

Série Rochas e Minerais Industriais

As Opalas do Piauí

**Érico Rodrigues Gomes
Marcondes Lima da Costa
Francisco Wilson Hollanda Vidal
Agnaldo Francisco de Freitas Filho**

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

As Opalas do Piauí

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Luciana Santos

Ministra de Estado

Luis Manuel Rebelo Fernandes

Secretário Executivo

Isa Assef dos Santos

Subsecretaria de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Silvia Cristina Alves França

Diretora

Robson Araujo D'Avila

Coordenador de Administração - COADM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Paulo Fernando Almeida Braga

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Marisa Nascimento

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIALIS

ISSN 1518-9155

SRMI - 36

As Opalas do Piauí

Érico Rodrigues Gomes

Geólogo, M.Sc em Geologia e Geoquímica. D.Sc em Geografia.
Professor e Pesquisador IFPI. Coordenador do APL da Opala.

Marcondes Lima da Costa

Geólogo e Professor Titular da UFPA.

Francisco Wilson Hollanda Vidal

Engenheiro de Minas D. SC em Engenharia Mineral pela
Universidade de São Paulo.

Agnaldo Francisco de Freitas Filho

Geólogo, M.Sc. em Geologia pela Universidade Federal do Ceará.

CETEM/MCTI

2025

SÉRIE ROCHAS E MINERAIS INDUSTRIAIS

Editor: Luiz Carlos Bertolino

Subeditor: Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

CONSELHO EDITORIAL: Fernanda Arruda Nogueira (IQ-UFRJ), Luis Lopes (Universidade de Évora – Portugal), Raimundo Humberto Lima (UFAM), Rogério Pinto Ribeiro (USP), Thiago Motta Bolonini (UFES), Victor Salgado Campos (UFF), Werlen Holanda dos Santos (UERJ).

A Série Rochas e Minerais Industriais publica trabalhos nas áreas de rochas ornamentais, minerais industriais, agrominerais e gemologia. Tendo como objetivo principal difundir os resultados das investigações técnico-científicas decorrentes de pesquisas desenvolvidas no CETEM e em Instituições de Pesquisas da área.

The Rocks and Industrial Minerals Serie publish works in the areas of ornamental rocks, industrial minerals, agrominerals and gemology. With the main objective of disseminating the results of technical-scientific investigations resulting from research carried out at CETEM and at Research Institutions in the area.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Todos os direitos reservados.

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte e atribuídos os devidos créditos. (Lei n. 9.610, de 19/2/1998).

Valéria Cristina de Souza
Diagramação e Editoração Eletrônica

André Luiz Costa Alves
Projeto Gráfico

Informações:

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Homepage: www.cetem.gov.br

CIP – Catalogação na Publicação

062

As Opalas do Piauí / Érico Rodrigues Gomes ... [et al.]. – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2025.
69 p. - (Série Rochas e Minerais Industriais; 36).

ISBN 978-65-5919-090-4

1. Mineralogia. 2. Gemologia. 3. Opala preciosa e de fogo.
I. Gomes, Érico Rodrigues. II. Costa, Marcondes Lima da. III. Vidal,
Francisco Wilson Hollanda. IV. Freitas Filho, Agnaldo Francisco
de. V. Série.

CDD 549.636

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
1 INTRODUÇÃO	11
2 AS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS DE OPALA NO ESTADO DO PIAUÍ	13
3 GEOLOGIA DA OPALA DO PIAUÍ	14
3.1 Principais Garimpos e Minas das Opalas de Pedro II e Buriti dos Montes	17
3.1.1 Mina e Garimpo do Boi Morto	17
3.1.2 Garimpo da Roça	20
3.1.3 Garimpos do Mamoeiro e do Pajeú	22
3.1.4 Garimpos do Bom Lugar, Centro e Limão	23
3.1.5 Garimpo da Tranqueira	24
4 GÊNESE DAS OPALAS DO PIAUÍ	26
4.1 O Ambiente Hidrotermal	28
5 GEMOLOGIA DAS OPALAS DO PIAUÍ	32
5.1 Características Gemológicas	32
5.2 Tratamentos em Opalas	37
5.3 Opalas Compostas	38
6 CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS OPALAS DO PIAUÍ	40
6.1 Cristalinidade Segundo Difração de Raios X – DRX	40

6.2 Comportamento Espectroscópico por FTIR	41
6.3 Comportamento Termo-Gravimétrico	42
7 OUTRAS PROPRIEDADES DAS OPALAS DO PIAUÍ	
7.1 Índice de Refração e Densidade	44
7.2 Dureza das Opalas	44
7.3 Fluorescência	45
7.4 Micromorfologia e Jogo de Cores sob Microscopia Óptica	45
7.5 Micromorfologia sob Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV	48
8 CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS OPALAS DO PIAUÍ	50
9 INCLUSÕES MINERALÓGICAS	52
9.1 Classificação Temporal das Inclusões encontradas nas Opalas Laranjas	58
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

RESUMO

Esta publicação apresenta o estado da arte das opalas encontradas em Pedro II e Buriti dos Montes, no estado do Piauí. Os capítulos foram definidos baseados na experiência dos autores, complementado com informações de pesquisas publicadas na literatura científica. Aborda de forma didática, a geologia das principais minas e garimpos e a gênese destas gemas. Apresenta as características gemológicas, conceitos e a fascinante classificação da opala. Há ainda, um resumo das principais características mineralógicas, químicas, além de suas inclusões, que irão contribuir na definição da Certificação de Origem (o DNA desta gema) - pesquisa em desenvolvimento - parceria do APL da Opala com o *Gemological Institute of America (GIA)*, desvendando a beleza e mistérios, indescritíveis aos olhos humanos, que encantam desde rainhas de Estado a um simples garimpeiro dos “bamburros” de opalas em Pedro II.

Palavras-chave

Mineralogia, gemologia, opala preciosa e de fogo.

ABSTRACT

This publication presents the state of the art of opals found in Pedro II and Buriti dos Montes, in the state of Piauí. The chapters were outlined based on the authors' experience, complemented with research information published in scientific literature. In a didactic manner, it addresses the geology of the major mines and prospecting sites and the genesis of these gems. It presents the gemological characteristics of opal, its concepts, and its fascinating classification. There is also a summary of its main mineralogical and chemical characteristics, in addition to its inclusions, which will all contribute to defining its Certification of Origin (this gem's DNA) - an ongoing research in development - a partnership between the Opal APL and the Gemological Institute of America (GIA), unveiling the beauty and mysteries, indescribable to the human eye, that captivate everyone from queens and heads of state to humble prospectors of opal "bamburros" in Pedro II.

Keywords

Mineralogy, gemology, precious and fire opal.

1 | INTRODUÇÃO

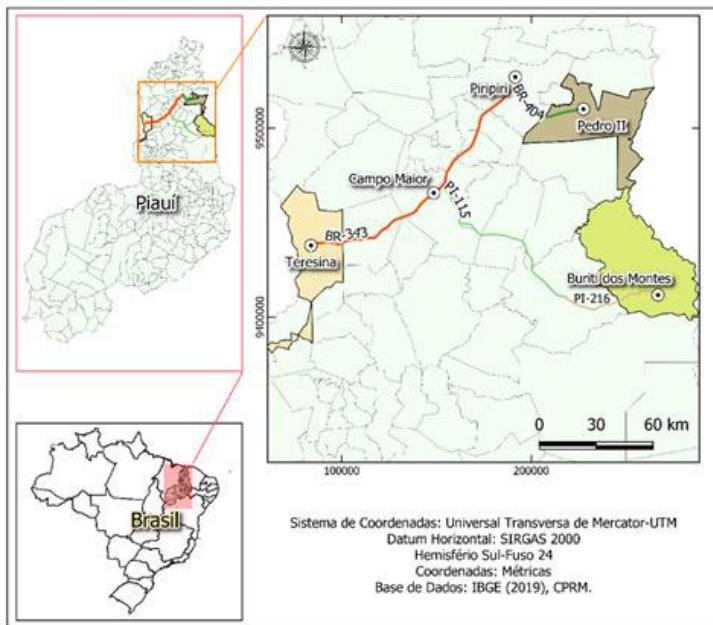
A opala é uma gema que em seu nome, já carrega nobreza e mistério, tendo origem no termo *upala*, que significa pedra preciosa, do sânscrito, a língua sagrada dos antigos sacerdotes hindus. É a mais bela de todas as gemas, apresentando uma combinação de cores, única em cada espécime.

A beleza da opala tem exercido fascínio nas pessoas através da história das civilizações, encantando a todos, como demonstrado através do acervo de estátuas de deuses, artefatos arqueológicos e joias, quenianos, gregos, romanos, egípcios, aborígenos australianos, astecas e de diversas dinastias reais europeias.

No Brasil, no estado do Piauí, no município de Pedro II, estão localizadas as principais minas e garimpos produtores de opalas preciosas, com os primeiros requerimentos de pesquisa no Ministério das Minas e Energia, registrados na década de 1940 (GOMES, 2022a, Figura 01).

Atualmente encontra-se em execução o APL DA OPALA DO PIAUÍ – SUSTENTABILIDADE DO GARIMPO À JÓIA, com recursos aprovados na Chamada CNPq/CT- Mineral N° 28/2022 – PD&I, Gestão e Extensão Tecnológica, Infraestrutura Laboratorial, Capacitação e Formação de RH para Mineração e Transformação Mineral em Micro, Pequena e Média Escala. A Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado do Piauí – FAPEPI, também apoia esta ação através do PROJETO “APL DA OPALA – SUSTENTABILIDADE & INOVAÇÃO”, contando com profissionais do Instituto Federal do Piauí (IFPI) campus Teresina Central, IFPI campus Pedro II, IFPI campus Paulistana, IFPI campus Valença, Secretaria Estadual de Desenvolvimento Econômico (SDE), Invest Piauí, Universidade Estadual do Piauí – UESPI, Universidade Federal do Ceará (Campus de Crateús),

Universidade Federal do Pará, Universidade Federal de Pernambuco, SEBRAE, Serviço Geológico do Brasil (SGB), Prefeitura de Pedro II, Associação de Joalheiros e Lapidários de Pedro II – AJOLP, Cooperativa de Garimpeiros de Pedro II e Kolping Piauí.



Fonte: Gomes et al., 2022b.

Figura 1. Mapa de Localização dos municípios e respectivas sedes de Pedro II, Buriti dos Montes e Teresina no Piauí.

2 | AS PRINCIPAIS OCORRÊNCIAS DE OPALA NO ESTADO DO PIAUÍ

As ocorrências de opalas no Piauí estão relacionadas à zona de contato entre rocha ígnea e sedimentares, as soleiras de diabásios das formações Mosquito e Sardinha, estratigraficamente alojadas na base e em porções intermediárias dos arenitos, siltitos e argilitos do Grupo Serra Grande e das formações Cabeças e Poti.

A opala com jogo de cores é encontrada em Pedro II, enquanto as ocorrências de opalas sem jogo de cores, foram registradas 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, Picos, Piripiri, São Félix do Piauí, São Miguel dos Tapuios, Tanque e Várzea Grande, sendo as mais importantes e conhecidas aquelas localizadas em Buriti dos Montes.

Associada a essas opalas ocorrem diversas variedades de quartzo (hialino, ametista, citrino, esfumaçado, morion e leitoso), tendo destaque as ametistas encontradas nos municípios de Batalha, Esperantina, Cocal e Castelo do Piauí, além da calcedônia em Nazaré do Piauí (COSTA et al., 2016; QUEIROZ et al., 2019).

3 | GEOLOGIA DA OPALA DO PIAUÍ

A região de Pedro II e Buriti dos Montes, assim como as demais ocorrências de opalas estão geologicamente situadas na Bacia Sedimentar do Parnaíba. As unidades estratigráficas diretamente relacionadas são representadas por rochas cujas idades variam desde o Siluriano até o Devoniano, englobando os Grupos Serra Grande e Canindé (composto pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti), além de intrusões básicas jurássicas e cretáceas, respectivamente as formações Mosquito e Sardinha (GÓES e FEIJÓ, 1994; VAZ et al., 2007. Figura 2).

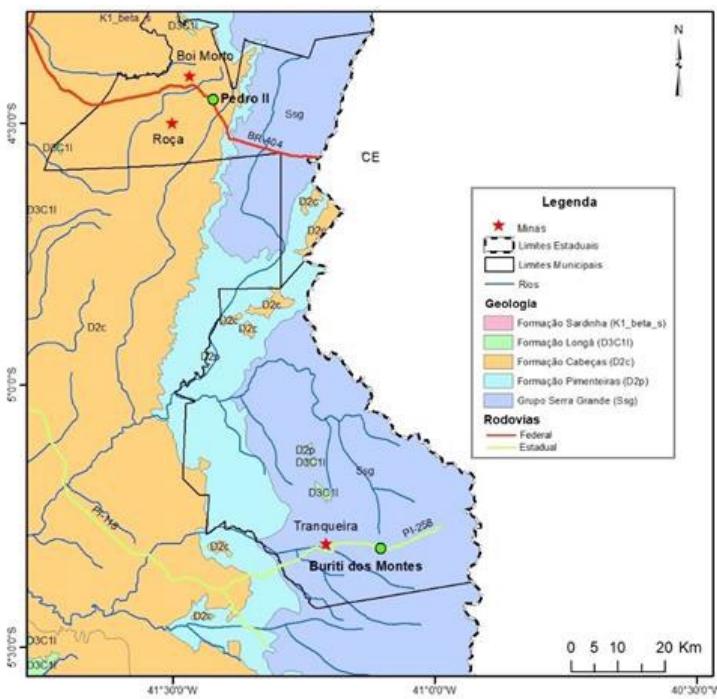
A Bacia do Parnaíba foi afetada por atividade magmática de caráter básico, essencialmente fissural, iniciada no final do Triássico até o Cretáceo, sendo que três pulsos magmáticos principais foram reconhecidos, os quais estariam representados por rochas ígneas básicas intrusivas e extrusivas, com idades variando entre 215 e 110 Ma (GÓES et al., 1992).

Segundo a SACHS et al., (2015), na área mineralizada com opala, foi cartografada apenas a Formação Mosquito, representada por grandes soleiras de diabásio. No garimpo da Roça, em Pedro II, foi coletada uma amostra desta rocha intrusiva básica na cava de um garimpo. A análise isotópica de cristais de zircão, foi datada com o método $206\text{Pb}/238\text{U}$, indicando uma idade de 203 ± 2 Ma.

Neste mesmo estudo, observou-se que o arranjo estrutural da região de Pedro II é marcado por três trends direções principais de fraturamento: NW-SE, NE-SW e aproximadamente E-W, sendo o primeiro o mais expressivo. Nas proximidades da mina do Boi Morto, no garimpo do Mamoeiro e na localidade de Cangulo, importantes ocorrências de opalas, foi observado σ1

com direção NW-SE, sugerindo-a como a direção principal das mineralizações em opalas, associadas à tectônica rúptil.

Regionalmente, a direção de fraturamento NE-SW está associada ao Lineamento Sobral-Pedro II, enquanto a direção NW-SE com o lineamento Picos-Santa Inês, ambos reativados diversas vezes ao longo de sua história geológica, controlaram o arcabouço estrutural e sedimentar da Bacia Sedimentar do Parnaíba.



Fonte: Gomes et al. (2022b).

Figura 2. Mapa geológico, destacando os arenitos do Grupo Serra Grande e da Formação Cabeças, hospedeiros das opalas encontradas respectivamente em Buriti dos Montes e Pedro II, com a localização dos principais garimpos deste mineral.

Para Gomes e Costa (1994), as rochas básicas localizam-se preferencialmente alojadas nos contatos entre arenitos e siltitos, resultantes dos efeitos de separação das placas Sul Americana e Africana, quando se desenvolveu um significativo processo magmático hipoabissal nos períodos Triássico e Eo-Cretáceo.

Os arenitos pertencentes ao Grupo Serra Grande e à Formação Cabeças, sobrepostos à soleira de diabásio, estão silicificados, muito fraturados e falhados tanto pela tectônica rúptil como resultantes dos esforços do *emplacement* da soleira de diabásio e de um intenso fraturamento hidráulico, controlando os veios de opala, calcedônia e quartzo.

A opala de Pedro II é encontrada nos arenitos, siltitos, folhelhos, diabásios e albititos, ocorrendo na forma de veios e vênulas, e ocorre associada com calcedônia, quartzo, pirita, esmectita e finos cristais de turmalina negra, de forma que a presença destes minerais, principalmente em zonas de fratura, pode servir de guia na prospecção da opala. E as ocorrências de opalas na região do município de Buriti dos Montes são encontradas em veios e vênulas hospedados nos arenitos do Grupo Serra Grande.

A partir do modo de ocorrência das opalas, é possível caracterizar dois tipos de depósitos: os primários e os secundários (eluviais e aluviais).

Os depósitos primários constituem todos aqueles que ocorrem preenchendo fraturas, falhas geológicas e brechas hidráulicas, principalmente no contato entre siltitos ou arenitos ou argilitos com o diabásio. A recuperação da opala é bastante difícil devido à elevada silicificação dos arenitos, tornando-os muito duros, e por muitas vezes localizar-se em níveis profundos, de difícil acesso. Destacam-se como exemplos de depósitos primários, a mina do Boi Morto e os garimpos do Limão, Mamoeiro e Roça

(em Pedro II). Em Buriti dos Montes, as principais mineralizações de opalas estão nos arredores do povoado Tranqueira, onde ocorrem importantes veios de opala laranja e quartzo.

Os depósitos secundários são originados a partir da erosão dos depósitos primários, cujo material foi transportado por meio das águas pluviais para o leito dos cursos de água. Formam depósitos irregulares e heterogêneos, repousando em discordância erosiva sobre a soleira do diabásio, em geral parcialmente intemperizado. O garimpo da Roça é um exemplo típico de depósito secundário, e está localizado no vale do rio Corrente, em Pedro II.

3.1 | Principais Garimpos e Minas das Opalas de Pedro II e Buriti dos Montes

Em termos históricos e de importância pela quantidade e qualidade das opalas, destacam-se os garimpos do Boi Morto, Roça, Mamoeiro, Centro, Limão, Pajeu e Bom Lugar, dentre dezenas de garimpos de opalas da região de Pedro II, enquanto em Buriti dos Montes, os garimpos localizados no entorno do povoado Tranqueira, descritos a seguir:

3.1.1 | Mina e Garimpo do Boi Morto

As opalas de Boi Morto foram encontradas no início da década de 1940 na localidade Crispim, pelo agricultor Francisco Silvino Mendes, enquanto arava a terra para a lavoura. A opala estava na superfície, em meio ao colúvio formado pelos blocos e matacões de arenitos, sustentados por uma matriz arenosa, entre o sopé da encosta da serra do Boi Morto e o vale fértil do rio dos Matos.

Ao ter a atenção desviada pela faísca colorida que brilhava no solo, pegou um fragmento e guardou em casa. Dias depois, exibiu a descoberta ao intendente municipal, o farmacêutico Lauro Cordeiro Brandão. Este, aproveitando uma viagem para o Rio de Janeiro, capital federal, levou um lote de pedras coloridas e mostrou numa loja, sendo identificadas como opalas.

Ao retornar para Pedro II, comentou a descoberta com o proprietário da terra, mas este não demonstrou interesse. Então apresentou a novidade para João Pinheiro Santos, comerciante de fios para tecelagem, que vislumbrou trabalhar com minérios. Decidiram arrendar a propriedade e iniciar a pesquisa e lavra de modo rudimentar.

Formalizaram o primeiro registro de área em Pedro II, com o requerimento de 40 hectares nos locais Almas e Revedor, com o protocolo no ano de 1944 e publicação do Decreto N° 17.615, de 18 de janeiro de 1945 no Diário das Leis, titulada em nome de Lauro Cordeiro Brandão. Posteriormente João Pinheiro adquire todos os direitos minerários da área e a explora por alguns anos.

Em 1958, Raimundo Daltro Galvão (“Mundote”) e Manoel Nogueira Filho (“Nogueirinha”) se associam com João Pinheiro na operação do garimpo. Em 22 outubro de 1959, formalizam a operação através de um contrato registrado em cartório. Investem e aumentam o garimpo, abrindo novas frentes de lavra tanto na encosta, a céu aberto, como em galerias rudimentares, seguindo os veios de opalas encaixados nos arenitos fraturados e brechados da Serra do Boi Morto.

Regularmente viajavam e/ou recebiam visita de compradores da capital federal. Em 1 de agosto de 1962, os direitos sobre a área foram cedidos para a empresa EMIBRA – Empresa de Minérios Brasil Norte-Nordeste Ltda, com sede na cidade do Rio de Janeiro

(RJ), representada pelo Sr. Nilzo Lacerda Barbosa, marcando o início da extração e comércio de opalas sob o domínio de empresários de fora de Pedro II. ´

Em junho de 1966, foi aprovado o Relatório Final de Pesquisa, com uma reserva indicada de 9.000 kg e inferida com 50.000kg de opalas, com publicação do Decreto de Lavra 61.470 no DOU, no dia 10 de outubro de 1967.

Desde o começo dos anos da década de 1970, até meados dos anos de 1980, a mina passa a ser administrada por empresários de origem australiana, que mecanizaram a operação, inicialmente com lavra a céu aberto e depois lavra subterrânea.

Os níveis mineralizados com opala formam dois conjuntos segundo os modos de ocorrência: a superior, em rochas sedimentares, com opalas preenchendo feições rúpteis como vênulas, veios e brechas nos arenitos médios e grossos, frequentemente silicificados e nos argilitos vermelhos; a outra zona mineralizada é formada pelas argilas de alteração hidrotermal do diabásio e no próprio diabásio, com as opalas preenchendo as fraturas, localmente disseminada entre os interstícios e cimentando a brecha (Figura 3).

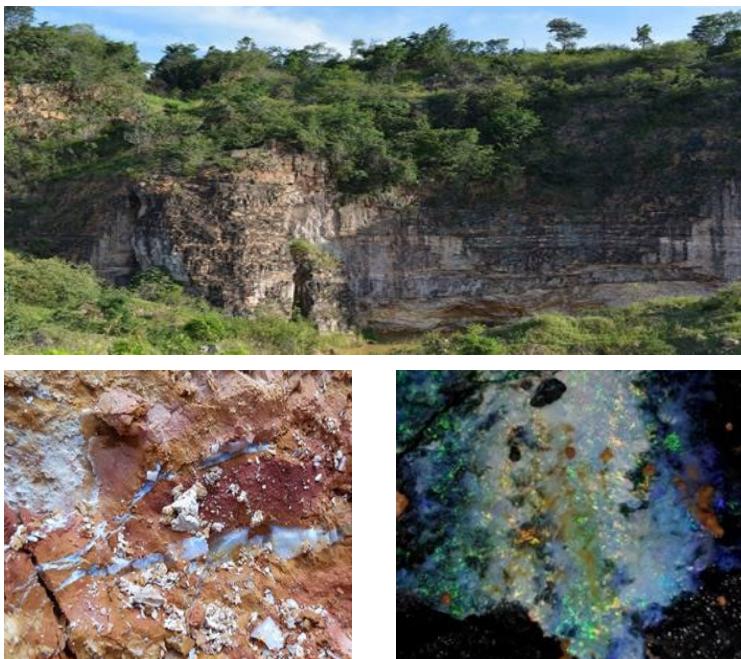


Figura 3. Acima, a frente de lavra da mina do boi Morto. Em baixo, a esquerda, argilito vermelho com veios e vênulas centimétricas, preenchidos com opala. À direita, opala cimentando brecha no topo da soleira de diabásio.

3.1.2 | Garimpo da Roça

A descoberta da opala na localidade Roça ocorreu no ano de 1960. Teria sido em uma olaria, durante a retirada de uma argila branca usada no fabrico artesanal de ladrilhos e telhas. Levaram as opalas para a cidade e mostraram ao senhor Raimundo Daltro Galvão, empresário que atuava no garimpo do Boi Morto. Este imediatamente procurou comprar o imóvel e logo iniciou a

escavação, encontrando grandes quantidades de opalas quase na superfície do solo e no leito raso do rio Corrente, em meio à aluvião.

Durante mais de 20 anos, o garimpo se restringiu ao aluvião encontrado no vale do rio Corrente. A partir do final da década de 1980, foram descobertos veios na porção superior da soleira de diabásio. Foi quando o garimpo passou a priorizar a mineralização primária.

A lavra garimpeira inicia na fácie arenosa do aluvião, aflorante, gradando para uma fácie conglomerática, basal, sustentada pelos blocos e matações de arenitos e diabásios, com matriz arenosa contendo seixos de opala, quartzo e calcedônia. Esta mineralização secundária está em discordância erosiva ao topo da soleira de diabásio. Após a extração do aluvião, os garimpeiros buscam a mineralização primária no diabásio.

Atualmente ainda ocorrem garimpos com desmonte hidráulico, mas esta atividade passa por um processo de mecanização, com desmonte das rochas sedimentares até a exposição do topo da soleira do diabásio, onde ocorrem as maiores concentrações de opala, preferencialmente, nas faixas mais fraturadas e brechadas, na forma de veios e bolsões de opalas, chamados pelos garimpeiros de “ninhadas”, de onde são extraídas as opalas preciosas (Figura 4).



Figura 4. Vista de uma frente de lavra do garimpo da Roça.

3.1.3 | Garimpos do Mamoeiro e do Pajeú

Em Mamoeiro e Pajeú as opalas preciosas se concentram em brechas, veios e vênulas no arenito, na zona argílica, resultante da alteração hidrotermal da soleira básica e no diabásio.

O alvo principal dos garimpeiros é chegar ao contato desta zona argílica com o diabásio (denominado de “laje”), uma vez que aí se encontra a zona mais rica em opalas. Ao encontrar as opalas, as pepitas são retiradas por cata manual e os fragmentos de menor granulometria são lavados, quando ocorre a recuperação das opalas menores (Figura 5).



Foto: SACHS et al., (2015).

Figura 5. Garimpo do Mamoeiro, com pacote de rochas sedimentares em tonalidades laranja, sobrepostos ao nível argiloso, avermelhado, na base do perfil.

3.1.4 | Garimpos do Bom Lugar, Centro e Limão

Os garimpos do Bom Lugar, Centro e Limão apresentam características geológicas similares. As opalas são encontradas em bolsões, geralmente entre 1 e 3 metros de profundidade, em uma zona onde o arenito se encontra modificado por um denso sistema de fraturas e brechas, alinhados nas direções predominantes Leste-Oeste e Nordeste-Sudoeste (Figura 6).



Figuras 6. Garimpo do Limão, destacando o denso fraturamento do arenito, com direção geral Leste-Oeste. A camada fraturada tem 2,0m de espessura.

3.1.5 | Garimpo da Tranqueira

Garimpo localizado na zona rural do município de Buriti dos Montes, onde são encontradas opalas laranjas, sem jogo de cores. Nas ocorrências primárias, principal modo de apresentação, a opala está na forma de vênulas e veios. As vênulas normalmente têm 0,4 cm de espessura enquanto os veios possuem espessura de 3,0 cm, com comprimento variável entre 5,0 e 20,0 cm. Localmente, um conjunto de veios paralelos, com aproximadamente 300m de comprimento, são controlados por lineamentos com direção geral NW-SE. Destaca-se, em comum entre as vênulas e o veio, a presença da opala laranja (Figura 7).

Associados à opala, encontram-se quartzo, calcedônia, barita, hematita (e/ou goethita). Há uma zonação com os cristais de quartzo nas paredes em contato com o arenito e a opala preenchendo a porção central do veio. Pode ocorrer hematita ou goethita, que estão localizadas entre os cristais de quartzo e a opala ou recobrindo parcialmente a base dos cristais de quartzo ou, principalmente, formando concreções entre o dique aplítico e o arenito encaixante. Na região são encontrados ainda veios de ametista.



Fonte: Gomes (2002).

Figura 7. Vista lateral do morrote que contém os principais veios de opalas laranjas, encaixados nos arenitos do grupo Serra Grande.

4 | GÊNESE DAS OPALAS DO PIAUÍ

Os diversos estudos que apresentam hipóteses para a formação das opalas encontradas no estado do Piauí, estão reunidos em dois grupos distintos: há aqueles que propõe uma origem similar às opalas australianas, com percolação de água meteórica através do arenito, dissolução da sílica e acumulação desta na zona próxima à soleira básica, que teria atuado como uma armadilha impermeável para a sílica, promovendo a sua concentração e posterior precipitação da opala. O outro grupo propõe que a origem da opala estaria relacionada a existência de um ambiente hidrotermal ativado pela intrusão do magma formador das soleiras básicas, responsável pelo aquecimento das águas contida nos poros do arenito, o que teria desenvolvido células de convecção de fluidos. Estas desestabilizaram os silicatos do arenito e diabásio, liberando a sílica que viria a precipitar como opala, alojando-se nas fraturas, falhas e brechas, no contato entre os arenitos com siltitos ou argilitos ou diabásio. Dentre os diversos estudos sobre esta temática, destacam-se:

Nem & Urbano Filho (1974) que postulam que as opalas seriam resultantes da precipitação das soluções finais do diabásio.

Estudando as opalas de Pedro II, Oliveira et al. (1979) sugerem que o diabásio possa ter funcionado como um *trap* impermeável e que as águas subterrâneas promoveram a dissolução da sílica dos silicatos do próprio diabásio, liberando sílica e a depositando ao longo das fraturas durante flutuações climáticas.

Bartoli et al. (1983) propuseram que a origem das opalas de Pedro II seria diretamente relacionada à circulação de águas quentes ligada ao *emplacement* do *sill* de diabásio ou que estejam associadas a uma migração da sílica a partir de uma antiga superfície laterítica.

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.

Segundo Rosa (1988), duas hipóteses podem ser consideradas sobre a fonte de sílica para a formação das opalas na região de Pedro II: circulação das águas quentes ligadas à colocação dos diabásios, com subsequente dissolução das rochas quartzosas ou a circulação das águas superficiais ligadas à alteração meteórica das rochas sedimentares. A concentração de opalas nobres seria 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.

Gomes (1990) propôs a atividade hidrotermal, sugerindo que a opala está associada a um ambiente hidrotermal relacionado à intrusão dos diabásios nas rochas siliciclásticas da Formação Cabeças (na região de Pedro II), desestabilizando os silicatos e liberando a sílica para a solução, vindo a precipitar como opala.

Gomes & Costa (1994) reforçam que a origem das opalas de Pedro II seja hidrotermal, em que o *emplacement* do diabásio foi o agente térmico, enquanto as rochas sedimentares, bem como o próprio diabásio, foram as rochas hidrotermalizadas fontes da sílica e receptoras da mineralização. A presença de arenitos com metamorfismo termal (*hornfels*), as texturas venular e brechóide, a alteração do diabásio em massas de esmectita, tremolita-actinolita,

clorita, serpentina, albita, carbonato, epidoto, sericita, argilominerais, titanita e minerais opacos, típicos de ambiente hidrotermal, evidenciam a origem hidrotermal das opalas.

Baseados em análises de inclusões fluidas, composição mineralógica e química das opalas e suas inclusões sólidas, Marques et al., (2015), afirmam que o ambiente hidrotermal formador das opalas é resultante da intrusão básica que aqueceu a água contida nos arenitos encaixantes, passando a solubilizar parcialmente os silicatos pré-existentes, liberando sílica e cátions de Ca, Ba, Sr, Fe, Mn e outros, migrando através de fraturas hidráulicas e/ou tectônicas, onde precipita a opala.

Para Vidal et al., (2018), o diabásio teria funcionado como *trap* impermeável para as águas subterrâneas, promovendo a dissolução da sílica do arenito e do próprio diabásio. A precipitação da opala seria controlada pelas oscilações climáticas.

Gomes (1990), Gomes & Costa (1992; 1994; 2001a, 2001b, 2007), Gomes (2002), Marques et al., (2013; 2015), Sachs et al., (2015), Gomes et al., (2022a) sustentam que a gênese da opala na região de Pedro II, está associada a um ambiente hidrotermal relacionado à intrusão dos diabásios nas rochas siliciclásticas da Formação Cabeças. Estas rochas, sob ação hidrotermal, teriam tido seus silicatos desestabilizados, liberando a sílica que formou a opala.

4.1 | O Ambiente Hidrotermal

O calor do magma intrusivo aquece a água existente nos poros do arenito, desenvolvendo células de convecção de fluidos que vão interagir com os grãos de quartzo da areia, constituintes desta rocha sedimentar, dissolvendo-os e/ou aprisionando-os como

inclusões. Pode ter ocorrido uma contribuição em menor escala, de fluido relacionado ao estágio final de cristalização do diabásio (Figura 8).

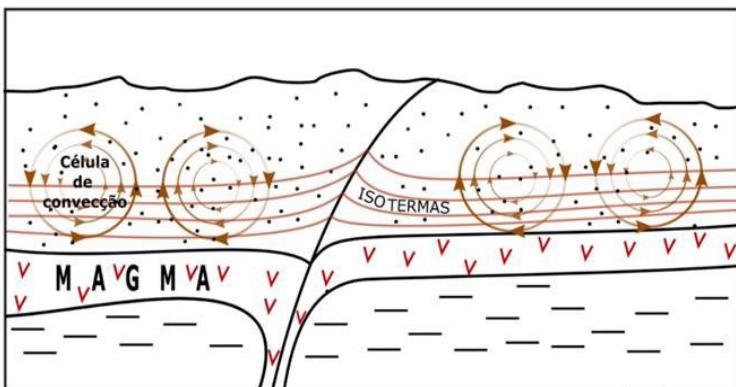


Figura 8. Representação esquemática da intrusão do magma na base do arenito, aquecendo os fluidos existentes na rocha sedimentar, com desenvolvimento de células de convecção de fluidos hidrotermais. As linhas paralelas ao topo da soleira do magma são as isotermas que dispersam o calor para a rocha hospedeira (GOMES, 2022a).

A circulação de fluidos aquecidos provoca uma brechação, favorecendo uma maior interação química com os minerais constituintes das rochas. Evidências de campo e laboratório, indicam que houve a formação de uma assembleia de minerais típicos de ambiente hidrotermal, refletindo as novas condições de temperatura, pressão, composição química e mineralógica das rochas envolvidas, a composição química do fluido e o tempo necessário para o equilíbrio (Figura 9).

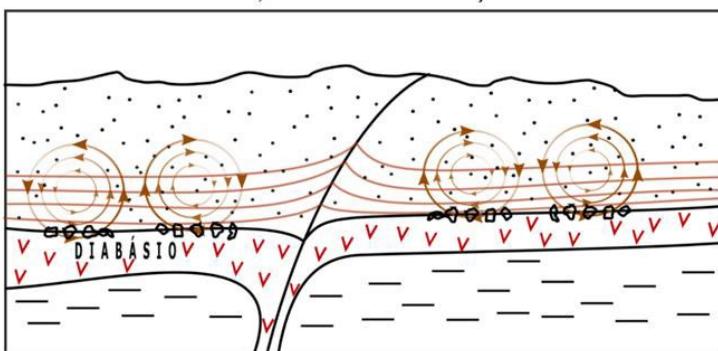


Figura 9. Brechação hidráulica nos arenitos e contato das rochas sedimentares com a soleira de diabásio, intensificando a alteração hidrotermal (GOMES, 2022a).

A mineralogia primária do diabásio foi desestabilizada e alterada, em que a augita deu origem a tremolita-actinolita, hornblenda, titanita, alguma biotita e clorita, com exsudação de opacos; olivina à serpentina. Contemporaneamente, tem lugar a saussuritização do plagioclásio, com geração de carbonato, epídoto, sericita e albita. Esta última, associada com a titanita e turmalina, originaram o albitito, contendo opala disseminada entre os cristais de albita, vindo a alojar-se em fraturas e brechas; e a formação de calcedônia e quartzo, ocorrendo junto com a opala.

Ao final desse processo, tanto nos arenitos como na rocha ígnea, o balanço geoquímico libera sílica para o fluido, torna-o saturado, perde calor, precipita nas fraturas e brechas existentes, formando a opala, quartzo e calcedônia (GOMES, 1990; GOMES, 2002; GOMES & COSTA, 2001a; MARQUES et al., 2013, 2015; Figura 10).

Esta assembleia de minerais hidrotermais, por ser característica da fácie albita-epidoto “hornfels”, utilizada como geotermômetro e geobarômetro. Em função destes parâmetros, acredita-se que a temperatura reinante durante este processo hidrotermal, seria da ordem de 300°C, com pressão em torno de 1 kbar.

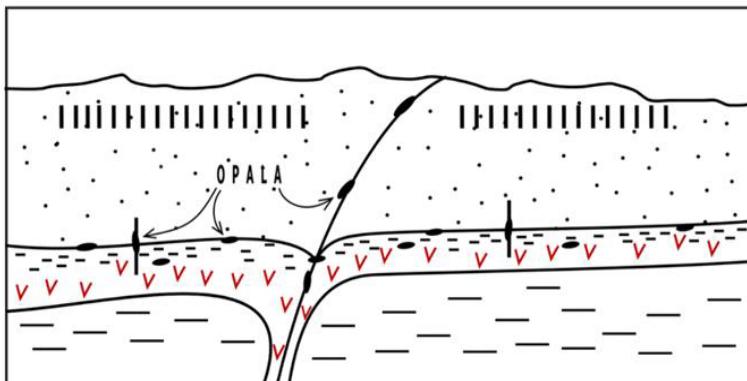


Figura 10. Com o resfriamento do sistema hidrotermal, ocorreu a precipitação da opala nas fraturas do arenito relacionadas com o Lineamento Transbrasiliano; em fraturas no diabásio; entre as rochas sedimentares e o diabásio e; entre a fácie alterada do diabásio e a rocha sã (GOMES, 2022a).

5 | GEMOLOGIA DAS OPALAS DO PIAUÍ

5.1 | Características Gemológicas

A caracterização gemológica das opalas foi realizada no Laboratório de Pesquisas Gemológicas do Centro de Tecnologia Mineral (CETEM) e Laboratórios de Mineralogia e o de Microanálises, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará. Aos que desejarem se aprofundar no assunto, recomenda-se a leitura dos relatórios depositados na biblioteca do CETEM e as referências relacionados na bibliografia complementar deste Livro.

A opala, é formada por sílica hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot \text{nH}_2\text{O}$), amorfa a criptocristalina, em que o percentual de água em peso pode chegar a até 31%, densidade variável entre 1,97 a 2,22 g/cm³ e dureza na escala de *Mohs* entre 5,5 a 6,5, transparente a translúcida.

A opala é classificada conforme os seguintes atributos:

- Se é natural;
- A presença ou ausência do jogo de cores;
- A tonalidade do corpo (*body tone*) ou cor básica ou cor de fundo (*background color*) ou cor do corpo (*body color*) ou cor da massa opalina;

O primeiro ponto da classificação de uma opala, é se o exemplar em avaliação é uma **opala natural**. Em não sendo, poderá ser sintética, imitação ou simulante, tratada ou ainda composta.

Sendo uma opala natural, observar se apresenta **jogo-de-cores** (*play of colour*). O jogo de cores da opala é um efeito óptico, que pode ser explicado pelo conjunto regular, homogêneo, ordenado,

tridimensional, de nanoesferas de sílica amorfa com tamanhos entre 150 nm a 300 nm (Jones et al., 1964; Sanders, 1964; Darragh et al., 1966; Jones, 1975; Ward, 2000; Jiang et al., 2001; Gaillou et al., (2008; 2008a), observado apenas com auxílio de microscópio eletrônico de varredura com boa resolução, que difratam a luz natural,

Tendo jogo-de-cores, a opala é denominada de **opala preciosa**, como exemplo, as opalas encontradas em Pedro II. Na ausência do jogo de cores, é uma **opala comum**, como exemplo, a opala laranja encontrada em Buriti dos Montes. A grande importância da opala preciosa encontrada em Pedro II se dá pelo fato destas serem tão belas quanto as similares encontradas na Austrália, confundindo-se com as mesmas no mercado mundial. Mas com um importante diferencial, a sua comprovada qualidade gemológica, o que a torna tão cobiçada por colecionadores, lapidários e indústria de joias.

A opala preciosa pode exibir em seu jogo-de-cores, todas as cores do espectro visível, as quais dançam sobre a superfície da gema, característica apreciada na joalheria. A cor básica, é relacionada com a presença de inclusões mineralógicas como paligorsquita, crisocola e oxi-hidróxidos de Fe que atuam como cromóforos (GAILLOU et al., 2008).

Os principais tipos de **opalas preciosas** encontradas em Pedro II são as opalas clara (*light opal*), cristal e opala na rocha (*opal on host rock*). A opala negra é muito rara. Há também opala tratada por carbonização e as opalas compostas (dublets, triplets e mosaicos), descritas a seguir:

Opala clara (*light opal*): opala translúcida com cor base branca ou outras cores em tonalidades claras, exibindo jogo-de-cores. É a mais encontrada em Pedro II (Figura 11);

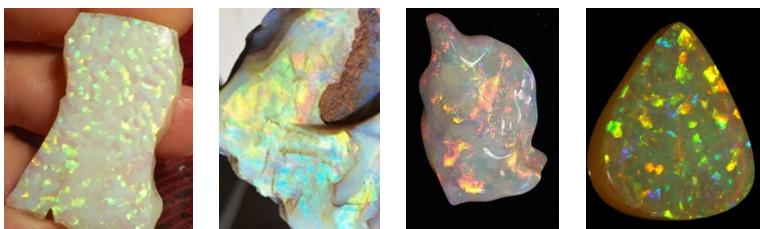


Figura 11. Exemplares de opala preciosa de Pedro II.

Opala cristal: exibe jogo de cores sobre uma base transparente. Frequentemente encontrada em Pedro II, principalmente em fraturas e brechas no arenito (Figura 12).



Figura 12. Opala cristal. Da esquerda para a direita, as opalas são provenientes dos garimpos da Barra, Mamoeiro, Roça e Limão.

Opala negra: opala translúcida apresentando cor básica preta (ou tonalidades escuras de cinza ou azul ou verde ou marrom), destacando o jogo-de-cores em sua superfície, dando-lhes mais definição e beleza.

Opala matriz (*opal in host rock*): a opala ocorre disseminada na rocha, preenchendo espaços entre os minerais que formam a rocha hospedeira da mineralização (Figura 13).

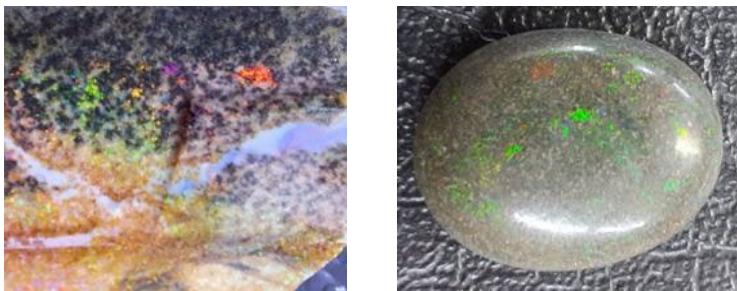


Figura 13. Opala matriz. Observar a opala disseminada na rocha. Amostras do garimpo do Boi Morto. Tamanho: 12,0 mm.



Figura 14. A esquerda, arenito com vênula de opala. A direita, opala na rocha, lapidação com o arenito. Amostras do garimpo do Boi Morto. Tamanho: 15,0 mm.

Os jogos-de-cores das opalas preciosas são classificados em padrões que tem a difícil missão de nomear a explosão de cores vistas no topo de cada cabochão. Os principais padrões identificados nas opalas de Pedro II, são *pinfire* (capotinha), *block*, *flagstone*, *jigsaw*, *flash fire*, *broad flash* (fogão), *tiger* (banda ou faixa), *ribbon*, *arlequim*, arlequim flag e *rolling flash* (GOMES et al., 2021: Figura 15).



Jigsaw, Roça, 4,0ct. *Ribbon*, Roça, 2,0 ct.. *Flash fire*, Roça, 18,0ct. *Tiger*, Centro, 23,0 ct

Figura 15. Padrões de jogo-de-cores *jigsaw*, *ribbon*, *tiger*, *flash fire*, em opalas preciosas dos garimpos de Pedro II. Na sequência: nome do padrão, garimpo onde foi encontrada e o peso em quilates. Fonte: Gomes et. al., 2021. Fotos cortesia da empresa *Brazil Opals*.

As cores básicas observadas nas opalas laranjas, apresentam o amarelo-claro água (*clear water*), amarelo-claro, amarelo, amarelo-laranja, laranja, laranja-avermelhado, vermelho, vermelho-escuro e vermelho-amarronzado (DOWNING, 1992). Também foram encontradas ocorrências de opalas na cor azul-claro e branca ou leitosa. Essas opalas, de um modo geral, têm boa transparência, sendo que as de cores vermelha escura e vermelho amarronzada são menos transparentes (Figura 16).



Fonte: Gomes (2002).

Figura 16. Fotografias das opalas de Buriti dos Montes, destacando a variação das cores desde o amarelo claro água ao vermelho amarronzado, em diversas lapidações facetadas e cabochões (escala: 2,0mm).

5.2 | Tratamentos em Opalas

O tratamento praticado em Pedro II é a **carbonização** da opala. A deposição de carbono nos poros de uma opala porosa, se dá pela imersão da gema em compostos ricos em carbono, como uma calda de açúcar, que ao ser aquecida sob pressão, induz a

impregnação do vapor carreado de carbono, nos poros superficiais da amostra, deixando preta a sua superfície, destacando o jogo-de-cores (Figura 17).

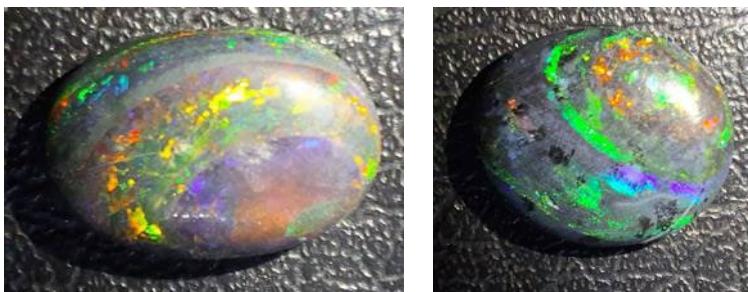


Figura 17. Opalas tratadas com a técnica da Carbonização. Amostras do garimpo do Boi Morto. Tamanho:15,0 mm

5.3 | Opalas Compostas

É uma opala colada manualmente a um substrato, proporcionando beleza e resistência ao espécime, classificada como opala *doublet*, opala *triplet* e opala *mosaico*.

- **Opala *doublet***: São formadas por duas camadas: a superior é uma opala com 1,0 mm de espessura colada sobre uma camada de diabásio ou ônix ou de uma opala comum ou outro material resistente e opaco que tem por objetivo simular uma cor básica escura ao conjunto e destacar o jogo de cores, dando uma aparência de uma opala negra (Figura 18).

- **Opala *triplet***: Possue três camadas. A superior é um vidro ou quartzo hialino convexo, lapidado como um cabochão, protejendo a segunda camada, formada por uma opala fina, polida e colada sobre uma base similar à usada na opala *doublet* (Figura 18).



Figura 18. A esquerda, *doublets* de opalas, tendo como base, uma placa de diabásio (Tamanhos: 12,0 a 18,0 mm). A direita, detalhe de um *triplet* formado por uma base de diabásio, camada central de opala e topo de vidro. Espessura: 6,0 mm.

- **Opala mosaico:** é uma composição produzida com pequenas peças de opala natural, cuidadosamente arranjadas e coladas com uma cola escura, sobre uma base de qualquer material, formando padrões geométricos, florais ou abstratos, resultando numa peça única, artesanal. Apresenta uma estrutura similar às opalas *doublet* e *triplet* (Figura 19).



Figura 19. Mosaicos de opalas formando os mapas do Piauí e do Brasil. Tamanho: 22,0 mm.

6 | CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DAS OPALAS DO PIAUÍ

6.1 | Cristalinidade Segundo Difração de Raios X – DRX

Rosa (1988) analisou 20 amostras de opalas preciosas de Pedro II. Todas são do tipo opala amorfa (opala A). O mesmo autor analisou 4 amostras de opalas comuns obtendo picos característicos de opala cristobalita-tridimita (opala CT). Gomes e Costa (1994) caracterizaram a opala preciosa como opala amorfa (A), apresentando uma banda larga e difusa, em torno de 4,04 Å. Silva (2007), realizou 14 análises por difração de raios X de opalas preciosas da mina do Boi Morto (Pedro II) e em opalas laranjas da mina Tranqueira (Buriti dos Montes). É possível constatar que todas as amostras que possuem jogo de cores são amorfas, enquanto a opala laranja da Mina Tranqueira, apresenta cristalinidade típica da opala CT.

As análises de DRX realizadas por Gomes (2002) e Marques et al., (2015), permitiram classificar as opalas laranjas de Buriti dos Montes como opala amorfa (opala A) e diversos estágios intermediários de cristalinidade, até opala cristobalita-tridimita (opala CT), com predomínio desta, segundo a classificação proposta por Flörke (1995). A opala A caracteriza-se por uma banda larga e difusa ($d=4,10\text{ \AA}$ / $4,12\text{ \AA}$); algumas opalas exibem estágios intermediários de cristalinidade até resultados onde estão individualizadas as principais distâncias interplanares da opala CT ($d=4,30\text{ \AA}$; $4,10\text{ \AA}$ e $2,50\text{ \AA}$), bem definidos.

6.2 | Comportamento Espectroscópico por FTIR

Em relação às análises por espectroscopia de absorção no infravermelho (IR) de opalas, destacam-se os estudos de Lyon (1967) e Jones & Segnit (1969 e 1971), Flörke (1995), caracterizando as opalas australianas e de outras procedências. Moura (1982) e Bartoli et al. (1983) foram pioneiros na caracterização IR das opalas preciosas de Pedro II.

Rosa (1988) efetuou análises IR em doze opalas preciosas de Pedro II, tendo como principais resultados:

a) os grupamentos silanóis são simples, do tipo Si (OH); b) o grau de substituição isomórfica Al-Si na rede tetracoordenada é função do teor de Al_2O_3 , traduzindo-se em bandas de vibração do alongamento com número de onda de 3620 a 3570 cm^{-1} enquanto a banda de deformação Si-O dos grupamentos silanóis, apresenta número de onda de 940 a 910 cm^{-1} ; c) bandas de vibração do alongamento da água exibem número de onde 3220 cm^{-1} ; d) e o decliva da linha de base entre 4000 e 2800 cm^{-1} .

Todas as amostras de opalas laranjas analisadas por Gomes (2002), provenientes da mina Tranqueira (Buriti dos Montes), apresentaram espectros característicos aos das opalas descritos na literatura, exibindo os seguintes conjuntos de bandas: de vibração de estiramento da água livre (de 3.447 a 3.462 cm^{-1}), de vibração de deformação da água livre (de 1.637 a 1.640 cm^{-1}), e as três bandas do SiO (vibração de estiramento entre 1.099 e 1.104 cm^{-1} , vibração de estiramento entre 787 e 790 cm^{-1} , e vibração de deformação entre 472 e 474 cm^{-1}).

6.3 | Comportamento Termo-Gravimétrico

As curvas das análises térmicas das opalas do Piauí aqui investigadas se equivalem àquelas encontradas descritas na literatura (Jones et al. 1963; Bayliss & Males 1965; Mackenzie 1970; Smykatz-Kloss 1974; Pearson 1985). Os estudos pioneiros couberam a Moura (1982) e Bartoli et al., (1983) pesquisando as opalas de Pedro II enquanto Gomes (2002) caracterizou as opalas laranjas de Buriti dos Montes.

Rosa (1988) realizou ensaios de ATD e ATG nas mesmas 12 amostras analisadas por FTIR, apresentando dois picos endotérmicos, atribuídos à saída da água (entre 20 e 400 °C) e à desidroxilização (uma parte nas opalas aquecidas até 400 °C e outra parte até 800 °C). Em função dos teores de Al_2O_3 , devido à perda da água, ocorre um alargamento e deslocamento dos picos endotérmicos para 160-170 até 280 °C; o mesmo ocorrendo com a desidroxilização, deslocada para 500-510 até 600 °C. Este autor conclui que as opalas dos arenitos são menos aluminosas e menos substituídas (IR), com um maior ordenamento (DRX), tendo menores teores de água. Por outro lado, as opalas formadas nos siltitos e argilitos são mais aluminosas, mais substituídas, menos ordenadas e com teores maiores de água.

As opalas laranjas de Buriti dos Montes estudadas por Gomes (2002) exibem curvas das ATDs caracterizadas 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 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 análises térmicas realizadas por Silva (2007), com opalas de Pedro II e Buriti dos Montes, ocorre uma perda da maior parte da água a baixas temperaturas (até 200°C). A partir daí a perda de água é mais lenta e gradual.

7 | OUTRAS PROPRIEDADES DAS OPALAS DO PIAUÍ

7.1 | Índice de Refração e Densidade

Gomes (2002) estudando opalas laranjas, obteve densidade entre 2,08 e 2,20 e índice de refração de 1,455 (+0,005, -0,015).

Silva (2007) analisou 18 amostras de opalas de Pedro II, apresentando índice de refração (IR) variando entre 1,456 e 1,459; a densidade (d) oscila de 2,094 a 2,168. No mesmo trabalho, duas opalas de Buriti dos Montes foram analisadas, obtendo-se IR de 1,456 e uma d de 2,130.

7.2 | Dureza das Opalas

A opala possui uma baixa dureza, sendo assim, a probabilidade de desenvolver fraturas e fissuras é maior, por isso é considerada uma gema frágil.

Na literatura, a dureza da opala é comumente citada como sendo entre 5,5 e 6,5 na escala *Moh's*. Souza (1985) afirma que as opalas de Pedro II são as mais resistentes do mundo, pois possuem dureza média igual a 6,5 e podem ser aquecidas e resfriadas sem que haja alterações na constituição. Rosa (1988) refere-se às opalas brasileiras como sendo mais duras que as australianas.

Com base nas informações produzidas durante a investigação da microdureza das opalas utilizando o microindentador *Vickers*, (SILVA, 2007) determinou os valores absolutos de dureza que posteriormente foram convertidos em valores relativos na escala de *Moh's*. Foram testadas 5 opalas brasileiras e 5 opalas

australianas para obtenção da microdureza *Vickers*, obtendo para as opalas de Pedro II, uma dureza entre 4,64 a 5,42 enquanto as opalas australianas tiveram sua dureza de 4,64 a 4,81.

7.3 | Fluorescência

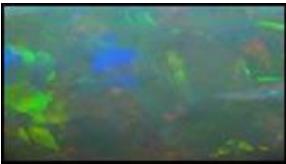
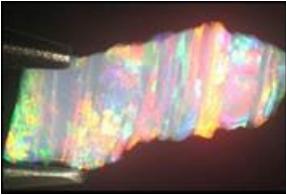
Gomes (1990) utilizou 235 opalas preciosas de Pedro II, expondo-as à incidência de ondas ultravioletas curtas e longas. Somente uma opala exibiu fluorescência na cor verde quando exposta às ondas curtas. Sob exposição às ondas ultravioletas longas, nenhuma das opalas floresceu.

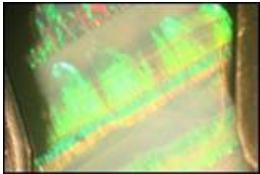
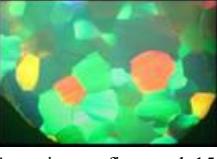
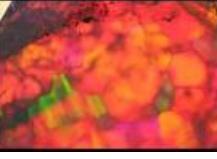
Gomes (2002) analisou 212 amostras de opalas laranjas, sem jogo-de-cores, de os matizes de cores, brutas e lapidadas, e em nenhuma delas observou-se qualquer reação à fluorescência sob luz ultravioleta, permanecendo inerte tanto sob ondas curtas como sob ondas longas.

7.4 | Micromorfologia e Jogo de Cores sob Microscopia Óptica

Todas as opalas preciosas analisadas apresentaram-se com boa transparência, caracterizando as cores do jogo-de-cores, com cores variáveis entre tons amarelados e alaranjados quando observadas em luz transmitida. A Tabela 01 lista as opalas fotografadas e suas principais características (SILVA, 2007).

Tabela 1. Opalas de Pedro II e suas principais características sob microscopia ótica.

Nº	Localidade	Principais Características
1	Limão	<p>Branca, com jogo de cores</p>  <p>Fotomicrografia - opala 1 mostrando patches com jogo de cores (16,25x, luz transmitida)</p>  <p>Fotomicrografia - opala 1 mostrando patches com jogo de cores (16,25x, luz incidente)</p>
36	Centro	<p>Branca, translúcida com bom jogo de cores</p>  <p>Fotomicrografia - opala 36 mostrando estrutura em formas acamadas das áreas com jogo de cores (16,25x, luz incidente)</p>  <p>Fotomicrografia - opala 36 mostrando estrutura em formas acamadas das áreas com jogo de cores (16,25x, luz incidente)</p>
50	Boi Morto	<p>Branca, translúcida com jogo de cores</p>  <p>Fotomicrografia - opala 37 mostrando estrutura acamada das áreas com jogo de cores (20x, luz incidente)</p>  <p>Fotomicrografia - opala 37 mostrando estrutura acamada das áreas com jogo de cores (20x, luz transmitida)</p>

50	<p>Boi Morto</p>  <p>Fotomicrografia - opala 50 mostrando estrutura acamada das áreas com jogo de cores (16,25x, luz incidente)</p>	<p>Branca, translúcida com jogo de cores</p>  <p>Fotomicrografia - opala 50 mostrando estrutura acamada das áreas com jogo de cores (16,25x, luz transmitida)</p>
155	<p>Roça</p>  <p>Fotomicrografia - opala 155 com estrutura colunar, geralmente detectado em opalas sintéticas (16,25x, luz incidente, pol. Xs)</p>	<p>Branca, translúcida estrutura colunar do jogo de cores</p>  <p>Fotomicrografia - opala 155 mostrando <i>patches</i> com jogo de cores. Estrutura colunar vista na seção basal (50x, luz incidente)</p>  <p>Fotomicrografia - opala 155 (50x, luz transmitida)</p>

7.5 | Micromorfologia sob Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV

Rosa (1988) e Marques (inédito; Figura 20), obtiveram imagens exibindo o arranjo tridimensional ordenado das esferas de sílica que compõem a estrutura das opalas preciosas de Pedro II.

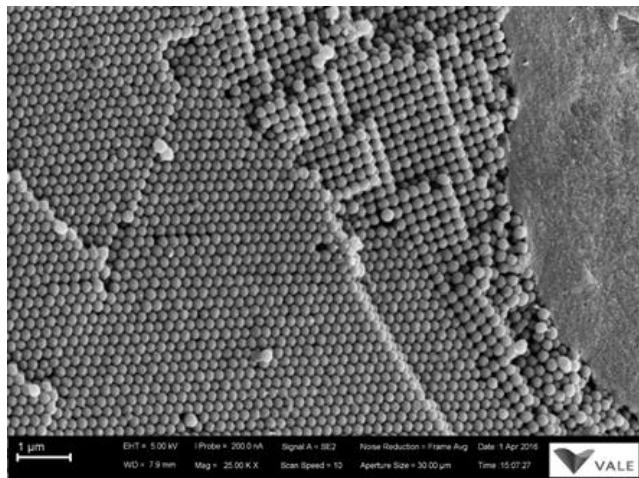
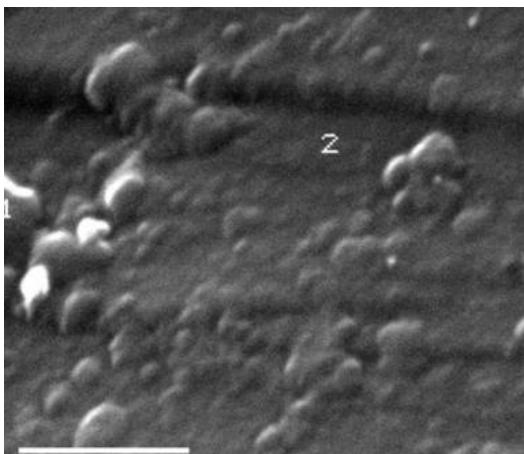


Figura 20. Imagem de uma opala preciosa de Pedro II, com aumento de 25.000 vezes, destacando as esferas de igual diâmetro, ordenadas com padrão regular, mostrando empacotamento tanto hexagonal como cúbico. Fonte: Imagem cedida pela geóloga Gisele T. Marques, produzida no Laboratório de Microanálises (IG-UFPA) no MEV Sigma-VP, pertencente ao Instituto Tecnológico Vale (ITV).

Nas opalas laranjas, a origem das cores básicas está relacionada com a presença de nano inclusões de minerais que contém ferro enquanto a intensidade desta cor deve-se à concentração deste elemento químico (GAILLOU et al., 2008a). Quando examinadas ao MEV, mostram 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, consequentemente conferindo às amostras de opalas laranjas aqui estudadas, sua excepcional transparência e ausência do jogo de cores (Figura 21).



Fonte: Gomes (2002). Escala: 1,0µm.

Figura 21. Imagem da opala laranja de Buriti dos Montes, com aumento de 25.000 vezes, destacando a cimentação das esferas pela sílica opalina.

8 | CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DAS OPALAS DO PIAUÍ

Para a opala de Pedro II, Gomes e Costa (1994) encontram teores médios de SiO_2 (entre 86,66 e 92,48); Al_2O_3 (entre 1,2 e 4,46%), o que é compatível com o teor de 2,8%, obtido por Bartoli et al. (1983); CaO (entre 0,26 e <0,63%); Na_2O (entre 0,14 e 0,77%). Dentre os teores anômalos, sobressaem-se os elementos traços Co , Cu e Ni , compatíveis com os resultados de Moura (1982), alcançando Co (37 ppm), Cu (141 ppm) e Ni (32 ppm).

As opalas laranjas de Buriti dos Montes em análise apresentaram SiO_2 , (92,76 %); H_2O como P. F. (5,69 %); Al_2O_3 (1,19 %), enquanto os teores de Fe_2O_3 e TiO_2 encontram-se na ordem de 0,2 %, conforme Gomes (2002). Estes dados são similares aos obtidos por Marques et al., (2015), que obtiveram SiO_2 (90,14 % em média), 8,03 % de água (PF), 1,32 % de Al_2O_3 e 0,2 % de Fe_2O_3 . Entre os elementos traços analisados, destacam-se apenas os valores de Ba , que oscilam entre 195 e 1373 ppm, com média de 808 ppm.

Análises pontuais realizadas em opalas laranjas de Buriti dos Montes por Gomes (2002) ao MEV / SED, de caráter semi-quantitativo, revelaram teores médios na ordem de 98,5% de SiO_2 , 0,4% de Al_2O_3 , 0,3 % de Fe_2O_3 , e 5.000 ppm de BaO , sendo praticamente desprovida de Ca e Na . Seis análises realizadas por ICP / AES em amostra total indicam em média: Fe_2O_3 (0,04%), Al_2O_3 (0,5%) e BaO (323 ppm); CaO , NaO , K_2O e MgO , estão na ordem de 0,03 %. Entre os elementos traços, Sr (9,2 ppm), Be (5,2 ppm) e Cr (4,7 ppm) exibem teores acima dos limites de detecção.

As diferenças dos teores apresentados acima, de SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 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 química dos minerais.

Gaillou et al., (2008) estudando opalas de procedência de diversos países, analisaram duas amostras de opalas preciosas de Pedro II, destacam os teores de Ba, entre 126 e 136 ppm. Segundo estes autores, a opala-A da Austrália pode ser diferenciada da opala-A do Brasil (de Pedro II) através de sua concentração de Al e Mg. Enquanto as opalas da Austrália têm relação Al/Mg >20, para as do Brasil esta relação é <10. Destacam-se os teores de Na (436 e 759 ppm), Mg (491 e 564ppm), Al (4318 e 4838ppm), K (720 e 626ppm), Ca (1550 e 1227ppm), Fe (113 e 181ppm).

9 | INCLUSÕES MINERALÓGICAS

A grande maioria das opalas encontradas em todo o mundo não tem inclusões ou estas não puderam ser observadas devido a baixa ou ausência de boa transparência do hospedeiro, a opala (Gübelin & Koivula, 1986 e 1992). Knigge & Milisenda (1997) identificaram inclusões de pirita em amostras de opalas preciosas provenientes da mina do Boi Morto, em Pedro II.

As inclusões identificadas por Gomes (2002), parcialmente publicadas em Gomes & Costa (2001b; 2001c e 2001f) e Marques et al., (2012; 2015) foram obtidas de 239 amostras de opalas laranjas contendo inclusões, todas provenientes da ocorrência Tranqueira, em Buriti dos Montes. As principais inclusões são:

- Relictos de arenitos constituídos de quartzo, caulinita e hematita (ou goethita), envoltos por uma fina camada branca. Estas inclusões apresentam as seguintes feições:

Tubo ou vermicular: conduto alongado, recurvado, podendo estar vazio ou parcialmente ou totalmente preenchido pelo arenito (Figura 22);

Banco de coral: estruturas semelhantes aos bancos de corais, botrioidal; geralmente é encontrado quando grandes porções do arenito (acima de 1,0 cm) são envolvidas pela opala (Figura 22);

Estalactite (Figura 22), stalagmite e coluna (Figura 22): são semelhantes às estruturas colunares encontradas no interior das cavidades cársticas;

Bolha: com forma arredondada, diâmetro entre 5 e 20 mm, translúcidas a opacas, podendo encontrar-se associada às fraturas de tensão. É uma estrutura zonada, tendo um núcleo

avermelhado, de arenito, e uma fina zona de borda ou de reação com a opala. A DRX revelou quartzo, caulinita e hematita; a fina camada branca que envolve a bolha é constituída, de quartzo e caulinita (Figura 22);

Irregular: são aquelas inclusões com aspecto terroso, granular, onde o arenito encaixante apresenta-se com uma textura característica (Figura 22);

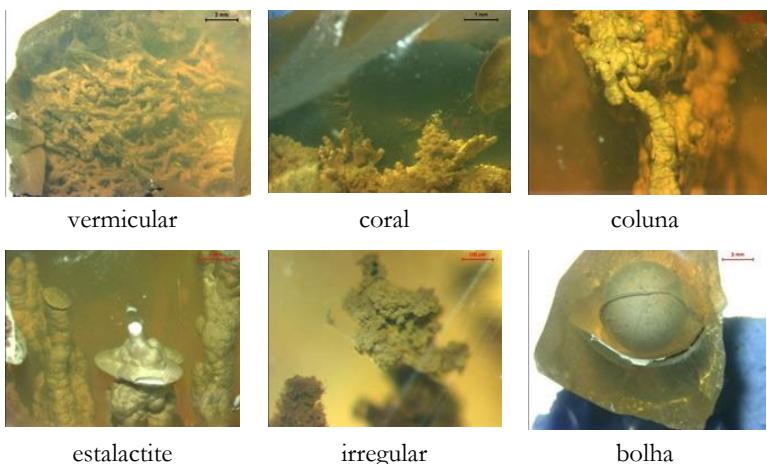


Figura 22. Inclusões de relictos de arenitos nas opalas de Buriti dos Montes.

Craqueamento: conjunto de diminutas fraturas que iniciam na borda de uma opala, e avançam em direção ao núcleo, chegando até, em alguns casos, a fragmentar toda a amostra. São resultantes da desidratação da opala (Figura 23);

Estrutura de fluxo normalmente concêntrica ou com tendência a essa estruturação, resultante do fluxo da solução rica em sílica, com alta viscosidade, através da fratura do arenito encaixante (Figura 23);

Mancha de cor: variação na cor básica predominante de uma determinada amostra de opala, em diversas combinações, por exemplo: opala laranja com opala amarela; opala vermelha com opala amarela, etc. (Figura 23);

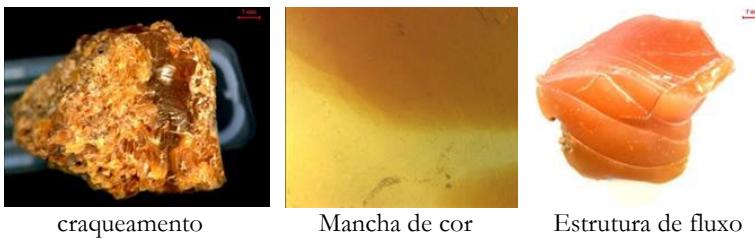


Figura 23. Craqueamento, estrutura de fluxo e mancha de cor observados nas opalas laranjas encontradas no povoado Tranqueira, município de Buriti dos Montes, PI.

Teia constituída de hematita, com cor amarronzada a avermelhada, disposta de forma "fios de cabelo" ou acicular, localmente radiais, entrelaçados, sem direção predominante, semelhante a uma teia. Vistas no MEV, confirmou-se serem de hematita (Figura 24).

Gübelin & 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.

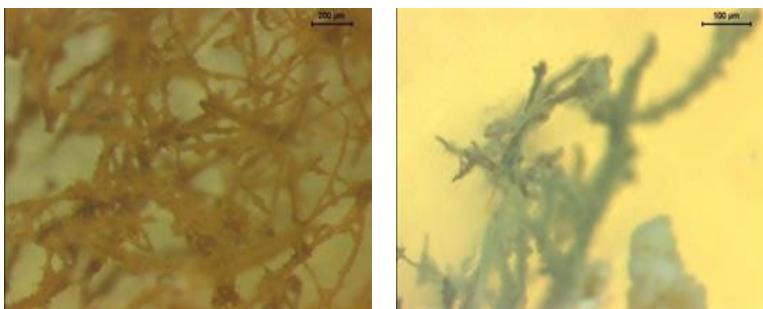


Figura 24. Inclusões tipo teia, identificadas como hematita.

– Fraturas: foram classificadas em:

Cicatrizadas: estas fraturas são totalmente preenchidas pela opala incolor (raramente com cor básica branca ou vermelha), (Figura 25);



Figura 25. Fraturas cicatrizadas pela sílica opalina.

Dendrítica: são fraturas onde a solução infiltrante, de composição química diferente da composição da opala, exibe uma textura dendrítica (Figura 26);

De tensão: são aquelas fraturas, circulares, associadas a uma inclusão de arenito no seu centro (tipos bolha, botrioidal e irregular), (Figura 26).



Figura 26. Fratura dendrítica e de tensão na opala de Buriti dos Montes

Planos de concentração de deformação: feição caracterizada por um conjunto de planos descontínuos e retilíneos, geralmente paralelos (Figura 27).

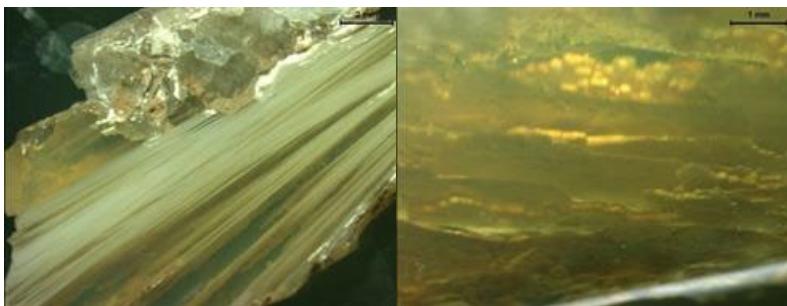


Figura 27. Vista perpendicular e oblíqua dos planos de concentração da deformação

Quartzo: Veios de quartzo e opala ocorrem associados. O quartzo ocupa a zona externa, centimétricos, em contato com o arenito encaixante, enquanto a opala ocupa a zona central, incluindo os cristais de quartzo. (Figuras 28 e 29);



Figura 28. Acima, a esquerda, vista perpendicular do contato entre o veio de quartzo e a opala. Quartzos envoltos com uma película de caulinita, imersos na opala laranja.



Figura 29. Quartzo envolto pela opala laranja compondo uma paisagem das pirâmides egípcias. A direita, película de caulinita destacando o pseudomorfo do quartzo.

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 reliquias do arenito encaixante. Apresenta-se em formas tendendo para o arredondamento, ligeiramente botrioidal. É comumente encontrada como pseudomorfos de cristais de quartzo, permanecendo a película de caulinita que recobria o cristal. Observa-se ainda com terminações de formas irregulares, com reentrâncias semelhantes a bordas de corrosão (Figura 29);

Caulinita: apresenta-se em agregados de plaquetas dispostas, aparentemente, sem uma orientação predominante, sendo encontradas plaquetas típicas com hábito hexagonal.

9.1 | Classificação Temporal das Inclusões Encontradas nas Opalas Laranjas

Segundo Gomes (Tabela 2, 2002), as inclusões identificadas nas opalas laranjas foram classificadas como:

Protopróximas: são inclusões que tem sua gênese anterior à formação das opalas laranjas, envolvidas pela sílica opalina, podendo ser parcialmente assimiladas. Foram identificadas as seguintes inclusões: arenito (hematita/caulinita/quartzo), teia (hematita), quartzo-caulinita (película que envolve as inclusões de arenito e os cristais de quartzo), cristais de quartzo e a caulinita.

Singenéticas: formadas simultaneamente às opalas. Estão representadas pela mancha de cor, estruturas de fluxo, opala branca (que envolve a hematita), pseudomorfos de quartzo.

Epigenéticas: originadas posteriormente à formação das opalas laranjas, representadas pelo craqueamento, as fraturas, mancha de cor (p.ex., opala amarela cicatrizando fratura na opala vermelha), além dos planos de concentração da deformação.

Tabela 2. Classificação das inclusões encontradas nas opalas laranjas de Buriti dos Montes.

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

Fonte: Gomes (2002).

10 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

As opalas mais importantes do Brasil são encontradas até o presente apenas no Piauí, em especial em Pedro II. São opalas preciosas com cristalinidade variando de opala-A até opala-CT e apresentando teores de água entre 3,7 e 10%.

Sua origem é hidrotermal, tanto para as opalas preciosas quanto às opalas laranjas. Essa atividade termal resultou do contato das manifestações subvulcânicas básicas com os sedimentos paleozóicos da Bacia Sedimentar do Parnaíba, com distribuição regional.

O fluido hidrotermal formador desta mineralização opalina ao percolar pelas fraturas e brechas hidráulicas, 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.

Quimicamente, destacam-se os teores dos elementos traços das opalas preciosas, as quais apresentam-se enriquecidas em Co, Cu, Ni, Be, B, Zn e Sr, (Souza 1985; Rosa 1988 e Gomes 1990), enquanto as opalas laranjas mostram-se bastante enriquecidas em Ba (GOMES, 2002).

O Instituto Nacional da Propriedade Industrial, desde 2012, certificou a Indicação Geográfica (IG), categoria Indicação de Procedência (IP), as opalas preciosas e as joias artesanais produzidas com as opalas encontradas em Pedro II.

Através do **APL da Opala**, estão sendo realizados novos estudos mineralógicos, químicos e gemológicos da opala encontrada em Pedro II, em parceria com o Grupo de Geologia Sedimentar da Amazônia (GSED), da Universidade Federal do Pará e com o *Gemological Institute of America (GIA)*, visando a obtenção de dados para fundamentação da Certificação de Origem destas opalas.

Com base nos dados apresentados, conclui-se que as opalas de Pedro II e Buriti dos Montes têm características geológicas, gemológicas e geoquímicas que demonstram sua importância, sendo um instrumento para valorização da "marca Brasil" no mercado internacional de gemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARTOLI, F.; BITTENCOURT ROSA, D.; DOIRISSE, M.; MEYER, R.; PHILIPPY, R. & SAMAMA, J.C. (1990): Role of aluminium in the structure of Brazilian opals – *Eur. J. Miner.* 2(5): 611-619.
- BARTOLI, F.; MEYER, R.; MOURA, F. de F.; SAMAMA, J.C. Caractérisation chimico – minéralogique de l'opale noble des gisements de nord-est du Brésil. Paris, Note. C. R. Acad. Sc. Paris, 296: 625-630, 1983.
- BAYLISS, P. & MALES, P.A. 1965. The mineralogical similarity of precious and common opal from Australia. *Miner. Magazine*, 35: 429-431.
- COSTA, M. L.; ALENCAR, Q.S.; GOMES, É.R.; ALMEIDA, H.D.F.; OLIVEIRA, S.K. Textural patterns, mineralogy, and chemistry of sandstone-related Calçadinha chalcedony (Piauí, Brazil). *Brazilian Journal of Geology*. v.46, p.395 - 409, 2016.
- DARRAGH, P.J.; GASKIN, A.J.; TERREL, B.C.; SANDERS, J.C. 1966. Origin of precious opal. *Nature*, 5018:13-16.
- DOWNING, P.B. **Opal - Identification and value.** Tallahassee, Majestic Pr. 210p., 1992.
- ELOISE, G.; DELAUNAY, A.; RONDEAU, B.; BOUHNIK-LE-COZ, M.; FRITSCH, E.; CORNEN, G.; MONNIER, C. The geochemistry of gem opals as evidence of their origin. *Ore Geology Reviews*. 34:113-126, 2008.
- FLÖRKE, O.W. 1995. Silicon dioxide-SiO₂ – minerals. *Mitt. Österr. Miner. Ges.*, 140: 9 - 34.
- GAILLOU, E.; DELAUNAY, A.; RONDEAU, B.; BOUHNIK-LE-COZ, M.; FRITSCH, E.; CORNEN, G.; MONNIER, C. The geochemistry of gem opals as evidence of their origin. *Ore Geology Reviews*, v. 34, p. 113-126, 2008.

GAILLOU, E.; FRITSCH, E.; GUILAR-REYES, B.; RONDEAU, B.; POST, J.; BARREAU, A.; OSTROUMOV, M. Common gem opal: An investigation of micro- to nano-structure. *American Mineralogist*, v. 93, pages 1865-1873, 2008.

GÓES, A.M.O.; TRAVASSOS, W.A.; NUNES, K.C. **Projeto Parnaíba: reavaliação da bacia e perspectivas exploratórias.** Belém: Petrobrás, 1992. Relatório interno.

GÓES, A.M. & FEIJÓ F.J. 1994. Bacia do Parnaíba. **Boletim de Geociências da Petrobrás.** 8(1):57-67.

GOMES, E.R. **Contribuição à Mineralogia, Geoquímica e Gênese das Opalas de Pedro II, Piauí.** 1990. 94 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) Departamento de Geoquímica e Petrologia / Centro de Geociências/ UFPA, Belém, 1990.

GOMES, E.R. **Mineralogia e Gemologia da Opala Laranja de Buriti dos Montes (Piauí, Brasil).** Belém: Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará. 89p. (Dissertação de Mestrado), 2002.

GOMES, É.R.; CASTRO, J.; FAVACHO, M. A Empresa de Mineração Brazil Opals e Suas Novas Explorações de Opalas em Pedro II, Piauí In: **GEMAS DO BRASIL**, ed.1. São Paulo: Editora Solaris, 2023, v.1, p. 408 - 410.

GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. 1992. **Contribuição à Gênese das Opalas de Pedro II (Piauí).** In: CONG. BRAS. GEOL., 37., São Paulo. *Anais ... São Paulo, SBG.* v.2, p.116., 1992.

GOMES, E.R. & COSTA, M.L. da. **Contribuição à gênese das opalas de Pedro II (Piauí).** Revista da Sociedade Brasileira de Geoquímica, Belém, v. 8, n. 1, p. 79-98, 1994.

GOMES E.R. & COSTA M.L. **Inclusões sólidas na opala laranja de Buriti dos Montes, Piauí.** Anais do Simpósio de Geologia do Nordeste, 19: 214, 2001a.

GOMES E.R. & COSTA M.L. **O Fogo do Piauí: uma Opala Laranja com 23.000 ct.** Anais do Simpósio de Geologia do Nordeste, 19: 215, 2001b.

GOMES E.R. & COSTA M.L. Opalas do Piauí, Pedro II – Buriti dos Montes (Parte II). **Diamond News**, 8: 54-59, 2007.

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. 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 & MARQUES, G.T. A Gênese Hidrotermal da Opala no Estado do Piauí. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 3, Número 3, p.89 - 106 , Janeiro/Junho, 2022a.

GOMES, E.R.; COSTA, M.L.DA & MARQUES, G.T. As Opalas de Pedro II e Buriti dos Montes, Piauí. **Revista da Academia de Ciências do Piauí**, v. 3, nr. 3, p.123 - 133 , Janeiro/Junho, 2022b.

GOMES, É.R.; RAMALHO, J.C.; FAVACHO, M. Município de Pedro II, no Piauí, Volta a Produzir Opalas de Qualidade Gemológica. **Af. Magazine**, São Paulo, p.134 - 137, 2021.

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.

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.
- JONES, J.V. 1975. Microstruture and crystallinity of gem opal. *Am. Mineral.*, 60:749-757.
- JONES, J.B.; SEGNIT, E.R.; NICKSON, N.M. 1963. Differential thermal and x-ray analysis of opal. *Nature*, 4886:1191.
- JONES, J.B.; SANDERS, J.V.; SEGNIT, E.R. 1964. Structure of opal. *Nature*, 205: 990-991.
- JONES, J.B. & SEGNIT, E.R. 1969. Water in sphere-type opal. *Miner. Magaz.*, 37:357-361.
- JONES, J.B. & SEGNIT, E.R. 1971. The nature of opal. Nomenclature and constituent phases. *J. Geol. Soc. Austr.*, 18: 57-68.
- KNIGGE, J. & MILISENDA, C.C. 1997. Brasilianische opale aus Pedro II. Z. *Dt. Gemmol. Ges.*, 46:99-105.
- KOIVULA, J.I.; FRYER, C.; KELLER, P.C. Opal from Querétaro, Mexico: Occurrence and inclusions. *Gems & Gemology*, v. 19-2, p. 87-96, 1983.
- LYON, R.J.P. 1967. Infrared absorption spectroscopy. In: ZUSSMANN, J. *Physical methods in determinative mineralogy*. London, Academic Press. p.371-398.
- MARTINS, JR. F. L. Aspectos genéticos das opalas preciosas de Pedro II, Piauí, Brasil. Fortaleza, MBL - Mineração Brasileira Ltda, 10, p. (Relatório Interno), 1983.
- MARQUES, G.T.; COSTA, M.L.; GOMES, E.R. 2012. As fascinantes inclusões sólidas das opalas laranja de Buriti dos Montes (PI). *Diamond News*, 37: 45-52.

MARQUES, G.T.; COSTA, M.L.; GOMES, E.R. Modelo genético para as opalas do Piauí. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE METALOGENIA, 3., 2013, Gramado. Boletim de resumos. Gramado1 CD-ROM, 2013.

MARQUES, G.T.; COSTA, M.L.; GOMES, E.R. Orange opals from Buriti dos Montes, Piauí: solid inclusions as genetic guides. **REM: R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 68 (1), 053- 059, jan. março, 2015.

MACKENZIE, R.C. 1970. Basic Principles and historical development. In: MACKENZIE, R.C. (ed.) *Differential thermal analysis*. London, Academic Press Inc. p. 3-30.

MOURA, F. de F. 1982. *Mineralogie des opales précieuses de Pedro II - Piauí*. C.E.S.E.V., 17p. (Report de fin de cycle).

NEN, L.H.B. de S. & URBANO FILHO, C. 1974. A Opala Brasileira no Piauí. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. Resumos... Porto Alegre, SBG, Bol. N°1, p. 593 - 595.

OLIVEIRA, J.C.; CARDOSO, C.E.T.; QUINHO, J.S.; AMORIM, H.J. Projeto Opala em Pedro II (Relatório Final). DNPM/CPRM, Recife, 1979.

OLIVEIRA, J.F. & SOARES FILHO, A.R. 1983. Garimpos de opalas da região de Pedro II, Piauí. In: DNPM. *Garimpos do Brasil*. Brasília, DNP/ DFPM, p.119-136.

PEARSON, G. 1985. Role of water in cracking of opal. ***The Austral. Gemm.***, 15: 435-445.

QUEIROZ, A.F. dos S.; COSTA, M.L. da; GOMES, E.R. Ocorrências de Quartzo Leitoso e Esfumaçado na Região de Batalha, Estado do Piauí, Brasil. **BOMGEAM**. Ano 6 (1), 2019.

ROSA, D.B. Les gisements d'opales nobles de la region de Pedro II dans l'etat de Piauí, region nord-est du Brésil. 230 p. Tese (Doutorado) – Universidade de Nancy, Nancy, 1988.

SACHS, L.L.B.; BATISTA, I.H.; BRAGA, I.F.; AMARAL, E.S. Projeto avaliação dos depósitos de opalas de Pedro II: estado do Piauí-Teresina: CPRM, 88 p.: il.; 30 cm. – (Informe de Recursos Minerais. Série pedras preciosas), 2015.

SANDERS, J.V. 1964. Colour of precious opal. *Nature*, 204:1151-1153.

SANDERS, J.V. 1975. Microestruture and crystallinity of gem opals. *Am. Miner.*, 60:749-757.

SAUER, J.R. 1982. *Brazil, paradise of gemstones*. Rio de Janeiro, Ed. Rix. 136p.

SILVA, E.E. 2007. Caracterização Gemológica e Mineralógica de Opalas Preciosas de Pedro II. Rio de Janeiro: Programa de Pós Graduação em Geologia, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 53p. (Dissertação de Mestrado).

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. Perfil analítico da opala. Brasília, DNPM, 44 p., 1985.

WARD, F. 2000. *Opals – the Fred Ward gem book series*. 2a ed. Bethesda, Gem Book Publishers. 66p.

VAZ, P.T.; REZENDE, N.das G. de A. Da; WANDERLEY FILHO, J.R.; TRAVASSOS, W.A.S. Bacia do Parnaíba. **Bol. Geociências**, Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 253- 263, maio/nov. 2007

VIDAL, F.W.H.; MORAIS, M.G.N. de O.; FREIRE, L.C.; SANTOS, C.A.M. As opalas de Pedro II no Piauí e o arranjo produtivo local. CETEM/MCTI, Rio de Janeiro. 53p., 2018. (Série Rochas e Minerais Industriais, 23).

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2024, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 390 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

Últimos números da Série Rochas e Minerais Industriais

SRMI-35 - Remineralizadores de solos: avaliação da conformidade frente à legislação e propostas para sua melhoria. Guilherme Resende Camara, Elton Souza dos Santos e Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, 2024.

SRMI-34 - Simulador de desgaste de pérolas diamantadas – Modelo matemático. Luan Lamon Machado, Leonardo Luiz Lyrio da Silveira e Beatriz Carvalheira Morerira, 2024.

SRMI-33 - Simulador de desgaste de pérolas diamantadas – Aspectos construtivos. Leonardo Luiz Lyrio da Silveira, Luan Lamon Machado e Beatriz Carvalheira Moreira, 2024.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 47 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.