

CONTRIBUIÇÃO À GÊNESE DAS OPALAS DE PEDRO II (PIAUI)

E.R. Gomes¹, M.L. da Costa²

1. Geólogo autônomo, Rio de Janeiro, RJ

2. Departamento de Geoquímica e Petrologia, CG-UFPA, Belém, PA

ABSTRACT

The most important occurrences of precious opal in Brazil are located at Pedro II Municipality, Piauí State. These opals have been described as of lateritic origin by the most of the published works. In the other side, this paper shows that the opals of Pedro II are typically related to hydrothermal environment as one can see through the geological, mineralogical and some geochemical data. The opals of Pedro II occur mainly as precious white opal under the varieties harlequin, band opal, pinfire and butterfly wing. They are found as veins and veinlets in diabases, sandstones, siltstone, shales and albitites. The XRD patterns indicate that these opals may be amorphous (A), or cristobalite-tridymite (CT) and possibly cristobalite (C) types. Chalcedony, rock crystal and amethyst may be found associated with opals. These opals are relatively rich on aluminium and sodium but the trace elements like Ni, Co, Cu and Cr are under crustal levels, although the opal-bearing rocks are concentrated in these elements. The emplacement of diabases into porous and water-saturated siliciclastic rocks of Cabeças Formation at upper crustal level caused the heating of the existing fluids and the development of a hydrothermal system, which favoured the alteration of the primary silicates, the silica enrichment of the solution and the precipitation of opals. In this way, the following mineral assemblage was formed: tremolite-actinolite, serpentine, chlorite, smectite, albite, titanite, carbonate, epidote, sericite and opaques, the main minerals of the opal-bearing rocks. They suggest that the hydrothermal conditions may have reached temperatures of 300°C and pressure of 1 Kbar.

RESUMO

As mais importantes ocorrências de opalas preciosas do Brasil estão situadas no município de Pedro II, no Estado do Piauí. Os trabalhos de pesquisas já realizados, em geral, expressam uma origem laterítica para essas opalas. O objetivo principal do presente trabalho é mostrar que essas opalas estão relacionadas, principalmente, com o ambiente hidrotermal, conforme indicam os dados geológicos, mineralógicos e alguns dados geoquímicos. As opalas de Pedro II são encontradas como opala branca preciosa nas variedades arlequin, faixa, chuveiro e asa de borboleta. Elas ocorrem em veios e vênulas nos diabásios, arenitos, siltitos, folhelhos e albititos. Os padrões de DRX indicam opalas amorfas (A), tipo cristobalita-tridymita (CT) e, possivelmente, cristobalita (C). Encontram-se associados às opalas, calcadônia, cristal de rocha e ametista. As opalas são relativamente ricas em alumínio e sódio, sendo que elementos traços como Ni, Co, Cu e Cr estão em nível crustal. Eles, por outro lado, estão concentrados nas rochas encaixantes da mineralização. A intrusão de diabásios nas siliciclásticas permoporosas e saturadas, em águas da Formação Cabeças, em nível crustal superior, provocou o aquecimento dos fluidos e o desenvolvimento de um sistema hidrotermal que levou à alteração dos silicatos primários. A solução enriqueceu-se em sílica, que precipitou-se como opala e quartzo. Como parte do processo, formou-se a assembléia mineralógica constituída por tremolita-actinolita, serpentina, clorita, esmectita, albite, titanita, carbonatos, epidoto, sericita, opacos e opalas. Essa associação sugere condições hidrotermais com temperatura ao redor de 300°C e pressão de 1 Kbar.

INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos maiores produtores mundiais de opala preciosa, explorada, em sua grande totalidade, em uma única região, situada nos arredores da cidade de Pedro II, no Estado do Piauí. Sua resistência ao calor e sua dureza relativamente elevada tornam-na uma gema sem similar no mercado, competindo com as opalas australianas.

Embora a região já tenha sido objeto

de várias investigações de natureza geológica e mineralógica, tanto a caracterização química e mineralógica, como a gênese dessas opalas, ainda não foram estudadas de forma satisfatória. Muitos trabalhos se restringem mais aos aspectos descritivos (Nen & Urbano Filho, 1974; Cassedanne & Cassedanne, 1971; Lima & Leite, 1978; Oliveira & Soares Filho, 1983; Baptista, 1981; BRASIL, 1986; Souza & Roberto,

1989), sendo que Moura (1982), Bartoli et al. (1983, 1990), Souza (1985) e Rosa (1988) dedicaram-se a um estudo químico-mineralógico e genético mais detalhado das diversas opalas da região de Pedro II. A maioria dos trabalhos indica uma origem supérgena, via intemperismo laterítico (Rosa, op. cit.), sendo que Sauer (1982) e Cascedanne (1991) já inferem uma contribuição hidrotermal. O presente trabalho apresenta novas informações geológicas, mineralógicas e químicas sobre as opalas de Pedro II, que levam a concluir que as mesmas são fundamentalmente de origem hidrotermal, sem contribuição intempérica.

Aspectos Fisiográficos – A cidade de Pedro II está situada no nordeste do Estado do Piauí (Fig. 1), ao redor e dentro da qual se encontram os diversos garimpos de opala (Fig. 2). A região faz parte da Serra da Ibiapaba, com altitude de até 850 m. O clima é tropical, com estação seca bem definida e longa. A vegetação é do tipo caa-

tinga e cerrado. A drenagem é intermitente e pertence à bacia hidrográfica do rio Poti.

Aspectos Geológicos Regionais – A região de Pedro II encontra-se dentro do domínio da Bacia Sedimentar Paleozóica-Mesozóica do Parnaíba, que, na região, está estratigraficamente representada pelo Grupo Serra Grande, do Siluriano, com sedimentos flúvio-deltáicos e marinhos rasos, sobrepostos pelos sedimentos Devonianos do Grupo Canindé (Formações Pimenteiras, Cabeças e Longá), os quais foram influenciados pelos grabens e lineamentos pré-existent (Fig. 3). Como consequência da separação das placas Sul-Americana e Africana, estabeleceu-se, do Jurássico ao Eo-Cretáceo, um magmatismo básico hipoabissal e extrusivo (Formação Mosquito), alojado, preferencialmente, no Grupo Canindé (Góes et al., 1990; Neves et al., 1990).

Coberturas lateríticas de evolução imatura sobrepõem-se às rochas básicas e sedimentares (Fig. 4) e são admitidas como

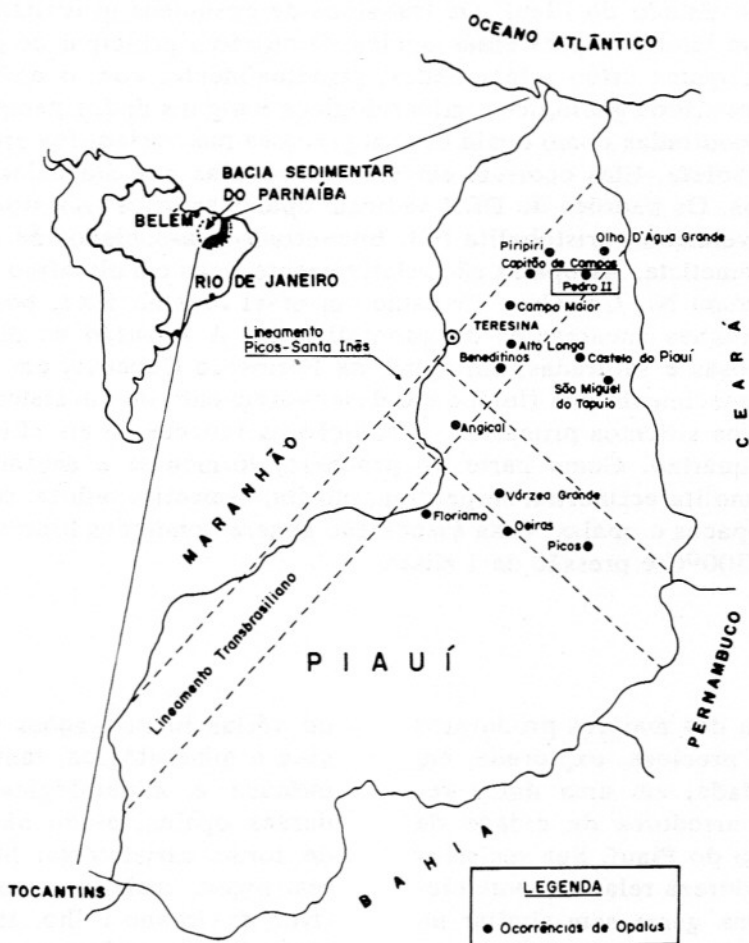


Figura 1 – Mapa mostrando a distribuição das ocorrências de opalas no Estado do Piauí.

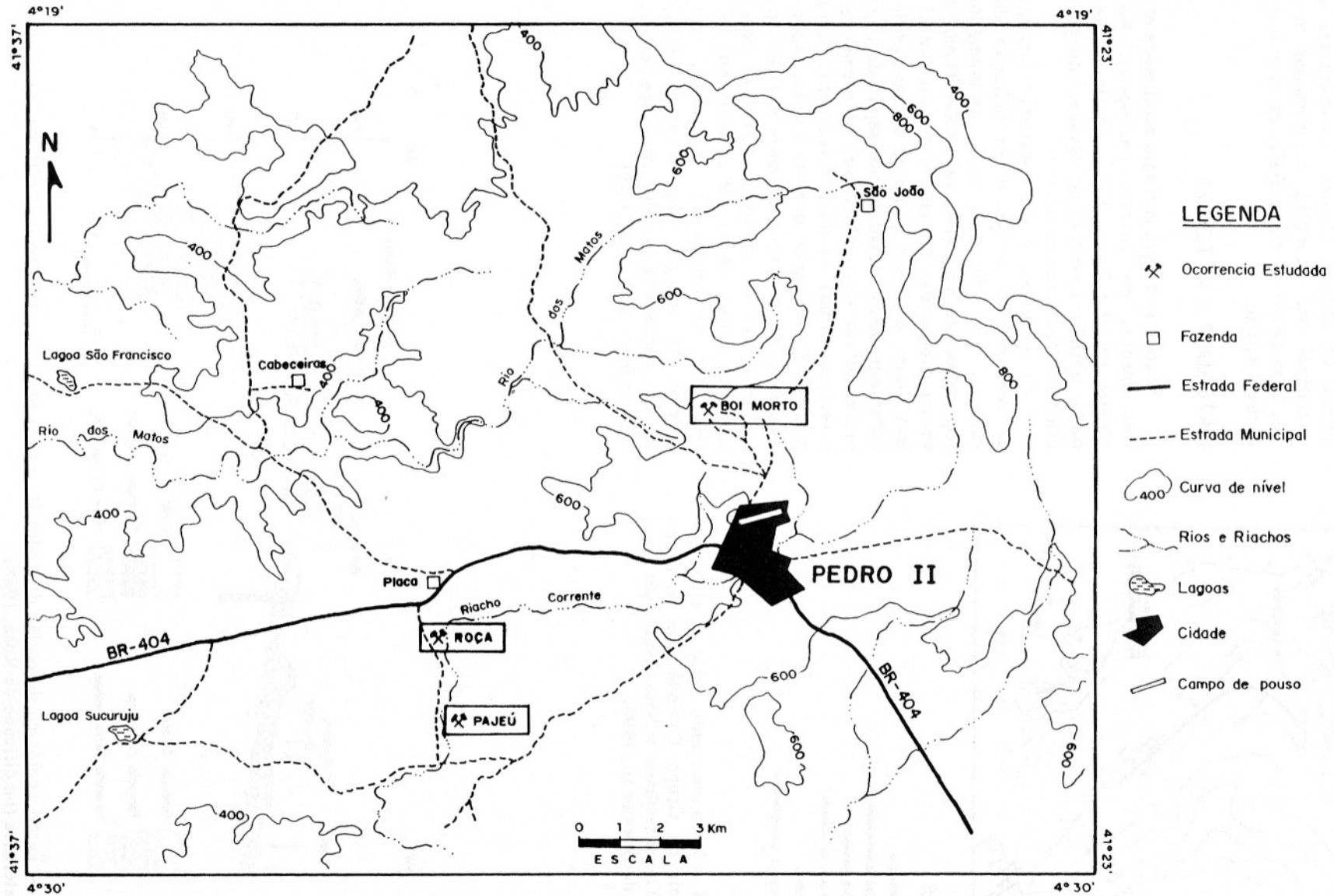
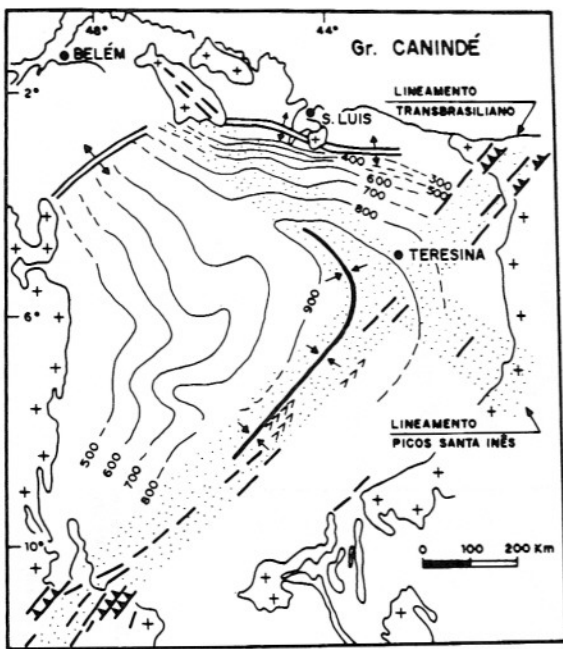


Figura 2 – Mapa de localização das ocorrências de opalas na região de Pedro II (modificado de Rosa,1988).



LEGENDA

- 700— Isópacas
- ↕ Eixo deposicional
- + + + Embasamento
- v v v Diques de diabásio
- Falhas
- ▲▲▲ Feições grabeniformes

Figura 3 - Relacionamento entre os eixos deposicionais do Grupo Canindé com os lineamentos Transbrasiliiano e Picos-Santa Inês (modificado de Góes et al., 1990).

de idade Terciária e/ou Quaternária, respectivamente, por Rosa (op. cit.) e Oliveira et al. (1979).

Aluviões distribuem-se ao longo das drenagens da região, contendo matacões e seixos de rochas básicas, sedimentares e lateríticas das unidades mencionadas acima, bem como de calcedônia, de cristal de rocha e opala.

MATERIAIS E MÉTODOS

Seções geológicas foram realizadas em três frentes de lavras (garimpos): Boi Morto, Pajeú e Roça. Nelas, foram coletadas e obtidas amostras de opalas, calcedônia e das rochas encaixantes.

As amostras foram estudadas através de microscopia óptica e de difração de raios X, em diferentes fases, previamente separadas, ou em amostras totais. Também foram submetidas à observações em luz ultravioleta. Análises químicas foram executadas nas fases, devidamente separadas, representativas de opalas, para os elementos principais e para os elementos traços. Essas análises foram feitas por via úmida, espectrometria de absorção atômica e espectrometria óptica de emissão. Amostras selecionadas foram objeto de estudos por microscopia eletrônica de varredura, com sistema de energia dispersiva. Os dados obtidos foram comparados, principalmente, com aqueles de Rosa (1988).

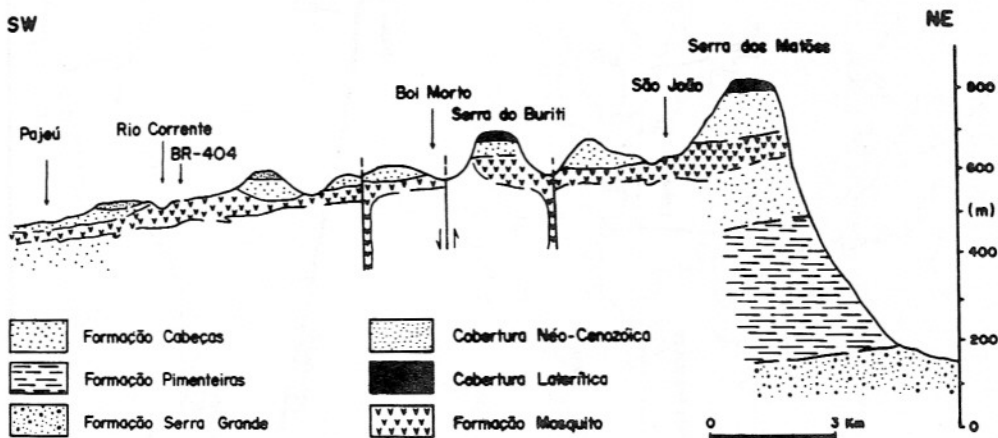


Figura 4 - Perfil geológico da região de Pedro II, mostrando a distribuição do "sill" básico e a cobertura laterítica (modificado de Rosa, 1988).

A OPALA DE PEDRO II

Geologia

Os garimpos e ocorrências de opala do Piauí estão situados, principalmente, dentro do contexto geológico dos lineamentos Transbrasiliano e Picos-Santa Inês (Figs. 1 e 3). Mas somente a região de Pedro II tem se mostrado como grande produtora de opala no Estado e no Brasil, sendo uma das mais importantes do mundo (Fig. 2).

De uma forma geral, as opalas do Piauí estão associadas a zonas quartzosas com pirita, junto aos diques de diabásio, sendo que, localmente, há zonas de concentração de goethita e hematita nas proximidades de zonas aplíticas (Lima & Leite, 1978; Oliveira et al., 1979; Baptista, 1981; Souza, 1985; BRASIL, 1986 e Rosa, 1988).

As opalas da região de Pedro II estão, invariavelmente, associadas aos diabásios, arenitos, siltitos, folhelhos e albititos. Nessas rochas, as opalas encontram-se sob a forma de veios e vênulas, principalmente, nos diabásios e arenitos, com forte evidências de hidrotermalismo.

Boi Morto: No garimpo de Boi Morto (Fig. 2), a opala forma vênulas e veios nas rochas acima citadas, bem como se comporta como cimento dessas rochas, intensamente brechadas. Nessa situação, o diabásio, inclusive, foi parcialmente transformado em esmectita. Calcedônia é freqüente junto às manifestações de opalas. Os arenitos mostram-se bastante recristalizados, de aspecto maciço (silicificado), desenvolvendo fraturas conchoidais e equivalendo a um hornfels. Corresponderia ao que Cassedanne & Cassedanne (1971) denominaram de quartzito duro. Os arenitos também podem conter hematita em concreções milimétricas a centimétricas, e feldspatos caolinizados. No contato inferior, encontram-se siltitos muito fraturados e falhados, onde se desenvolveram calcedônia e opala, podendo ser encontrado também gipso. Os siltitos gradam, na sua base, para folhelhos, os quais também estão intensamente microbrechados com manifestações opalinas nas fraturas, às proximidades de um sill de rocha básica.

O diabásio, geralmente, encontra-se bastante alterado hidrotermalmente, com coloração esverdeada, onde a opala é encontrada em microfissuras e microfalhas. O diabásio assim transformado, pode, local-

mente, ter a forma de brecha, onde a opala envolve os elementos fragmentados.

Roça: Neste garimpo (Fig. 2), a opala também ocorre sempre como veios e vênulas associadas ao diabásio, o qual está freqüentemente diaclasado. Está normalmente esmectitizado, o que o permite ser lavrado pelos métodos convencionais de garimpagem hidráulica. Nesse garimpo, o diabásio venular também contém muita sílica não opalina, milimétrica a centimétrica, ou mesmo opala em seus interiores. O colúvio que se sobrepõe aos diabásios é relativamente rico nesse tipo de opala, além de calcedônia e cristal de rocha.

Pajeú: Neste garimpo, foi estudada a cava lavrada nos idos de 1984 pela empresa ORION. É constituída por uma seqüência granoascendente de argilitos a arenitos, com diabásio na base, sob os argilitos, propiciado localmente por uma falha inversa. A opala precipitou-se no contato entre o diabásio e os sedimentos encaixantes, e, aparentemente, já foi completamente extraída. Lateritos imaturos, com horizonte ferruginoso concrecionário delgado (1 a 2 m de espessura), são encontrados no topo do perfil estratigráfico exposto, bem acima da zona opalina.

Mineralogia e Petrografia

As opalas de Pedro II são, principalmente, as variedades branca e negra (rara) da opala preciosa, as quais estão relacionadas aos diabásios, arenitos e em parte aos albititos.

Diabásios: Apresentam manifestações hidrotermais com a presença de tremolita-actinolita ao longo de fraturas, planos de clivagens e bordas, bem como no interior dos cristais de augita. Cristais de olivina encontram-se parcialmente serpentinizados, com opala venular junto à hematita, ao quartzo e a argilominerais. Os plagioclásios também encontram-se saussuritizados ou albitizados. A opala ocorre na variedade comum (isotrópica) e preciosa (lilás, verde e azul a luz polarizada), associando-se à tridimita (cristais prismáticos) e ao quartzo de granulação fina, com feições de ponto tríplice. A opala preciosa preenche, localmente, os interstícios entre as agulhas de hematita. Lamelas de argilomineral encontram-se como inclusões na opala.

Os diabásios de coloração cinza esverdeada a esverdeada são formados, principalmente, por esmectitas, derivadas da

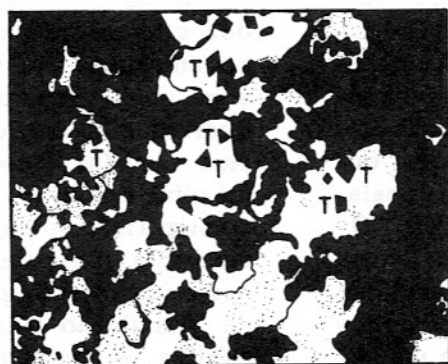
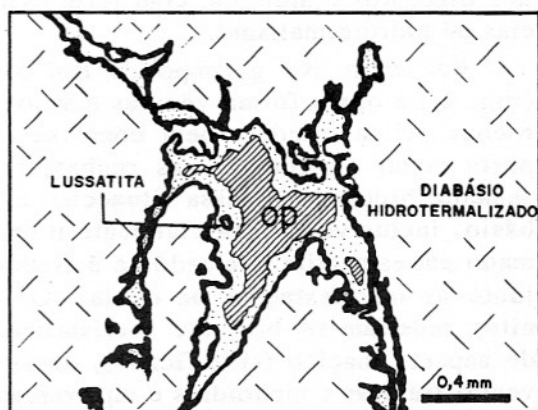
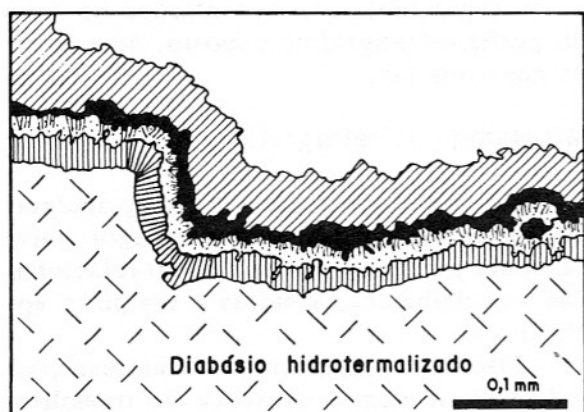
alteração dos minerais máficos. Quando ricos em vênulas e veios, o que lhes confere um aspecto brechado, contêm opalas nos veios e como cimento. Essas rochas ainda preservam a estrutura original da rocha fresca. As opalas, nas vênulas, estão dispostas em camadas (Figs. 5A, B e C), na seguinte seqüência: borda externa - argilominerais em plaquetas oblíquas, faixa de cristobalita fibrosa (lussatita), faixa de opala criptocristalina; centro - opala comum, isotrópica.

Arenitos: Os arenitos encontram-se, tanto em seus aspectos texturais originais, como em mosaico (textura granoblástica poligonal), devido à ação termal do emplacement do diabásio. Além de quartzo, contêm plagioclásios subordinados e saussuritizados. O quartzo encontra-se em grãos monocristalinos, de fraca extinção ondulante, com contatos côncavo-convexos e retilíneos, poligonizados com junção tríplice (Figs. 6A e B). É comum apresentarem feições de dissolução parcial, com desen-

volvimento de golfos de corrosão, onde há preenchimento com hematita. O contorno dos grãos foi mascarado, tanto pela recristalização, como pelo sobrecrecimento. A opala de cor amarelada está preenchendo os interstícios entre os grãos de quartzo ou junto às porções de hematita e plagioclásio (Figs. 5A e B). Titanita é um acessório comum em cristais prismáticos euédricos.

Albitos: São rochas de granulação fina, creme, constituída de albita e opala, e, localmente, opacos. A opala encontra-se, tanto em microfraturas, como disseminada na rocha, de tal forma que a rocha é opalescente. A albita forma cristais anédricos a euédricos, assimilados, parcialmente, pela opala, e também saussuritizados (Fig. 7).

Opala preciosa ocorre disseminada na rocha, tanto ocupando os interstícios, como substituindo a albita e mesmo a titanita. Sua cores são violeta, azul, verde e vermelho, com manifestações de opala comum, isotrópica.



○ Quartzo
 ◆ Tridimita
 — 0,2 mm

Figura 5 - A. Contato do diabásio hidrotermalizado com vênula de opala: 1) argilominerais; 2) lussatita; 3) opala microcristalina; 4) opala comum (ERG-8, Boi Morto, nicóis cruzados, 10 x). B. Opala preciosa (op). O plasma opalino individualiza concreções com lussatita no diabásio hidrotermalizado (ERG-8, Boi Morto, nicóis cruzados, 2,5 x). C. Cristais prismáticos de tridimita no quartzo (ERG-25, Roça, nicóis cruzados, 10 x).

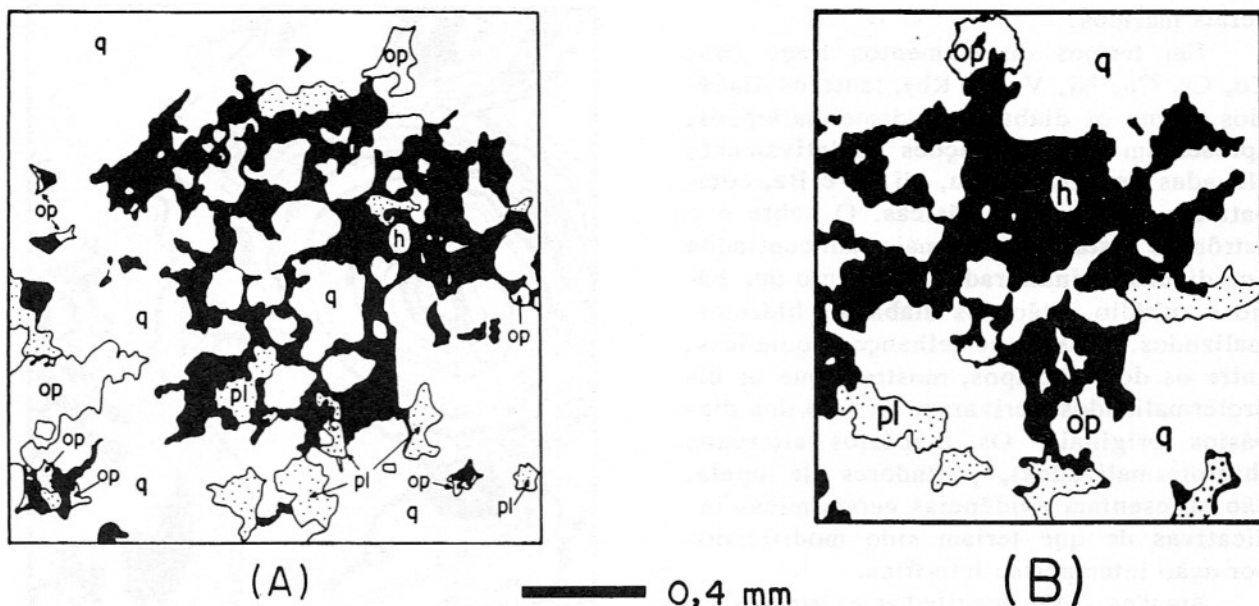


Figura 6 - Feições de dissolução parcial em grãos de quartzo (q), onde a hematita (h) encontra-se envolvendo porções reliquiárias do quartzo. A opala (op) ocorre associada à hematita e ao plagioclásio (pl) e, por vezes, nos interstícios dos grãos de quartzo (ERG-8/2, Boi Morto).

Opalas: A variedade branca da opala preciosa de Pedro II, a mais comum na região, é encontrada nos tipos arlequim, faixa (band opal), chuva (pinfire) e asa de borboleta (butterfly wing opal), segundo os diversos autores que trabalharam na região. A variedade branca é encontrada nos diabásios, arenitos, siltitos, folhelhos e albitos, sob a forma de veios e vênulas. A opala negra é rara, sendo verificada, principalmente, nos diabásios como vênulas delgadas; ambas estão associadas a calcedônia (Fig. 8), cristal de rocha e mesmo ametista.

As opalas de Pedro II são estruturalmente desde amorfas (A) a cristalinas. As opalas amorfas (A) mostram uma banda larga e difusa em torno de $4,04 \text{ \AA}$ (Fig. 9), enquanto as cristalinas são do tipo cristobalita-tridimita (CT), indicado pelo delineamento melhor da banda em $4,1 \text{ \AA}$. Existem evidências de várias zonas de transições entre estes tipos de opalas na região, ou seja, um ordenamento gradual da estrutura cristalina das opalas amorfas até às cristalinas. Rosa (1988) encontrou, em Pedro II, além de opalas A e CT, também a cristobalita (C). Jones & Segnit (1976 in Ball, 1982) associam a opala CT a regiões de fluxos de lavas já nos líquidos finais da cristalização, ou seja, a evento hidrotermal. A transformação da sílica amorfa em produtos cristalinos sob condições crescentes

de temperatura ($325 \text{ a } 448^\circ\text{C}$), de pressão ($15.000 \text{ a } 59.000 \text{ p.s.i}$) e de tempo (de 6 a 840 horas) tem sido investigada por diversos autores (Carr & Fyfe, 1958; Mizutani, 1966; Jones & Segnit, 1971), observando a progressiva mudança da sílica amorfa, sob condições hidrotermais, para opalas CT e C e, finalmente, quartzo. Constataram que os fatores principais são temperatura e tempo.

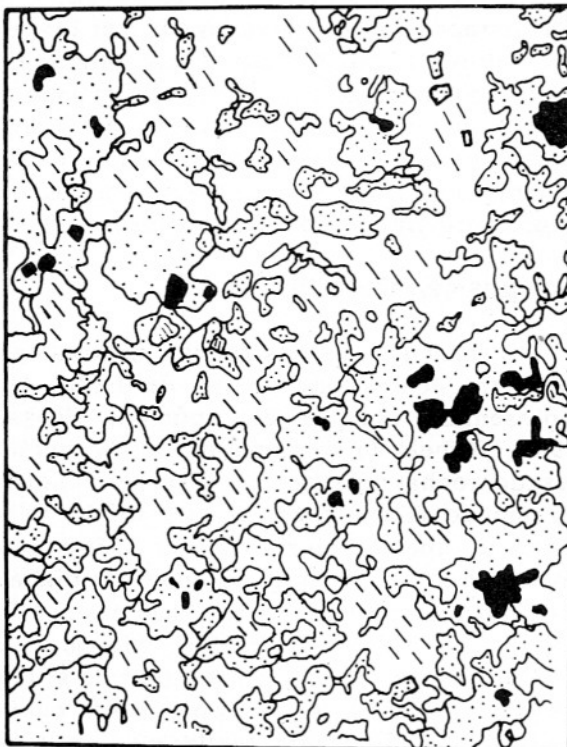
Composição Química

Diabásios - São as rochas encaixantes mais freqüentes das opalas de Pedro II. Apresentam composição química, (Rosa, 1988, (Tabela 1) similar à média das análises de rochas básicas de diversas regiões do mundo (Carmichael et al., 1974). Observa-se, apenas, teor médio de sílica e de sódio mais baixo nestes últimos. Os diabásios hidrotermalizados, com base nas análises de Oliveira et al. (1979), Martins Jr. (1983) e Rosa (1988), contêm teor de sílica variável (36,29 a 60,5%) com média equivalente aos diabásios inalterados, porém com Al_2O_3 mais concentrado (de 20,80 a 41,71%), Fe_2O_3 com teor variável de 2,2 a 20,8% e teores relativamente baixos de MgO (0,23 a 1,89%), CaO (0,15 a 1,05) e FeO (0,04 a 0,3%). Essa composição química dos diabásios hidrotermalizados reflete o domínio da esmectita nontronítica, derivada da alteração hidrotermal dos mi-

nerais máficos.

Em termos de elementos traço (Ba, Co, Cr, Cu, Ni, V, Sr, Rb), tanto os diabásios, como os diabásios hidrotermalizados, apresentam concentrações relativamente elevadas de Co, Cr, Cu, Ni, V e Ba, compatíveis com rochas básicas. O cobre e o estrôncio estão muito mais concentrados nos diabásios inalterados, enquanto que bário e rubídio estão nos diabásios hidrotermalizados. Essas semelhanças químicas, entre os dois litotipos, mostram que os hidrotermalizados derivaram de fato dos diabásios originais. Os diabásios alterados (hidrotermalizados), portadores de opala, não apresentam evidências geoquímicas indicativas de que teriam sido modificados por ação intempélica laterística.

Arenitos – Os resultados existentes na literatura e os obtidos neste trabalho (Tabela 1) mostram que os arenitos têm elevados teores médios de SiO_2 (88,7%), além de 2,6% de Al_2O_3 e 0,87% de Na_2O , o que ressalta, fundamentalmente, a composição



0,4 mm
● Opala comum ▨ Opala preciosa
○ Albita saussuritizada

Figura 7 – Albitito com ripas de albita saussuritizada dispostas aleatoriamente, e opala preciosa disposta intersticialmente (ERG-7, Roça, nicóis cruzados, 2,5 x).

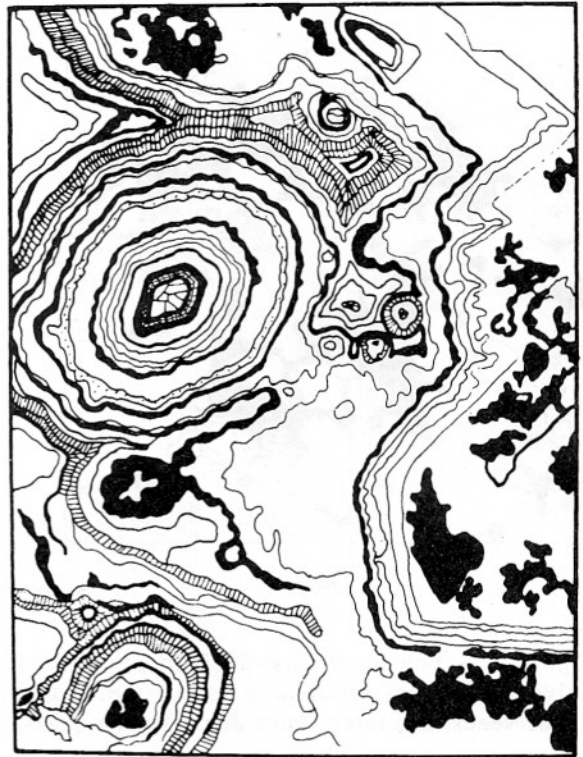


Figura 8 – Calcedônia com textura em franja (ERG-12, Roça, nicóis cruzados, 1 x).

mineralógica com abundância de quartzo, e contribuição de plagioclásio, opala e outros minerais.

Enquanto os dados de Moura (1982) mostram teores muito elevados de V (Tabela 1), Rosa (1988) relaciona 207 ppm de Ba e 1680 ppm de Co. Neste trabalho, os teores de Co obtidos para essas rochas foram da ordem de 47 ppm. Merecem destaque os teores de Ni, que, em conjunto com os de Co, podem sugerir uma influência da atividade termal dos diabásios.

Siltitos – São ricos em SiO_2 (74,21%) e Al_2O_3 (11,3%) e mesmo em Na_2O (4,7%) (Rosa, 1988 - Tabela 1), representando a mineralogia com domínio de quartzo e participação de plagioclásio entre outros.

As concentrações de Ba e Cr, mais elevadas do que nos arenitos, e mesmo as concentrações de Co e Cu, mostram que essas rochas podem ter sido mais afetadas pelo efeito termal dos diabásios, ou foram rochas mais favoráveis à contaminação química, devido a sua maior reatividade químico-mineralógica.

Opalas – A composição química das opalas de Pedro II é apresentada na Tabela 2. Essas opalas contêm em média 86,66% de SiO_2 , segundo Rosa (1988), e 92,48%,

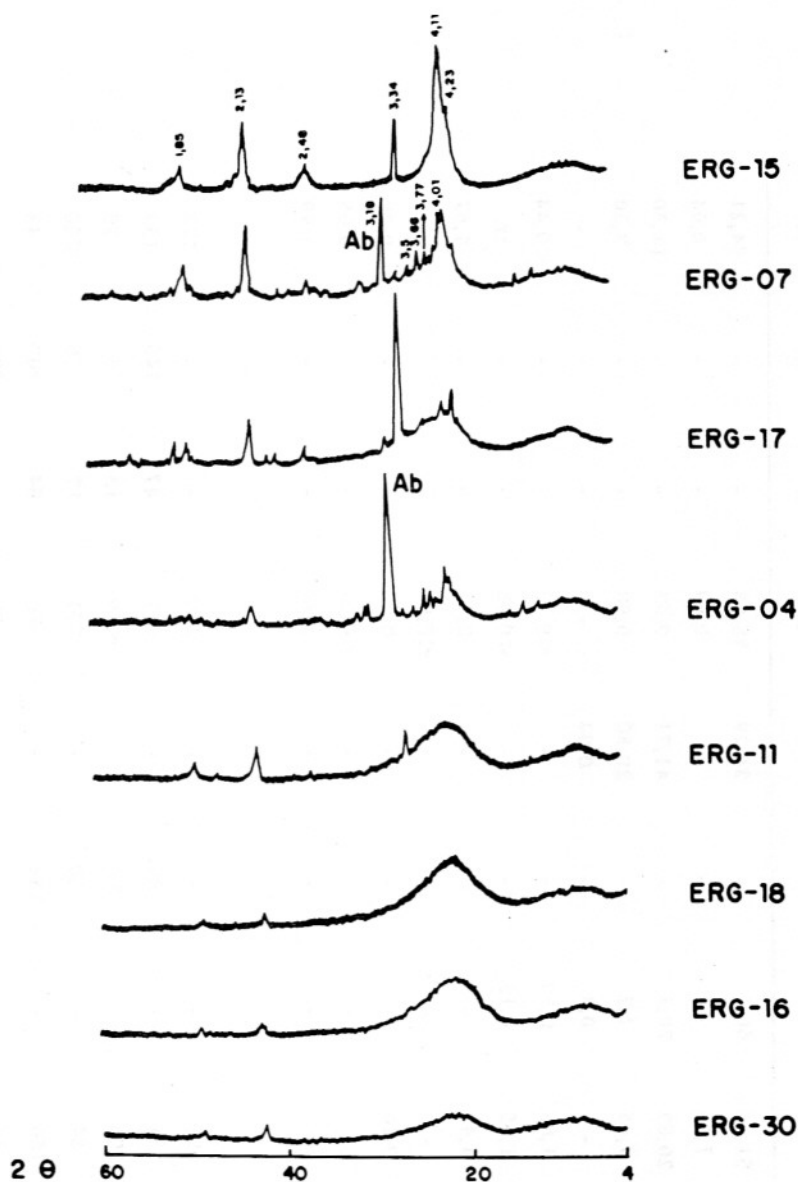


Figura 9 - Difratoogramas de raios X mostrando os diferentes graus de cristalinidade das opalas encontradas em Pedro II. Ab: albita em albititos (ERG-04 e ERG-07).

segundo Souza (1985), enquanto as análises obtidas neste trabalho (Tabela 3) mostram concentrações superiores de SiO_2 (91,36 a 94,87%). Teores de 98% (recalculados a 100%) foram obtidos através de MEV/EDS de forma semi-quantitativa (Tabela 4), que, se recalculados com base em $\text{PF} = 6,2$, equivalem aos teores indicados acima. Também contêm teores significativos de Al_2O_3 (0,87 a 24,13%), sendo mais comum abaixo de 2,84%, o que está dentro da faixa apresentada por Bartoli et al. (1983), e são comparáveis àqueles das opalas australianas. As opalas de Pedro II ainda contêm teores significativos de Na_2O e CaO , enquanto os de TiO_2 são extrema-

mente baixos. O conteúdo de H_2O fica abaixo de 6,80%. Enquanto Rosa (1988) obteve concentrações de Co, Cu e Ni muito elevadas (respectivamente, <5.600, <2.700 e <1.100 ppm) nas opalas de Pedro II, neste trabalho foram encontrados teores muito baixos para esses elementos, sendo os máximos, respectivamente, 15, 141 e 32 ppm, na ordem de grandeza dos dados fornecidos por Moura (1982), em nfeis crustais ou abaixo destes. Os teores de Co e Ni, obtidos nas opalas de Pedro II, são, inclusive, inferiores àqueles das opalas australianas reportadas por Bayliss & Males (1965).

Análises químicas semiquantitativas

Tabela 1 – Composição química média dos diabásios, diabásios hidrotermalizados, arenitos e siltitos da região de Pedro II, Piauí.

				Diabásio			Diabásio Hidrotermalizado			Arenito	Siltito
	N = 7 (a)	N = 33 (b)	N = 1 (c)	N = 2 (a)	N = 1 (b)	N = 1 (c)	N = 2 (d)	N = 7 (a)	N = 1 (b)	N = 1 (c)	N = 4 (a)
SiO ₂	53,36	51,26	-	51,46	60,5	-	36,29	88,68	-	-	74,21
TiO ₂	1,59	-	-	1,46	-	-	-	0,69	-	-	0,94
Al ₂ O ₃	13,87	14,51	-	20,82	20,8	-	41,71	2,63	-	-	11,30
Fe ₂ O ₃	11,79	3,75	-	7,45	2,2	-	20,80	0,98	-	-	3,30
FeO	-	7,81	-	-	0,3	-	0,04	-	-	-	-
MgO	<5,17	6,28	-	1,89	0,23	-	-	<0,13	-	-	<0,44
CaO	7,58	9,58	-	1,05	0,15	-	-	<0,08	-	-	tr.
Na ₂ O	2,70	-	-	4,47	-	-	-	0,87	-	-	4,67
K ₂ O	0,89	-	-	-	-	-	-	<0,08	-	-	-
MnO	0,17	-	-	0,16	-	-	-	0,02	-	-	0,20
P ₂ O ₅	<0,28	-	-	-	-	-	-	<0,03	-	-	0,05
P.F.	2,98	-	-	-	-	-	-	1,58	-	-	3,99
ppm											
Ba	400	-	-	699	-	-	-	<89	-	-	173
Co	113	-	88	131	-	86	-	671	47	145	159
Cr	63	-	62	105	-	51	-	<19	15	31	70
Cu	325	-	177	84	-	60	-	<11	17	10	<20
Ni	108	-	99	156	-	134	-	41	64	200	43
V	289	-	-	214	-	-	-	58	-	590	133
Sr	276	-	-	98	-	-	-	<20	-	234	<54
Rb	26	-	-	119	-	-	-	<10	-	-	<13

(a) Rosa, 1988; (b) Oliveira et al., 1979; (c) este trabalho; (d) Martins Jr., 1983; (e) Moura, 1982

N = Número de amostras analisadas

Tabela 2 – Composição química das opalas de Pedro II e da Austrália.

% em peso	N = 12 (1)			N = 6 (2)			N = 3 (3)			(4)		
	Média	Maior	Menor	Média	Maior	Menor	Média	Maior	Menor	Média	Maior	Menor
SiO ₂	86,66	93,10	64,10	92,48	93,80	91,50	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	4,46	24,13	0,87	1,20	1,50	0,94	-	-	-	1,65	2,50	1,20
MgO	<0,22	0,97	tr.	0,05	0,05	0,05	-	-	-	0,06	0,10	0,04
CaO	<0,63	2,47	tr.	0,26	0,44	0,17	-	-	-	0,60	0,90	0,20
Na ₂ O	0,77	4,59	0,08	0,14	0,14	0,12	-	-	-	0,23	0,40	0,05
Fe ₂ O ₃	-	-	-	0,06	0,09	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	0,20	0,30	0,15
MnO	-	-	-	0,05	0,05	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	<0,01
K ₂ O	-	-	-	0,07	0,08	0,05	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	-	-	-	0,05	0,05	0,05	0,01	0,03	<0,01	0,03	0,10	0,10
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
P.F.	-	-	-	6,20	6,80	5,50	-	-	-	-	-	-
ppm												
Co	<3718	5600	tr.	-	-	-	20	37	10	35	50	20
Cu	<487	2700	tr.	-	-	-	56	138	14	30	100	4
Ni	<566	1100	100	-	-	-	15	17	13	25	30	20
Be	-	-	-	-	-	-	21	40	9	-	-	-
B	-	-	-	-	-	-	22	29	15	-	-	-
V	-	-	-	-	-	-	<10	<10	<10	-	-	-
Zn	-	-	-	-	-	-	130	148	105	-	-	-
Sr	-	-	-	-	-	-	106	120	98	-	-	-

(1) Rosa, 1988; (2) Souza, 1985; (3) Moura, 1982; (4) Bayliss & Males, 1965

N = Número de amostras analisadas; - = não analisado

Tabela 3 – Composição química das opalas, segundo este trabalho.

% em peso	ERG-11 (1)	ERG-9 (1)	ERG-9 (2)	ERG-10 (2)	ERG-16 (2)	ERG-32 (2)	ERG-17 (3)	ERG-18 (3)
SiO ₂	91,36	94,87	-	-	-	-	-	-
Al ₂ O ₃	2,75	2,97	-	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	<0,01	0,19	-	-	-	-	-	-
FeO	<0,10	<0,10	-	-	-	-	-	-
MgO	-	-	-	-	-	-	-	-
CaO	-	-	-	-	-	-	-	-
Na ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-
MnO	-	-	0,01	0,02	<0,01	<0,01	-	-
K ₂ O	-	-	-	-	-	-	-	-
TiO ₂	<0,10	<0,10	-	-	-	-	-	-
P ₂ O ₅	0,22	0,35	-	-	-	-	-	-
ppm								
Co	-	-	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<15	<15
Cu	-	-	49	141	11	27	<15	<15
Ni	-	-	32	8	17	12	<15	<15
Cr	-	-	11	19	9	12	-	-
V	-	-	-	-	-	-	-	-

(1) Análise química por via úmida; (2) absorção atômica; espectrografia de emissão ótica semi-quantitativa

- Não analisado

Tabela 4 – Composição química semi-quantitativa de opalas de Pedro II, obtida por MEV/EDS.

% peso	ERG-33	ERG-34
SiO ₂	98,68 (92,56)	98,48 (92,37)
Al ₂ O ₃	<0,01	0,01
Fe ₂ O ₃ ^t	0,93	1,28
MgO	<0,01	<0,01
CaO	<0,10	<0,01
Na ₂ O	<0,01	<0,01
K ₂ O	0,28	0,23
MnO	0,01	<0,01

Teores recalculados a 100%. () Teores recalculados, tendo como base PF = 6,2% em peso.

com MEV/EDS (Tabela 3 e Fig. 10) mostram que, de fato, as opalas de Pedro II estudadas neste trabalho são pobres em elementos traços.

Outras Características

As opalas de Pedro II, quando submetidas a temperatura de até 220°C, em intervalos diferentes de tempo, não apresentaram modificações de suas propriedades gerais. Essas opalas também são, em geral, não fluorescentes, nem em ondas curtas, nem em ondas longas. Em 235 amostras, apenas uma apresentou fluorescência (ondas curtas) em tonalidade verde.

ORIGEM DAS OPALAS

Considerações Gerais

As evidências geológicas apresentadas indicam de forma bastante clara que as ocorrências de opala de Pedro II estão situadas dentro de um ambiente hidrotermal, onde o emplacement do diabásio em rochas clásticas (Fig. 4), desde arenitos até folhelhos (Formação Cabeças), foi o agente térmico responsável, enquanto os sedimentos, bem como o próprio diabásio, foram as rochas hidrotermalizadas e receptoras da mineralização. São evidências: a presença de arenitos com metamorfismo termal (hornfels); as texturas venular e brechóide; a alteração do diabásio em mas-

sas de esmectita ou em tremolita-actinolita, clorita, serpentina, albita, carbonato, epidoto, sericita, argilominerais, titanita e opacos, típicos de ambiente hidrotermal; até mesmo a presença de albitos opalizados; e a presença de elementos químicos dos diabásios nos arenitos e argilitos.

A Formação Cabeças (Grupo Canindé) constituiu-se de uma seqüência muito favorável ao estabelecimento de um ambiente hidrotermal, já que, até o presente, ainda é um dos principais aquíferos da Bacia Sedimentar do Parnaíba. A permoporosidade desses sedimentos diminui muito com sua aproximação aos "sills" de rochas básicas (Soeiro, 1988), onde os siliciclásticos foram silicificados numa auréola de até 20 m (Martins Jr., 1983). A salinidade das águas desse aquífero aumenta com a profundidade, sendo que nas partes mais profundas pode ser encontrada até água salgada (PETROBRÁS, 1963).

A constituição predominantemente quartzosa dos sedimentos da Formação Cabeças é também importante fonte de sílica para formação de minerais silicosos (opalas, calcedônia e quartzo), especialmente as de granulometria mais finas.

As rochas básicas da região de Pedro II são de amplitude regional, e alojaram-se durante a reativação do Lineamento Sobral-Pedro II, entre o Jurássico e o Eo-Cretáceo, preferencialmente nas zonas de fraqueza entre as fácies pelítica e psamítica da Formação Cabeças. São sills e diques de rochas gabróicas com 20 a 150 m de espessura (Oliveira et al., 1979). O domínio das ocorrências de opalas no Piauí associadas aos diabásios e ao longo dos lineamentos Picos-Santa Inês e Transbrasiliiano, onde se alojaram estes corpos, reforçam a relação das opalas com a atividade hidrotermal (Figs. 1 e 3).

Os Efeitos da Intrusão do Diabásio no Arenito

Na bacia sedimentar do Parnaíba, no âmbito da Formação Cabeças, frequentemente os arenitos estão termalmente metamorfizados às proximidades dos diabásios (PETROBRÁS, 1963). Segundo Jaeger (1968) e Sial & McReath (1984), isso ocorre quando a intrusão se dá em níveis crustais superiores, onde as rochas encaixantes estão mais frias.

Uma intrusão desenvolveu uma anomalia termal, que aqueceu os fluidos da ro-

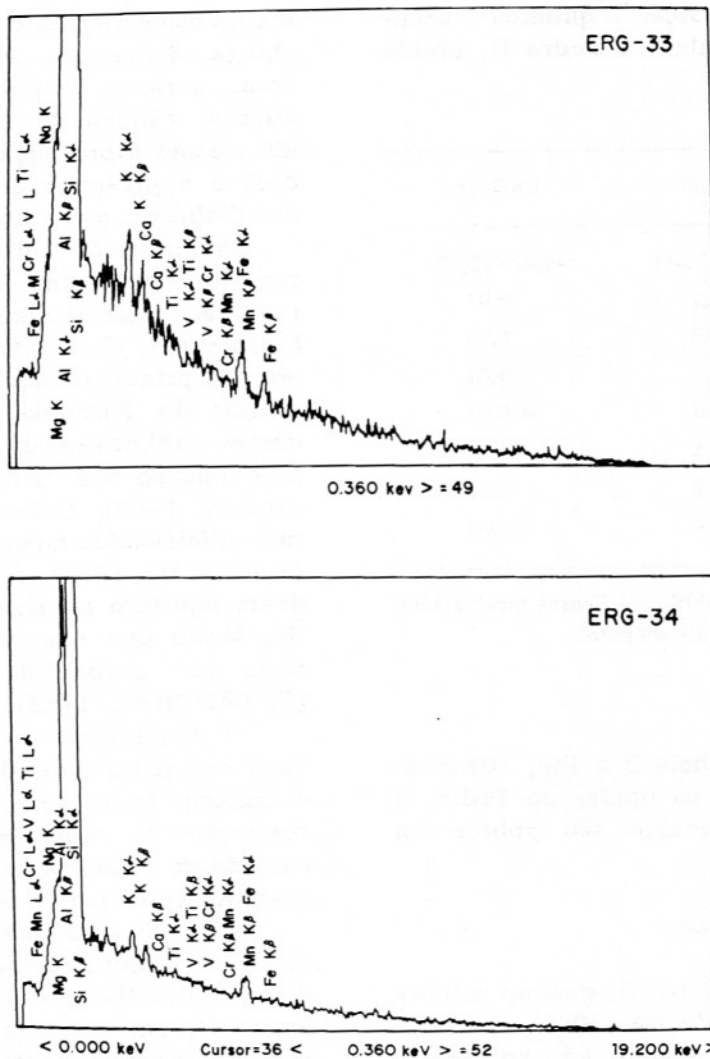


Figura 10 - Espectrogramas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)/Sistema de Energia Dispersiva (SED) das opalas de Pedro II.

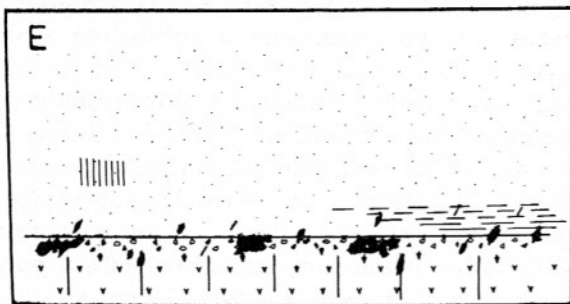
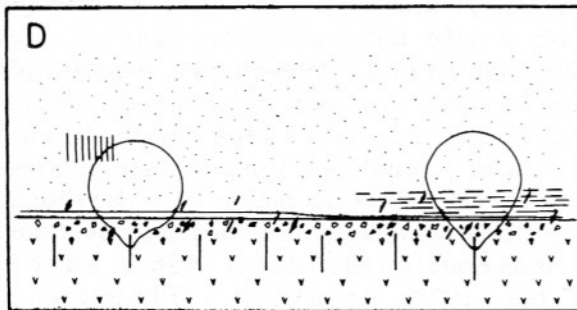
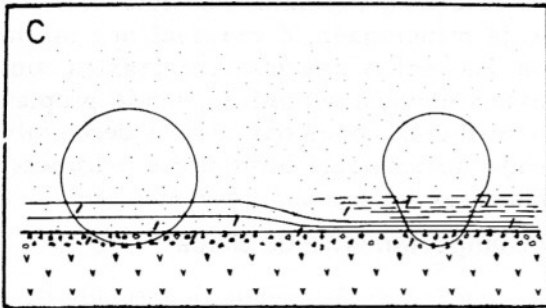
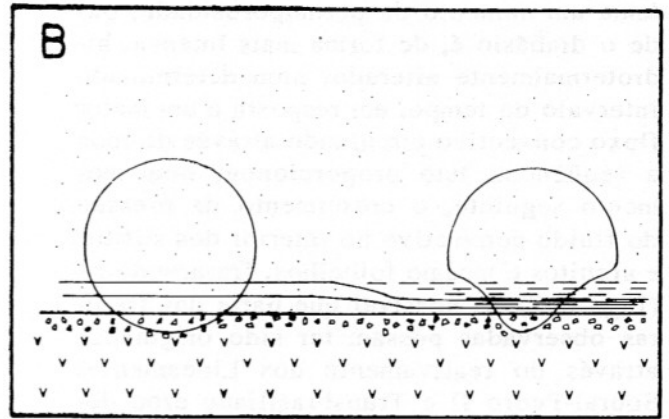
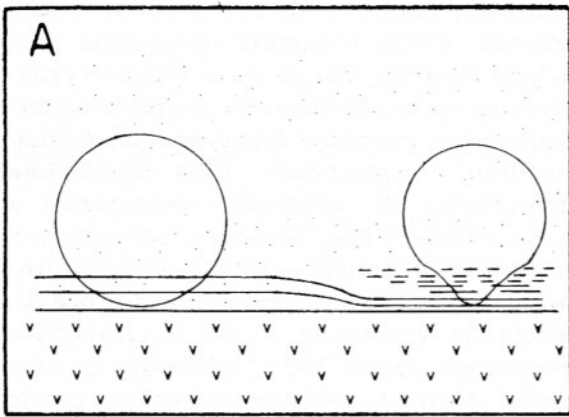
cha encaixante, no caso a Formação Cabeças, rica em água, ou mesmo transferiu fluidos para a mesma, sendo que a temperatura pode alcançar centenas de graus Celsius. A anomalia térmica, então, dispersa-se por transmissão de calor, via condução e, principalmente, via células de convecção de fluidos - o processo dominante - em meio saturado com fluidos e com boa permeabilidade. Nestas condições, as isotermas distribuem-se, aproximadamente, paralelas à anomalia termal (Norton & Knapp, 1977; Norton & Knight, 1977; Villas & Norton, 1977; Norton & Cathies, 1979).

Em Pedro II, o emplacement básico ocorreu em níveis crustais superiores, provocando o aquecimento dos fluidos existentes nas rochas sedimentares encaixantes, dando origem às células de convecção de

até 20 m de amplitude, sugerida pela silicificação dos arenitos, com as isotermas certamente paralelas à superfície externa do "sill" (Fig. 11A).

Em função da variação da granulometria das rochas encaixantes com a profundidade (arenitos até folhelhos), ocorreu uma mudança vertical da permeabilidade, que deve ter alterado, em parte, o estilo de circulação dos fluidos, confinados aos estratos mais permeáveis, e refratados nas discontinuidades de permeabilidade, o que é discutido por Norton & Knight (1977).

A pressão do fluido convectivo, atuando no contato diabásio/rocha encaixante, num determinado momento, iguala-se à pressão confinante, dando origem a um denso fraturamento hidráulico (Fig. 11B), surgindo a brechação (comunicação verbal de Augusto Kishida). Surge assim, no sis-



LEGENDA

○ □ □ □
v v v v Diabásio hidrotermalizado

| Diáclases

|||| Juntas colunares

/// Opala

○ ○ ○ ○ Arenito

- - - - Siltito

== Folhelho

v v v v Diabásio

○ Célula de convecção de fluidos

== Isotermas

○ ○ ○ ○ Brecha

/ Microfalha e fraturas

Figura 11 - A. "Emplacement" do diabásio com desenvolvimento de células de convecção de fluidos. As isothermas são paralelas à superfície externa do referido "sill". B. Fraturamento hidráulico, sem direção predominante na interface diabásio-rocha encaixante. C. Fraturamento hidráulico, com direção predominante (fraturas e falhas). D. Resfriamento do sistema hidrotermal, com formação de diáclases e disjunção colunar, e início da precipitação da opala. E. Precipitação da opala, ocupando as fendas existentes.

tema um aumento da permporosidade, onde o diabásio é, de forma mais intensa, hidrotermalmente alterado, num determinado intervalo de tempo, em resposta a um maior fluxo convectivo circulando através de toda a seqüência. Isto proporcionou, num momento seguinte, o crescimento da pressão do fluido convectivo no interior dos siltitos e arenitos e mesmo folhelhos, fraturando-os (Fig. 11C). É possível que parte das fraturas observadas possam ter sido originadas através do reativamento dos Lineamentos Sobral-Pedro II e Transbrasiliano e/ou devido a tensão gerada pelo emplacement do magma básico (Figs. 1 e 4).

O resfriamento do sistema hidrotermal leva à contração das rochas, originando diáclases, em direção perpendicular à superfície de resfriamento (Sial & McReath, 1984), fato observado no diabásio e na fácies psamítica de Pedro II (Fig. 11D). Esta estrutura foi, favorável à penetração de soluções hidrotermais, como mostra a presença de tremolita-actinolita e olivina serpentinizada, ambas no contato do veio de opala com o diabásio.

A opala teria sua precipitação iniciada, dentre outros fatores, após a dispersão da anomalia térmica e, conseqüentemente, da razão de circulação dos fluidos (Figs. 11D e E).

O Ambiente Hidrotermal

Os fluidos presentes no sistema hidrotermal de Pedro II eram, provavelmente, do tipo seccional, oriundo das rochas encaixantes, mobilizados pela excitação térmica da intrusão. Os de fluidos do estágio final da cristalização do corpo básico parecem ter sido contaminados parcialmente com elementos químicos provenientes da decomposição hidrotermal inicial dos minerais formadores das rochas básicas. Isto é sugerido pela presença de elementos traço, tais como Co, Cu, Ni e Ba, em concentrações significativas nos sedimentos afetados pela alteração termal. O transporte desses e de outros elementos deve ter sido basicamente por infiltração e menos por difusão. As opalas e suas rochas encaixantes estão situadas em um quadro, indubitavelmente, não laterfítico.

A ação hidrotermal é bem evidenciada pela alteração da augita para tremolita-actinolita, titanita, clorita e exsudação de opacos; e da olivina para serpentina. Também os plagioclásios foram alterados para

carbonato, epídoto, sericita e albita. Neste contexto, albita e titanita localmente preenchem fissuras, chegando a formar verdadeiros albititos. Fortalecem a ambiência hidrotermal, a presença freqüente de quartzo cristalino e calcedônia. Essa assembléia mineralógica de alteração corresponde a fácies albita-epídoto hornfels, assumindo a função de geotermômetro e geobarômetro. Por conseguinte, assume-se que o processo hidrotermal atuante em Pedro II alcançou a temperatura de até 300°C e pressão de cerca de 1 Kbar. A presença de argilominerais (esmectita, principalmente) e carbonatos sugere, ainda, a natureza neutra a alcalina das soluções, portanto, não laterfítica. Como já mencionado, é provável que os fluidos das rochas clásticas encaixantes contivessem elevada salinidade, tendo propiciado melhores condições para o desenvolvimento do ambiente hidrotermal e fornecido elementos como sódio, magnésio, etc.

O Comportamento da Silica

As fontes da grande quantidade de sílica para formar opalas, calcedônica e quartzo, em Pedro II, foram, fundamentalmente, os diabásios e as siliciclásticas, que sob a ação térmica tiveram seus silicatos desestabilizados. Temperatura, pressão, pH da solução, presença de sais e de cátions metálicos (ex.: Al^{3+} e Mg^{2+}) controlaram o processo. Condições típicas desse ambiente, prevaleceram na região. A solubilidade da sílica aumenta com a alcalinidade e com a temperatura (Krauskopf, 1956 in Yariv & Cross, 1979; Krauskopf, 1959 in Siever, 1972), independente da ampla variação de pressão, exceto próximo ao ponto crítico da água (Holland & Malinin, 1979). Enquanto esses fatores aumentam a solubilidade da sílica, a presença de NaCl e Al^{3+} e mesmo Mg^{2+} na solução reduzem a solubilidade da mesma (Way & Siffer, 1961 in Yariv & Cross, 1979). Ou seja, inicialmente, o ambiente hidrotermal de Pedro II, sob temperatura mais elevada, decompôs os minerais silicatados primários, transferiu sílica para o sistema, que com a saturação em sílica e a presença de sais de Al^{3+} e Mg^{2+} propiciaram a sua insolubilização. Segundo Kastner et al. (1977), isto começa a ocorrer já a partir de 150°C, quando se forma opala A, que na presença de núcleos de Mg^{2+} e OH^{-} dá origem a opala CT.

CONCLUSÕES

Embora a região de Pedro II tenha

ocorrência de lateritos, situados, principalmente, nas superfícies mais elevadas, as jazidas de opala são encontradas apenas dentro das rochas alteradas hidrotermalmente, sem que se observe nelas quaisquer evidências de intemperismo laterítico. Obviamente que as opalas, em certos locais, podem ser encontradas como componente de materiais coluvionares e aluvionares, ao lado de muitos fragmentos de rochas, inclusive de lateritos, ou mesmo dentro de paleoaluviões já ferruginizados localmente. Em Boi Morto, por exemplo, enquanto o perfil de alteração laterítica não alcança 10 m de profundidade, as opalas são encontradas entre 40 e 45 m abaixo da atual superfície, em rochas sãs. Os dados aqui apresentados mostram que as opalas de Pedro II estão intimamente ligadas a um ambiente

hidrotermal, surgido quando do emplacement dos diabásios nas siliciclásticas da Formação Cabeças, já provavelmente no final do Cenozóico (Eo-Cretáceo).

AGRADECIMENTOS

À Prefeitura Municipal de Pedro II, pela concessão de apoio logístico nos trabalhos de campo; à PETROBRÁS, pela permissão a consulta de relatórios técnicos sobre a região; à família Galvão, pela acolhida em Pedro II, ao Prof. Dr. Herbert Poellmann, da Friedrich Alexander Universität Erlangen-Nuernberg, pelas análises de MEV/EDS; e aos técnicos do Departamento de Geoquímica e Petrologia do Centro de Geociências (UFPa), pelo apoio nos diversos trabalhos analíticos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALL, R.A. (1982) Common opal and potch opal. *The Austr. Gem.*, August, p. 305-310.
- BAPTISTA, J.G. (1981) *Geografia Física do Piauí*. 2ª ed., Teresina, Comepi, 368p.
- BARTOLI, F.; MEYER, R.; MOURA, F. de F.; SAMAMA, J.C. (1983) Caractérisation chimico-minéralogique de l'opale noble des gisements du nord-est du Brésil. Paris, Note, C.R. Acad. Sc. Paris, 296: 625-630.
- BARTOLI, F.; ROSA, D.B.; DOIRISSE, M.; MEYER, R.; PHILIPPY, R.; SAMAMA, J.C. (1990) Role of aluminium in the structure of Brazilian opals. *Eur. J. Mineral.*, 2: 611-619.
- BAYLISS, P. & MALES, P.A. (1965) The mineralogical similarity of precious and common opal from Australia. *Mineralogical Magazine*, 35(270): 429-431.
- BRASIL - Departamento Nacional da Produção Mineral (1986) Avaliação regional do setor mineral do Piauí. Brasília, 125p.
- CARMICHAEL, I.S.E.; TURNER, F.J.; VERHOOGEN, J. (1974) *Igneous petrology*. New York, McGraw-Hill Book, 740p.
- CARR, R.M. & FYFE, W.S. (1958) Some observation on the crystallization of amorphous silica. *Am. Min.*, 43(9/10): 908-916.
- CASSEDANNE, J.P. (1991) Tipologia das jazidas brasileiras de gemas. In: *Principais depósitos minerais do Brasil*, 4: 337-346.
- CASSEDANNE, J.P. & CASSEDANNE, J.O. (1971) Nota sobre a exploração da opala nobre de Boi Morto. *Bol. Geoc., IG/UFRJ*, 6: 15-21.
- GÓES, A.M. de O.; SOUZA, J.M.P. de; TEIXEIRA, L.B. (1990) Estágio exploratório e perspectivas petrolíferas da Bacia do Parnaíba. *Bol. Geoc., PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, 4(1): 55-64.
- GOMES, E.R. (1990) Contribuição à mineralogia, geoquímica e gênese das opalas de Pedro II, Piauí. Universidade Federal do Pará, Belém, PA, trabalho de conclusão de curso, TCC, 94p.
- HOLLAN, H.D. & MALININ, S.D. (1979) The solubility and occurrence of non-ore minerals. In: Barnes, H.L., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2ª ed., New York, John Wiley & Sons, p. 461-508.
- JAEGER, J.C. (1968) Cooling and solidification of igneous rocks. In: Hess, H.H., *Basalts - The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition*, New York, John Wiley & Sons, 2: 503-536.
- JONES, J.B. & SEGNI, E.R. (1971) The nature of opal. I. Nomenclature and constituent phases. *J. Geol. Soc. Austr.*, 18(1): 57-68.
- KASTNER, M.; KEENE, J.B.; GIESKES, J.M. (1977) Diagenesis of siliceous oozes. I. Chemical controls on the rate of opal A to opal CT transformation - an experimental study. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 41(8): 1041-1059.
- LIMA, E.A.M. & LEITE, J.F. (1978) Projeto Estudo Global dos Recursos Minerais da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Brasil, DNPM/CPRM, Rel. final da etapa III, V. 11, anexos.
- MARTINS JR., F.L. (1983) Aspectos genéticos das opalas preciosas de Pedro II, Piauí, Brasil. *Rel. Int., Fortaleza, MLB - Minera-*

- ção Brasileira Ltda, 10p.
- MIZUTANI, S. (1966) Transformation of silica under hydrothermal conditions. *J. Earth Sci.*, **14**: 56-88.
- MOURA, F. de F. (1982) *Minéralogie des opales précieuses de Pedro II, Piauí, Brésil. Contribution à la connaissance CESEV-ENSG, Nancy, Rapport fin de cycle, 17p.*
- NEN, L.H.B. de S. & URBANO FILHO, C. (1974) A opala brasileira no Piauí. In: *Congr. Bras. Geol.*, **28**, Porto Alegre, 1974, Resumos... Porto Alegre, SBG, Bol. n° 1, p. 593-595.
- NEVES, C.A. de O.; SILVA, A.B. e; GÓES, A.M. de O.; LIMA, M.P. de (1990) Projeto de Exploração, Bacia do Parnaíba. PETROBRÁS/DEPEX/DENOR, Rel. Int., Belém, 24p.
- NORTON, D.L. & KNAPP, R. (1977) Transport phenomena in hydrothermal systems: nature of porosity. *Am. Jour. Sci.*, **277**: 913-936.
- NORTON, D.L. & KNIGHT, J. (1977) Transport phenomena in hydrothermal systems: cooling plutons. *Am. Jour. Sci.*, **277**: 937-981.
- NORTON, D. & CATHLES, L.M. (1979) Thermal aspects of ore deposition. In: Barnes, H.L., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*, 2ª ed., New York, John Wiley & Sons, p. 611-631.
- OLIVEIRA, J.F. & SOARES FILHO, A.R. (1983) Garimpos de opalas da região de Pedro II, Piauí. In: *Brasil, DNPM, Garimpos do Brasil, Brasília, DFPM, avulso n° 5*, p. 119-136.
- OLIVEIRA, J.C. de; CARDOSO, C.E.T.; QUINHÓ, J. de S.; AMORIM, H.J. (1979) Projeto opala em Pedro II. Relatório final, Recife, DNPM/CPRM, 2 v., II.
- PETROBRÁS (1963) Perfis compostos dos poços perfurados na Bacia Sedimentar do Parnaíba. PETROBRÁS/DENOR, Belém, Rel. Int.
- ROSA, D.B. (1988) Les gisements d'opales nobles de la region de Pedro II, dans l'état de Piauí (region nord-est du Brésil). Nancy, 327p, Th. Docteur, INPL-ENSG.
- SAUER, J.R. (1982) *Brasil, Paraíso das Pedras Preciosas*. Rio de Janeiro, Ed. Riex, 140p.
- SIAL, A.N. & McREATH, I. (1984) *Petrologia ígnea: os fundamentos e as ferramentas de estudo*. Salvador, SBG/CNPq/BUREAU, v. 1.
- SIEVER, R. (1972) Silicon. In: Wedepohl, K.H., *Handbook of Geochemistry*, Berlin, Springer-Verlag, v. II/3, p. 14-H-1 - 14-H-7.
- SOEIRO, P.A.S. (1988) Catálogo de porosidade da Bacia do Parnaíba. PETROBRÁS/DENOR/DIRGEO, Rel. Int., Belém, 30p.
- SOUZA, W.C. (1985) Perfil analítico da opala. Brasília, DNPM, Bol. n° 57, 44p.
- SOUZA, V.C. & ROBERTO, F.A.C. (1989) Depósitos de opala de Pedro II, Piauí. In: *Simp. Geol. NE, 13, Fortaleza, 1989, Atas... Fortaleza, SBG, Núcleos Fortaleza, NE e BA, Bol. 11: 55-58.*
- VILLAS, R.N. & NORTON, D. (1977) Irreversible mass transfer between circulating hydrothermal fluids and the mayflower stock. *Econ. Geol.*, **72**: 1471-1504.
- YARIV, S. & CROSS, H. (1979) *Geochemistry of colloid systems*. Berlin, Springer-Verlag, 456p.