períodos remotos na história da civilização, até a atualidade.

Há vários tipos de opalas. Mas as nomenclaturas ainda são confusas a respeito do que constitui um “tipo” de opala, resultando em classificações que seguem vários parâmetros como a cor, gênese, padrão e muitas outras categorias e subcategorias. Segundo Eckert (1997), existem basicamente dois tipos de opala, a preciosa e a comum. Estas, por sua vez, se subdividem em outras classificações e assim por diante. Como exemplo disso, a opala laranja, que é o objeto deste estudo, é uma opala não preciosa (comum) que pode ser transparente, mas frequentemente translúcida a opaca, com cor básica laranja a vermelha alaranjada.

Atualmente, cerca de 95 % da extração de opalas no mundo se refere a opala comum e o restante corresponde a opala preciosa. A Austrália é o maior produtor mundial de opalas com 90-95 % do total, seguida pelo Brasil, Estados Unidos, Honduras, Japão, Etiópia e México. No Brasil, as ocorrências mais importantes estão no estado do Piauí, nos municípios de Pedro II e Buriti dos Montes, respectivamente opala preciosa e opala laranja. Há ocorrências menores de opala laranja no Rio Grande do Sul, Ceará, Pará e Rondônia, assim como em outras localidades do Piauí.

Em contraste com o caráter singular das ocorrências de opala laranja no Piauí, as mesmas foram pouco estudadas, tendo se iniciado as pesquisas por Rosa (1988). Também há registros por Johnson e Koivula (1999) e mais recentemente por Gomes (2002) e Gomes e Costa (2000, 2001d, 2007). Gomes (2002) estudou as opalas do Piauí quanto à sua mineralogia, composição química e propriedades gemológicas, quando analisou diversas amostras de Pedro II e Buriti dos Montes.

Assim, os resultados foram interpretados e comparados, constatando-se que a opala laranja de Buriti dos Montes se formou em um ambiente de natureza hidrotermal. Entretanto, o referido autor não se aprofundou no estudo das inclusões, tema principal deste trabalho.

O município de Buriti dos Montes se localiza na porção nordeste do Estado do Piauí, a aproximadamente 230 km a leste da capital Teresina (Figura 1). O acesso pode ser feito pelas rodovias federais e estaduais que cortam a região. A partir de Teresina, segue-se pela BR-343 até o município de Campo Maior, de onde a viagem prossegue pela PI-115 até Castelo do Piauí, seguindo pela PI-407 até Buriti dos Montes.

1.2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

As opalas de Buriti dos Montes se encontram no contexto geológico da Bacia do Parnaíba, que engloba uma sequência sedimentar cortada por corpos ígneos intrusivos. O embasamento cristalino que sustenta a coluna sedimentar é formado por rochas metamórficas que tiveram origem ligada aos eventos tectonomagmáticos do Pré-Cambriano. Segundo a proposta de Góes e Feijó (1994), a bacia pode ser dividida em quatro grupos (Serra Grande, Canindé, Balsas e Mearim), que foram depositados desde o Siluriano até o Cretáceo, além de cinco formações sobrepostas a eles (Grajaú, Codó, Itapecuru, Urucuia e Areado), conforme a Figura 2.

Segundo Góes e Feijó (1994), a sequência sedimentar siluriana, que é a mais basal, representa a primeira deposição marinha na Bacia do Parnaíba, correspondente a um ciclo transgressivo-regressivo completo que abrange todo o Grupo Serra Grande. Admite-se que um megassistema de fraturas tenha dado início a sedimentação e estaria associado à contração térmica ocorrida no final da Orogenia Brasiliana. O final da sedimentação é devido aos reflexos da Orogenia Caledoniana.

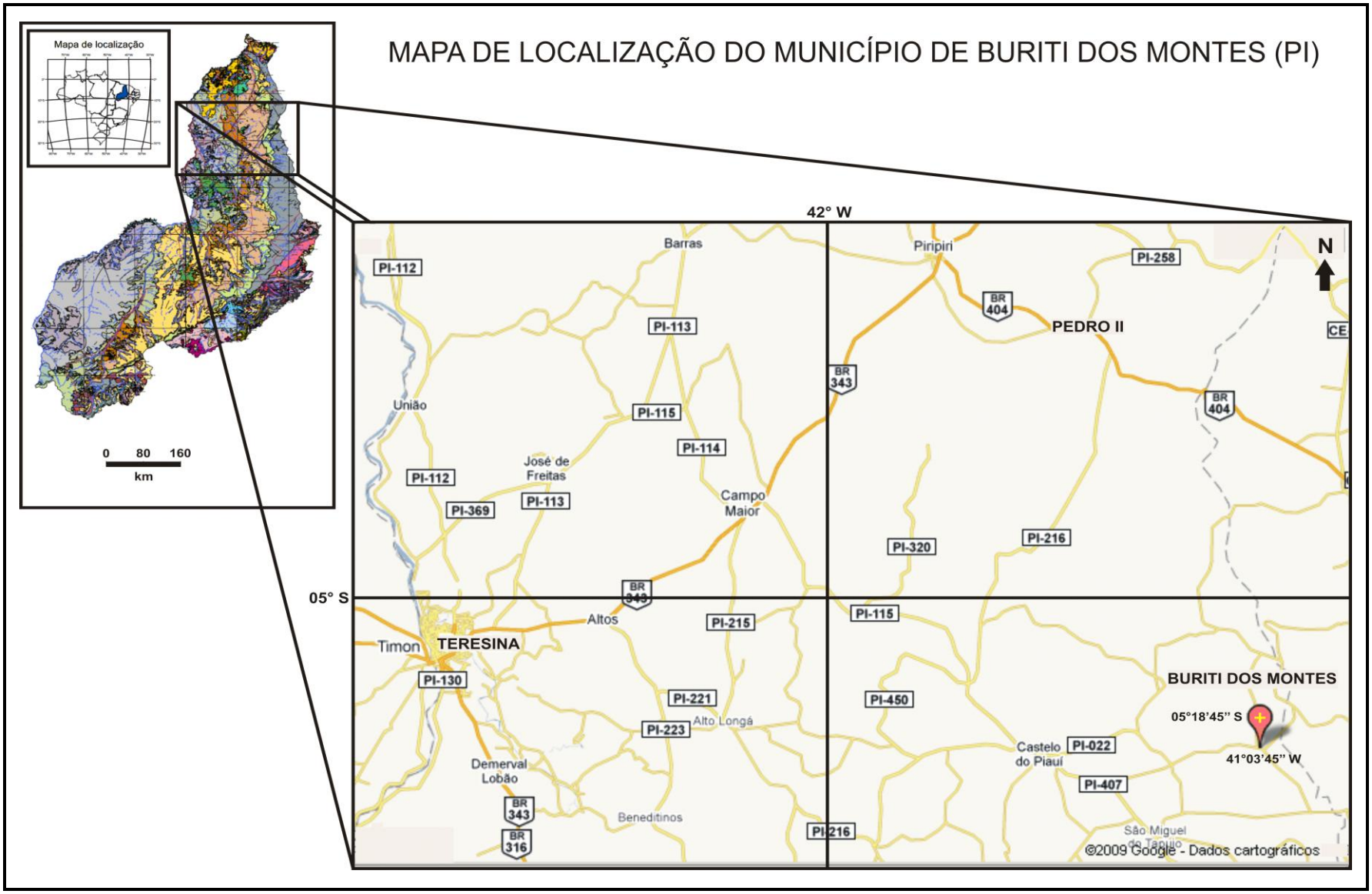

Figura 1: Mapa de localização do município de Buriti dos Montes, Piauí, Brasil.

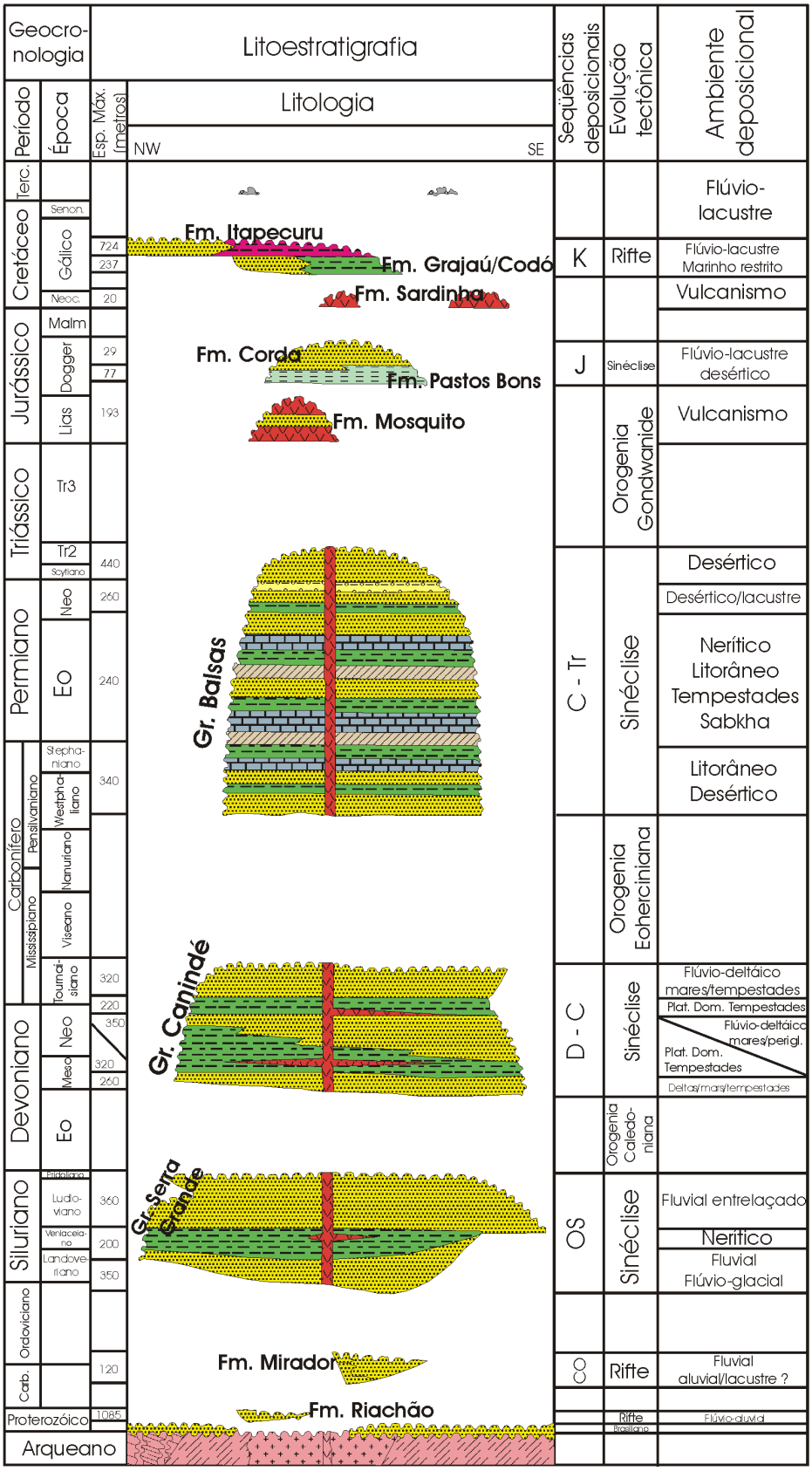

Figura 2: Coluna estratigráfica da Bacia do Parnaíba.
Fonte: Góes e Feijó (1994).

1.3 CONTEXTO GEOLÓGICO LOCAL

As ocorrências de opalas laranja de Buriti dos Montes, no Piauí, estão relacionadas à interação entre o pacote sedimentar basal da Bacia do Parnaíba com os corpos ígneos intrusivos da Formação Sardinha que cortam este grupo de rochas, denominado Serra Grande. A Figura 3 mostra o mapa geológico da porção nordeste do Piauí, onde ocorrem as opalas que são objetos deste estudo.

1.3.1 Grupo Serra Grande

O Grupo Serra Grande aflora nas bordas da Bacia do Parnaíba e é composto por conglomerados, arenitos, folhelhos e calcários. Ele foi dividido em três formações: Ipu, Tianguá e Jaicós, e apresenta-se em discordância com o Grupo Canindé sobrejacente. A ele atribui-se idade Ordoviciana–Siluriana com base em datações e correlações (CAPUTO; LIMA, 1984).

1.3.1.1 Formação Ipu

Composta por arenitos fluviais, siltitos, folhelhos e diamictitos, que denotam influências periglaciais. A Formação Ipu é afossilífera e apresenta contato discordante na base com as Formações Riachão e Mirador, e contato superior concordante com a Formação Tianguá. Em subsuperfície, sua espessura chega a 350 m (GÓES; FEIJÓ, 1994). Caputo e Lima (1984) atribuem idade Landoveriana (Siluriano).

1.3.1.2 Formação Tianguá

É composta por três membros; (1) folhelho preto a cinza escuro, siderítico, bioturbado ou laminado síltico; (2) arenito fino a médio, com intercalações de folhelho, feldspático, cinza esbranquiçado e (3) folhelho e siltito intercalados, cinza escuros a verdes, micáceos, siderítico (CABRAL, 1991). Os contatos superior e inferior são concordantes e a espessura desta unidade varia de 25 a 250 m. Mesner e Wooldridge (1964) classificaram a idade da formação como Neo-Siluriana, baseados em estudos palinológicos de Müller (1962), enquanto Caputo e Lima (1984) constataram a ocorrência da quitinozoas, acritarcas e miosporos que sugerem idade Eo-Siluriana. Góes e Feijó (1994) consideram o ambiente de deposição da formação Tianguá como nerítico raso.

1.3.1.3 Formação Jaicós

O nome Jaicós foi proposto por Plummer (1946) para designar, em categoria de formação, os arenitos conglomeráticos que ocorrem nas escarpas de Serra Grande, cujos contatos superior e inferior são respectivamente discordante e concordante. Segundo Lima e Leite (1978) a unidade é constituída por arenitos médios, grosseiros a conglomeráticos, cinza esbranquiçados, cremes, castanhos, mal selecionados, friáveis e com estratificação cruzada. A unidade é mineralógica e texturalmente imatura. A Formação Jaicós foi considerada como depositada em ambiente fluvial (KEGEL, 1953), marinho raso e costeiro a leque submarino (MABESOONE, 1978). Carozzi et al. (1975) interpretaram-na como depositada em canais distributários e frente deltaica, enquanto Caputo e Lima (1984) a classificam como produto de leques aluviais e deltaicos nas áreas de afloramentos e como frente de leque deltaica em subsuperfície. Sua idade é Eo-Devoniana, segundo Quadros (1982) baseado em acritarcas, e sua espessura máxima é de 400 m.

1.3.2 Formação Sardinha

Aguiar (1971) denominou de Formação Sardinha, os basaltos cretácicos, que ocorrem na cidade de Sardinha, na parte central da Bacia. São basaltos de cor negra e amigdaloidais, de pequena espessura, máxima em torno de 25 m e restrita às proximidades das cidades de Barra do Corda e Lizarda. Aguiar (1971) datou os derrames pelo método K-Ar e obteve idade Cretácica Inferior. A Formação Sardinha ocorre de forma discordante tanto com as formações sobrepostas quanto com as sotopostas, e foi originada pelas atividades vulcânicas intrusivas ocorridas no Cretáceo (LIMA; LEITE, 1978). Cunha e Carneiro (1972) ratificaram os basaltos Sardinha como sobrepostos à Formação Grajaú e subjacentes à Formação Codó.

1.3.3 Modo de Ocorrência das Opalas

As ocorrências de opala laranja do município de Buriti dos Montes estão associadas às rochas sedimentares do Grupo Serra Grande.

As opalas são encontradas principalmente na forma de vênulas e veios encaixados nos arenitos deste Grupo. Ocorrem também cimentando brechas na zona de contato da encaixante com o dique. Depósitos secundários tipo coluvionar e fluvial também foram verificados por Gomes e Costa (2001c) em um dos principais jazimentos no povoado de Tranqueira. Associados às opalas, localmente encontram-se veios de quartzo e goethita supergênica, esta, localizada entre os cristais de quartzo e a opala ou recobrindo parcialmente a base dos cristais de quartzo (GOMES; COSTA, 2001a).

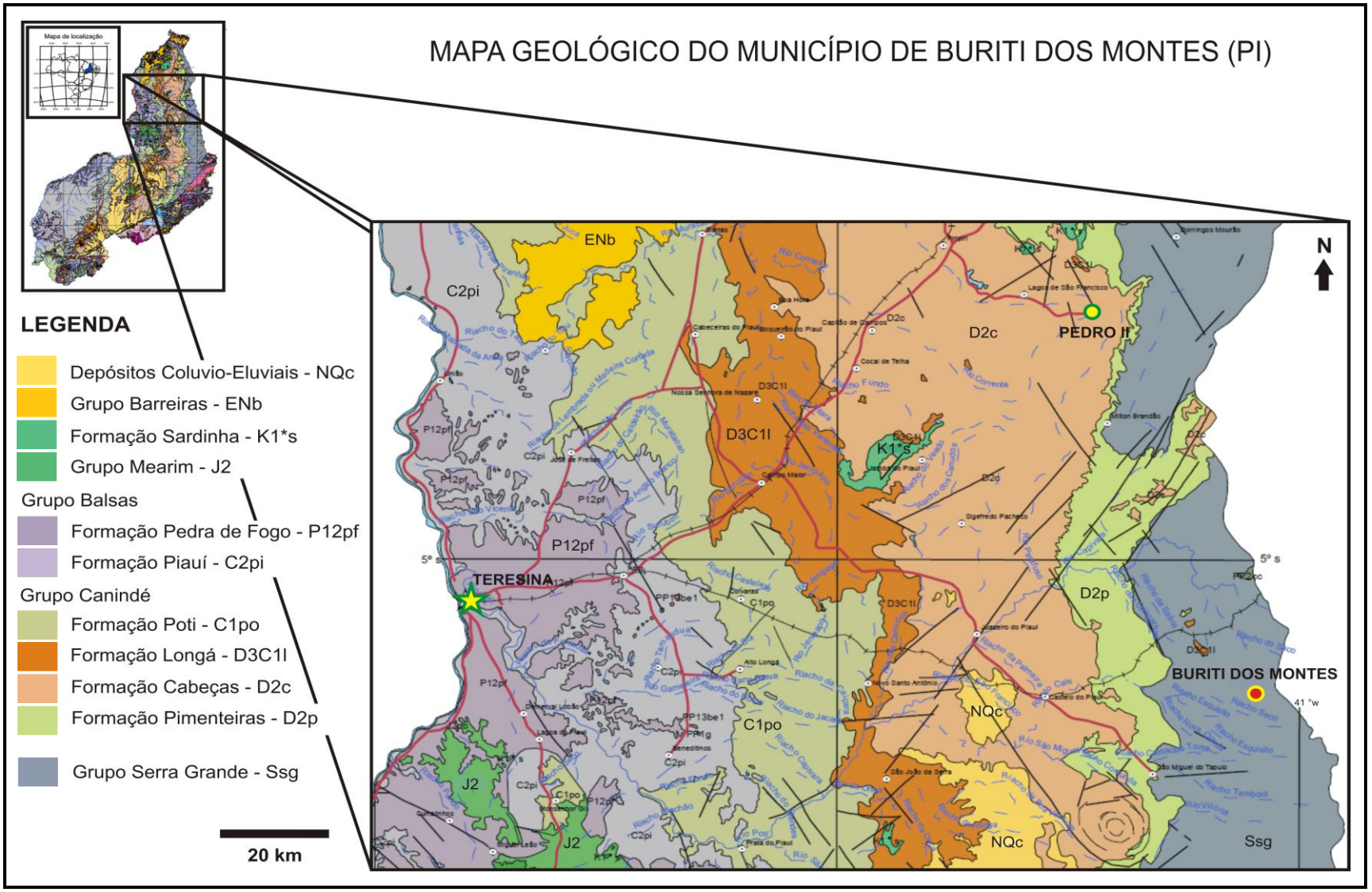

Figura 3: Mapa geológico do nordeste do Piauí, com destaque a região de Buriti dos Montes.
Modificado de: Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM) (2006).

1.4 O ESTUDO DE INCLUSÕES

Considera-se como inclusão em uma gema, qualquer corpo estranho ou defeito em seu interior. Algumas inclusões podem ser visíveis a olho nu ou com aumento de até dez vezes, enquanto outras podem ser notadas apenas por análises microscópicas, como ocorre frequentemente com as inclusões fluidas. Elas ocupam fraturas, clivagens e zonas de crescimento. Elas podem estar no estado sólido, líquido ou gasoso, ou ainda compor a coexistência de duas ou três fases.

Quando presentes em uma gema, as inclusões podem ser indesejáveis, por interferir na cor e na resistência mecânica da mesma, diminuindo-lhe o valor comercial. No entanto, há casos em que as inclusões são apreciadas e contribuem para a sua valorização. Os cristais de (outros) minerais, geralmente desvalorizam um produto gemológico, mas são importantes auxiliares na identificação de gemas, incluindo a sua procedência, do mesmo modo que as linhas de crescimento e figuras de corrosão.

Dessa forma, as inclusões são também de grande importância para os estudos sobre minerais de gemas, pois fornecem informações a respeito do ambiente de formação ou de crescimento dos materiais hospedeiros, por estarem relacionadas com as condições físicas, químicas e composicionais do meio envolvente. Assim, definir um conjunto de inclusões características de determinada gema em um depósito específico, pode ser um instrumento muito importante para diferenciá-lo de outras ocorrências similares.

No caso das opalas, que geralmente são translúcidas ou opacas, o estudo de inclusões torna-se uma tarefa mais difícil, pois são necessárias boas condições de diafaneidade para tal. Contudo, há vários registros na literatura sobre a ocorrência de inclusões em opalas preciosas e laranja, inclusive nas brasileiras, como descrito por Gomes e Costa (2001a, 2001d, 2001b) e Gomes (2002).

2 JUSTIFICATIVA E OBJETIVOS

As opalas do Piauí conferem a este estado uma importante fonte de renda para a sua economia. As duas principais ocorrências, Pedro II com as opalas nobres e Buriti dos Montes com as opalas laranja, ganham destaque na região à medida que são exploradas, por sua beleza singular que as insere no mercado gemológico. No entanto, a falta de informações quanto à origem e desenvolvimento destes depósitos na região, bem como a informalidade na produção e comercialização destas opalas, impede uma maior valorização das mesmas.

Neste sentido, é de grande importância estudá-las e preencher as lacunas que ainda existem na caracterização dessas gemas e sua relação com a geologia local. As inclusões também podem se constituir em importante ferramenta pra certificação de autenticidade destas opalas, principalmente quando competem com opalas de outras procedências.

O principal objetivo deste trabalho é estudar as inclusões sólidas das opalas de Buriti dos Montes, envolvendo:

- Caracterização de sua morfologia (cor, dimensões e textura);
- Determinação de sua composição química e mineralógica;
- Avaliar a relação da cor e diafaneidade com as inclusões;
- Discussão genética das opalas laranja e sua relação com as rochas sedimentares da Bacia do Parnaíba.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAL UTILIZADO

O material utilizado neste trabalho foi um conjunto de amostras de opalas laranja provenientes de Buriti dos Montes, nordeste do Piauí, e cedidas pelo geólogo Érico Gomes, atualmente professor do IFPI em Teresina-PI.

3.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica foi realizada durante todo o período de desenvolvimento deste trabalho, através da coleta de informação sobre opalas no contexto geral, ocorrências de opala no Brasil e no mundo, contexto geológico dos depósitos e aplicação de técnicas analíticas. Para isso, foram consultados diversos trabalhos técnico-científicos, revistas e livros especializados, na Biblioteca do Instituto de Geociências da UFPA e na internet.

3.3 COLETA DE AMOSTRAS

As amostras de opalas laranja utilizadas neste trabalho foram coletadas nos anos de 1998 e 1999 pelo geólogo MSc. Érico Rodrigues Gomes (na época, mestrando) em companhia do Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa. Uma parte delas foi utilizada no desenvolvimento da dissertação de mestrado de Érico e a outra foi cedida para a realização desta pesquisa.

3.4 DESCRIÇÃO MACROSCÓPICA

Para a descrição macroscópica das amostras de opala laranja, foi utilizada uma lupa de bolso com aumento de 10 vezes. Durante esta etapa do trabalho, as amostras foram fotografadas com uma câmera digital Canon modelo A460 no Laboratório de Gemologia do Museu de Geociências da UFPA.

3.5 DESCRIÇÃO MICROSCÓPICA

A descrição microscópica foi realizada com o auxílio de um estereomicroscópio ao se tratar de amostras inteiras ou pouco fragmentadas e com o microscópio óptico ao se utilizar as lâminas polidas confeccionadas para o estudo das inclusões. As amostras foram fotografadas com uma câmera digital Canon Power Shot modelo G6. Esta etapa do trabalho foi realizada no Laboratório de Gemologia do Museu de Geociências da UFPA.

3.6 IDENTIFICAÇÃO MINERAL POR DIFRAÇÃO DE RAIOS-X (DRX)

As principais fases minerais e o grau de ordem-desordem (cristalinidade) das opalas foram determinados por difração de raios-x no Laboratório de Caracterização Mineral do Instituto de Geociências da UFPA, método do pó, com corrida de 5 -75º 2θ. Foi utilizado um Difratômetro de Raios-X modelo X´PERT PRO MPD (PW 3040/60) da PANalytical, com Goniômetro PW3050/60 (Theta/Theta), tubo de Raios-X cerâmico e anodo de cobre (Kα1=1,540598 Å), modelo PW3373/00 com foco fino longo (2200W- 60kV) e filtro Kβ de níquel, com detector X' Celerator, do tipo RTMS (Real Time Multiple Scanning), atuando no modo Scanning e com um active length de 2,122º. As condições utilizadas foram de varredura de 5° a 75° 2θ, voltagem de 40 kV e corrente de 40 mA, tamanho do passo 0,02° em 2θ e 20s o tempo/passo,

fenda divergente de 1/8º e anti-espalhamento de 1/4º, máscara de 10 mm, amostra em movimentação circular com freqüência de 1 rotação/s. Os dados foram processados e interpretados com os softwares X'Pert Data Collector, versão 2.1a, e X'Pert High Score versão 2.1b, ambos da PAnalytical.

3.7 ANÁLISE TERMODIFERENCIAL (ATD) E GRAVIMÉTICA (TG)

O comportamento termodiferencial das opalas laranja foi avaliado através de Análise Termodiferencial e Termogravimétrica em equipamentos de Termodiferencial do Laboratório de Caracterização Mineral do Instituto de Geociências da UFPA. O equipamento utilizado é da marca Thermal Science modelo PL com analisador térmico simultâneo STA1000/1500, da Stanton Redcroft Ltda, com forno cilíndrico vertical, conversor digital acoplado a um microcomputador. O intervalo de temperatura das análises ficou entre a ambiente e 1100 ºC.

3.8 ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO NO INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER (FTIR)

As análises por Espectroscopia de Absorção no Infravermelho foram realizadas nas dependências do Laboratório de Caracterização Mineral do Instituto de Geociências da UFPA. O equipamento utilizado foi um espectrofotômetro da marca Perkin-Elmer, modelo FTIR-1760, acoplado a um microcomputador com registros na faixa espectral de 4000 a 400 cm-1, com resolução de 4 cm-1. Cada pastilha prensada foi confeccionada com 1,5 mg de amostra e 20 mg de KBr.

3.9 ANÁLISES QUÍMICAS

A determinação da composição química foi feita em amostra total empregando-se ICP-MS junto aos laboratórios da Acme Analytical Laboratories Ltda.

3.10 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV/EDS/CL)

Fragmentos milimétricos a centimétricos de amostras de opala laranja foram fixados nos *stubs* com fita adesiva dupla face. Todo o material foi metalizado com ouro para obtenção de imagens de elétrons secundários (ES), elétrons retroespalhados (ERE) e catodoluminescência (CL). As imagens de CL foram produzidas em um aparelho de Monocatodoluminescência da Gatan acoplado ao MEV LEO ZEISS modelo 1430, no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura (LABMEV) do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

Também foram realizadas análises químicas semiquantitativas com auxílio de MEV/EDS (energy dispersive spectrometry) para O, Si, Al, K, Ti, Fe, Cr, Co e Ni. Utilizou-se o equipamento LEO ZEISS modelo 1530 VP, do Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). As condições analíticas foram: corrente do feixe = 90 µa, voltagem de aceleração constante = 20 kV, distância de trabalho = 15 mm, tempo de análise = 30 s com 3000 a 4000 c/s para cada análise.

4 RESULTADOS

4.1 A ESTRUTURA DAS OPALAS E SUA INFLUÊNCIA NA COR

Em escala de MEV, as opalas laranja de Buriti dos Montes em geral revelaram estrutura homogênea, com aspecto maciço, o qual provavelmente está ligado ao preenchimento dos interstícios das esferas de sílica por cimento opalino. Localmente, foi possível visualizar o arranjo irregular das esferas de sílica amorfa (?), cujo diâmetro varia de 150 a 500 nm (Figuras 4 e 5). Por vezes, elas formam agregados de esferas de diâmetros distintos. O arranjo irregular e a ampla variação no diâmetro das esferas não permitem que as mesmas produzam o jogo de cores, pois este efeito só se manifesta quando as esferas são perfeitas, possuem tamanho uniforme, e são dispostas segundo um empacotamento regular onde os espaços entre elas não são preenchidos por sílica (WOLLAERT; VOCHTEN; LANDUYT, 1990).

Por sua vez, as opalas de Buriti dos Montes aqui estudadas são semitransparentes a translúcidas e apresentam uma ampla variação na tonalidade laranja, variando do amarelo claro ao vermelho amarronzado. Acredita-se que a boa diafaneidade apresentada por elas esteja relacionada ao tamanho dos espaços entre as esferas de sílica, pois segundo Schwartz (1984) e O'Donoghue (1983), interstícios pequenos proporcionam maior transparência às opalas.

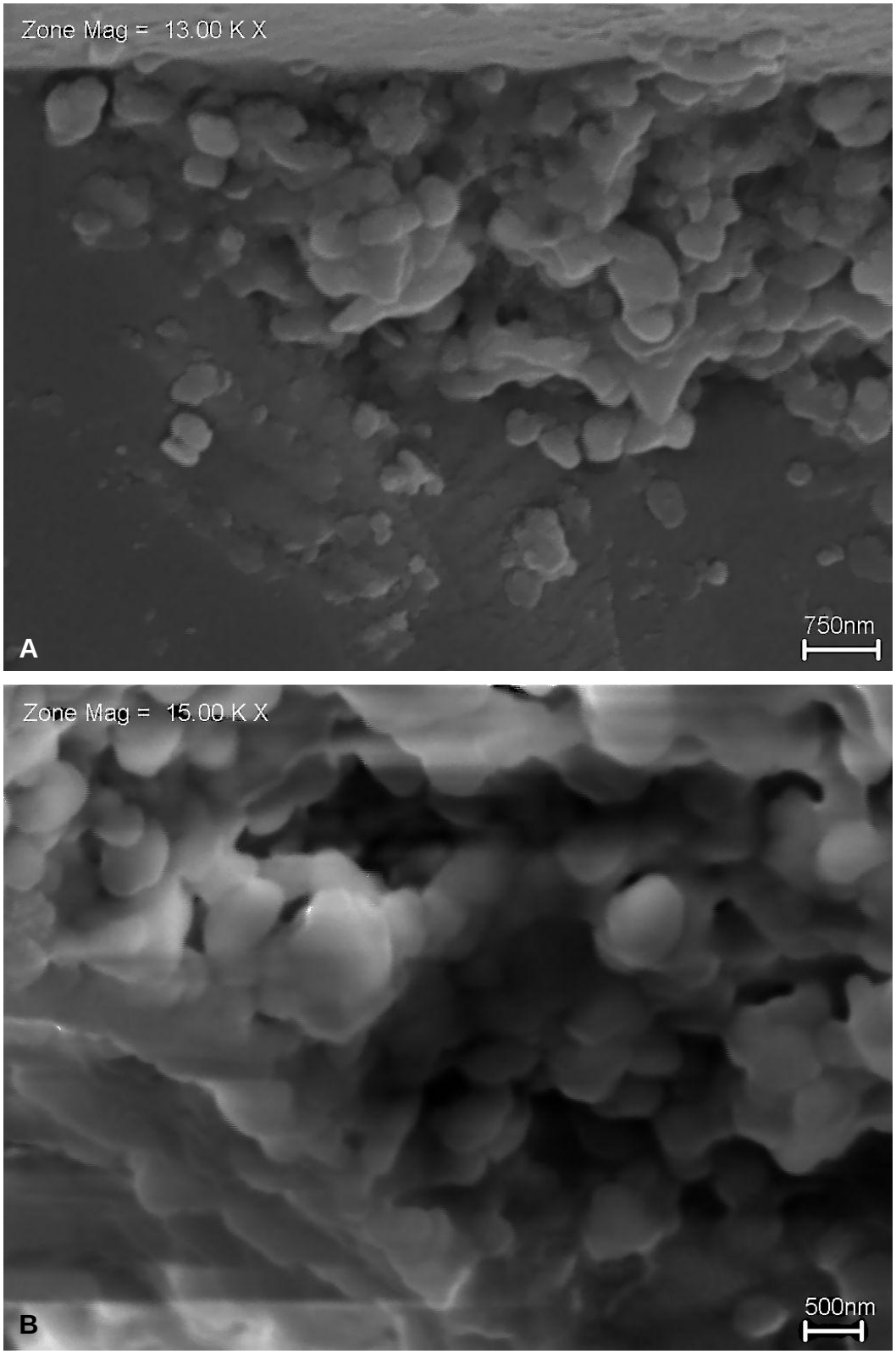

Figura 4: Arranjo irregular das esferas de sílica que constituem as opalas estudadas. Imagem de elétrons secundários obtida por MEV.

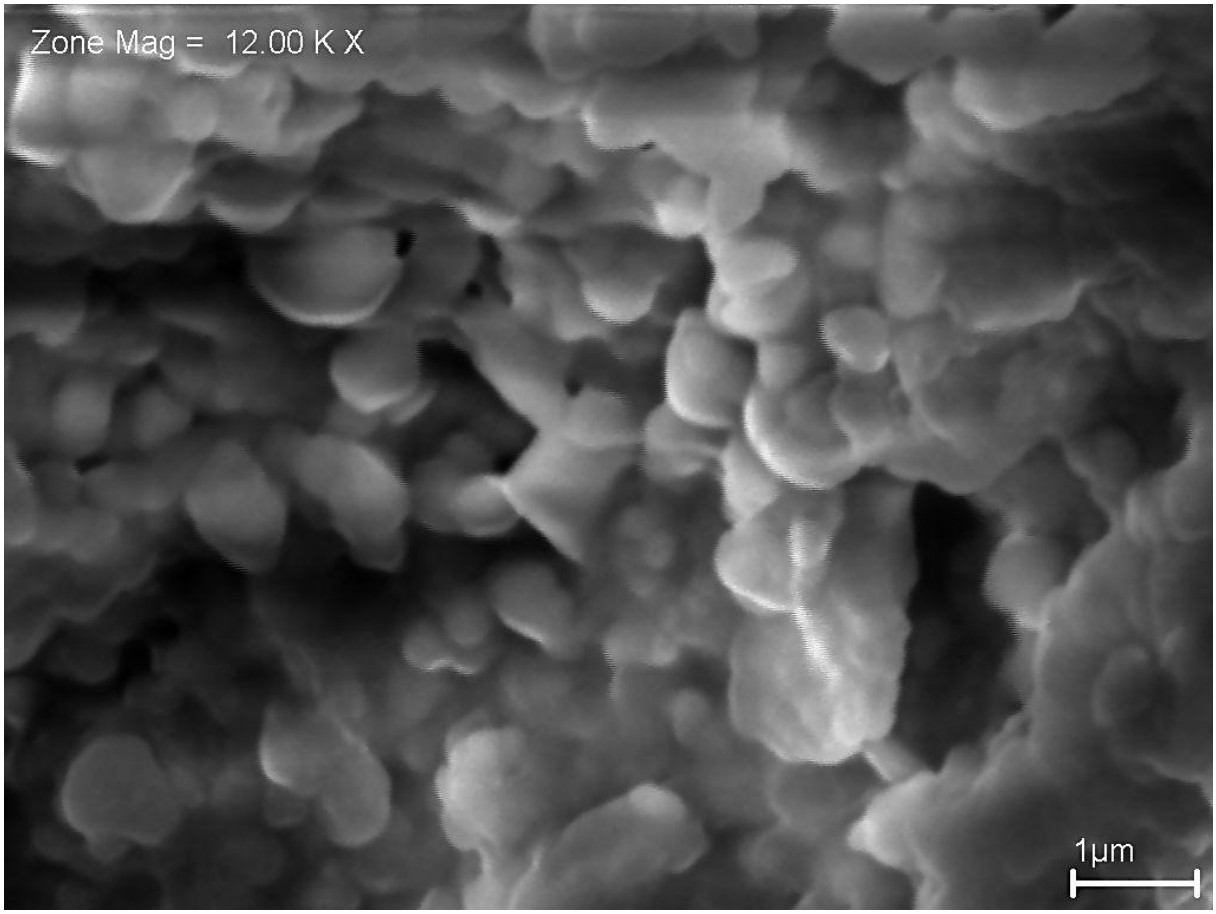

Figura 5: Esferas de sílica amorfa observadas em opalas laranja de Buriti dos Montes, com diâmetros variando de 150 a 500 nm. Imagem de elétrons secundários em MEV.

4.2 MORFOLOGIA DAS INCLUSÕES

As inclusões sólidas observadas nas opalas laranja de Buriti dos Montes foram avaliadas quanto à forma, cor, tamanho e textura, bem como o arranjo produzido por elas no interior das opalas. Foram distinguidos os seguintes tipos de inclusões sólidas:

4.2.1 Bolha

Cavidade com forma arredondada ou ovalada, de dimensão milimétrica (diâmetros entre 5 a 20 mm, aproximadamente). Apresenta coloração creme esbranquiçada ou amarronzada de acordo com o preenchimento. Algumas bolhas aparecem vazias, provavelmente contiveram gases, já liberados. Outras apresentam apenas uma película branca na parede interna da cavidade (Figuras 6 a 8), enquanto as demais são preenchidas por material equivalente aos arenitos encaixantes ou que simplesmente os envolveram. Há ainda aquelas que aparecem envolvidas por fraturas de tensão e na forma de micro-concreções. Por conta destas características elas foram subdividas em:

- Preenchidas: Bolhas parcialmente ou totalmente preenchidas (Figura 9);
- Vazias: Não possuem qualquer material de preenchimento (Figura 10);
- Micro-concreções: Bolhas cujo aspecto externo é similar ao de uma concreção gretada (Figura 11).

4.2.2 Botrioidal

Material arenoso e/ou argilo-arenoso proveniente das rochas sedimentares na região em que ocorrem veios de opala, que desenvolveram externamente morfologia ou contorno botrioidal. Na verdade, trata-se de um conjunto de formas arredondadas agrupadas aleatoriamente, como se fossem várias esferas interligadas (Figuras 12 a 14). Sua coloração varia entre o branco e o creme, e marrom ou tons avermelhados. O contorno espacial deste tipo de inclusão no interior das opalas permitiu individualizar as seguintes subdivisões:

- Banco de Corais: A inclusão de aspecto botrioidal aparece segundo um arranjo semelhante aos bancos de corais (Figura 13);

- Estalactite, Estalagmite e Coluna: A inclusão botrioidal se organiza de maneira similar às estruturas colunares que se formam no interior das cavernas a partir do gotejamento da água enriquecida em materiais dissolvidos da rocha hospedeira.

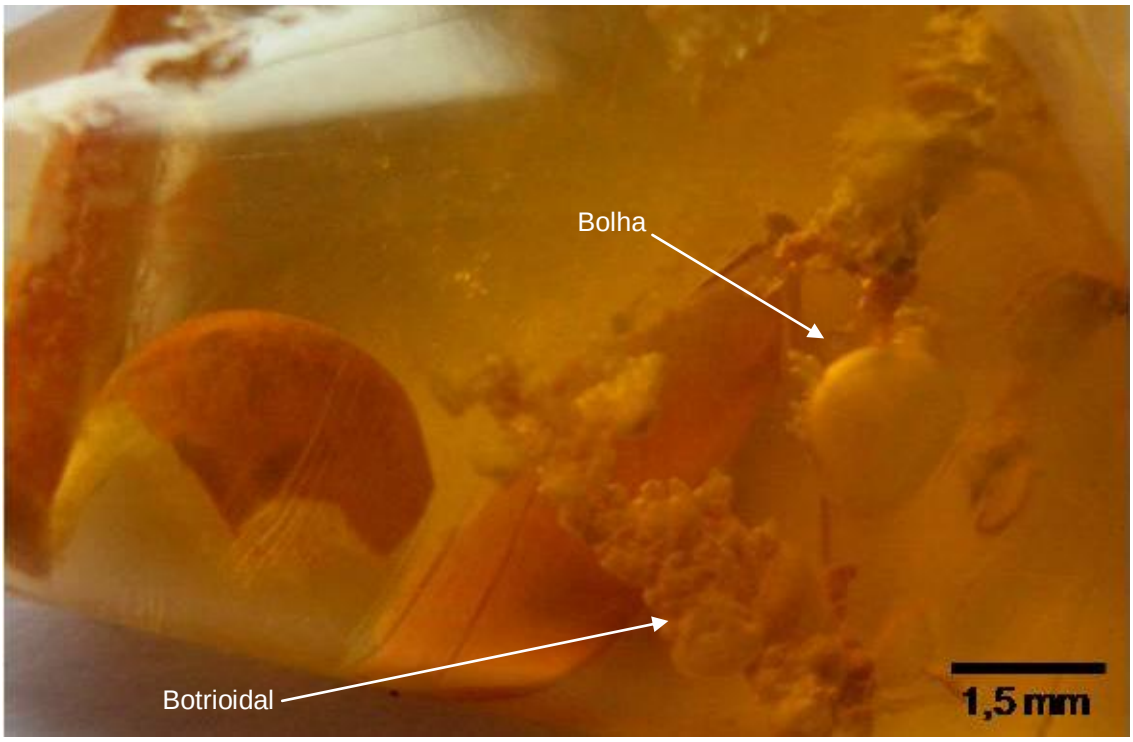

Figura 6: Opala laranja contendo diferentes tipos de inclusões, das quais, destacam-se as bolhas e formas botrioidais.

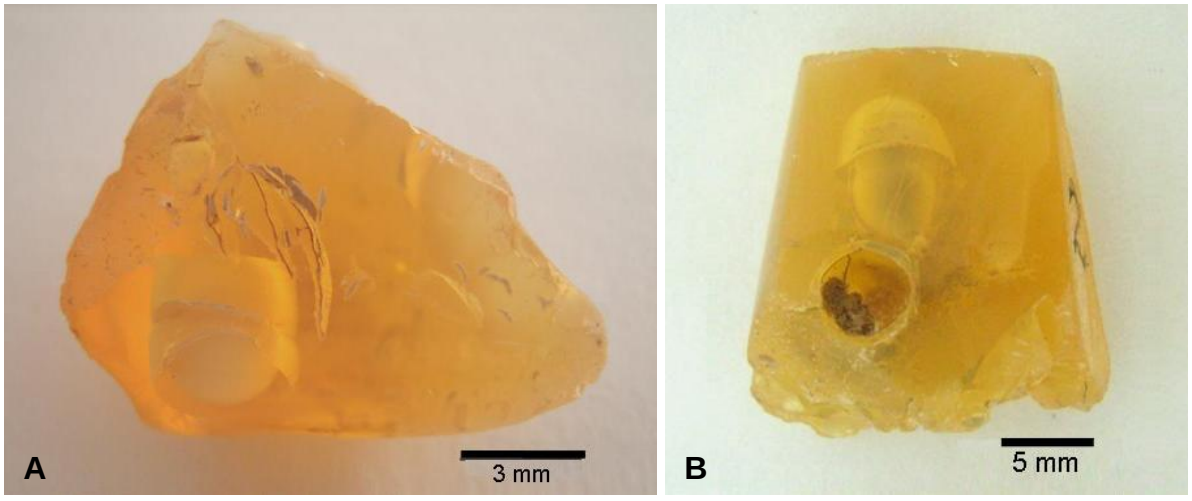

Figura 7: Opalas laranja contendo bolhas nas quais há revestimento interno por uma película branca. Em B, a bolha mais abaixo é semipreenchida.

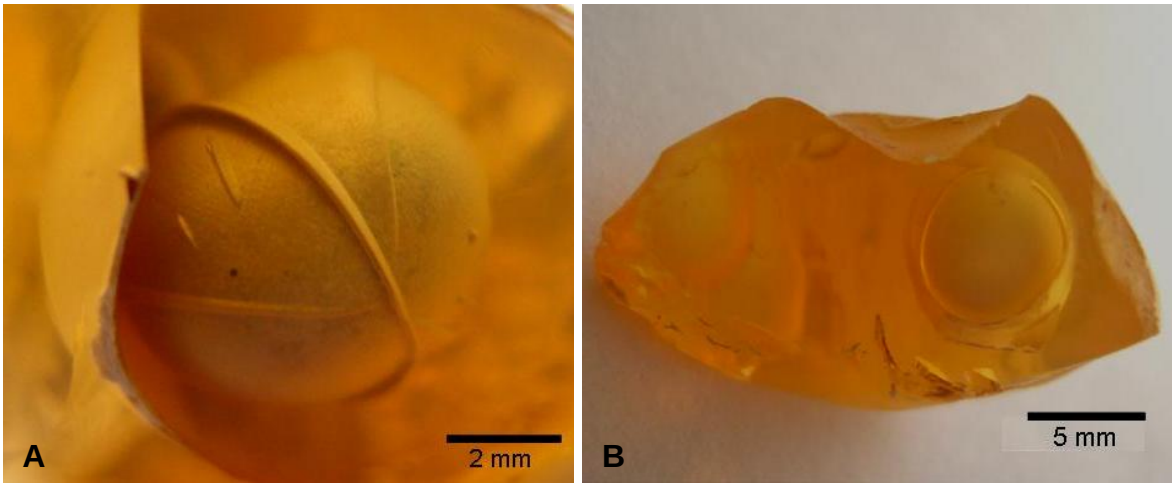

Figura 8: Opalas laranja com bolhas revestidas internamente por uma película branca.

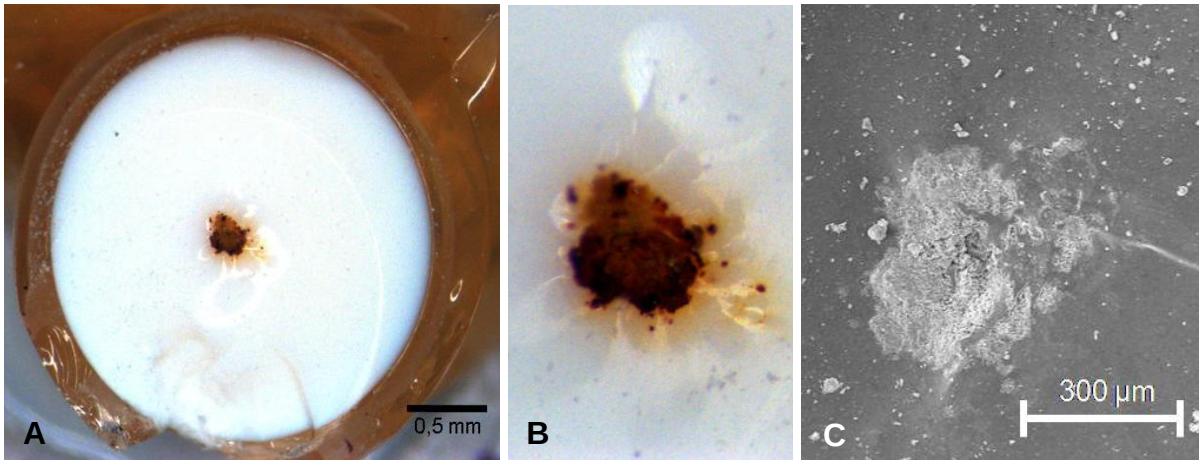

Figura 9: A – Seção transversal de uma opala laranja com bolha totalmente preenchida por opala branca e goethita (?) no centro. B – Detalhe da inclusão mostrando a bolha branca e o material ferruginoso (marrom), goethita, provavelmente. C – Detalhe da inclusão observada ao MEV, em imagem de elétrons secundários.

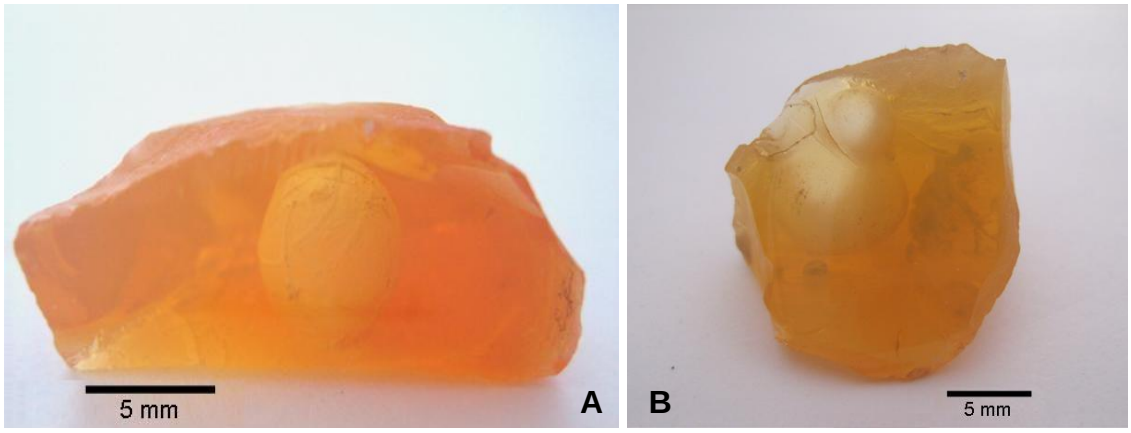

Figura 10: Amostras de opala laranja contendo bolhas. Em A, a bolha é revestida internamente por uma película branca, ausente em B.

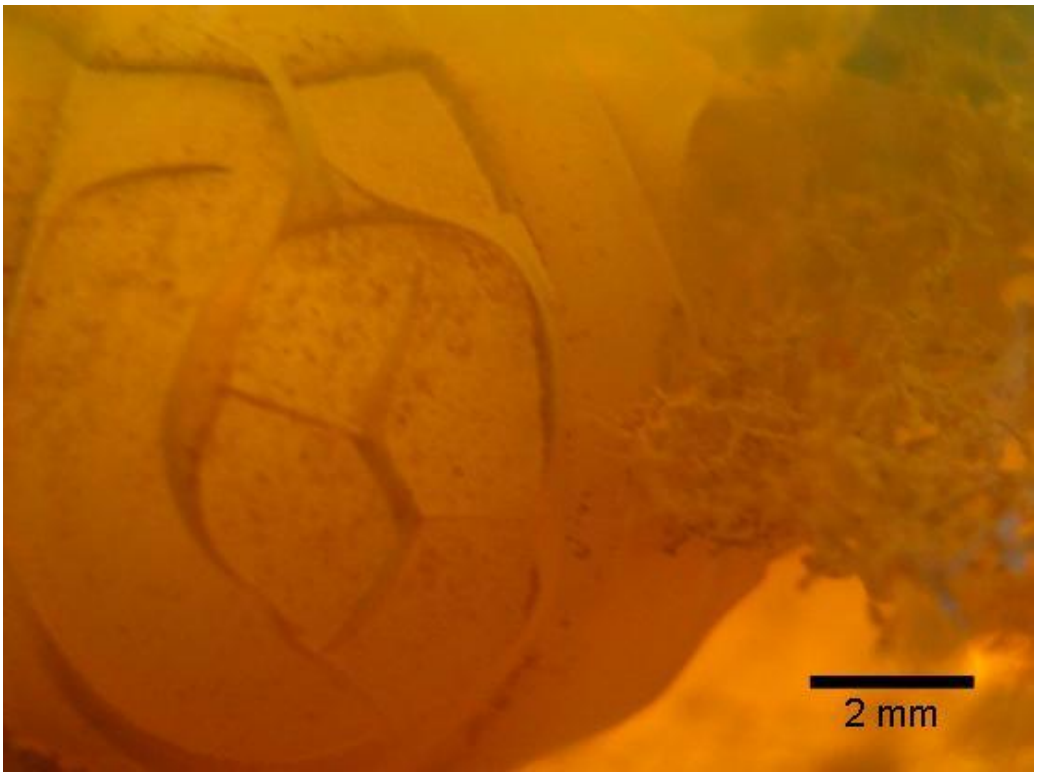

Figura 11: Bolha com aspecto de microconcreção ou ainda micro-segmentada como se fosse seccionada por gretas de contração, ao lado de uma inclusão dendrítica.

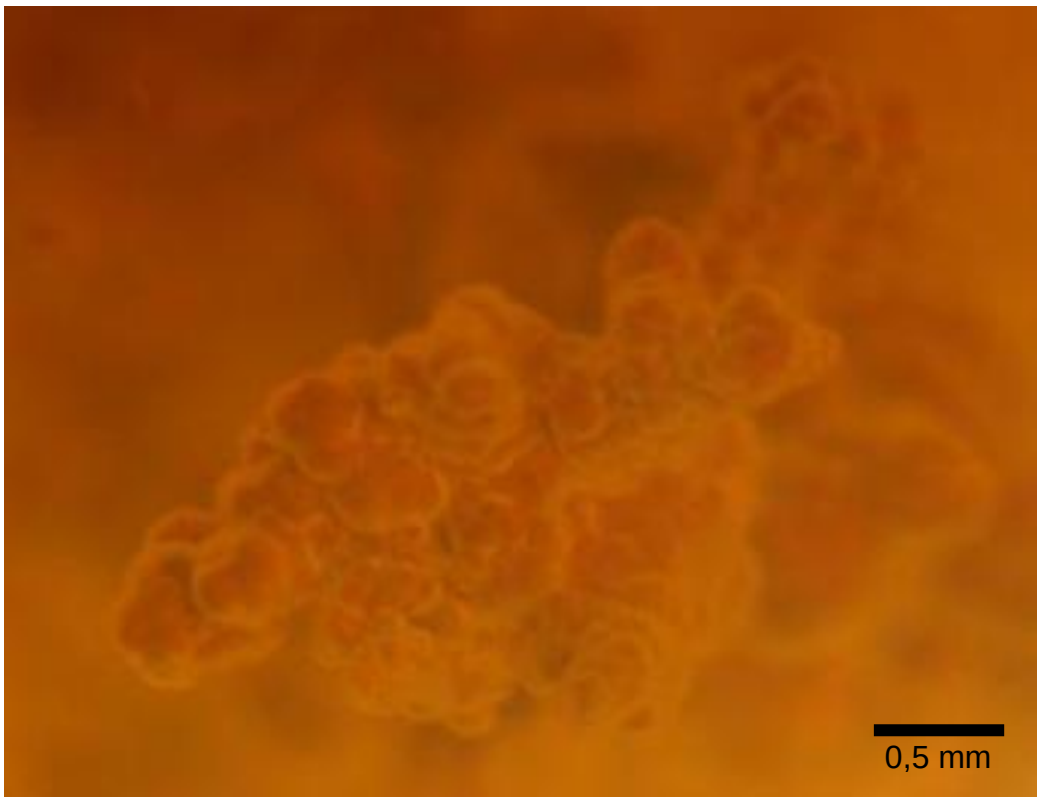

Figura 12: Inclusão botrioidal em opala laranja, cujo conjunto parece descrever uma coluna.

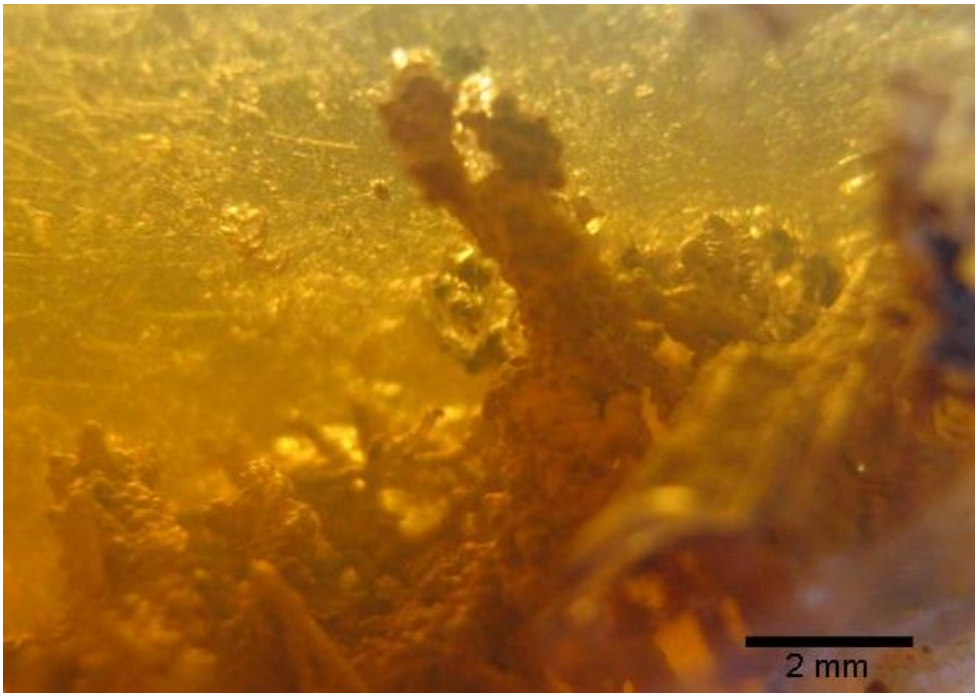

Figura 13: Inclusão botrioidal lembrando um banco de corais.

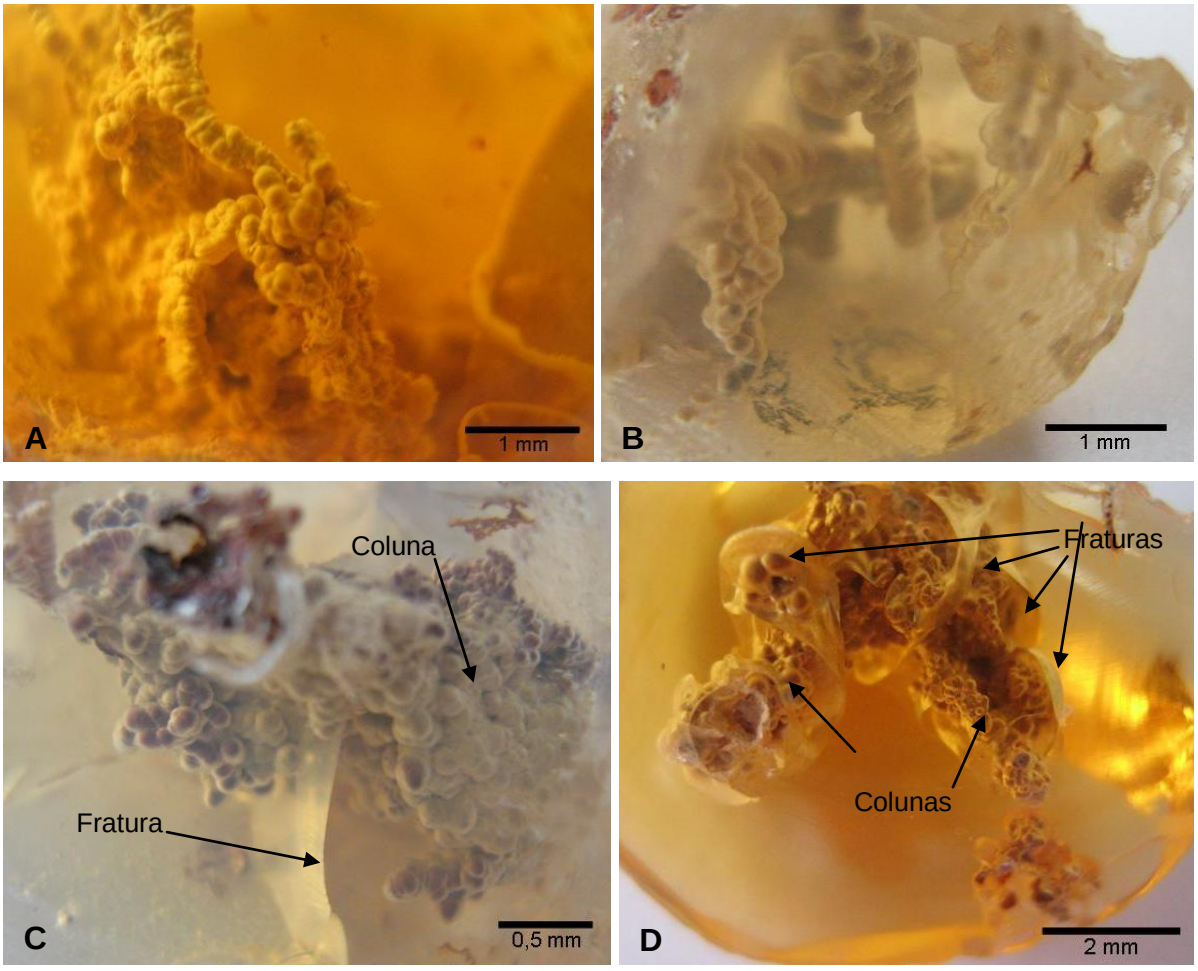

Figura 14: Inclusões botrioidais colunares, à semelhança daquelas formadas no interior de cavernas. Algumas delas estão associadas a fraturas secas e de tensão (C e D).

4.2.3 Dendrítica

Inclusão que se apresenta na forma de dendritos. Geralmente se encontra associada a outros tipos de inclusões como bolhas (Figuras 15 a 20).

4.2.4 Estrutura de Fluxo

Estrias encurvadas, aproximadamente concêntricas que representam a provável migração da solução rica em sílica através de fraturas ao longo do arenito encaixante (Figura 21).

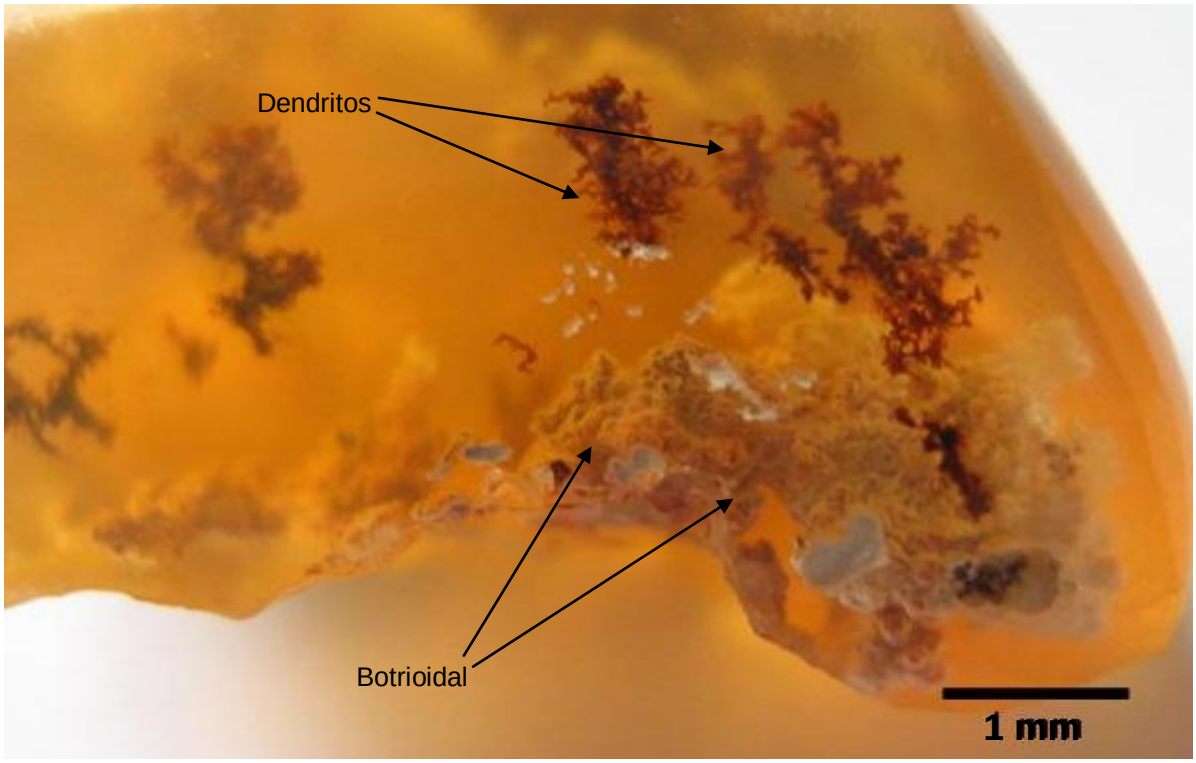

Figura 15: Opala laranja com inclusões botrioidais e dendríticas.

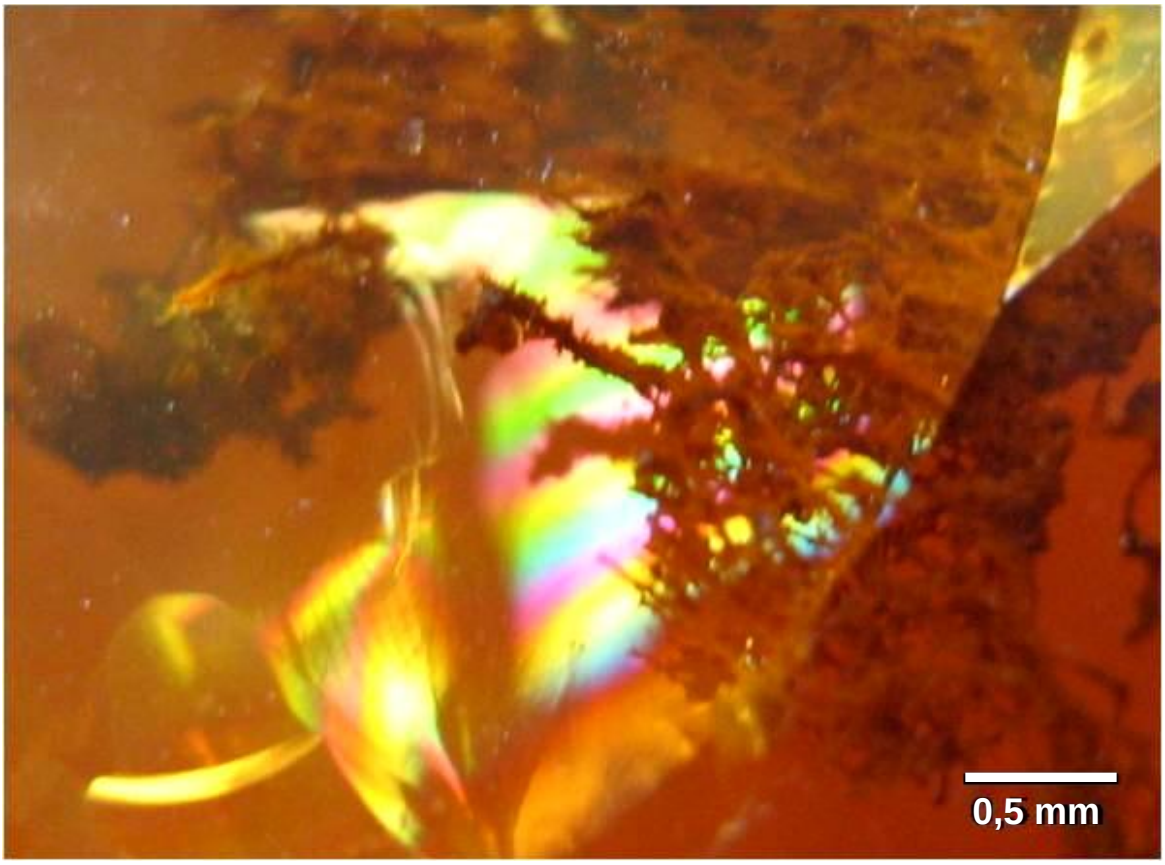

Figura 16: Inclusão dendrítica associada a uma fratura de tensão seca e iridescência.

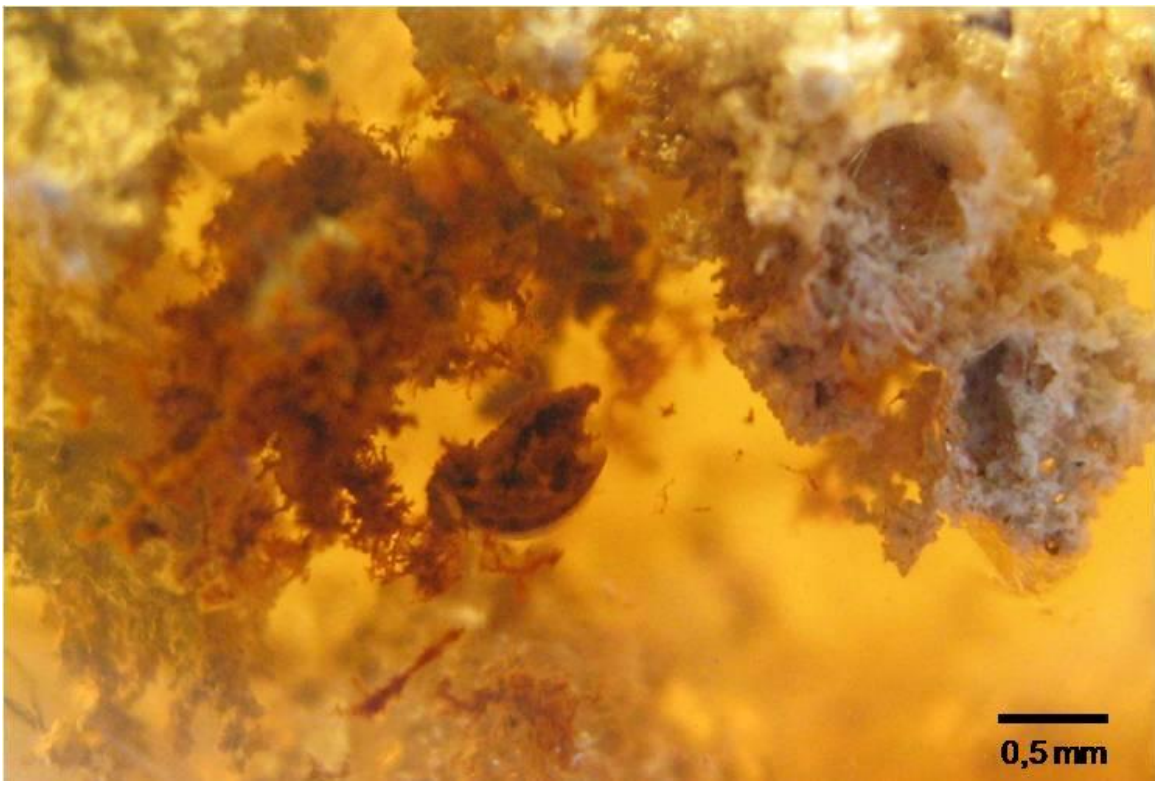

Figura 17: Opala amarela contendo inclusão dendrítica cavernosa.

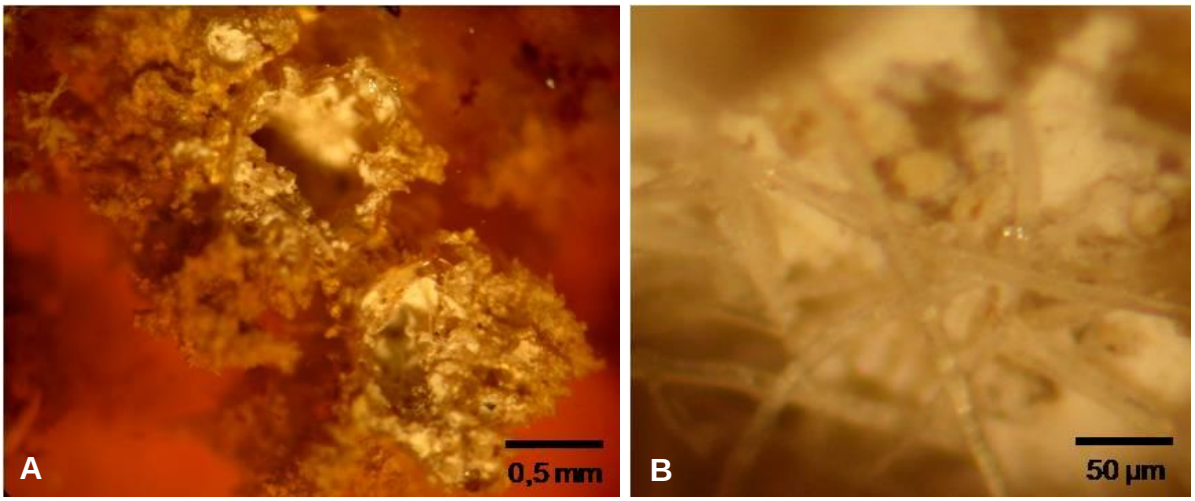

Figura 18: A – Cavidade na inclusão dendrítica mostrada na figura anterior. B – Cristais aciculares reticulados dentro de cavidade.

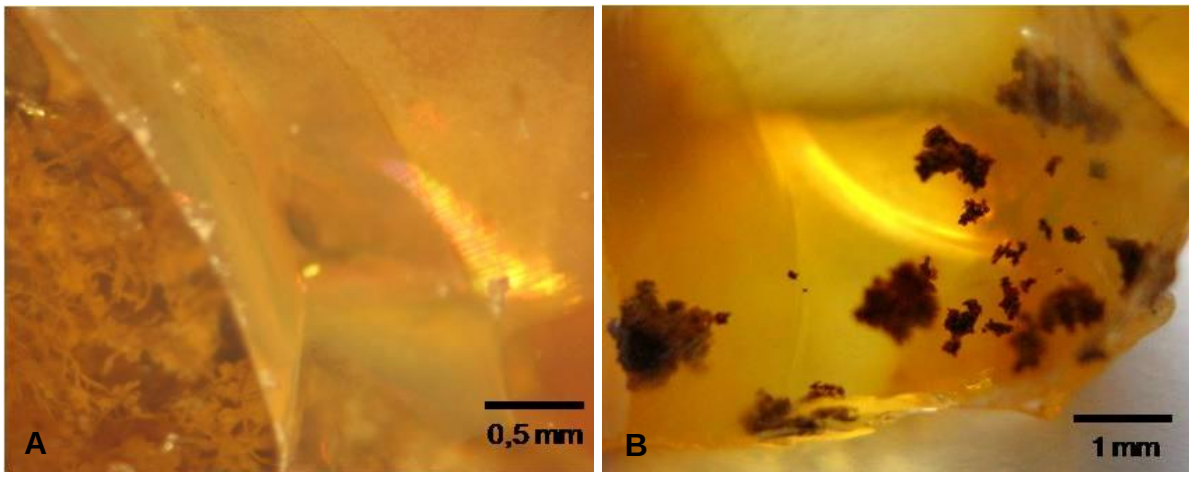

Figura 19: A – Inclusão dendrítica e fratura seca. B – Exemplar de opala amarela com inclusões dendríticas.

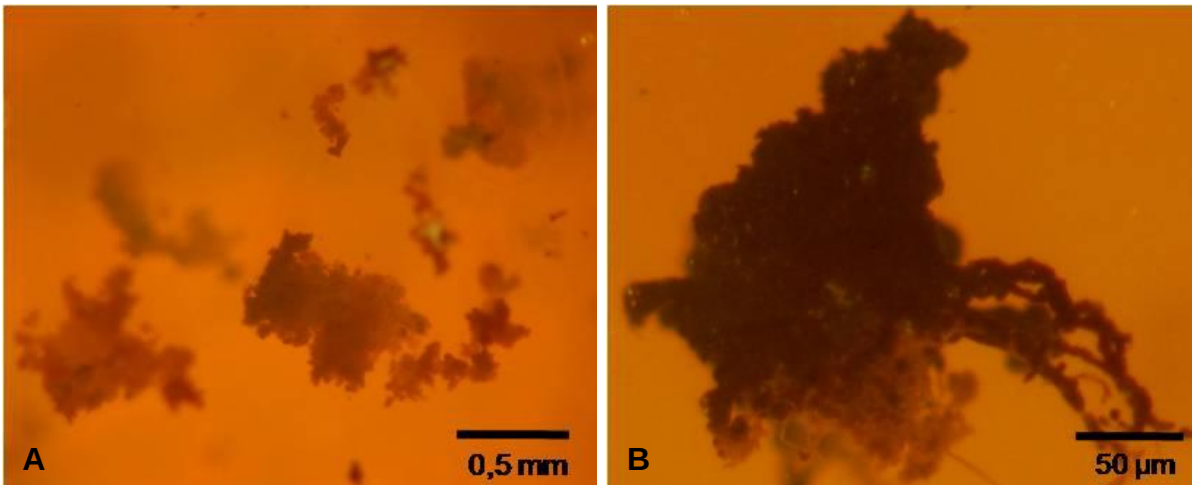

Figura 20: Inclusões dendríticas em amostras de opala laranja.

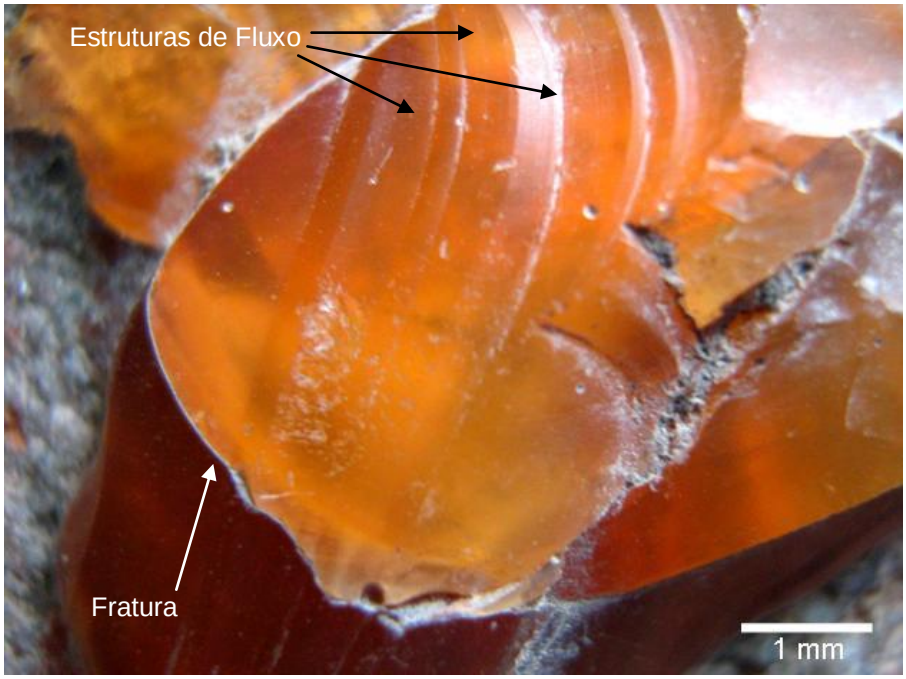

Figura 21: Estruturas de fluxo secionadas por fratura na superfície da opala.

4.2.5 Fratura

Essas estruturas foram observadas tanto no interior como na superfície das opalas, associadas ou não a outras feições como bolhas e botrióides arenosos. Distingue-se as seguintes variações:

- Cicatrizada: Fratura totalmente preenchida por opala geralmente incolor (Figuras 21 e 22);
- Seca: Fratura sem qualquer tipo de preenchimento (Figura 23 A);
- De Tensão: Fraturas circulares ou semicirculares que contornam outras inclusões (bolhas, botrioidal e dendrítica). Elas podem estar secas ou preenchidas (Figura 23 B);
- Superficial: Fraturamento disposto apenas na superfície externa da opala;
- Craqueamento: Conjunto de fraturas interligadas que delimitam pequenos polígonos e se estendem da borda da opala até seu interior, em direção ao centro. Por vezes, se encontram associadas a feições esferulíticas iridescentes nos polígonos delimitados pelas fraturas (Figura 23 C e D).

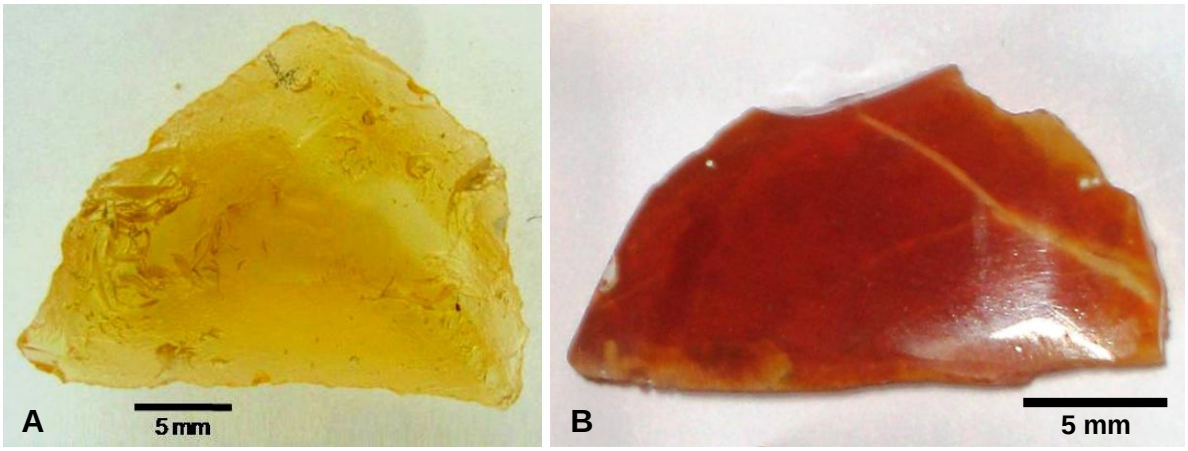

Figura 21: Fratura cicatrizada por opala incolor em opala com cor básica amarela. B – Fratura cicatrizada por opala incolor em opala vermelha.

Figura 22: Fratura cicatrizada por opala laranja em opala vermelha.

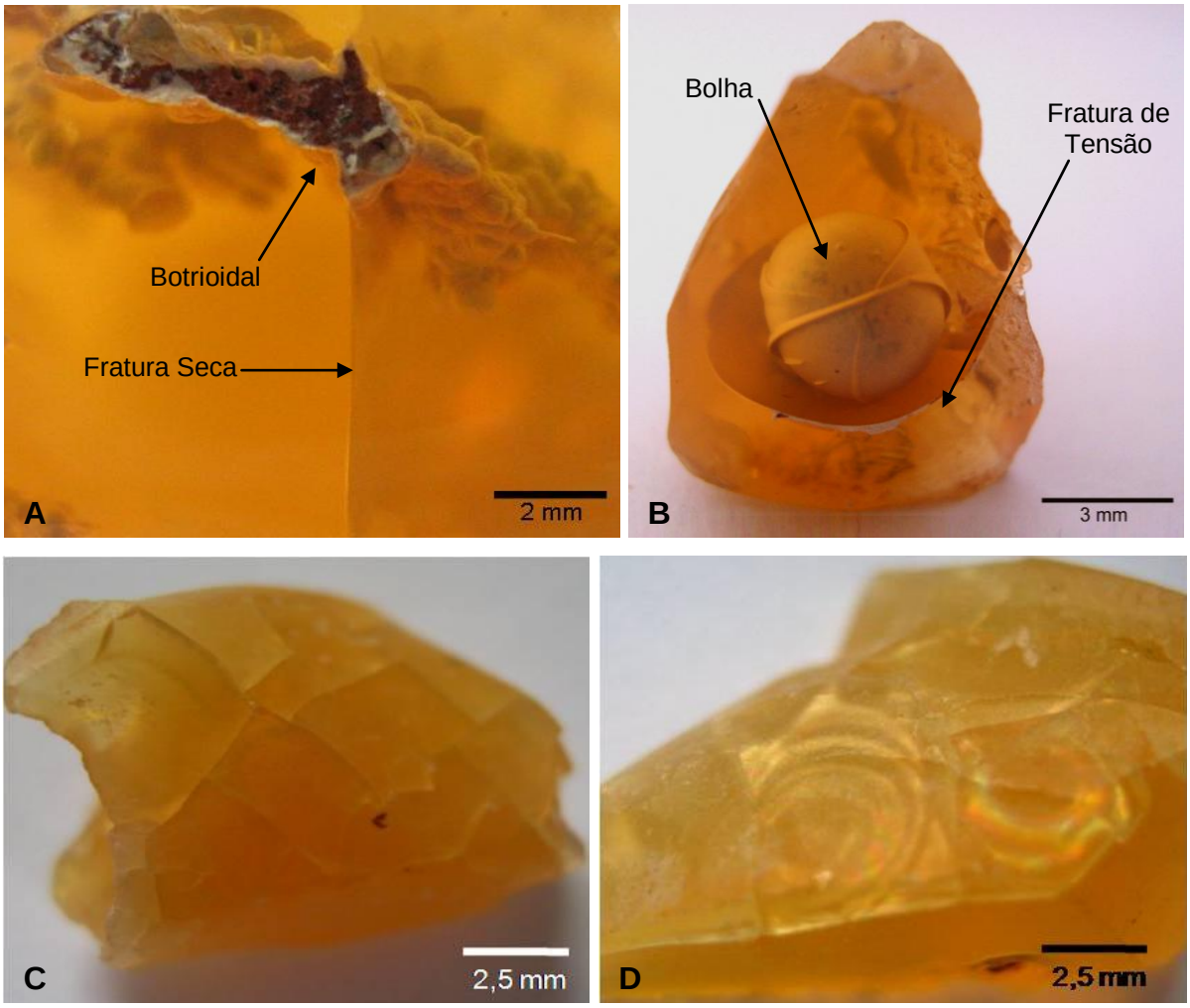

Figura 23: A – Opala laranja com fratura seca e inclusões botrioidais. B – Opala laranja com fratura de tensão associada a uma bolha. C – Craqueamento em opala com cor básica amarela. D – Feições esferulíticas iridescentes nos polígonos delimitados pelas fraturas.

4.2.6 Lamelar ou Tabular

Pequenas lamelas ou plaquetas paralelas formadas por material arenoso e/ou argilo-arenoso. Esta estruturação pode ser conseqüente de uma pressão que deformou porções do arenito encaixante e englobadas pelos fluidos que os percolaram (Figuras 24 e 25).

Figura 24: Inclusões lamelares com terminação botrioidal a estalactítica-estalagmítica.

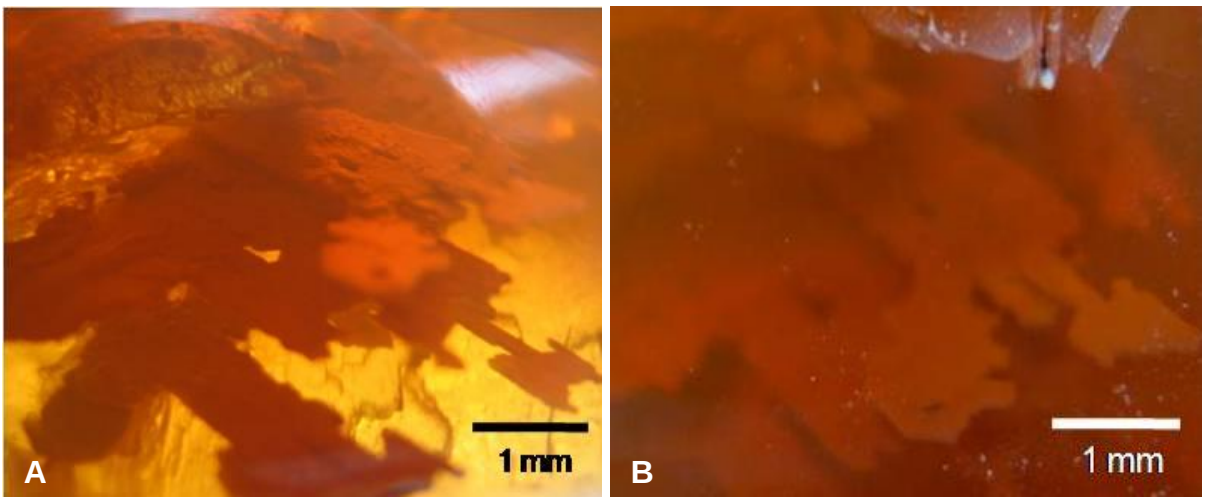

Figura 25: Inclusões lamelares em amostras de opala com cor básica laranja.

4.2.7 Mancha de Cor

Mudança de cor na opala, em forma de mancha. Considerando que a cor nas opalas depende das impurezas químicas e em alguns casos, de inclusões minerais, a cor nas opalas de fogo, por exemplo, está associada ao conteúdo de Fe^{3+} na forma de nanocristais (GAILLOU et al., 2008) de oxi-hidróxidos de Fe. De maneira semelhante, a mancha de cor vermelha em opala de cor básica laranja pode estar associada a partículas de plasma hematítico (Figura 26).

4.2.8 Microcristal

Inclusão de um ou mais cristais, bem formados e mais comumente agrupados, de um ou mais minerais, em geral quartzo (Figuras 27 e 28).

4.2.9 Nodular

Nódulos de material arenoso e/ou argilo-arenoso proveniente das rochas encaixantes da opala. Representam fragmentos englobados pela solução rica em sílica que não foram totalmente dissolvidos por ela (Figura 29).

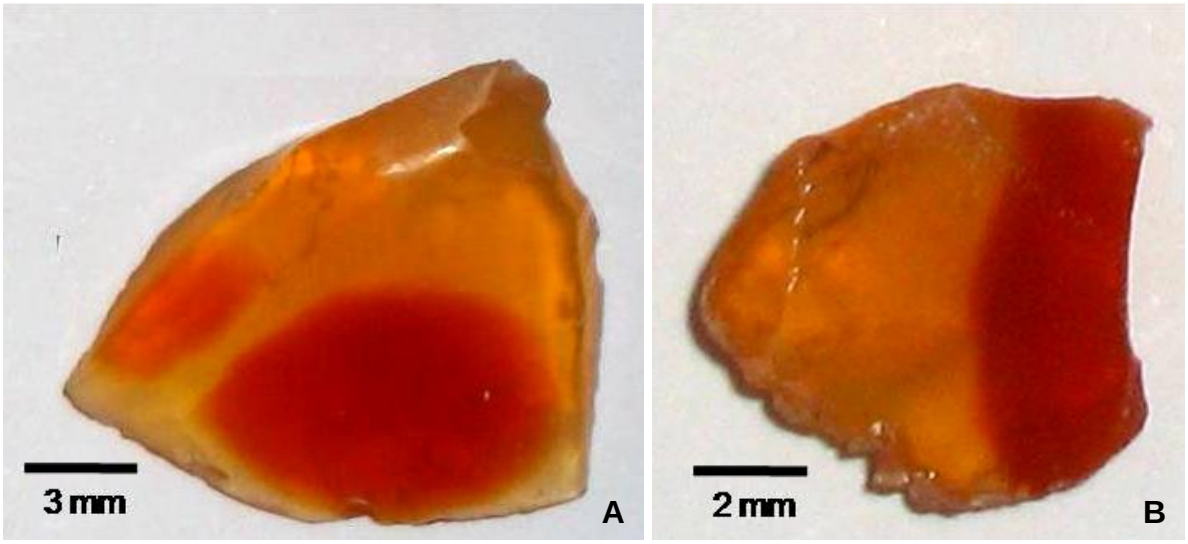

Figura 26: Mancha de cor vermelha em exemplares de opala laranja, possivelmente formadas por plasma hematítico.

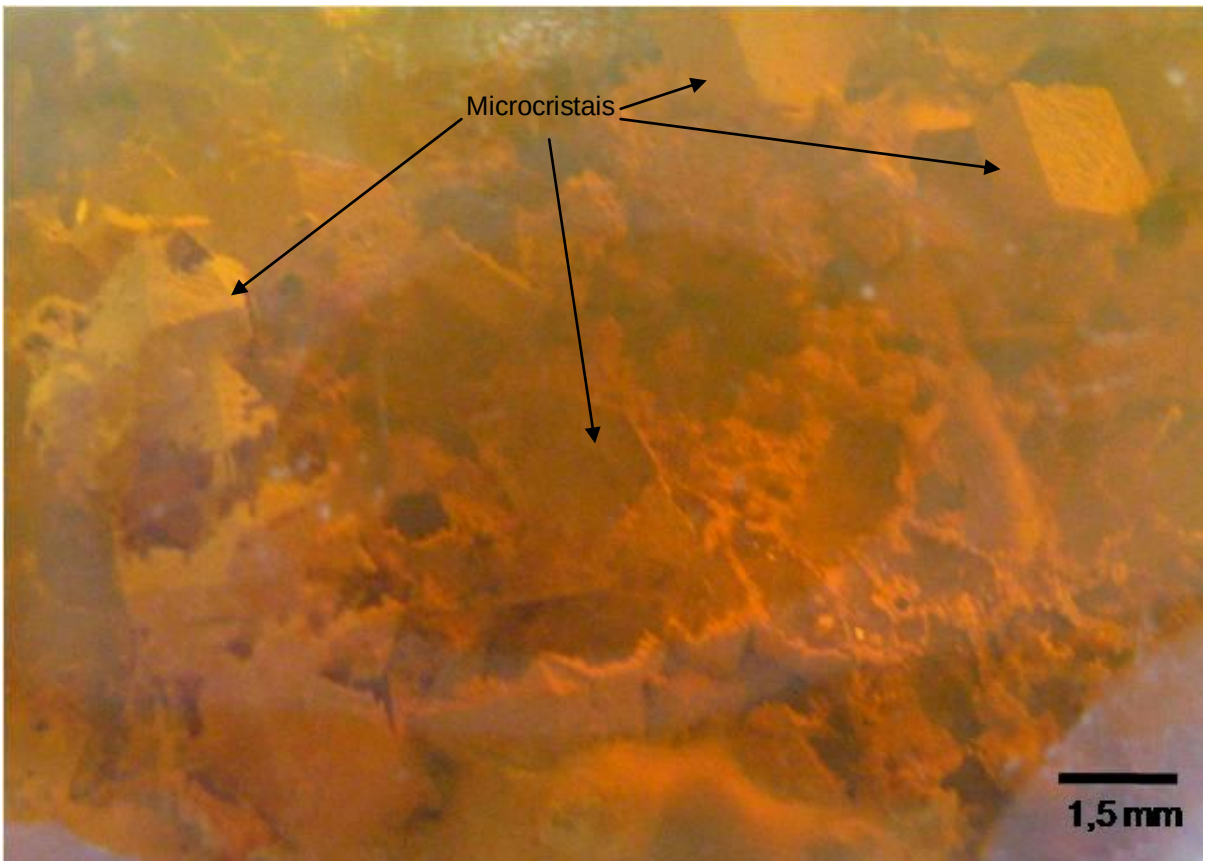

Figura 27: Inclusão de microcristais de quartzo em amostra de opala laranja.

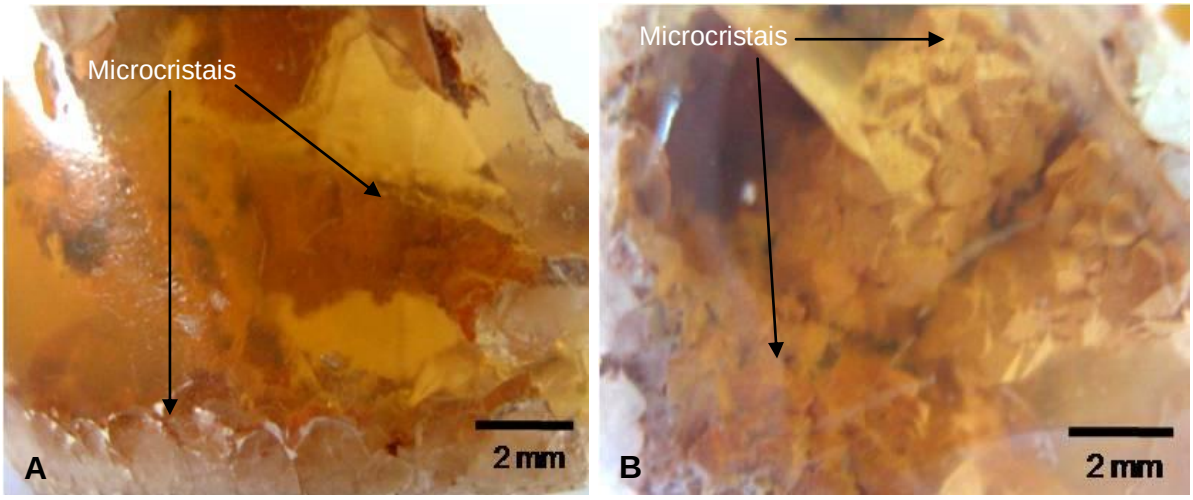

Figura 28: Amostras de opala amarela com inclusões de microcristais de quartzo.

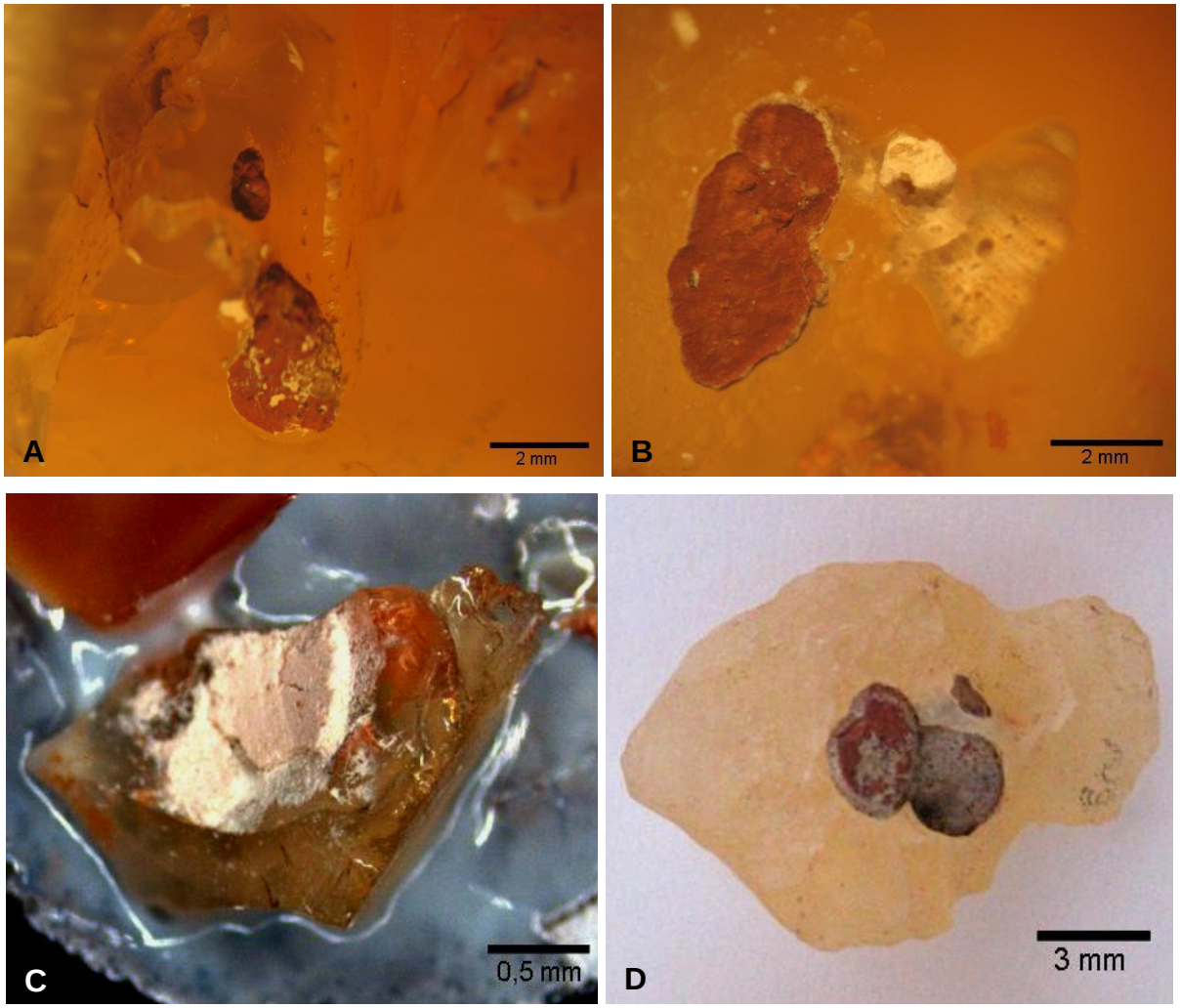

Figura 29: Inclusões nodulares compostas por material arenoso e argilo-arenoso, as quais apresentam películas de oxi-hidróxidos de Fe externas.

4.2.10 Teia ou Helicítica

Inclusão formada por material capilar semelhante a fios de cabelo, que em conjunto configuram um arranjo semelhante a uma teia de aranha (Figura 30).

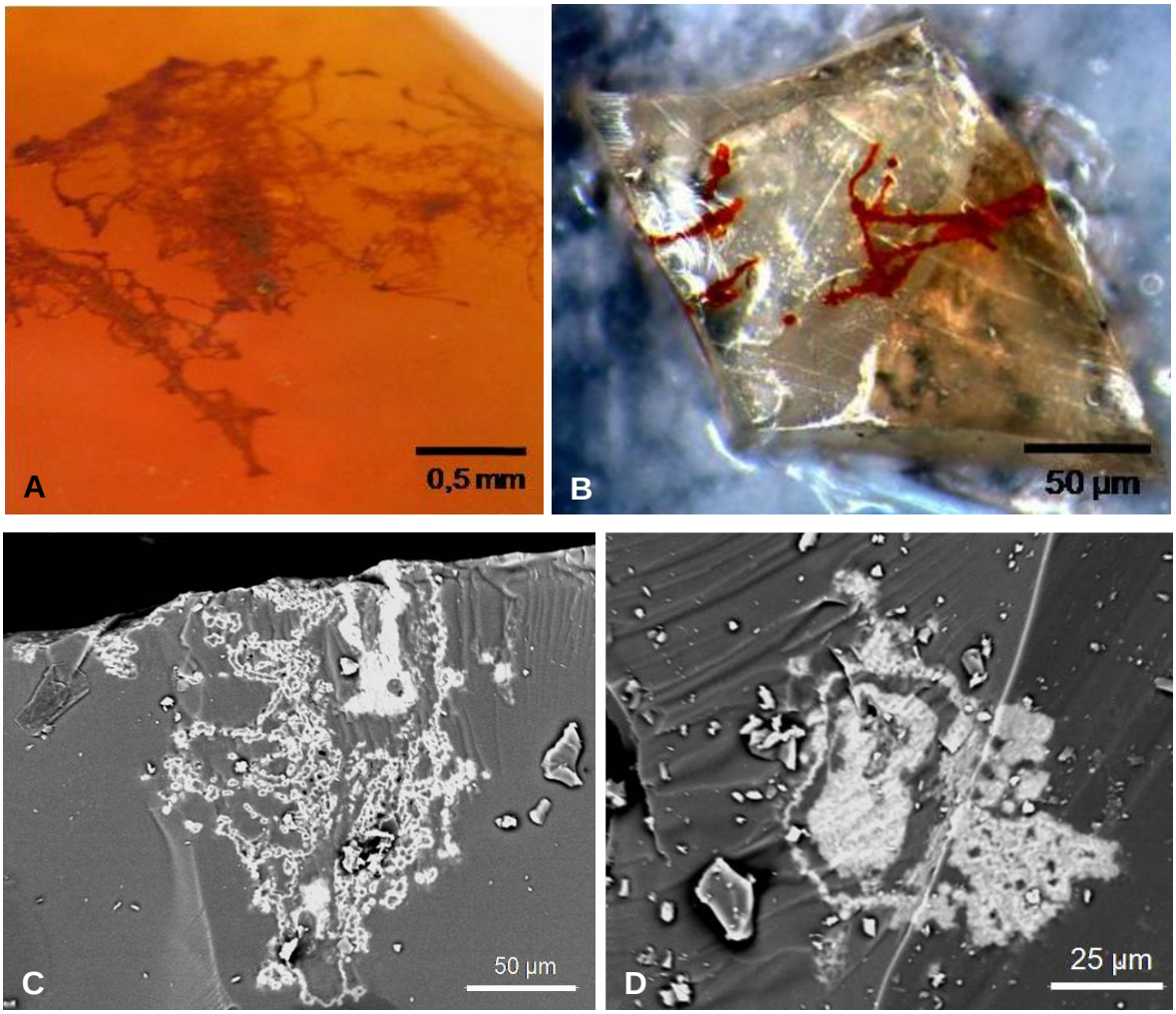

Figura 30: A, B – Inclusões helicíticas em amostras de opala laranja. C, D – Inclusões helicíticas (teia), em imagens de ERE em MEV.

4.2.11 Tubo ou Canal

Conduto alongado, aproximadamente cilíndrico, com diâmetro milimétrico, por vezes encurvado. Pode estar vazio, ou ainda parcial ou totalmente preenchido por material arenoso e/ou argilo-arenoso proveniente das rochas encaixantes das

opalas. Quando preenchidos, os tubos apresentam uma coloração avermelhada e/ou esbranquiçada (Figura 31).

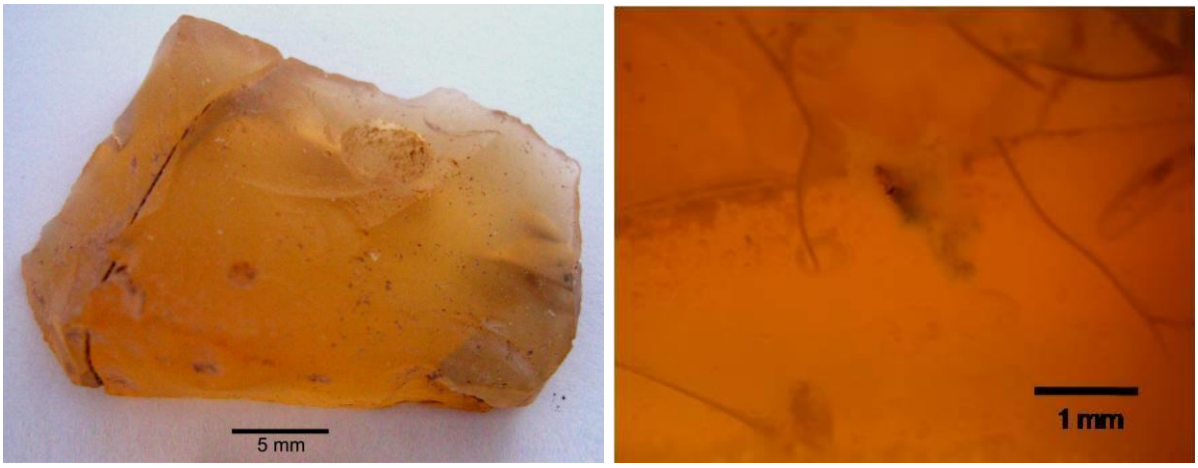

Figura 31: Microtubos com preenchimento arenoso em opala laranja.

4.3 MINERALOGIA DAS OPALAS E DE SUAS INCLUSÕES SÓLIDAS

4.3.1 Minerais Identificados por Difração de Raios-X (DRX)

As análises mineralógicas por DRX revelaram que as opalas laranja de Buriti dos Montes se apresentam em diferentes graus de ordem-desordem (graus de cristalinidade), desde opala amorfa (opala-A) até opala cristobalita-tridimita (opala-CT). A opala-A é representada pela amostra GB 8-37, cujo difratograma mostra o pico principal com d = 4,11 Å e outro incipiente em d = 2,50 Å. A opala-CT (GB 2-14) apresenta as principais distâncias interplanares que a definem (d = 4,10 Å; 4,31 Å; 2,50; 1,63 Å e 2,05 Å). Entre elas, há exemplares cujos estágios são intermediários (Figura 32). Algumas amostras (GB 1-24; 3-20; 4-5; e 10) apresentam o pico do espaçamento interplanar d = 3,34 Å, característico do quartzo. Neste caso, devido à influência do conteúdo de inclusões de microcristais de quartzo, os quais estão representados na Figura 30, que se constituem no difratograma mais representativo deste mineral nas amostras aqui estudadas (GB 20-22). Estas análises reforçam as descrições das inclusões sólidas formadas por cristais euédricos de quartzo.

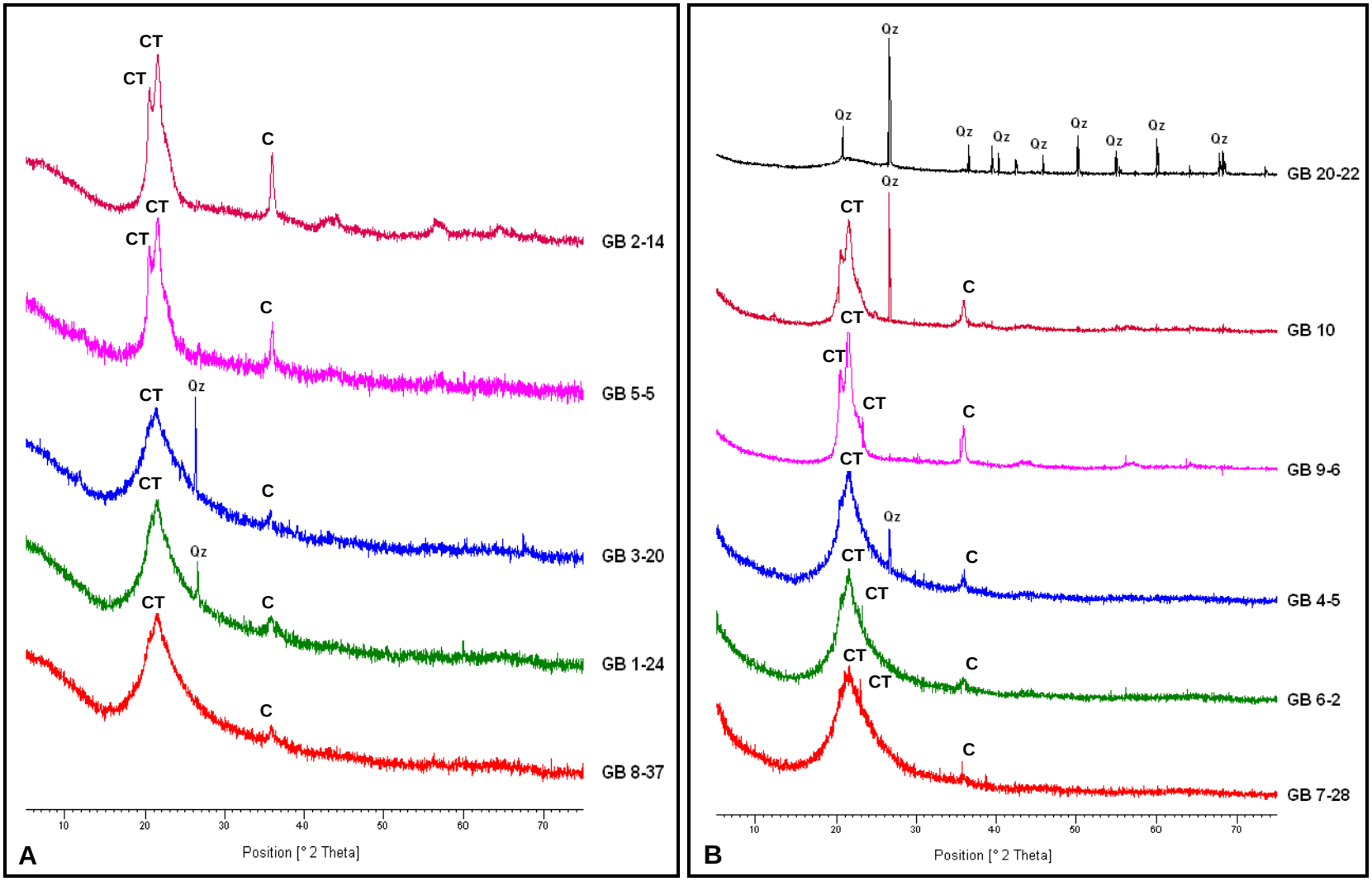

Figura 32: Difratogramas de raios-x representando os diferentes estágios de ordem-desordem (cristalinidade) das opalas laranja, desde opala-A até opala-CT, com níveis intermediários. CT – cristobalita-tridimita, C – cristobalita e Qz – quartzo.

4.3.2 Comportamento Termodiferencial (ATD) e Gravimétrico (TG)

O comportamento termodiferencial das opalas laranja de Buriti dos Montes mostra algumas similaridades com os padrões e exemplos descritos por Gomes (2002). Com exceção à amostra GB 10, as amostras de opalas investigadas não apresentam o pico endotérmico que representa a perda inicial de água entre 100° e 200° C aproximadamente.

A curva da amostra GB 10 é caracterizada por um pico endotérmico inicial a 69° C e posteriormente a 514° C. Isso ocorre de maneira incipiente na amostra GB 20-22 por volta de 573° C, que coincide com a temperatura de transformação quartzo α - quartzo β. As demais iniciam as curvas com uma inflexão no sentido exotérmico, mas que não delimita um pico característico e posteriormente, se transforma em uma curva de caráter endotérmico, mas sem qualquer pico definido. Tais características podem indicar baixo conteúdo de água nestas opalas, sendo liberada de forma lenta e contínua apenas após os 400°C (Figura 33). As curvas de ATG mostram a contínua perda de massa com incremento da temperatura.

4.3.3 Comportamento perante a Espectroscopia de Absorção no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

As análises por FTIR mostram espectros semelhantes aos das opalas descritas por Van der Marel e Beutelspacher (1976). Conforme pode ser observado na Figura 34, os espectros das amostras analisadas são muito semelhantes entre si, dentre os quais se diferenciam apenas as amostras GB 10 e GB 20-22 por apresentarem uma banda em 695 cm^{-1}, que corresponde à banda de estiramento de Si-O. De maneira semelhante, a amostra GB 20-22 apresenta a banda de 796 cm^{-1}, que correspondente ao estiramento de Si-O, no entanto, esta banda é próxima a de 793 cm^{-1}, que representa a tridimita. As bandas de 472 e 1104 cm^{-1} são correlacionáveis à tridimita, enquanto que as de 1098 cm^{-1} seriam compatíveis com a cristobalita, segundo as descrições de Van der Marel e Beutelspacher (1976),

reforçando, como discutido anteriormente, a existência de vários estágios de cristalinidade das opalas estudadas, de opala-A a opala-CT.

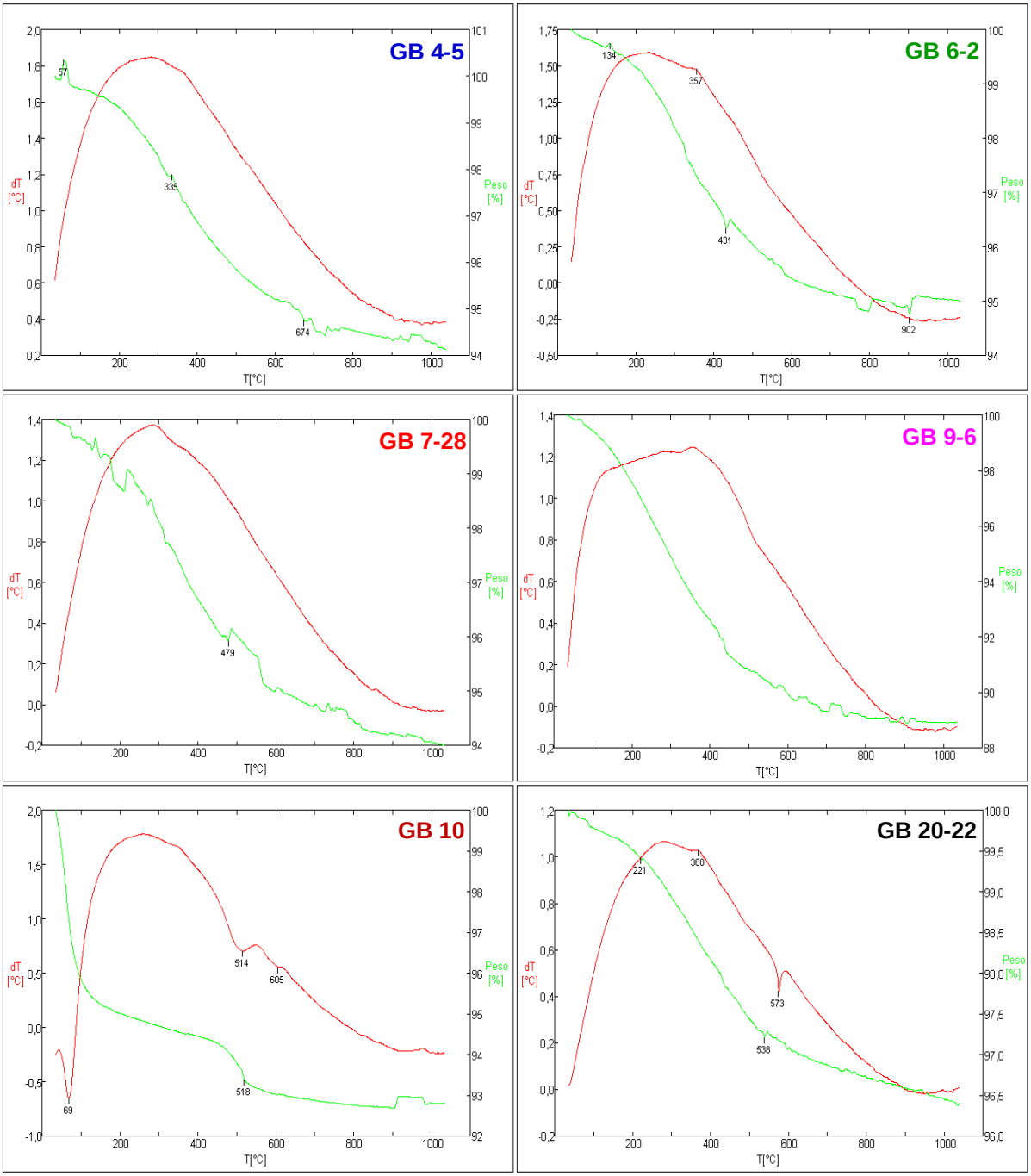

Figura 33: Termogramas de análises termodiferenciais e gravimétricas das opalas laranja de Buriti dos Montes, representadas pelas cores vermelha e verde respectivamente.

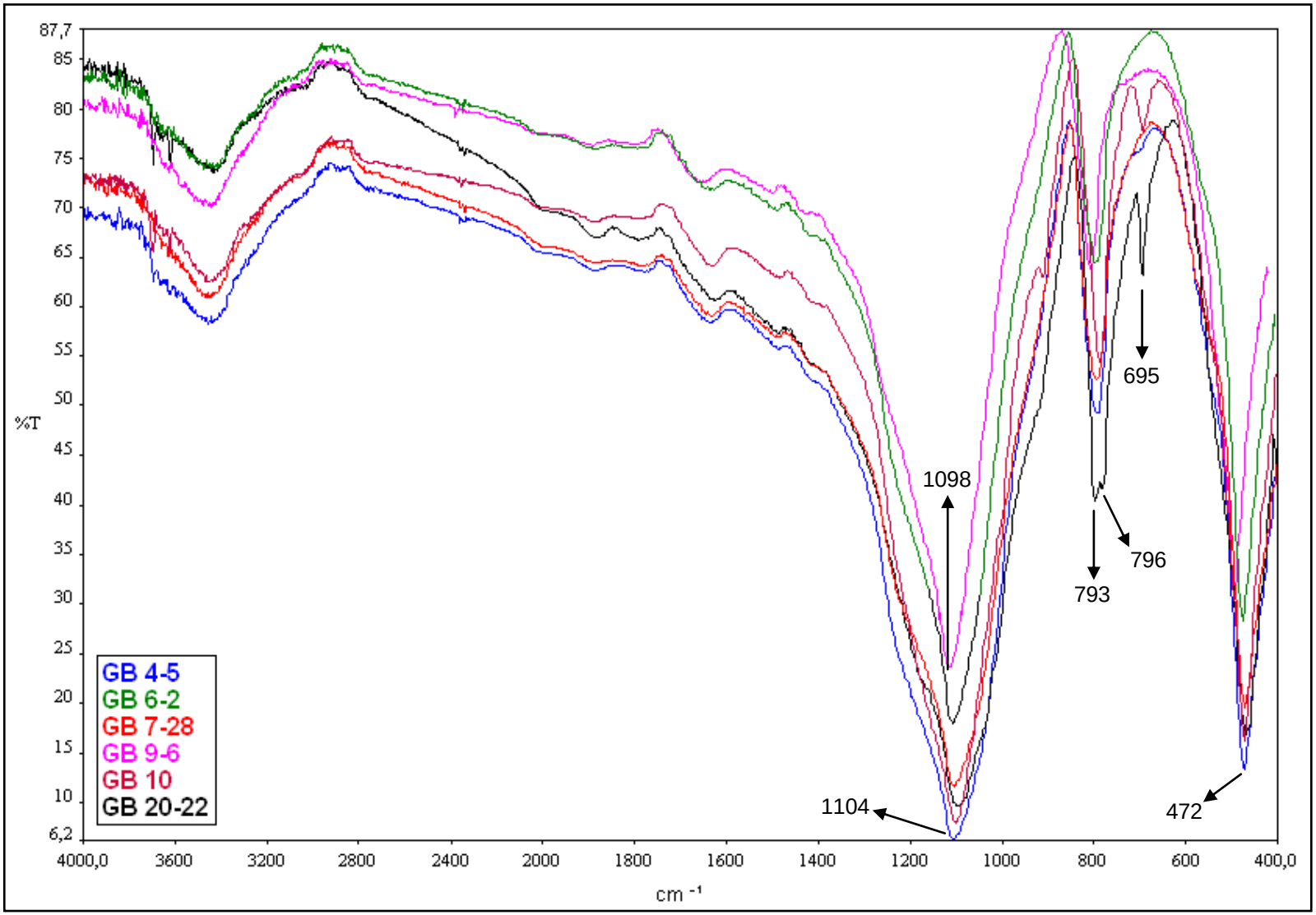

Figura 34: Espectros de absorção no infravermelho das opalas estudadas.

4.3.4 Contribuições Mineralógicas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV/EDS/CL)

Com esta técnica, foi possível visualizar a estrutura das opalas laranja (item 5.1), e identificar caulinita, quartzo, hematita/goethita e pseudomorfos de gipsita ou barita nas inclusões já apresentadas. As inclusões botrioidais, lamelares, nodulares e microtubulares contém caulinita em sua composição mineralógica (Figura 35), em meio ao material arenoso de coloração esbranquiçada que as preenche. É comum encontrar porções do preenchimento com aspecto ferruginoso ou o mesmo estar envolvido por uma película escura, formada por oxi-hidróxidos de ferro. O óxido de ferro, correspondente a goethita ou hematita, foi identificado no preenchimento central de uma bolha de opala branca em amostra de opala amarela (Figura 36).

As inclusões helicíticas e parte das dendríticas são constituídas de hematita, como constatado por Gomes (2002), a qual se deve a coloração amarronzada das inclusões. Destas, as helicíticas são contornadas por bordas de reação na opala hospedeira (Figura 37), onde os teores de Fe são mais altos em relação à porção circundante (1.700 ppm em média), atingindo aproximadamente 4.500 ppm. O quartzo se apresenta como microcristais inclusos nas opalas, com zoneamento desenvolvido segundo a simetria dos cristais (Figura 38). Localmente, foram identificados pseudomorfos de gipsita inclusos nas opalas (Figura 39).

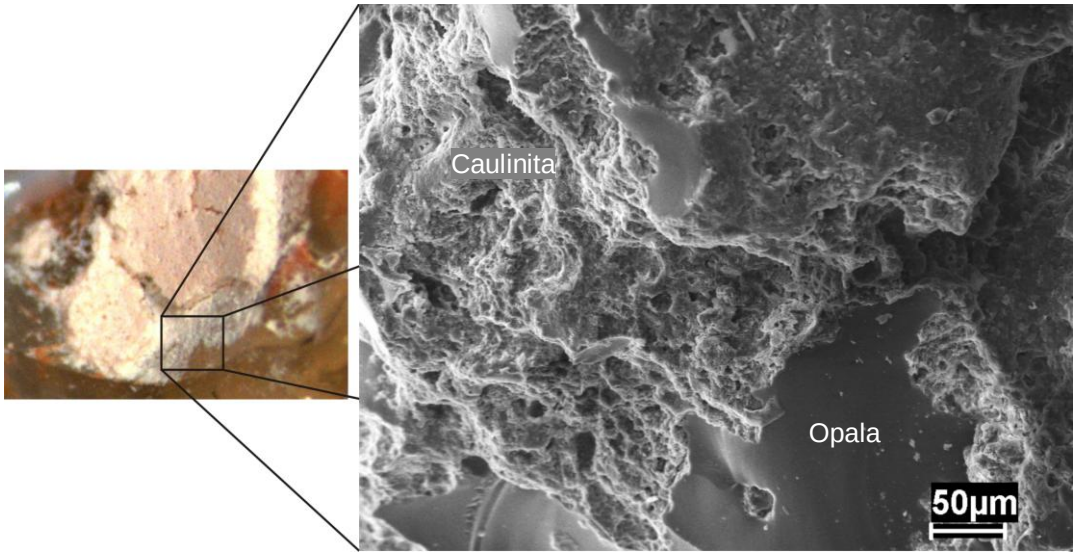

Figura 35: Fragmento de opala com inclusão botrioidal formada por caulinita. Imagem obtida com elétrons retroespalhados em MEV.

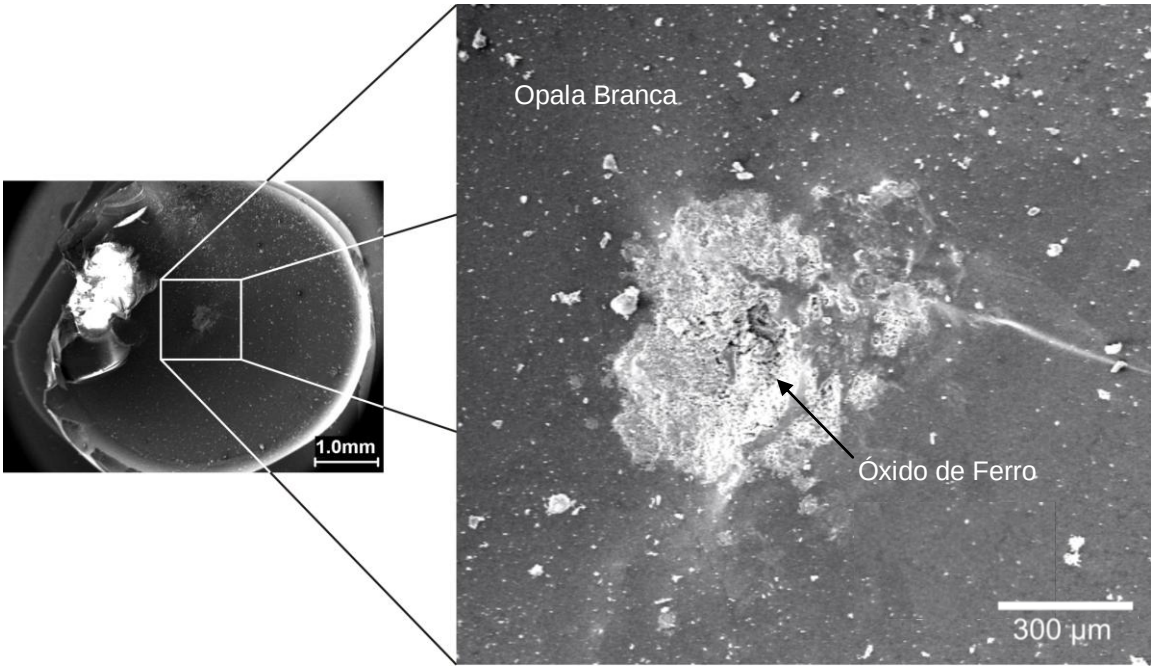

Figura 36: Inclusão de hematita no centro de uma bolha preenchida por opala branca, mostrada no item 5.2.1. Imagem de ERE em MEV.

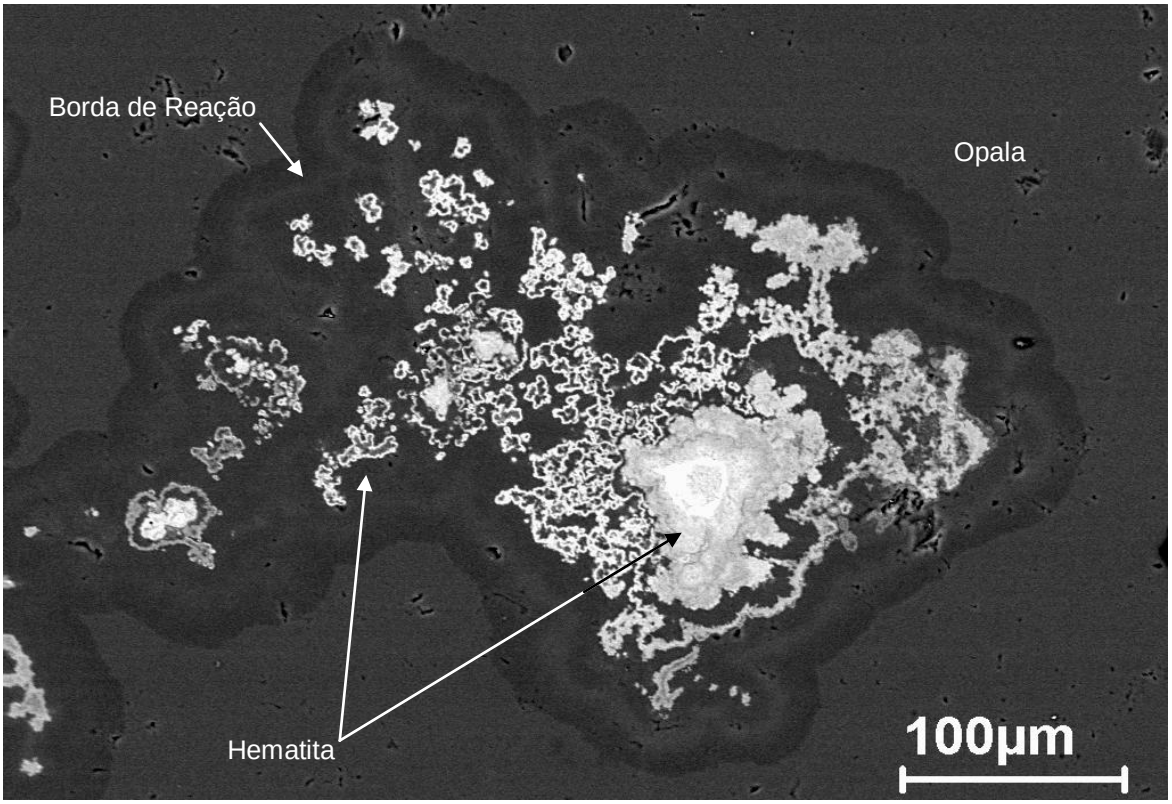

Figura 37: Inclusão do tipo teia composta por hematita, imagem de ERE em MEV. É possível observar o contorno da inclusão por uma borda de reação de opala, onde os teores de Fe são mais altos em relação à opala circundante, formada provavelmente pela interação entre a inclusão e o fluido, por dissolução parcial das bordas do material incluso.

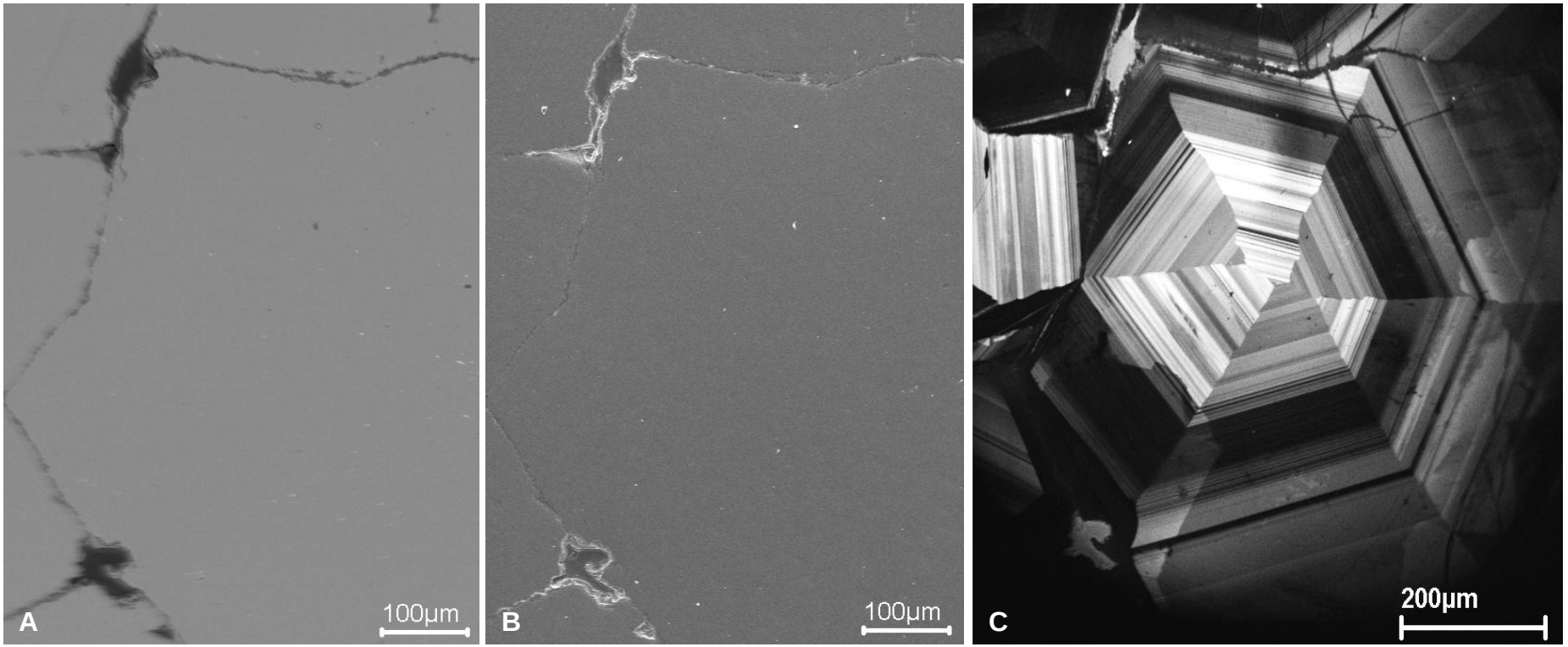

Figura 38: Cristal de quartzo em imagens de elétrons secundários (ES), retroespalhados (ERE) e de catodoluminescência (CL), onde ele exibe as possíveis zonas de crescimento.

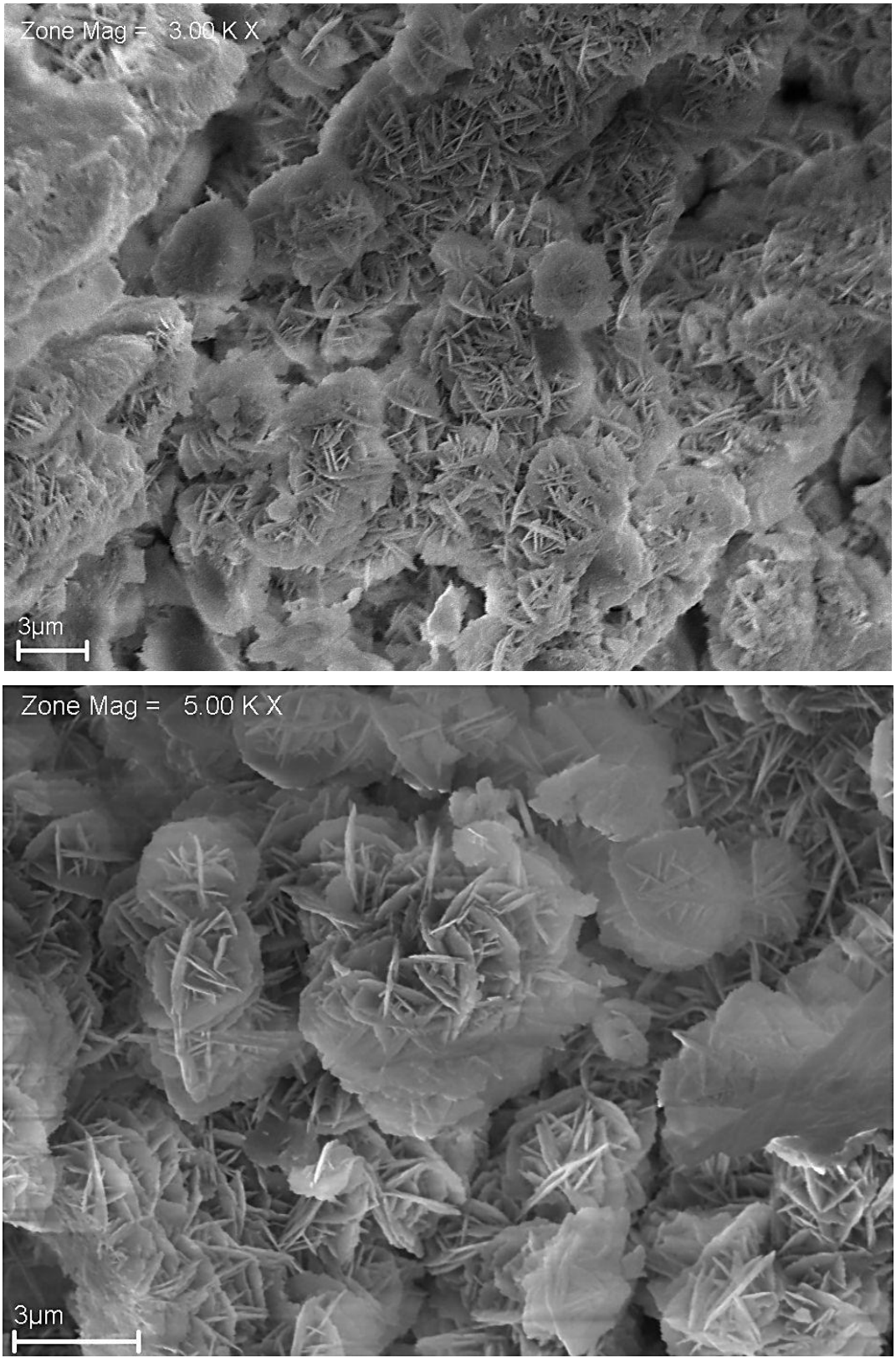

Figura 39: Prováveis agregados placosos de quartzo pseudomórficos segundo gipsita ou barita, inclusos em opalas laranja. Imagens de ES em MEV.

4.4 O QUARTZO

O quartzo é o principal mineral associado à opala de Buriti dos Montes. Da mesma forma que as opalas laranja, o quartzo também ocorre na forma de veios, quando é hialino, citrino, ou como ametista e calcedônia. Nestes veios ocorre também barita. O quartzo hialino desenvolve pequenas drusas, com cristais inferiores a 2 cm, e está frequentemente incluso nas opalas (Figura 40).

Atualmente, são desenvolvidos vários estudos sobre quartzo utilizando-se a catodoluminescência (CL) em MEV como ferramenta principal. Como exemplo, Müller; Seltmann e Behr (2000), Vortisch; Harding e Morgan (2003) e Wiebe; Wark e Hawkins (2007) demonstraram que o quartzo em rochas ígneas pode preservar zoneamentos capazes de fornecer informações importantes sobre sua história de cristalização. No quartzo hidrotermal, como parece ser o de Buriti dos Montes, essas feições são reveladas pela CL, com maior intensidade, cujas formas remetem à simetria dos cristais, tornando-as distintivas para a natureza deste mineral.

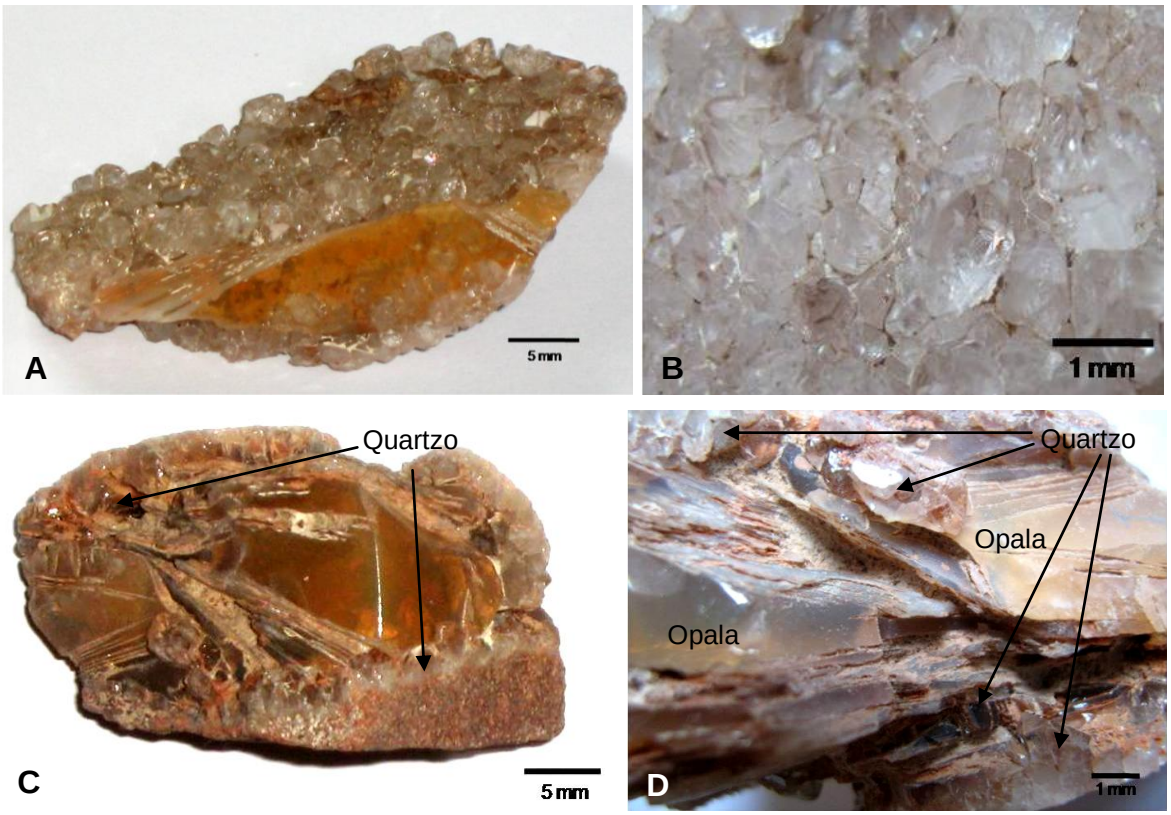

Figura 40: A e C – Amostras de opala laranja e cristais de quartzo. B e D – Detalhe dos cristais de quartzo.

Os cristais de quartzo que ocorrem associados às opalas revelam padrões de zoneamento perceptíveis apenas pela CL. Nelas, é possível observar que as zonas são concêntricas, com luminescência em diferentes intensidades e dispostas segundo a simetria hexagonal dos cristais, que é uma das características principais deste mineral (Figuras 41 A e B). Em contraposição, não há feições zonadas nos cristais de quartzo que compõem o arenito encaixante, os quais são arredondados e subédricos a anédricos (Figura 41 C e D). Em contraste com o quartzo, a opala, que varia de amorfa a criptocristalina (CT, cristobalita-tridimita), não emite CL, e, portanto aparece completamente extinta (RUSK; LOWERS; REED, 2008), isenta de quaisquer feições visíveis em CL, o que permite diferenciá-los, apesar de serem formados pelos mesmos componentes químicos, Si e O, praticamente (Figura 42).

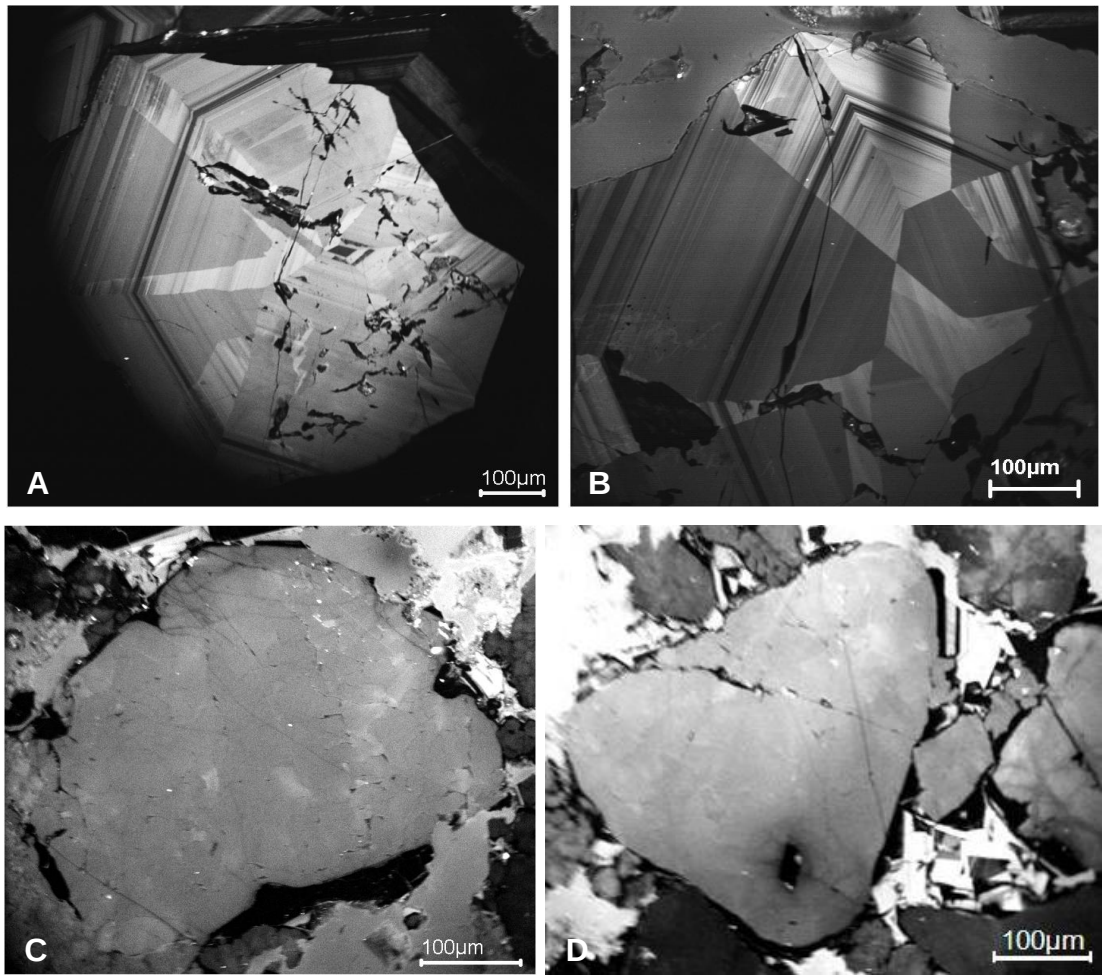

Figura 41: A e B – Cristais de quartzo exibindo zoneamento. C e D – grãos de quartzo do arenito do Grupo Serra Grande sem zoneamento da simetria hexagonal observado nas imagens A e B. Imagens de catodoluminescência (CL) em MEV.

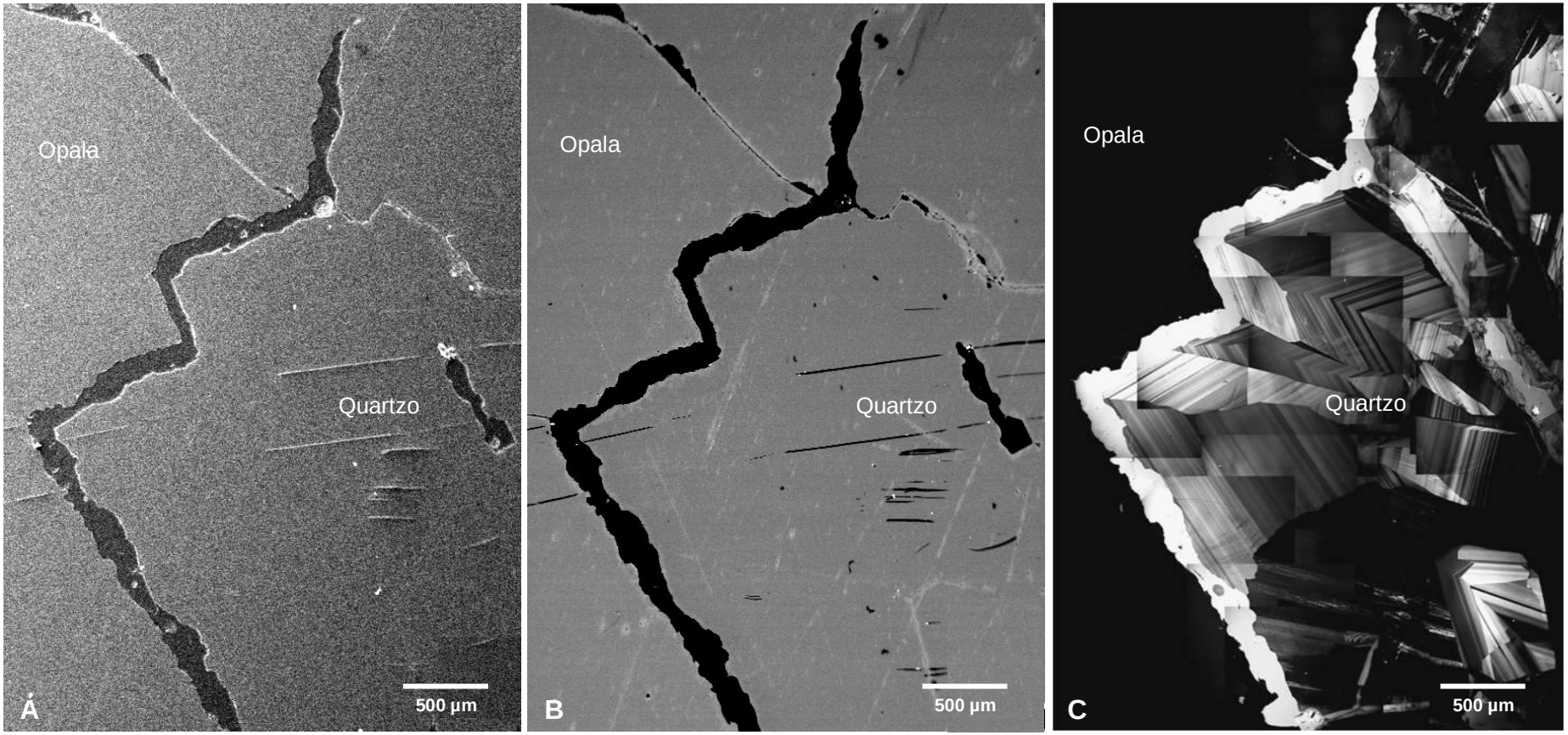

Figura 42: Inclusões de cristais de quartzo na opala. Imagem de elétrons secundários (A), retroespalhados (B) e catodoluminescência (C) em MEV, a partir da qual se pode distinguir a opala do quartzo.

Nos veios mineralizados, constituídos de opala na zona central e quartzo nas bordas, os cristais hexagonais de quartzo neoformado coexistem com os grãos que formam os arenitos encaixantes, substituindo-os gradativamente. As amostras GB 20-1 e 11, principais exemplos desses veios, foram observadas em MEV-CL, onde foi possível identificar diferentes desenvolvimentos de quartzo. É possível distinguir o quartzo primário (pré-existente à mineralização), quartzo neoformado associado às opalas e vênulas de quartzo que representam a fase intermediária (Figuras 43 e 44).

O quartzo primário, pré-existente em relação à mineralização, é representado pelos grãos que compõem o arenito encaixante, completamente anédricos e homogêneos quanto à textura, ou seja, sem quaisquer feições de zoneamento. À medida que se aproxima da parede dos veios, esses grãos vão se tornando corroídos e fraturados, cuja intensidade aumenta para o interior do veio. Aos poucos, os grãos vão sendo substituídos por cristais subédricos, contornados por vênulas de quartzo fortemente zonado, formado a expensas dos grãos pré-existentes.

Este aspecto sugere que fluidos ricos em sílica originados pela alteração hidrotermal das rochas, se precipitaram entre os grãos de quartzo dos arenitos e ao mesmo tempo sobrecresceram aos mesmos. Grandes cristais de quartzo hidrotermal que constituem a porção central dos veios, associados ou não às opalas, assim se formaram. Os cristais de quartzo hidrotermal são bem desenvolvidos, euédricos e fortemente zonados. As respectivas zonas aparecem dispostas concentricamente, desenhando o contorno hexagonal dos seus cristais e possuem caráter oscilatório quanto aos níveis de intensidade de catodoluminescência.

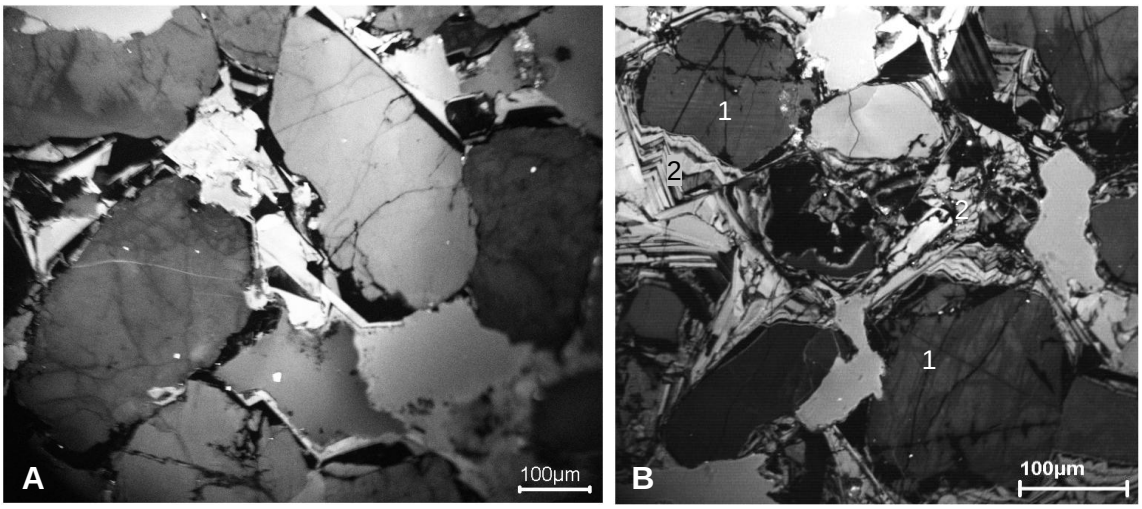

Figura 43: A – Grãos de quartzo dos arenitos do Grupo Serra Grande, homogêneos e anédricos a subédricos. B – Diferentes tipos de quartzo na transição arenito-veio. Imagens de MEV-CL. 1 e 2 indicam, grãos de quartzo do sedimento e intermediário, respectivamente.

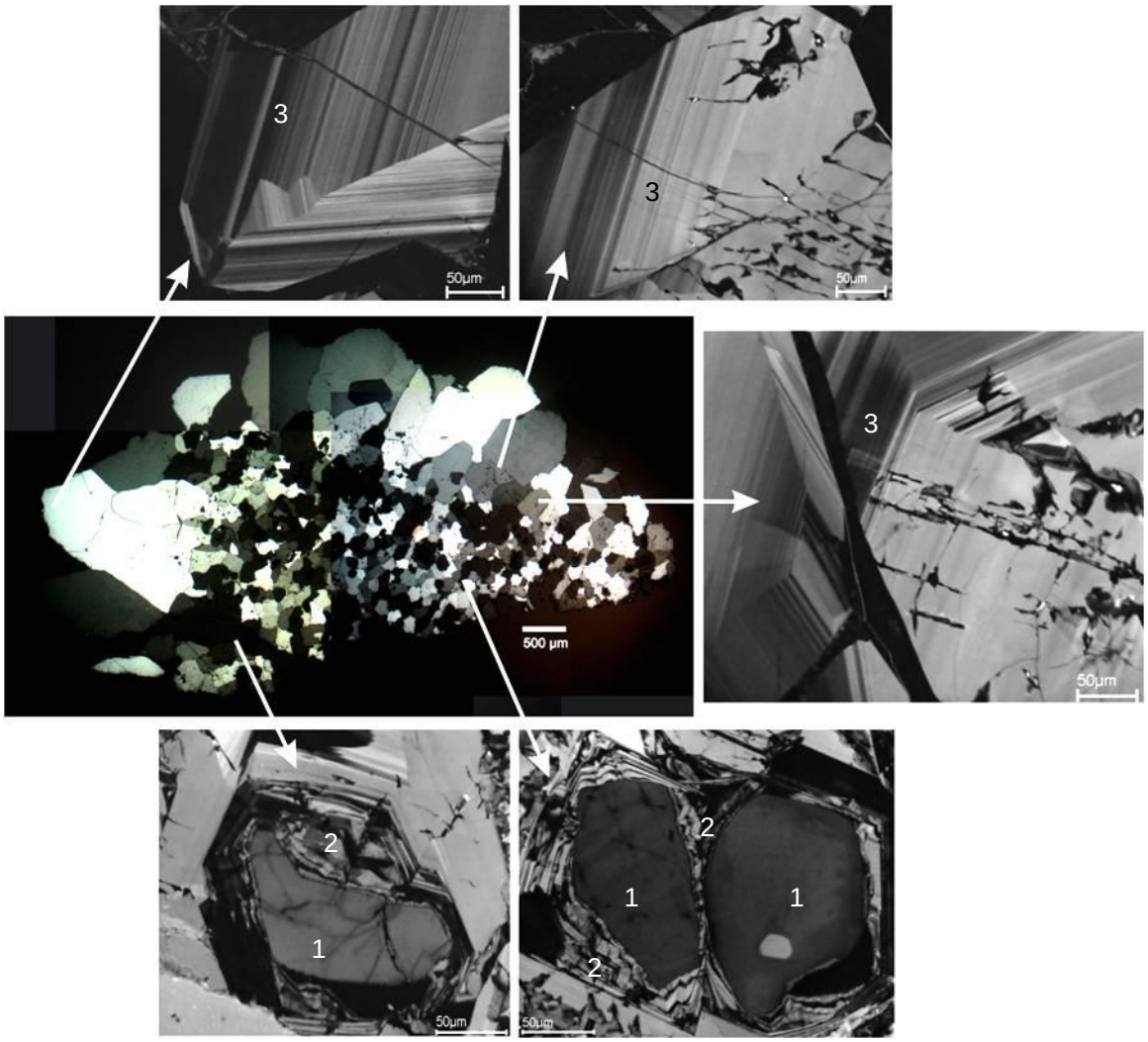

Figura 44: Diferentes tipos de quartzo associados às opalas laranja nos veios. Imagens de MEV-CL. 1, 2 e 3 indicam quartzo primário, intermediário, e neoformado, respectivamente.

4.5 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Como esperado, as opalas laranja de Buriti dos Montes são formadas principalmente de SiO_2, 90,14 % em média. Completam a composição química, água (representada pela PF) com 8,03 %, Al_2O_3 com 1,32 % e Fe_2O_3 com 0,2 %. A quantidade de água na constituição destas opalas é sensivelmente maior em relação aos dados obtidos por Gomes (2002). Os teores de Al_2O_3 e Fe_2O_3, não mostram relação direta com SiO_2, que de fato, é dominantemente. As concentrações de Al e Fe são relativamente maiores que os demais componentes, e podem estar associadas às inclusões sólidas, pois maioria delas é composta de caulinita e hematita, minerais formados predominantemente por estes elementos. O Al pode representar também eventuais substituições do Si.

Os valores muito baixos de TiO_2, de mobilidade mínima, confirmam a alta solubilidade e mobilidade da sílica, na formação das opalas, pois não incluíram o titânio. Quando comparadas, as opalas analisadas mostram que a amostra GB 4 apresenta maiores concentrações de elementos maiores, à exceção de Na e Ca (Tabela 1 e Figura 45).

Tabela 1: Composição química de opalas laranja de Buriti dos Montes em termos de elementos maiores (óxidos). (-) Abaixo do limite de detecção.

ELEMENTOS (%)	**AMOSTRAS**				
	GB 4	**GB 7**	**GB 9**	**GB 20**	**Média**
SiO_2	86,20	93,16	88,29	92,92	90,14
Al_2O_3	3,92	0,47	0,34	0,54	1,32
Fe_2O_3	0,45	0,17	0,08	0,09	0,20
Na_2O	0,03	0,07	0,02	0,06	0,05
CaO	0,03	0,05	0,02	0,03	0,03
K_2O	0,08	0,04	0,03	0,03	0,05
MgO	0,08	0,04	0,03	0,04	0,05
MnO	-	-	-	-	-
P_2O_5	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02
TiO_2	0,04	-	-	-	0,01
Cr_2O_3	0,026	-	-	-	0,0065
P.F.	8,9	5,9	11,1	6,2	8,03
TOTAL	99,80	99,94	99,94	99,94	

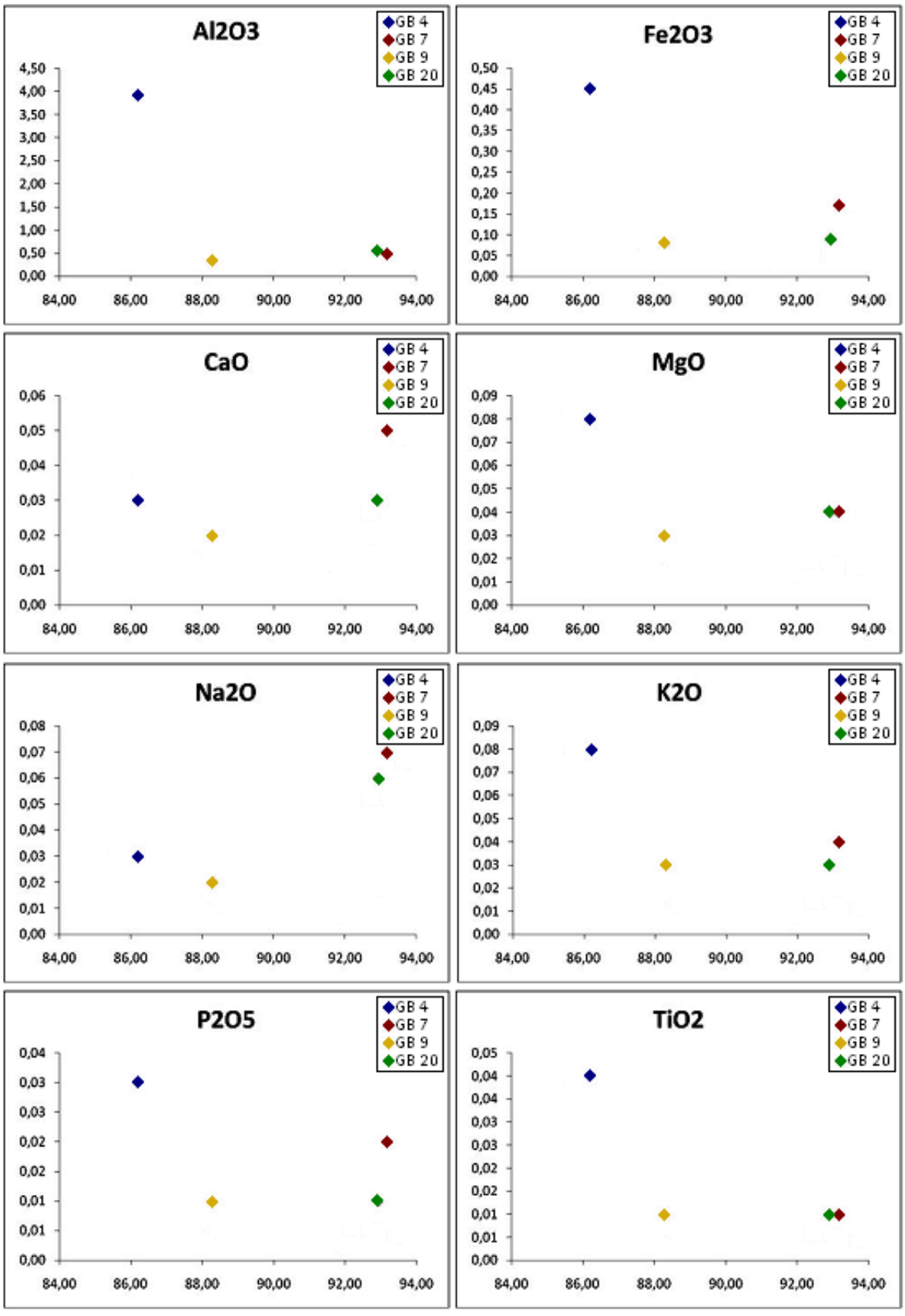

Figura 45: Diagramas de dispersão binária entre SiO_2 e demais elementos determinados nas opalas de Buriti dos Montes.

Entre os elementos-traço analisados nas opalas de Buriti dos Montes se destacam apenas os valores de Ba, que oscilam entre 195 ppm e 1373 ppm, com média de 808 ppm, (Figura 46). Os demais elementos estão em níveis muito abaixo dos crustais e equivalentes ao mineral quartzo. Barita tem sido encontrada com freqüência nos veios dentro dos arenitos encaixantes das opalas (GOMES, 2002). A amostra GB-4, a mais rica em Al_2O_3 e Fe_2O_3, apresentou-se mais enriquecida nos elementos traços analisados, que provavelmente estão associados com as inclusões sólidas de hematita e caulinita.

O padrão de elementos terras raras (ETR), de modo geral, apresenta fracionamento contínuo, moderado, e, portanto empobrecimento de terras raras pesados (ETRP). A amostra GB-4 destaca-se das demais, pois está relativamente mais concentrada em ETR, provavelmente em virtude do grande número de inclusões mineralógicas lamelares, compostas por caulinita. Somente a amostra GB-7 apresentou anomalia positiva de Eu, nas demais esta anomalia é negativa (Figura 47). Esta anomalia pode estar relacionada à presença de minerais como o feldspato nas inclusões dendríticas dessa amostra.

Os teores de elementos traços e terras raras podem ser consultados na Tabela 2.

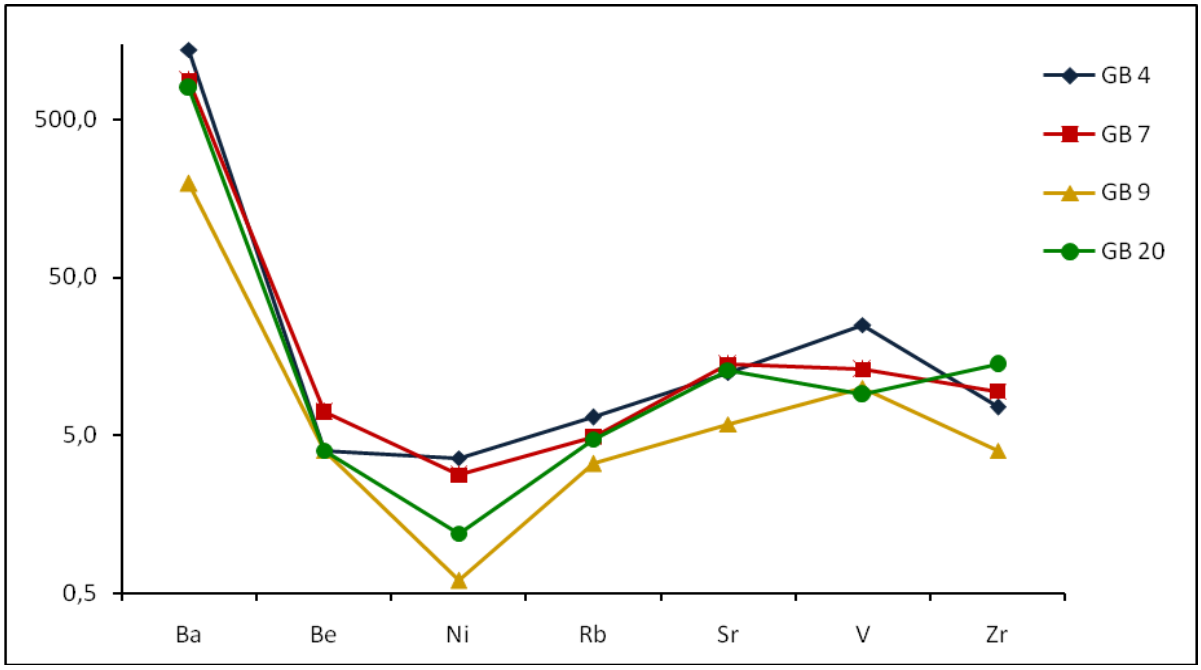

Figura 46: Diagrama binário mostrando a distribuição dos elementos traços nas opalas das amostras GB 4, GB 7, GB 9 e GB 20.

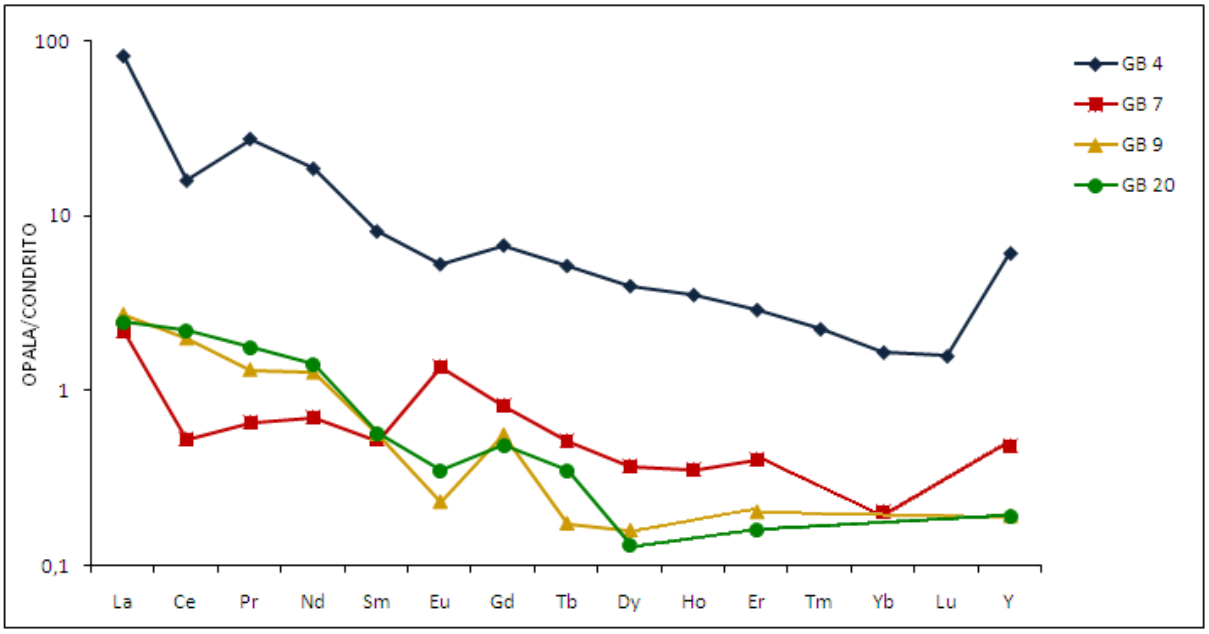

Figura 47: Diagrama de ETR mostrando o padrão de distribuição destes nas opalas das amostras GB 4, GB 7, GB 9 e GB 20. Os valores, em ppm, foram normalizados pelo condrito segundo Taylor e McLennan (1985).

Tabela 2: Teores de elementos traços verificados em opalas laranja de Buriti dos Montes. (*) Valores normalizados pelo condrito (TAYLOR; MCLENNAN, 1985). (-) Abaixo do limite de detecção.

ELEMENTOS (ppm)	**AMOSTRAS**				
	GB 4	**GB 7**	**GB 9**	**GB 20**	**Média**
Ba	1373	875	195	787	807,5
Be	4	7	4	4	4,75
Co	3,2	-	-	-	0,8
Cs	0,9	2,5	0,8	2,2	1,6
Cu	3,6	0,3	0,2	0,3	1,1
Ga	4,8	-	0,6	-	1,35
Hf	0,3	0,6	0,3	0,6	0,45
Mo	0,1	0,1	-	-	0,05
Ni	3,6	2,8	0,6	1,2	2,05
Pb	5,8	0,7	0,3	0,3	1,78
Zn	7	-	-	1	2
Nb	0,8	0,1	-	0,1	0,25
Rb	6,5	4,9	3,3	4,7	4,85
Sc	2	-	-	-	0,5
Sr	12,4	14,0	5,9	12,9	11,30
Th	1,9	0,2	0,4	0,4	0,73
U	0,3	0,4	0,3	0,2	0,30
V	25	13	10	9	14,25
Zr	7,5	9,5	4,0	14,0	8,75
La*	81,74	2,18	2,72	2,45	22,28
Ce*	15,88	0,52	1,99	2,19	5,15
Pr*	27,45	0,66	1,31	1,75	7,79
Nd*	18,57	0,70	1,27	1,41	5,49
Sm*	8,14	0,52	0,56	0,56	2,45
Eu*	5,29	1,38	0,23	0,34	1,81
Gd*	6,76	0,82	0,56	0,49	2,16
Tb*	5,17	0,52	0,17	0,34	1,55
Dy*	3,96	0,37	0,16	0,13	1,15
Ho*	3,53	0,35	-	-	0,97
Er*	2,89	0,40	0,20	0,16	0,91
Tm*	2,25	-	-	-	0,56
Yb*	1,65	0,20	-	-	0,46
Lu*	1,57	-	-	-	0,39
Y*	6,10	0,48	0,19	0,19	1,74

5 DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Dentre os diferentes tipos de inclusões sólidas estudadas, grande parte delas é constituída de material arenoso e exibe formas variadas, como lamelas, microtubos e nódulos, por exemplo. Analisadas em conjunto, estas inclusões exibem conteúdo mineralógico, cores e texturas muito semelhantes, tanto em caráter macroscópico quanto microscópico, o que indica mesma procedência.

De maneira geral, as inclusões botrioidais, dendríticas, lamelares, nodulares, microcristais, teias e microtubos, são compostas mineralogicamente por quartzo, caulinita e hematita/goethita, apresentam coloração amarronzada com porções esbranquiçadas (onde há maiores quantidades de caulinita) e aspecto terroso a granular, além de ocorrerem frequentemente associadas, se diferenciando entre si apenas pelos arranjos tridimensionais que constituem no interior das opalas. Neste sentido, essas inclusões formam um conjunto protogenético em relação às opalas que as contém, pois representam pequenos fragmentos dos arenitos encaixantes assimilados pela solução rica em sílica que originou as opalas. Suas formas exóticas e tão variadas são resultantes da contínua migração de fluidos viscosos através das fraturas nos arenitos, de onde fragmentos de tamanhos e formas diferentes foram agrupados, em parte dissolvidos e moldados como inclusões distintas.

Outras inclusões refletem processos singenéticos, como por exemplo, bolhas, estruturas de fluxo, manchas de cor e fraturas cicatrizadas. As bolhas correspondem à fase gasosa do fluido que originou as opalas. Algumas delas se apresentam totalmente ou semipreenchidas, enquanto o restante se constitui em moldes ou cavidades, neste caso, resultantes de escape do material de preenchimento através de fraturas formadas após o resfriamento das opalas. As estruturas de fluxo representam ao que tudo indica, o caráter viscoso do fluido durante a percolação dos arenitos encaixantes através das fraturas e poros entre os grãos.

Variações químicas no ambiente de formação das opalas, devidas a própria interação entre o fluido e a rocha, podem causar zoneamentos no seu interior, e conseqüentemente as manchas de cor. A cor na opala laranja e suas variações são devidas ao conteúdo de micro e nanoinclusões ricas em ferro, conforme constatado por vários autores como Fritsch et al. (1999, 2002, 2006), Steffen (2000), e Galillou et al. (2008). Da mesma maneira, acredita-se que os zoneamentos de cor

apresentados neste trabalho, são consequentes de variações no conteúdo de Fe^{3+} no interior das opalas, oriundas de instabilidades químicas durante a formação das mesmas. Segundo Fritsch et al. (1999), as cores compreendidas entre o laranja e o vermelho são produzidas na opala devido à absorção de luz por nanopartículas de óxido de ferro na forma de agulhas (tipicamente com 10 x 100 nm). A cor dessas gemas é atribuída também à homogeneidade de sua estrutura, onde os interstícios entre as esferas de sílica são intensamente cimentados por sílica, e estas por sua vez apresentam tamanhos compatíveis com os comprimentos de onda que resultam nas respectivas cores.

As fraturas cicatrizadas representam um processo tardi-singenético, onde as soluções silicosas finais preenchem as fraturas geradas pelo início do resfriamento das opalas, onde as proporções entre elementos químicos não são iguais as iniciais, resultando em preenchimentos geralmente mais claros, a exemplo das fraturas preenchidas por opala laranja em matriz vermelha e preenchimento incolor em opala amarela. São consideradas feições epigenéticas, as fraturas secas, de tensão e craqueamento. As fraturas em geral, se formam com o resfriamento da sílica opalina, enquanto que o craqueamento ocorre com o ressecamento da opala ao longo do tempo e pode sofrer influência das condições de armazenamento do material.

O conjunto de inclusões sólidas identificado neste trabalho revela grande interação entre o fluido gerador das opalas e o material sedimentar que compõe as rochas encaixantes, uma vez que a maior parte das feições estudadas é protogenética e representa fragmentos dos arenitos do Grupo Serra Grande, dissolvidos e aprisionados durante a migração dos fluidos hidrotermais pelas friáveis superfícies de fraturas nessas rochas.

As opalas estudadas apresentam vários estágios de cristalinidade entre opala-A e opala-CT, conforme foi observado nas análises mineralógicas, o que já havia sido comprovado anteriormente por Gomes (2002).

Os elevados teores de Ba nas opalas, na ordem de 195 ppm a 1373 ppm, estão relacionados à barita encontrada com freqüência em veios dentro dos arenitos encaixantes das opalas, descritos por Gomes (2002), um mineral típico da ambiência hidrotermal, e encontrado com freqüência nos sedimentos da Bacia do Parnaíba.

A amostra GB-4 destaca-se por ser consideravelmente a mais enriquecida em elementos maiores, exceto Na e Ca, em relação ao Si, seu maior constituinte. Da mesma maneira, a amostra também é nitidamente enriquecida em elementos traços e terras raras em relação às outras. Esse fato pode estar relacionado ao conteúdo abundante de inclusões lamelares contidas na opala. No entanto, os teores de Ba são bem mais altos que os outros traços mesmo nas opalas com poucas ou nenhuma inclusão. Isso mostra a forte influência do ambiente de formação dessas opalas no seu quimismo.

A atividade hidrotermal que deu origem a opala é reforçada pela presença de cristais de quartzo euédrico com zoneamento concêntrico que acompanha a simetria hexagonal do mineral e é registrada na literatura como uma feição diagnóstica da origem hidrotermal, identificada apenas por CL. As feições apresentadas por ele contrastam fortemente com aquelas correspondentes aos grãos de quartzo que compõem os arenitos encaixantes, o que permite identificar diferentes tipos de quartzo, que podem ser interpretados como estágios de alteração das rochas hospedeiras pelos fluidos hidrotermais.

O ambiente geológico onde as opalas laranja de Buriti dos Montes se formaram, tem, portanto, características únicas e essenciais à sua formação, como a interação entre as rochas sedimentares do Grupo Serra Grande e ígneas da Formação Sardinha, os veios de barita e as extensas e numerosas fraturas que serviram para alojar os veios mineralizados.

Com base nos dados discutidos anteriormente, propõe-se um modelo geológico simplificado para sintetizar a formação das opalas laranja de Buriti dos Montes (Figura 48). Nesse contexto, os diabásios foram imprescindíveis como a fonte de calor responsável pelo aquecimento das soluções hidrotermais, enquanto os arenitos contribuíram com toda a sílica disponível necessária à saturação das soluções e as fraturas foram as armadilhas indispensáveis ao aprisionamento das soluções hidrotermais.

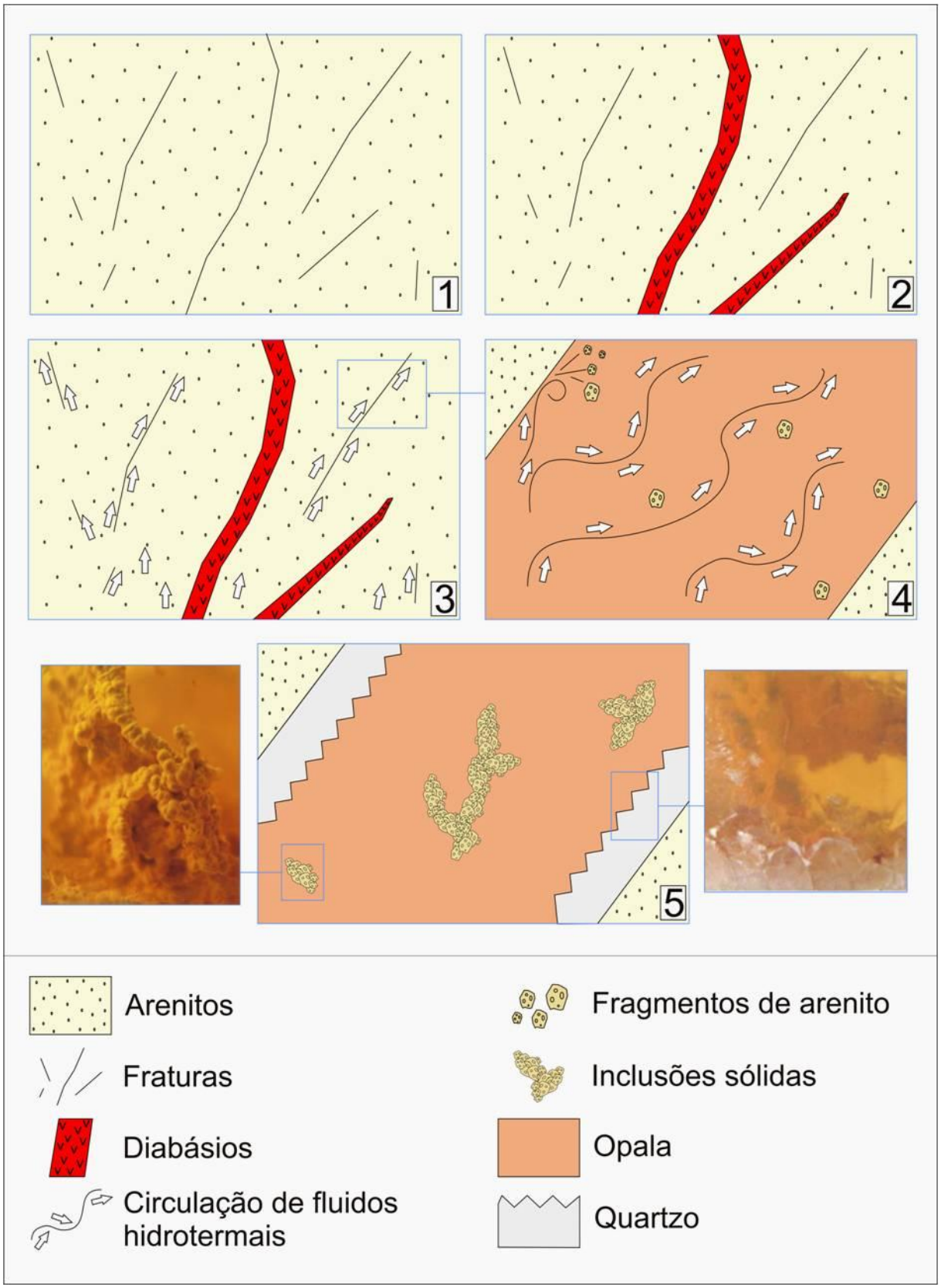

Figura 48: Modelo geológico proposto para sintetizar a formação das opalas laranja de Buriti dos Montes.

Na região de Buriti dos Montes, a deposição de sedimentos da Bacia do Parnaíba implantou rochas clásticas, dominantemente arenitos, que têm caracteristicamente alta porosidade, constituindo-se assim como bons reservatórios de água. Com a colocação dos corpos ígneos básicos da Formação Sardinha, o grau geotérmico na região aumentou consideravelmente, fazendo com que a água armazenada nos poros dos arenitos fosse aquecida, já que esses magmas são praticamente anidros e assim, não teriam água suficiente para constituir as soluções.

A partir de então, esta começou a migrar através dos poros dos arenitos e pelas fraturas que cortam essas rochas, lixiviando a sílica disponível e se constituindo em uma solução hidrotermal supersaturada em SiO_2. Esta solução, à medida que percolava os arenitos, dissolvia e consequentemente, arrancava fragmentos das friáveis superfícies de fraturas por onde migravam, originando assim grande parte das inclusões, às quais se atribui a classificação protogenética.

Enquanto os fluidos hidrotermais migravam, estes eram aprisionados nas fraturas dos arenitos, até que fatores como a alta viscosidade, a diminuição da temperatura e o próprio aprisionamento nas feições rúpteis, fizeram a solução se resfriar completamente e originar os veios mineralizados que existem na região de Buriti dos Montes. Neste caso, as porções que se resfriaram mais rapidamente formavam um gel de sílica se precipitou como opala laranja, enquanto que o resfriamento mais lento permitiu um rearranjo estrutural e a formação de quartzo.

Com base no exposto, conclui-se ainda que as opalas laranja de Buriti dos Montes têm características especiais, que são nitidamente devidas ao ambiente e processos genéticos que as originaram. Tais características deveriam servir como instrumento de valorização das mesmas, agregando-lhes maior valor comercial. Da mesma maneira, outras ocorrências de minerais gemológicos no Brasil deveriam ser estudadas e certificadas como produtos brasileiros no mercado gemológico mundial.

Recomenda-se como sugestões para trabalhos posteriores estudos de inclusões fluidas para caracterizar os fluidos hidrotermais que originaram essas opalas e os veios de quartzo associados, estudos estruturais dessas opalas com técnicas modernas como a espectroscopia Raman, bem como a caracterização geoquímica detalhada das rochas envolvidas na formação das opalas do Piauí, estabelecendo-se as possíveis relações entre elas.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, G. A. Revisão Geológica da Bacia do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO. GEOLOGIA, 25., 1971. São Paulo. *Anais*... São Paulo: SBG, 1971. v. 3, p. 113-122.

CABRAL, N. M. T. *Estudo Litoestratigráfico do Permocarbonífero da Bacia do Maranhão*. 1991. 152f. Dissertação (Mestrado em Geologia). Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 1991.

CAPUTO, M. V.; LIMA, E. C. Estratigrafia, Idade e Correlação do Grupo Serra grande - Bacia do Parnaíba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33., 1984. Rio de Janeiro. *Anais*... Rio de Janeiro: SBG, 1984. v. 2, p. 740-753.

CAROZZI, V.C; et al. *Análise ambiental e evolução tectônica sinsedimentar da seção siluro-eocarbonífera da bacia do Maranhão*. Ciência – Técnica – Petróleo. Rio de Janeiro: Petrobras, 1975. v. 7-1, 2. p. 48. (Seção Exploração de Petróleo).

COMPANHIA DE PESQUISAS E RECURSOS MINERAIS. *Mapa geológico do estado do Piauí*. 2. ed. Teresina, 2006. 1 CD-ROM.

CUNHA, F. B. M.; CARNEIRO, R. G. Interpretação Fotogeológica do centro-oeste da Bacia do Maranhão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 26., 1972. São Paulo. *Anais*... São Paulo: SBG, 1972. p. 65-79.

ECKERT, A. W. *The world of opals*. Chichester: John Wiley & Sons. 1997. 471p.

FRITSCH, E.; et al. Découvertes récentes sur l'opale. Revue de Gemmologie a.f.g 138/139, p. 34-40. 1999.

FRITSCH, E.; et al. Mexican gem opal: nano- and micro-structure, origin of color and comparison with other common opals of gemmological significance. *The Australian Gemmologist*, v. 21. p. 230-233. 2002.

FRITSCH, E.; et al. The Nanostructure Of Fire Opal. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v. 352. p. 3957–3960. 2006.

GAILLOU, E.; et al. The geochemistry of gem opals as evidence of their origin. *Ore Geology Reviews*, v. 34. p. 113-126. 2008.

GÓES, A. M. O.; FEIJÓ, F. J. *Boletim de Geociências da Petrobras*. Rio de Janeiro: Petrobras. 1994. v. 8-1. p.57-67.

GOMES, E. R. *Mineralogia e gemologia da opala laranja de Buriti dos Montes (Piauí, Brasil)*. 2002. 89f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geoquímica). Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2002.

GOMES, E. R.; COSTA, M. L. DA. A Opala Laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TRATAMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE GEMAS, 1., 2000. *Anais ...* Ouro Preto, 2000. p. 35.

_____. Feições rúpteis na opala do Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA, 7., 2001. Belém. *Livro de Resumos*... Belém, SBG/Norte: 2001a. CD-ROM.

_____. Inclusões sólidas na opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 19., 2001. Natal. *Livro de Resumos*... Natal: SBG/Nordeste. 2001b. p. 214.

_____. Mineralogia da opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 19., 2001. Natal. *Livro de Resumos*... Natal, SBG/Nordeste, 2001c. p. 215.

_____. Opalas do Piauí, Pedro II – Buriti dos Montes (Parte II). *Diamond News*, p. 54-59. 2007.

_____. Orange Opals from Buriti dos Montes, Piauí, Brazil. *Revista de Pesquisa em Pós-Graduação*. UFOP. 2001d. Ouro Preto.

JOHNSON, M. L.; KOIVULA, J. I. Opal from matrix in Brazil. *Gems & Gemology*, p. 35-53. 1999.

KEGEL, W. *Contribuição ao Estudo do Devoniano da Bacia do Parnaíba*, Brasil. Rio de Janeiro: DNPM, 1953. v. 141. 48p. (Boletim da Divisão de Geologia e Mineralogia).

LIMA, E. DE A. M.; LEITE, J. F. *Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da bacia Sedimentar do Parnaíba*. *Integração Geológico-Metalogenética*. Recife: DNPM/CPRM, 1978. v.1, 2. (Relatório Final da Etapa 3).

MABESOONE, J. M. Panorama geomorfológico do Nordeste brasileiro. *Geomorfologia*, p. 16- 56. 1978.

MESNER, C. J.; WOOLDRIDGE, C. P. *Estratigrafia das Bacias Paleozóica e Cretácea do Maranhão*. Rio de Janeiro: Petrobras, 1964. v. 2. p.137-164 (Boletim Técnico 7, Abr./Jun.).

MÜLLER, H. *Report on palynological results of samples examined from wells in Maranhão*. *Petrobras/Rpba*, 1962. 44 p. (Relatório Interno).

MÜLLER, A.; SELTMANN, R.; BEHR, H. J. Application of cathodoluminescence to magmatic quartz in a tin granite-case study from the Schellerhau Granite Complex, Eastern Erzgebirge, Germany. *Mineralium Deposita*, v. 35. p. 169-189. 2000.

O'DONOGHUE, M. Identifying man-made gems – opal. *London, N. A. G. Pres*. p. 171-178. 1983.

PLUMMER, F. D. et al. Estados do Maranhão e Piauí. In: BRASIL. *Conselho Nacional de Petróleo*. Rio de Janeiro: CNP, 1948. p.87-134. (Relatório).

QUADROS, L. P. *Distribuição bioestratigráfica do Chitinozoa e Acritarchal na Bacia do Parnaíba*. Ciência –Técnica – Petróleo. Rio de Janeiro: Petrobras, 1982. v.12. p.1-76. (Seção Exploração de Petróleo).

ROSA, D. B. *Les gisementsd'opale nobles de la region de Pedro II dans l'etat de Piauí.* 1988. 327f. These de Docteur. Nancy: L'Institut National Polytechnique de Lorraine/Ecole Nationale Superieure de Geologie de Nancy, 1988.

RUSK B. G.; LOWERS H. A.; REED M. H. Trace elements in hydrothermal quartz: relationships to cathodoluminescence textures and insights into vein formation. *Geology*, v. 36-7. p. 547-550. 2008.

SCHWARTZ, D. Gemas policristalinas e amorfas. *Revista da Escola de Minas*, v. 27. p. 34-43. 1984.

STEFFEN, G. *Farbe und lumineszenz von mineralien*. Stuttgart: Ed. Enke. 2000. 150p.

TAYLOR, S. R.; MCLENNAN, S. M. *The Continental Crust:* Its Composition and Evolution. Oxford: Blackwell Scientific Publication. 1985. 312p.

VAN DER MAREL, H. W.; BEUTELSPACHER, H. *Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their Admixtures*. Amsterdam: Elsevier. 1976. 396p.

VORTISCH, W.; HARDING, D.; MORGAN, J. Petrographic analysis using cathodoluminescence microscopy with simultaneous energy-dispersive X-ray spectroscopy. *Mineralogy and Petrology*, v. 79. p. 193-202. 2003.

WIEBE, R.A.; WARK, D.A.; HAWKINS, D.P. Insights from quartz cathodoluminescence zoning into crystallization of the Vinalhaven granite, coastal Maine. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, v. 154. p. 439-453. 2007.

WOLLAERT, E.; VOCHTEN, R.; LANDUYT, J. V. Characterisation of gem opal and inferior qualities by means of electronmicroscopy. *Zeitschrift der Deutschen Gemmologischen Gesellschaft*, v. 39. p. 211-223. 1990.