



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

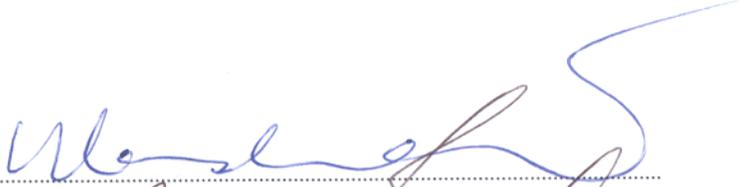
“ A AMETISTA DE PAU D’ARCO E ALTO BONITO NO PARÁ E A DO ALTO URUGUAI NO RIO GRANDE DO SUL ”.

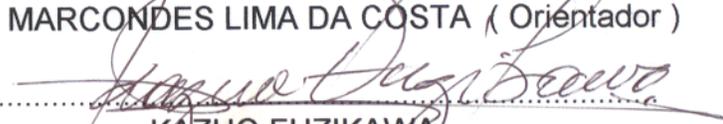
TESE APRESENTADA POR
CARLOS TADEU CASSINI

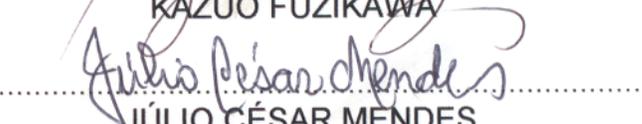
Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Ciências na Área de GEOQUÍMICA E PETROLOGIA.

Data de Aprovação 23.03.1998

Comitê de Tese:


.....
MARCONDES LIMA DA COSTA (Orientador)


.....
KAZUO FUZIKAWA


.....
JÚLIO CÉSAR MENDES

BELÉM

À minha família, principalmente aos meus pais, Remi e Therezinha e, a minha avó, Maria Domaradzki que sempre acreditaram em mim.

À Adriana, pelo incentivo, carinho e paciência durante todos esses anos.

...E a Pity, uma estrela que brilhou na hora certa e, que, sem perceber, mudou muitas coisas em mim.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTOS	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	v
RESUMO	1
ABSTRACT	3
1 - INTRODUÇÃO	5
1.1 - OBJETIVOS.....	6
1.2 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	6
1.2.1 - Trabalho de Campo.....	6
1.2.2 - Procedimentos Analíticos.....	7
1.2.3 - Metodologia para estudos das inclusões fluidas (IF).....	8
1.2.3.1 - Características gerais das inclusões fluidas.....	9
1.2.3.2 - O método microtermométrico.....	10
2 - A AMETISTA	14
2.1 - HISTÓRICO.....	14
2.2 - GENERALIDADES.....	14
2.3 - A COR NA AMETISTA.....	16
2.4 - PROPRIEDADES GEMOLÓGICAS.....	16
3 - A AMETISTA DE PAU D'ARCO-PA	19
3.1 - ASPECTOS GERAIS.....	19
3.2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO AO GARIMPO.....	20
3.3 - GEOLOGIA DO DEPÓSITO.....	20
3.4 - MICROTERTURAS.....	24
3.5 - INCLUSÕES MINERALÓGICAS.....	26
3.6 - ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS.....	27
3.6.1 - Introdução.....	27
3.6.2 - Microscopia das inclusões fluidas na ametista de Pau D'Arco.....	27
3.6.3 - Resultados Microtermométricos.....	31
3.7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	36
3.8 - GÊNESE.....	37
4 - A AMETISTA DO ALTO BONITO-PA	40
4.1 - ASPECTOS GERAIS.....	40
4.2 - LOCALIZAÇÃO.....	40
4.3 - GEOLOGIA DO DEPÓSITO.....	40
4.3.1 - Depósito Primário.....	40

4.3.2 - Depósito Secundário.....	40
4.4 - PROPRIEDADES FÍSICAS E GEMOLÓGICAS.....	43
4.5 - MICROTERTURAS.....	43
4.6 - INCLUSÕES MINERALÓGICAS.....	46
4.7 - ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS.....	46
4.7.1 - Resultados Microtermométricos.....	48
4.8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	52
4.9 - GÊNESE.....	53
5 - A AMETISTA DO ALTO URUGUAI-RS.....	54
5.1 - ASPECTOS GERAIS.....	54
5.2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO.....	58
5.3 - GEOLOGIA DO DEPÓSITO.....	58
5.4 - PROPRIEDADES FÍSICAS E GEMOLÓGICAS.....	65
5.5 - MICROTERTURAS.....	66
5.6 - INCLUSÕES MINERALÓGICAS.....	67
5.7 - ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS.....	69
5.7.1 - Resultados Microtermométricos.....	72
5.8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA.....	76
5.9 - GÊNESE.....	77
6 - CONCLUSÕES E COMPARAÇÕES.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1 -	Estrutura cristalina do quartzo.....	15
Figura 2 -	Exposição de cristais de ametista de Pau D'Arco-PA.....	19
Figura 3 -	Mapa geológico e de localização da região do garimpo de ametista de Pau D'Arco-PA.....	21
Figura 4 -	Mapa geológico do depósito de ametista de Pau D'Arco-PA.....	22
Figura 5 -	Aspecto do relevo do garimpo de ametista de Pau D'Arco.....	23
Figura 6 -	Microfotografia mostrando vários cristais com crescimento paralelos, com faces bem desenvolvidas, ponto tríplice e contato retilíneo, na ametista de Pau D'Arco-PA.....	24
Figura 7 -	Microfotografia de ametista de Pau D'Arco-PA, apresentando cristais com diversas fases de crescimento.....	25
Figura 8 -	Microfotografia da ametista de Pau D'Arco-PA, com fissuras preenchidas provavelmente por hidróxido de ferro.....	25
Figura 9 -	Fotomicrografia de rutilo em forma de agulhas, desenhando leques, inclusos na ametista de Pau D'Arco-PA.....	26
Figura 10 -	Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas (a e b) com formas irregulares e, bifásicas (c) subarredondada na ametista de Pau D'Arco-PA..	28
Figura 11 -	Fotomicrografia de inclusões bifásicas primárias, dispostas paralelamente ao eixo c do cristal. A inclusão "a" possui formato de cristal negativo. Na inclusão "b", destaca-se a bolha de gás que ocupa até 85% do espaço da cavidade da inclusão, mostrando também feição de escape de fluido (PD-1).....	29
Figura 12 -	Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas e bifásicas primárias, na ametista de Pau D'Arco (PD-2), acompanhando planos de crescimento do cristal, mostrando várias formas	29
Figura 13 -	Fotomicrografia de inclusões fluidas bifásicas primárias, com formas alongadas, na ametista de Pau D'Arco (PD-3), acompanhando o eixo c do cristal.....	30
Figura 14 -	Fotomicrografia de uma inclusão fluida trifásica tipo líquido+gás+sólido (l+g+s), inclinada ao eixo c do cristal.....	31
Figura 15 -	Diagrama de frequência das temperaturas de fusão de gelo (Tfg), nas inclusões fluidas da ametista de Pau D'Arco-PA.....	33
Figura 16 -	Diagrama de temperaturas de homogeneização para as inclusões fluidas da ametista de Pau D'Arco-PA.....	34
Figura 17 -	Diagrama de temperatura de homogeneização vs salinidade das inclusões fluidas da ametista de Pau D'Arco, mostrando a densidade dos fluidos (modificado de ROEDDER. 1984).....	35

Figura 18 - Mapa de localização à área de garimpo de ametista do Alto Bonito-PA.....	41
Figura 19 - Mapa geológico do garimpo de ametista do Alto Bonito-PA.....	42
Figura 20 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito-PA, mostrando vários cristais em crescimento paralelo.....	44
Figura 21 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito-PA, mostrando alguns cristais intercrescidos.....	44
Figura 22 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito, mostrando um cristal com algumas fases de crescimento.....	45
Figura 23 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito-PA, mostrando contato retilíneo predominante e localmente ponto triplíce.....	45
Figura 24 - Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas e bifásicas primárias com formas irregulares, dispostas ao longo do eixo c do cristal, na ametista do Alto Bonito-PA.....	46
Figura 25 - Fotomicrografia de inclusões bifásicas e monofásicas primárias, paralelas ao eixo c do cristal, com formas irregulares na ametista do Alto Bonito-PA.....	47
Figura 26 - Fotomicrografia de inclusões monofásicas e bifásicas dispostas ao longo do eixo c do cristal, apresentando diversas formas, destacando a do cristal negativo e alongada na ametista do Alto Bonito-PA.....	48
Figura 27 - Diagrama de frequência para temperaturas de fusão de gelo (Tfg) na ametista do Alto Bonito-PA.....	50
Figura 28 - Diagrama de frequência para temperaturas de homogeneização das inclusões fluidas bifásicas da ametista do Alto Bonito-PA.....	50
Figura 29 - Temperatura <i>versus</i> salinidade das inclusões fluidas bifásicas da ametista do Alto Bonito-PA, a partir das quais foram determinadas as densidades dos fluidos no diagrama de ROEDDER (1984).....	51
Figura 30 - Geodo com ametista da região do Alto Uruguai, município de Ametista do Sul-RS.....	54
Figura 31 - Geodo com ametista. Mede cerca de 4 metros de altura. Notar os orifícios por onde os garimpeiros analisam a qualidade dos cristais.....	55
Figura 32 - Segmento de um geodo de ametista com sobreposições de cristais trapezoédricos de calcita (“dente-de-cão”).....	56
Figura 33 - Geodo de ametista com cristais de calcita.....	57
Figura 34 - Mapa de localização da área de ocorrência de ametista no Estado do Rio Grande do Sul, destacando-se a da região do Alto Uruguai.....	59
Figura 35 - Aspecto do relevo onde são explotados os geodos de ametista.....	60
Figura 36 - Mapa geológico regional do Alto Uruguai-RS.....	61
Figura 37 - Mapa geológico da região de Ametista do Sul (antiga São Gabriel) no Alto Uruguai-RS.....	62
Figura 38 - Entrada de uma mina de ametista em basalto maciço, onde são encontrados os geodos, em Ametista do Sul-RS.....	64
Figura 39 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Uruguai-RS, com vários cristais em crescimento paralelo, contanto retilíneo predominante.....	66

Figura 40 - Fotomicrografia de pequenos cristais de goethita identificados através das propriedades ópticas e difração de raios-X, nas ametistas do Alto Uruguai-RS.....	67
Figura 41 - Fotomicrografia de lepidocrocita, identificada através das propriedades ópticas, em forma de finas agulhas inclusas na ametista do Alto Uruguai-RS.....	68
Figura 42 - Fotomicrografia da goethita e lepidocrocita em forma de agulhas, identificadas através das propriedades ópticas e difração de raios-X, inclusas na ametista do Alto Uruguai-RS.....	68
Figura 43 - Difratoograma de raios-X da ametista do Alto Uruguai-RS, onde se observa além dos picos do quartzo, aqueles da goethita e da calcita.....	69
Figura 44 - Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas (l) primárias, com diversas formas ao longo do eixo c do cristal, na ametista do Alto Uruguai-RS.....	70
Figura 45 - Fotomicrografia da ametista do Alto Uruguai-RS, com inclusões fluidas bifásicas (l+g) primárias, dispostas ao longo do eixo c do cristal.....	71
Figura 46 - Fotomicrografia da ametista do Alto Uruguai-RS, com inclusões fluidas bifásicas primárias (l+g), com forma alongada, inclinada ao eixo c do cristal.....	71
Figura 47 - Fotomicrografia de inclusões fluidas bifásicas primárias (l+g), com formas subarredondadas e irregulares, dispostas ao longo do eixo c do cristal de ametista do Alto Uruguai-RS.....	72
Figura 48 - Diagrama de frequência da temperatura de fusão de gelo (Tfg), na ametista do Alto Uruguai-RS.....	73
Figura 49 - Diagrama de frequência para temperaturas de homogeneização (Th) nas inclusões fluidas da ametista do Alto Uruguai-RS.....	74
Figura 50 - Temperatura versus salinidade para inclusões fluidas da ametista do Alto Uruguai, para determinação das densidades dos fluidos, no diagrama de ROEDDER (1984).....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas salinos e seus respectivos pontos eutéticos.....	12
Tabela 2 - Salinidades (% NaCl) correspondendo a temperaturas de fusão de gelo para inclusões fluidas com presença de bolha de vapor.....	12
Tabela 3 - Propriedades físicas da ametista.....	15
Tabela 4 - Escala de cor para a ametista, indicando a tonalidade para as amostras de Pau D'Arco, Alto Bonito e do Alto Uruguai	17
Tabela 5 - Composição química da ametista de Pau D'Arco.....	36
Tabela 6 - Análises químicas para elementos-traço em cristal de rocha e variedades coloridas de quartzo	37
Tabela 7 - Composição química da ametista do Alto Bonito.....	52
Tabela 8 - Composição química da ametista do Alto Uruguai-RS.....	76
Tabela 8 - Principais características dos fluidos das ametistas de Pau D'Arco, Alto Bonito e do Alto Uruguai.....	81
Tabela 9 - Comparação da composição química entre as ametistas estudadas.....	82

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, que deu apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Marcondes Lima da Costa, pela orientação durante o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Professores: Dr. Júlio César Mendes, Antônio Luciano Gandini e César Mendonça Ferreira, pelas discussões que ajudaram a enriquecer este trabalho.

Ao Professor Dr. Kazuo Fuzikawa, pela atenção e orientação no estudo das inclusões fluidas, sem as quais seria impossível o término deste trabalho.

Aos geólogos Elias Leão Moraes, Newton Cunha Costa, Sérgio Roberto Costa Coelho, Lucindo Fernandes Filho, pelo apoio durante este período.

Ao geólogo Helmuth Höhn pela ajuda nas discussões sobre os processos de formação das ametistas estudadas e organização do texto.

Ao químico Natalino Valente, responsável pelo Laboratório de Análises Químicas, pelo auxílio na parte analítica.

À Nestor Everton Mendes Filho, professor da Universidade Federal do Maranhão, pelo apoio, amizade e incentivo, que muito ajudaram para o término deste trabalho.

À arquiteta Rosilene do Socorro Saraiva da Costa, pela correção do texto.

Ao Centro de Geociências pelo acesso aos laboratórios utilizados.

Ao Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica pela oportunidade em realizar este trabalho.

RESUMO

A jazida de ametista de Pau D'Arco, localiza-se no município de Conceição do Araguaia. Essa ametista é explorada de antigos terraços do Rio Araguaia, em depósitos eluviais e coluviais. Os fluidos que cristalizaram este mineral, eram compostos de $\text{H}_2\text{O}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2$ e/ou $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$, com salinidades entre 23,18 e 5,11% em peso de NaCl e, densidade na faixa de 0,85 a 1,0 g/cm^3 . As temperaturas mínimas de cristalização variam entre 120 e 383,1°C, predominando na faixa de 293,6 a 383,1°C. Essas temperaturas são compatíveis com processos hidrotermais para a formação desta ametista que, estariam ligados a algum evento magmático que remobilizou o SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , TiO_2 , Fe, V e F das rochas encaixantes, precipitando essas soluções em fraturas e fissuras. Provavelmente, o Fe fornecido pela rocha encaixante, tenha sido o causador dos centros de cor que, aliados a alguma fonte de calor tenha originado a cor lilás. Os estudos petrográficos mostram evidências dos eventos cisalhantes, visto que, os cristais apresentam inúmeras fissuras, zoneamento na cor, cristais em crescimento paralelo, outros com várias fases de crescimento, ponto tríplice e extinção ondulante. Outra ocorrência de ametista no Estado do Pará, está localizada em Alto Bonito, município de Marabá. Esta, é encontrada em depósitos primários e secundários. Os fluidos são compostos de $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2$ e/ou $\text{H}_2\text{O}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2$, com salinidades equivalentes na faixa de 22,10 a 2,07% em peso de NaCl. A densidade dos fluidos estão entre 1,0 e 0,85 g/cm^3 . As temperaturas mínimas de cristalização variaram entre 220 e 390,4°C. Estas temperaturas são compatíveis com as condições de hidrotermalismo em ambiente hipotermal, que seria o processo responsável pela mineralização, semelhantes a de Pau D'Arco. A cor desta ametista, provavelmente foi originada através dos centros de cor causados pelo Fe. Os resultados dos estudos petrográficos se assemelham com os conseguidos para a ametista de Pau D'Arco. A

ametista do Alto Uruguai, que ocorre na região de Iraí, são encontradas em geodos nos basaltos da Bacia do Paraná, pertencentes a Formação Serra Geral, estando relacionados ao intenso vulcanismo que atuou na região. Os fluidos são compostos de $\text{H}_2\text{O-NaCl-FeCl}_2$, $\text{H}_2\text{O-FeCl}_2$ e/ou $\text{H}_2\text{O-NaCl-MgCl}_2$, com salinidades equivalentes na faixa de 13,83 a 0,18% em peso de NaCl. As densidades dos fluidos estão entre 0,95 e $1,0 \text{ g/cm}^3$. As temperaturas de fusão de gelo entre $-0,1$ e $-1,6 \text{ }^\circ\text{C}$, sugerem fase final de hidrotermalismo em condições epitermais com influência de águas meteóricas. No entanto, as temperaturas de homogeneização em inclusões fluidas bifásicas na faixa de $181,4$ a $239,5^\circ\text{C}$, sugerem também, condições mesotermiais para a formação desta ametista. A origem da cor é semelhante a de Pau D'Arco e do Alto Bonito. Os estudos petrográficos confirmam que os cristais deste mineral, se desenvolveram em ambiente calmo, devido serem bem formados, poucas fissuras e ausência de ponto tríplice com extinção ondulante. Estas ametistas apesar de terem sido desenvolvidas em ambientes diferentes, mostram composição química semelhantes em termos de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 e alguns elementos-traço, como o F, V e Co.

ABSTRACT

The Amethyst occurrence of Pau D'Arco is situated in the Conceição do Araguaia county, southeast of Pará state, and has been exploited by artisanal miners in eluvial and coluvial placers from ancient terraces of the Rio Araguaia. The Amethyst crystallization fluids are composed by $\text{H}_2\text{O}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2$ and/or $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CaCl}_2$, with salinities ranging from 5,11 to 23,18 wt% of NaCl and density from 0,85 to 1,0 g/cm^3 . Crystallization minimum temperatures change from 120 to 384,1 °C, usually between 293,6 and 383,1 °C. These temperatures are compatible with amethyst formation in hidrothermal processes for that probably are related to some magmatic event which removed SiO_2 , Al_2O_3 , Na_2O , TiO_2 , Fe, V and F from host rocks and precipitated these solutions into fractures and joints. Iron supplied by the host rocks was probably the reason for color centers besides some heat source that could give rise to the purple color. Petrographic studies revealed the presence of joints, color zoning, paralel-crystal growing, some with several growing phases, triple point and undulose extinction. Another amethyst occurrence in Pará State is situated in Alto Bonito, Marabá county, found in primary and secondary deposits, the fluids are composed by $\text{H}_2\text{O}-\text{CaCl}_2$ and/or $\text{H}_2\text{O}-\text{MgCl}_2-\text{CaCl}_2$, with salinities ranging 2,07 to 22,10 wt% of NaCl and density from 0,85 to 1,0 g/cm^3 . Crystallization minimum temperatures range from 220 to 390,4 °C, and are compatible with hidrothermal conditions upon hipothermal environment, that would be the main process of mineralization similar to the Pau D'Arco. Occurrence the amethyst's color was probably originated through color centers caused by Fe. Petrographic results are similar of those described for the Pau D'Arco amethyst. Alto Uruguai amethysts that occur in the Iraí region, (Sta. Catarina state, southern Brazil) are

found in basalt geodes from the Parana Basin's (Serra Geral Formation). The Fluids are composed by $\text{H}_2\text{O-NaCl-FeCl}_2$, $\text{H}_2\text{O-FeCl}_2$ and/or $\text{H}_2\text{O-NaCl-MgCl}_2$, with salinities ranging from 0,18 to 13,83 wt% of NaCl. Densities range from 0,95 to 1,0 g/cm^3 . Ice melting temperatures are between -0,1 and -1,6 °C and suggest a hydrothermal final phase in epithermal conditions under meteoric waters influence. However, homogenization temperatures in two-phase fluid inclusions from 181,4 to 239,5 °C also suggest mesothermal conditions for occurrences this amethyst formation. Color's origin is similar with Pau D'Arco and Alto Bonito occurrences. Petrographic studies confirm that the crystals were developed under tranquil environment because they are well shaped, the presence of very few joints and undulose extinction the absence of triple point. Although the amethysts from these three occurrences were developed on different environments they show chemical composition similar in SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , TiO_2 and trace elements as F, V and Co.

1 - INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se no cenário mundial pela produção de gemas coradas. No sub-solo brasileiro são encontrados, praticamente todos os tipos de variedades de minerais-gemas, como diamantes, esmeraldas, turmalinas, águas-marinhas, granadas e ametistas, entre outras.

No caso das ametistas, as ocorrências mais conhecidas são as do Rio Grande do Sul e as do Sul do Estado do Pará.

As ametistas do Rio Grande do Sul, foram as primeiras a serem exploradas no Brasil. Ocorrem em depósitos do tipo geodos em basaltos da Bacia do Paraná, pertencentes a Formação Serra Geral. Nestes geodos, associados à ametista, encontram-se cristais de quartzo hialino e róseo, calcita, barita, ágata, zeólitas e gipsita (selenita). Embora a produção de pedras apropriadas para a lapidação seja rara, os geodos cortados e as vezes polidos realçando sua beleza, são muito procurados por mineralogistas, colecionadores e esotéricos.

A ametista de Pau D'Arco, situada no Município de Conceição do Araguaia no Estado do Pará, ocorre em terraços do antigo leito do Rio Araguaia em depósitos eluviais e coluviais (COLLYER et al. 1988). Este garimpo, teve seu apogeu na década de oitenta, onde chegaram a trabalhar até 400 (quatrocentos) homens. Os cristais de ametista, embora atingindo até 60 kg, apresentam baixo aproveitamento para a lapidação, em torno de 1 a 10%, devido a fraturas, fissuras e zoneamento de cor produzidos por excesso de tensões cristalinas. No entanto, a cor lilás forte com aspecto "aveludado" ganhou fama pelo mundo, sendo muito procurada (CASSINI & COSTA, 1994). Apesar desta procura, o garimpo desta ametista conta atualmente com 6 (seis) homens trabalhando na exploração. Isto acontece devido a falta de conhecimento do depósito, bem como, da sua gênese, o que coíbe a prospecção de novas ocorrências.

A ametista do Alto Bonito, município de Marabá, em termo de quantidade, é a de maior destaque neste estado. No auge das atividades garimpeiras, chegou a produzir até 50 (cinquenta) toneladas/ano de cristais, sendo que a grande maioria era destinada para o artesanato mineral. Este garimpo atualmente, encontra-se com suas atividades reduzidas, devido principalmente ao baixo preço da ametista praticado no mercado.

1.1 - OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho, são os de estudar as características mineralógicas, químicas, físicas, gemológicas, inclusões sólidas e fluidas e, com isto, caracterizar os aspectos genéticos dos depósitos de Pau D'Arco e Alto Bonito no Estado do Pará e, os do Alto Uruguai no Estado do Rio Grande do Sul. Espera-se com isto estabelecer comparações entre as três ocorrências, facilitando suas identificações no mercado e influenciar na prospecção de novas jazidas.

1.2 - MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em duas etapas: atividades de campo com coleta de material e, análises laboratoriais.

1.2.1 - Trabalho de Campo

Consistiu do conhecimento dos depósitos, quanto a geologia da área, sistema de trabalho dos garimpeiros, comercialização das gemas em bruto e, coleta de material para análises laboratoriais.

1.2.2 - Procedimentos Analíticos

As análises de laboratório consistiram em:

1 - Descrição macroscópica das amostras;

2 - Análises das propriedades físicas com o auxílio da balança de Kraus-Jolly para determinar a densidade e refratômetro de Schneider para medir os índices de refração;

3 - Para verificação dos tipos de inclusões, tanto sólidas como fluidas, imperfeições, como fissuras e fraturas foi usado microscópio gemológico Schneider;

4 - Verificação de fluorescência com lâmpada ultra-violeta (SCHENEIDER).

Estas atividades foram desenvolvidas no Laboratório Básico de Mineralogia e Gemologia (LBGM) do Centro de Geociências da UFPa.

5 - Estudos petrográficos com o auxílio de microscópio óptico Zeiss em algumas amostras selecionadas de cada ocorrência. Este trabalho foi realizado no Laboratório de Petrografia do Centro de Geociências da UFPa.

6 - As análises mineralógicas por difração de raios-X (DRX), para identificação de inclusões mineralógicas, foram feitas no Laboratório de raios-X do Centro de Geociências da UFPa.

7 - Análises químicas totais (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , FeO , TiO_2 , P_2O_5 , Na_2O , CaO e MgO) foram realizadas no Laboratório de Análises Químicas do Departamento de Geoquímica do Centro de Geociências e, os métodos utilizados foram: para os elementos maiores Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , Na_2O , e CaO por absorção atômica, SiO_2 por gravimetria e TiO_2 por colorimetria em amostras representativas de ametista de cada garimpo. Os elementos traço (Pb, Zn, Co, Sn, Cl, Rb, Mn, Sr, Zr, Y, Be, Sc, V, Cr, Ti, As, Se, Hg e F) foram analisados na GEOSOL-SA em Belo Horizonte-

MG, e os métodos utilizados foram fluorescência de raios-X, absorção atômica, espectrografia ótica.

8 - Para os estudos microtermométricos de inclusões fluidas e seções bipolidas de cristais de ametistas, foram utilizados um microscópio ZEISS com platina de aquecimento/resfriamento CHAIXMECA que permite observações no intervalo de -180 °C a + 600 °C através da combinação de um sistema de circulação de N₂ líquido para o resfriamento e resistência elétrica para o aquecimento (POTY et al. 1976). A determinação da composição dos fluidos foi feita através de medidas obtidas no resfriamento, enquanto que, temperaturas mínimas de aprisionamento dos fluidos, foi conseguida através do aquecimento.

A seleção e o preparo das amostras para estudo das IF, seguiram metodologia descrita por HOLLISTER & CRAWFORD (1981), ROEDDER (1984) e SHEPHERD et al. (1985).

Estas análises foram realizadas no Laboratório de Microtermometria do Centro de Geociências da UFPa.

9 - O tratamento térmico em diversas amostras das três áreas em questão, foi realizado em mufla de secagem e esterilização (modelo HERAEUS, tipo MR-170) com temperaturas de 0 °C a 1200 °C, no Laboratório de Sedimentologia do Centro de Geociências.

1.2.3 - Metodologia para estudos das inclusões fluidas (IF)

O estudo das inclusões fluidas, permite, em certos casos, determinar as faixas de temperaturas e pressão de cristalização de um dado mineral, as salinidades, as densidades e as composições dos fluidos mineralizantes e, também, estabelecer a história da evolução dessas soluções. Os fluidos encontrados como inclusões, podem estar ligados a processos hidrotermais,

magmáticos, meteóricos, etc. No estudo das IF considera-se que as mesmas mantenham as características originais de seu aprisionamento e que, mudanças pós-formacionais quando ocorridas podem ser reconhecidas, de modo a se poder avaliar a sua influência nos resultados obtidos.

1.2.3.1 - Características Gerais das Inclusões Fluidas

As características mais comuns estudadas nas inclusões fluidas são a morfologia, dimensões, quantidade, número de fases, composição e distribuição espacial que, permitem em muitos casos, identificar sua origem (ROEDDER, 1984; FUZIKAWA, 1985; SHEPHERD et al. 1985).

De acordo com o número de fases presentes, as IF podem ser classificadas em até 4 tipos: no primeiro, é constituída por inclusões monofásicas, que apresentam uma fase, que pode ser líquida ou gasosa. O segundo, compreende inclusões bifásicas, que podem ser constituídas por líquido+gás (l+g) líquido+sólido (l+s), dois líquidos imiscíveis (l_1+l_2) ou sólido+gás (s+g), como no caso das inclusões vítreas. O terceiro, é representado por inclusões trifásicas, geralmente constituídas por dois líquidos imiscíveis+gás (l_1+l_2+g) ou por líquido+gás+sólido (l+g+s). O quarto tipo, são de inclusões fluidas polifásicas, ou multifásicas, exibindo quatro ou mais fases. Os componentes gasosos podem ser de diferentes tipos, mas sempre formarão uma única fase, podendo, esta, se apresentar subdividida por razões morfológicas da inclusão. No caso de líquidos miscíveis, também formarão uma única fase (ROEDDER, 1984; FUZIKAWA, 1985).

Quanto a origem, podem ser classificadas em primárias, secundárias ou pseudosencudárias. As primárias são aprisionadas durante o crescimento do mineral, como por exemplo, nas irregularidades das superfícies de crescimento. As secundárias são aprisionadas após a

cristalização do mineral, em consequência de fraturamentos, por onde pode haver penetração de fluidos e, posteriormente cicatrização destas fraturas. As pseudosecundárias, são aquelas englobadas durante processos de cicatrização de fraturas desenvolvidas ainda durante crescimento do mineral (FUZIKAWA, 1985).

A classificação, entre inclusões primárias, secundárias ou pseudosecundárias, nem sempre é fácil. As primárias, normalmente, ocorrem como inclusões isoladas ou dispostas segundo algumas direções cristalográficas, como a superfície ou arestas de crescimento do cristal, ou distribuídas aleatoriamente no mineral. As secundárias, geralmente ocorrem alinhadas ou seguindo distribuições planares ao longo de fraturas cicatrizadas, onde se apresentam em grande número. As pseudosecundárias, são as mais difíceis de serem identificadas, mas geralmente, são encontradas ao longo de fraturas cicatrizadas internas ao cristal (ROEDDER, 1984).

1.2.3.2 - O método microtermométrico

Para se aplicar este método, deve-se levar em conta que os os fluidos aprisionados nas inclusões devem ser amostras representativas das soluções presentes durante um determinado processo geológico, como a cristalização e/ou recristalização de minerais ou mesmo de eventos deformacionais. É assumido, também, que o sistema é isolado e quimicamente inerte, e que as propriedades físico-químicas dos fluidos (composição, densidade), não tenham sofrido alterações desde o aprisionamento, até durante os estudos microtermométricos (WESBROD et al. 1976; ROEDDER & BODNAR, 1980; FUZIKAWA, 1985).

As medidas de temperatura de homogeneização, não devem ser realizadas em inclusões com feições de estrangulamento ou crepitação, pois esses fenômenos, que podem ocorrer durante

o resfriamento ou a recristalização dos minerais, podem causar mudanças no volume original das inclusões e/ou, alteração de sua composição, adquirindo características diferentes das iniciais. Para inclusões que tiveram perdas eventuais de fluidos, ou introdução de outras soluções, os dados ficam comprometidos. FUZIKAWA & ALVES (1995), alertam para o fenômeno de dilatação (stretching), que ocorre em alguns minerais, causando uma variação no volume das inclusões fluidas durante os procedimentos microtermométricos.

Pelo discutido acima, observa-se que, somente após um exame cuidadoso, é que se inicia o estudo microtermétrico, o qual é baseado na observação e registro das várias temperaturas de mudanças de fases dos componentes presentes nas inclusões.

Na microtermometria das inclusões fluidas das ametistas de Pau D'Arco, Alto Bonito e Alto Uruguai, foram estudadas as temperaturas de fusão de gelo (Tfg) e temperaturas de homogeneização (Th).

- TEMPERATURA DE FUSÃO DE GELO (Tfg).

Em água pura, a temperatura de fusão de gelo (Tfg) ocorre a $0,015^{\circ}\text{C}$, ponto triplo dessa substância. Nas IF é frequente a presença de íons na solução aquosa, como por exemplo, Cl^{-} , K^{+} , Na^{+} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , a fusão inicia-se em temperaturas mais baixas (menores que 0°C) representativas do seu ponto eutético (Te) cujos valores dependem dos componentes dissolvidos, indicando a composição dos fluidos (Tabela 1). A temperatura final de fusão do gelo (Tfg) indicará, através de diagramas que envolvem sistemas experimentais compostos por $\text{H}_2\text{O} + \text{sais}$, a salinidade das soluções que, é expressa em termos de equivalentes à porcentagem em peso de NaCl (Tabela 2) (FUZIKAWA, 1985).

Tabela 1 - Sistemas salinos e seus respectivos pontos eutéticos

SISTEMAS SALINOS	PONTO EUTÉTICO (°C)
H ₂ O-NaCl-CaCl ₂	-55
H ₂ O-MgCl ₂ -CaCl ₂	-52.2
H ₂ O-KCl-CaCl ₂	-50.5
H ₂ O-CaCl ₂	-49.5
H ₂ O-Na ₂ CO ₃ -K ₂ CO ₃	-37.0
H ₂ O-NaCl-FeCl ₂	-37.0
H ₂ O-FeCl ₂	-35.0
H ₂ O-NaCl-MgCl ₂	-35.0
H ₂ O-MgCl ₂	-33.6
H ₂ O-NaCl-KCl	-23.5
H ₂ O-NaCl-Na ₂ SO ₄	-21.7
H ₂ O-NaCl-NaHCO ₃	-21.8
H ₂ O-NaCl-Na ₂ CO ₃	-21.4
H ₂ O-NaCl	-21.2
H ₂ O-KCl	-10.6
H ₂ O-NaHCO ₃ -Na ₂ CO ₃	-3.3
H ₂ O-NaHCO ₃	-2.3
H ₂ O-Na ₂ CO ₃	-2.1
H ₂ O-Na ₂ SO ₄	-1.2

Fonte: Extraído de SHEPHERD et al. (1985)

Tabela 2 - Salinidades (% NaCl) correspondendo a temperaturas de fusão de gelo para inclusões fluidas com presença de bolha de vapor. Dados de BODNAR (1992); adaptados por GOLDSTEIN and REYNOLDS (1994).

FPD	.0	.1	.2	.3	.4	.5	.6	.7	.8	.9
0.	0.00	0.18	0.35	0.53	0.71	0.88	1.05	1.23	1.40	1.57
1.	1.74	1.91	2.07	2.24	2.41	2.57	2.74	2.90	3.06	3.23
2.	3.39	3.55	3.71	3.87	4.03	4.18	4.34	4.49	4.65	4.80
3.	4.96	5.11	5.26	5.41	5.56	5.71	5.86	6.01	6.16	6.30
4.	6.45	6.59	6.74	6.88	7.02	7.17	7.31	7.45	7.59	7.73
5.	7.86	8.00	8.14	8.28	8.41	8.55	8.68	8.81	8.95	9.08
6.	9.21	9.34	9.47	9.60	9.73	9.86	9.98	10.11	10.24	10.36
7.	10.49	10.61	10.73	10.86	10.98	11.10	11.22	11.34	11.46	11.58
8.	11.70	11.81	11.93	12.05	12.16	12.28	12.39	12.51	12.62	12.73
9.	12.85	12.96	13.07	13.18	13.29	13.40	13.51	13.62	13.72	13.83
10.	13.94	14.04	14.15	14.25	14.36	14.46	14.57	14.67	14.77	14.87
11.	14.97	15.07	15.17	15.27	15.37	15.47	15.57	15.67	15.76	15.86
12.	15.96	16.05	16.15	16.24	16.34	16.43	16.53	16.62	16.71	16.80
13.	16.89	16.99	17.08	17.17	17.26	17.34	17.43	17.52	17.61	17.70
14.	17.79	17.87	17.96	18.04	18.13	18.22	18.30	18.38	18.47	18.55
15.	18.63	18.72	18.80	18.88	18.96	19.05	19.13	19.21	19.29	19.37
16.	19.45	19.53	19.60	19.68	19.76	19.84	19.92	19.99	20.07	20.15
17.	20.22	20.30	20.37	20.45	20.52	20.60	20.67	20.75	20.82	20.89
18.	20.97	21.04	21.11	21.19	21.26	21.33	21.40	21.47	21.54	21.61
19.	21.68	21.75	21.82	21.89	21.96	22.03	22.10	22.17	22.24	22.31
20.	22.38	22.44	22.51	22.58	22.65	22.71	22.78	22.85	22.91	22.98
21.	23.05	23.11	23.18							

- TEMPERATURA DE HOMOGENEIZAÇÃO (Th)

Em sistemas compostos por soluções aquosas salinas, a temperatura de homogeneização (Th) é determinada através do aquecimento da amostra a partir da temperatura ambiente. O procedimento de aquecimento, só é realizado, após a obtenção de todas as medidas relativas ao resfriamento, pois, frequentemente, durante o aquecimento, podem ocorrer modificações nas características originais das inclusões, excetuando-se os casos em que possam ocorrer gelo super aquecido, ou inclusões de várias fases.

As temperaturas de homogeneização (Th) de inclusões no sistema de líquido-gás, ocorrem seja pela expansão da fase líquida (diminuição da bolha de gás), seja pela expansão da fase de vapor. Quando o sistema apresenta líquido+gás+sólido, a homogeneização das fases fluidas somadas à dissolução do sólido determinará a temperatura de homogeneização total (Tht).

Esta medida pode fornecer as condições mínimas de temperatura e pressão de aprisionamento do fluido, quando se tratar de inclusões fluidas não modificadas posteriormente. A temperatura de homogeinização (Th), quando associada a outros dados microtermométricos pode também, determinar a densidade total do fluido (WEISBROD et al. 1976; HOLLISTER et al. 1981 ; ROEDDER, 1984; FUZIKAWA, 1985).

2 - A AMETISTA

2.1 - HISTÓRICO

A ametista é a variedade de quartzo de cor violeta. O quartzo e suas variedades são conhecidos há muito tempo pela humanidade. O homem primitivo já o conhecia e o utilizava para confeccionar objetos cortantes e perfurantes, tais como pontas de flexas, lanças e facas que facilitavam o seu dia-a-dia em suas caçadas e no corte da carne dos animais abatidos, como também para a sua própria defesa e da tribo, como mostra os objetos encontrados em sítios arqueológicos. As referências mais antigas estão citadas na Bíblia, demonstrando que àquela época, já eram conhecidas praticamente todas as variedades deste mineral.

Dentre estas variedades, sem dúvida, a mais admirada é a ametista, cujo nome é originado do grego e quer dizer "não ébrio" e por isso, era usada como amuleto contra a embriaguês. Atribuía a ela forças sobrenaturais, acreditando-se que dava sorte, protegia dos feitiços e das nostalgias. No mundo moderno, cada vez mais pessoas acreditam nas forças místicas dos cristais e denominam esta prática como esoterismo mineral. No ramo joalheiro, a ametista como gema, é muito procurada devido a sua cor de rara beleza e é usada em jóias e adornos.

2.2 - GENERALIDADES

A estrutura cristalina simplificada do quartzo e, portanto da ametista, pode ser visualizada na Figura 1. Cristaliza-se no sistema hexagonal-R, classe 32, grupo espacial $P3_12$ (do lado direito) e $P3_22$ (do lado esquerdo), sendo que, as constantes da cela unitária são: $a_0 = 4,9133 \text{ \AA}$ e $c_0 = 5,4053 \text{ \AA}$ (DEER et al. 1992).

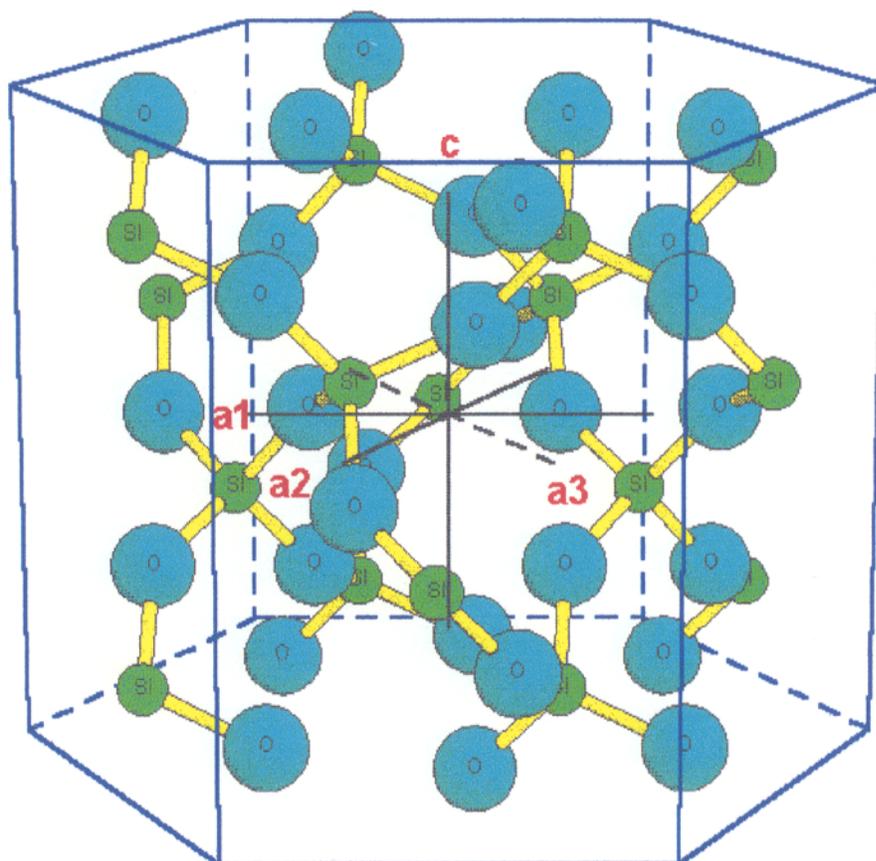


Figura 1 - Estrutura cristalina do quartzo, onde o oxigênio ocupa os vértices e o silício o centro dos tetraedros (DEER et al. 1992). (a_1 , a_2 , a_3 , e c : eixos cristalográficos).

As propriedades físicas da ametista são, obviamente, iguais aquelas do quartzo hialino, com exceção da cor e estão representadas na tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades físicas da ametista

COR	Violeta em diversos tons
DUREZA	6,5 - 7,0 (escala de MOHS)
DENSIDADE	2,63 A 2,65
ÍNDICES DE RERAÇÃO	$n_e = 1,544$
	$n_o = 1,553$
BIRREFRINGÊNCIA	0,009
SISTEMA CRISTALINO	Hexagonal (trigonal)
FRATURA	Conchoidal
PONTO DE FUSÃO	1775 °C

Extraída de SCHUMANN (1985).

2.3 - A COR NA AMETISTA

A ametista é uma variedade de quartzo, no qual o Fe^{4+} responsável pela cor violeta, é formado a partir do Fe^{3+} por ação de radiação ionizante. O processo de transferência de carga, é devido a seguinte reação: $\text{Fe}^{3+} + \text{RI (radiação ionizante)} \rightarrow \text{Fe}^{4+} + \text{e}^-$ (ROSSMAN, 1994). Desta forma, a cor da ametista está relacionada a centros de cor que constituem “buracos” na rede cristalina, ocorrendo pela remoção de um dos elétrons constituintes do par eletrônico. Esta ausência de elétron na posição original, pode provocar cor nas substâncias (NASSAU, 1976).

Geralmente as impurezas de Fe, estão concentradas nos contornos da geminação segundo a lei Brasil, sugerindo que átomos de qualquer impureza que estejam em difusão pelos canais ao longo do eixo “c” dos cristais, possam ser aprisionados pelos contornos da geminação, por causa do relativo desordenamento, dando ênfase da importância do Fe intersticial na coloração da ametista (ROSSMAN, 1994). Segundo este mesmo autor, a cor da ametista está distribuída de forma irregular, normalmente concentrada sob a principal face romboédrica $\{1011\}$ e, por vezes, de uma série de bandas finas e escuras que estão organizados paralelamente às faces $\{0111\}$. A cor deste mineral é instável à luz e, experimentos mostraram que muito da cor dos geodos de ametista é perdida após exposição direta à luz solar por um período de três anos (ROSSMAN, 1994).

A irradiação pode ser um fator importante para colorir cristais na natureza, pois o quartzo pode receber doses enormes de radiação através de desintegração do K^{40} , U e Th (ROSSMAN, 1994).

2.4 - PROPRIEDADES GEMOLÓGICAS

A dureza entre 6,5 e 7,0 na escala de MOHS, a cor lilás (com aspecto “aveludado”) e o brilho vítreo, são as propriedades gemológicas mais importantes da ametista. Na ametista de Pau D’Arco, a cor atinge frequentemente tonalidade 7 com grau de beleza “S” (especialmente bela e com brilho), a do Alto Uruguai até 4 (S) e na do Alto Bonito 3 (S) na escala de SUWA (1994).

Esta escala apresenta tonalidades variando de 1 a 7 (1= extremamente clara, 5=média e, 7 escura) com grau de beleza S (especialmente bela e com brilho), A (muito boa), B (boa), C (boa com poucas imperfeições) e, D (ausência de beleza) (Tabela 4).

Tabela 4 - Escala de cor para a ametista, indicando a tonalidade para as amostras de Pau D'Arco, Alto Bonito e do Alto Uruguai (SUWA, 1994).

		Beauty Grade				
		S	A	B	C	D
Tone						
7						
6						
5						
4						
3						
2						
1						

Ametista de Pau D'Arco

Ametista do Alto Uruguai

Ametista do Alto Bonito

No entanto, a quantidade de fissuras e fraturas causadas por tensões cristalinas, aliadas ao zoneamento de cor, faz com que o aproveitamento desta ametista seja em torno de 1 a 10%. O cálculo de aproveitamento, é realizado pesando-se os cristais após a “martelação” em bruto e, após a lapidação, onde restará somente a gema lapidada que será novamente pesada, a diferença entre o peso dos cristais “martelados” e, o peso das gemas lapidadas é transformada em porcentagem e, conseqüentemente em índice de aproveitamento.

Os cristais que não são aproveitados na lapidação, são usados das mais diferentes formas no artesanato mineral, como esferas, pirâmides e suportes diversos.

O tratamento térmico da ametista, é realizado, ou para abertura de cor, quando muito saturada (± 100 °C), ou para encontrar a cor amarelo citrino. A ametista de Pau D’Arco, atingiu esta cor a 480 °C quando exposta por 6 horas em mufla.

3 - A AMETISTA DE PAU D'ARCO-PA.

3.1 - ASPECTOS GERAIS

A ametista de Pau D'Arco, possui características que a diferencia de outras ocorrências no Brasil. Os cristais apresentam-se em vários tamanhos, de alguns centímetros até 1,20 m e peso, desde algumas gramas, até 60 kg (Figura 2).

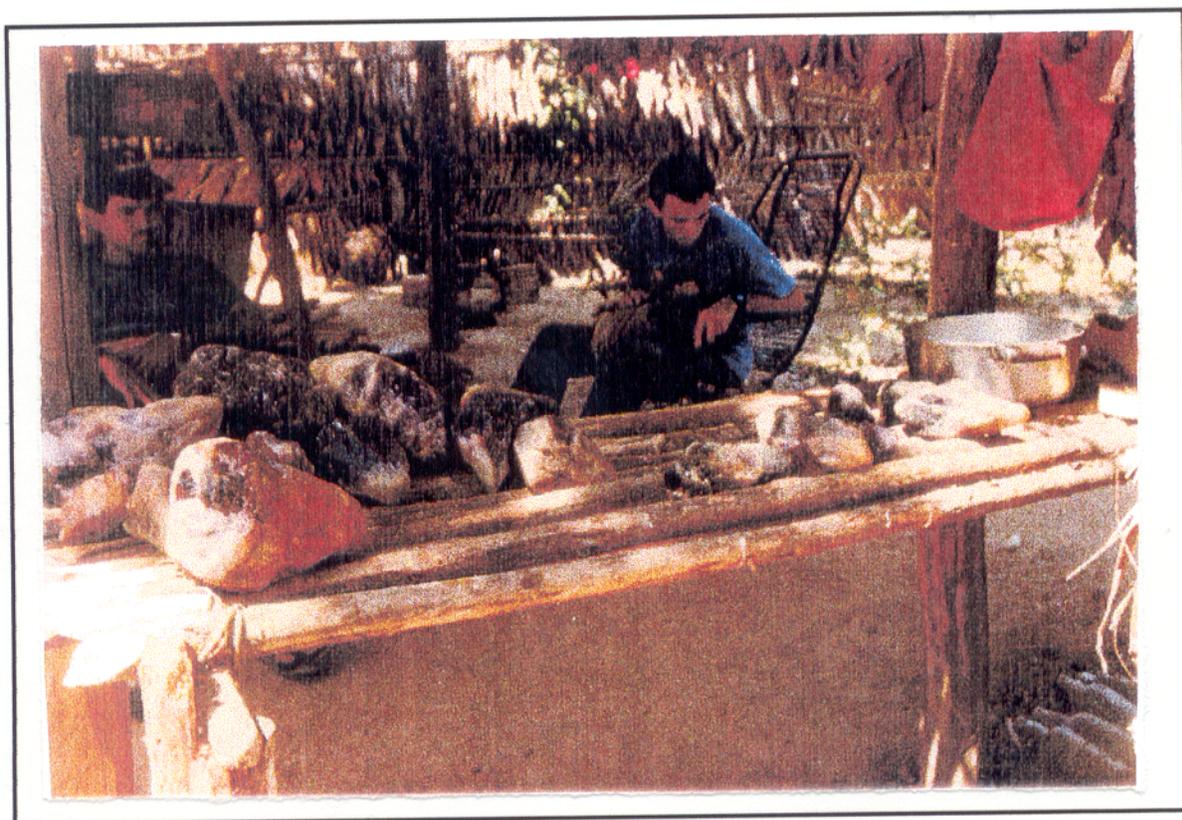


Figura 2 - Exposição de cristais de ametista de Pau D'Arco na Vila Boa Esperança-PA.

Geralmente, possuem muitas fraturas, fissuras e zoneamento na cor. As arestas dos cristais, euédricos e subédricos, por apresentarem-se pouco desgastadas, indicam evidências de transporte a curta distância. Apesar de serem raras as pedras limpas com boa transparência, a cor lilás com aspecto “aveludado” é muito apreciada no mercado de gemas.

3.2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO AO GARIMPO

O garimpo de ametista está localizado no Município de Conceição do Araguaia, região sudeste do Estado do Pará. O acesso a partir de Belém, pode ser feito via aérea até a sede do Município de Conceição do Araguaia, seguindo-se por rodovia secundária cerca de 75 Km até a localidade de Vila Boa Esperança, sede do garimpo. Por Araguaína-TO, alcança-se o garimpo pela BR-010 e acesso pela rodovia TO-283, via Arapoema até a cidade de Pau D'Arco-TO, à margem do Rio Araguaia, onde atravessando-se este rio chega-se a sede do garimpo (Figura 3).

3.3 - GEOLOGIA DO DEPÓSITO

Segundo COLLYER et al. (1988), a região de ocorrência de ametista está representada geologicamente pelo Complexo Xingu, Formações Couto Magalhães, Rio das Barreiras e Pimenteiras. A ametista é encontrada apenas no conglomerado polimitico da Formação Rio das Barreiras. Esta Formação é constituída, por seixos de clorita xisto e/ou filito, quartzo de diversos tipos e quartzitos claros ferruginosos com matriz carbonática, assentando discordantemente sobre a Formação Couto Magalhães (Figura 4).

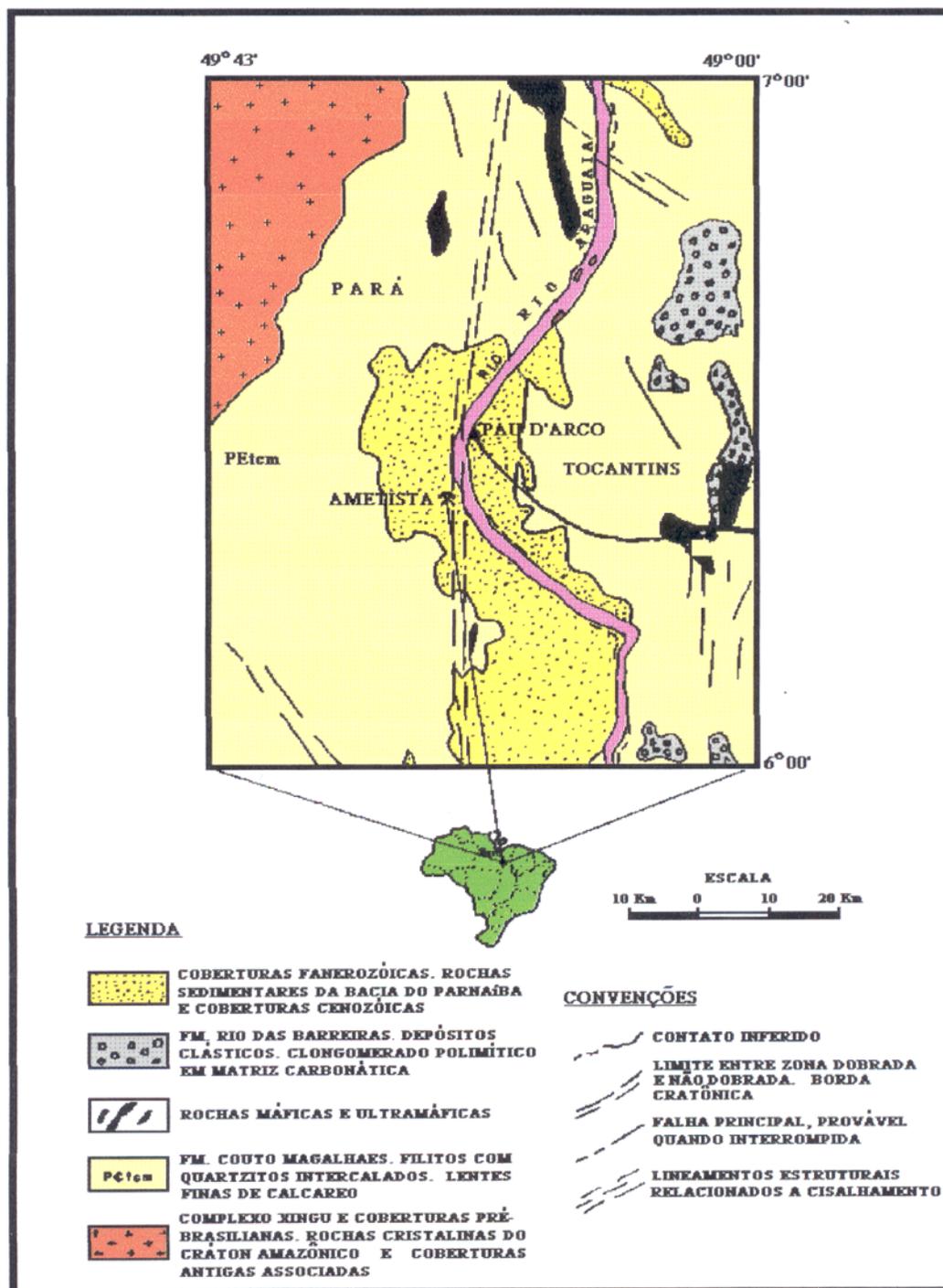


Figura 3 - Mapa geológico e de localização da região do garimpo de ametista de Pau D'Arco-PA. (modificado de COLLYER et al. 1988).

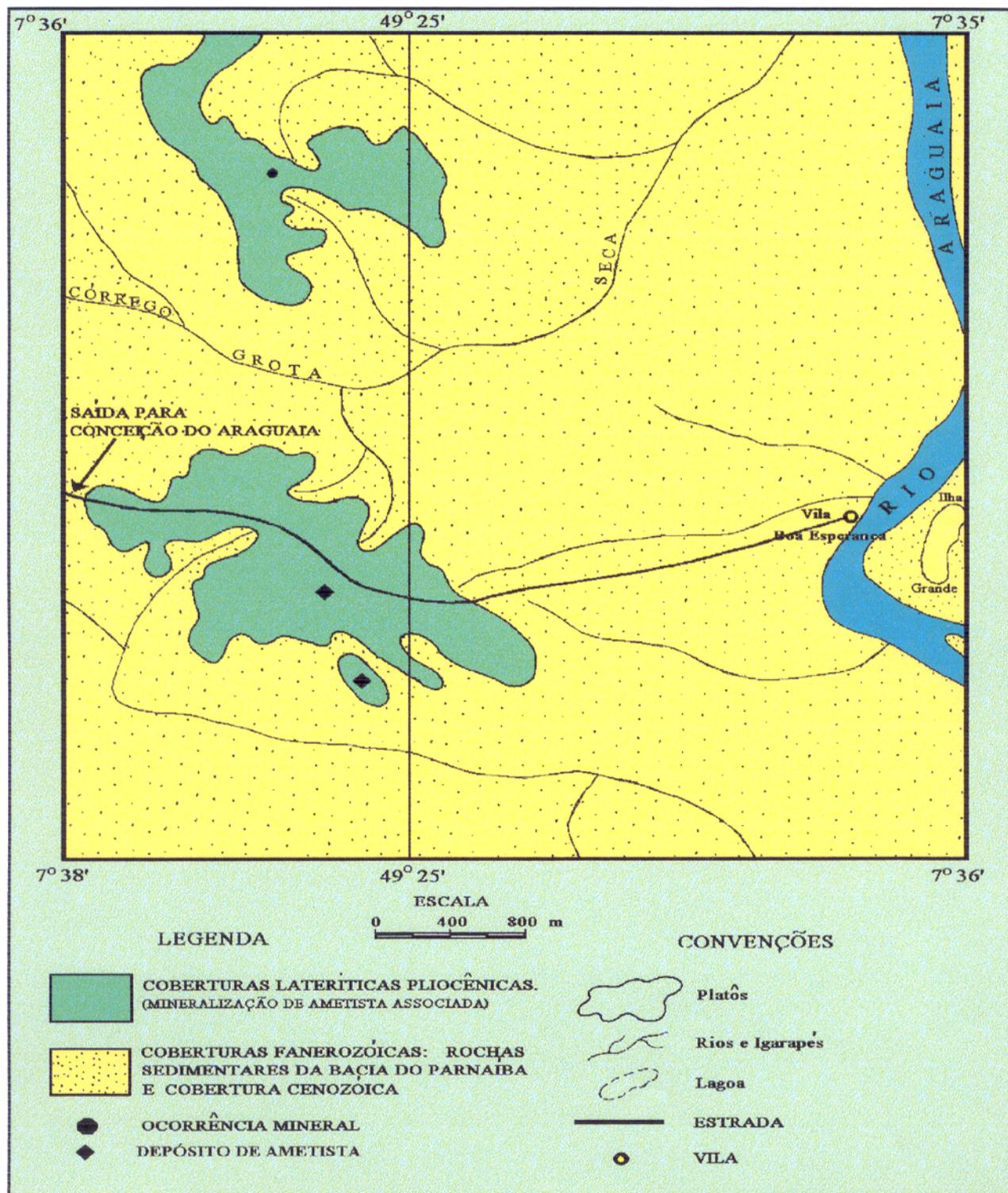


Figura 4 - Mapa geológico do depósito de ametista de Pau D'Arco-PA. (modificado de COLLYER et al. 1988).

Sotoposto a este conglomerado, encontra-se uma cobertura laterítica com espessura variando de 1 a 20 m, de material concrecionário, constituído principalmente de quartzo, goethita e caulinita.

Este material, apresenta maior destaque no topo dos platôs, formado pela intensa erosão diferencial dos terraços, gerando formas abauladas (Figura 5).



Figura 5 - Aspecto do relevo do garimpo, onde a ametista de Pau D'Arco é explotada. Observa-se a Vila Boa Esperança-PA, as margens do Rio Araguaia.

3.4 - MICROTERTURAS

Os estudos ao microscópio petrográfico, mostram que cristais em crescimento paralelo e textura granoblástica são comuns, bem desenvolvidos, com faces definidas, originando contatos retilíneos, definindo localmente ponto tríplice com extinção ondulante, indicando que estes cristais sofreram recristalização. É frequente também, a presença de cristais com várias fases de crescimento bem desenvolvidas.

As fissuras observadas são secas e outras preenchidas por um material de cor marrom avermelhado, provavelmente hidróxido de ferro (Figuras 6 a 8).

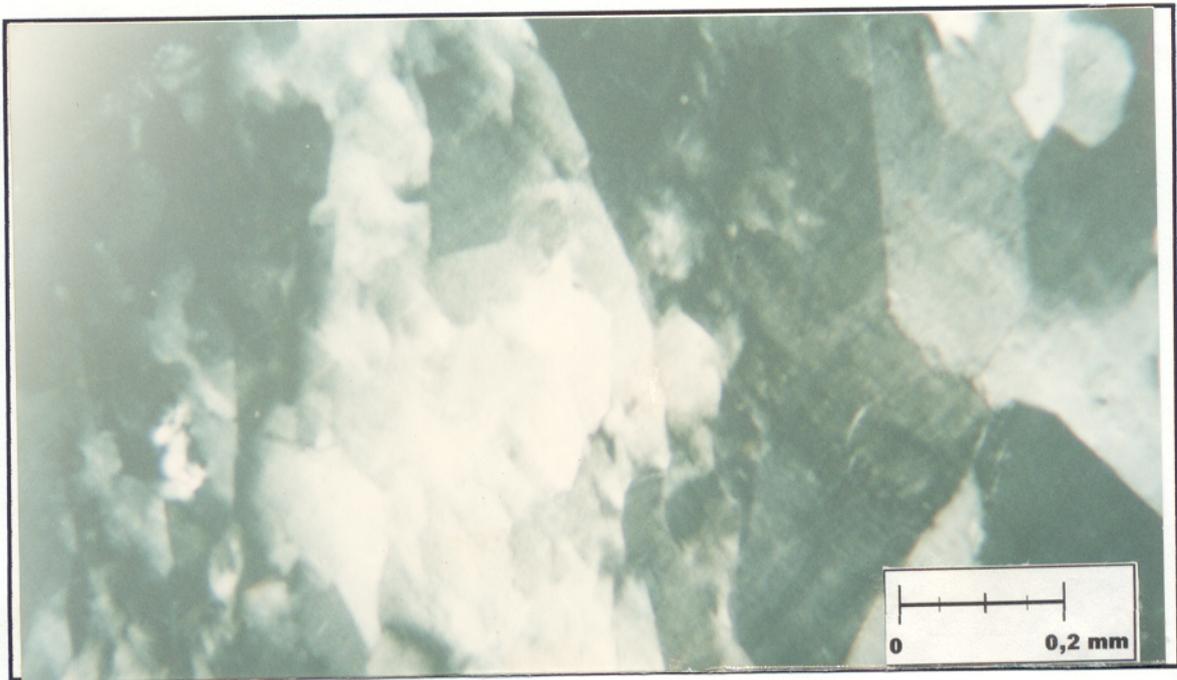


Figura 6 - Microfotografia mostrando vários cristais com crescimento paralelos, com faces bem desenvolvidas, ponto tríplice e contato retilíneo, na ametista de Pau D'Arco-PA. (nicóis cruzados, 25x).

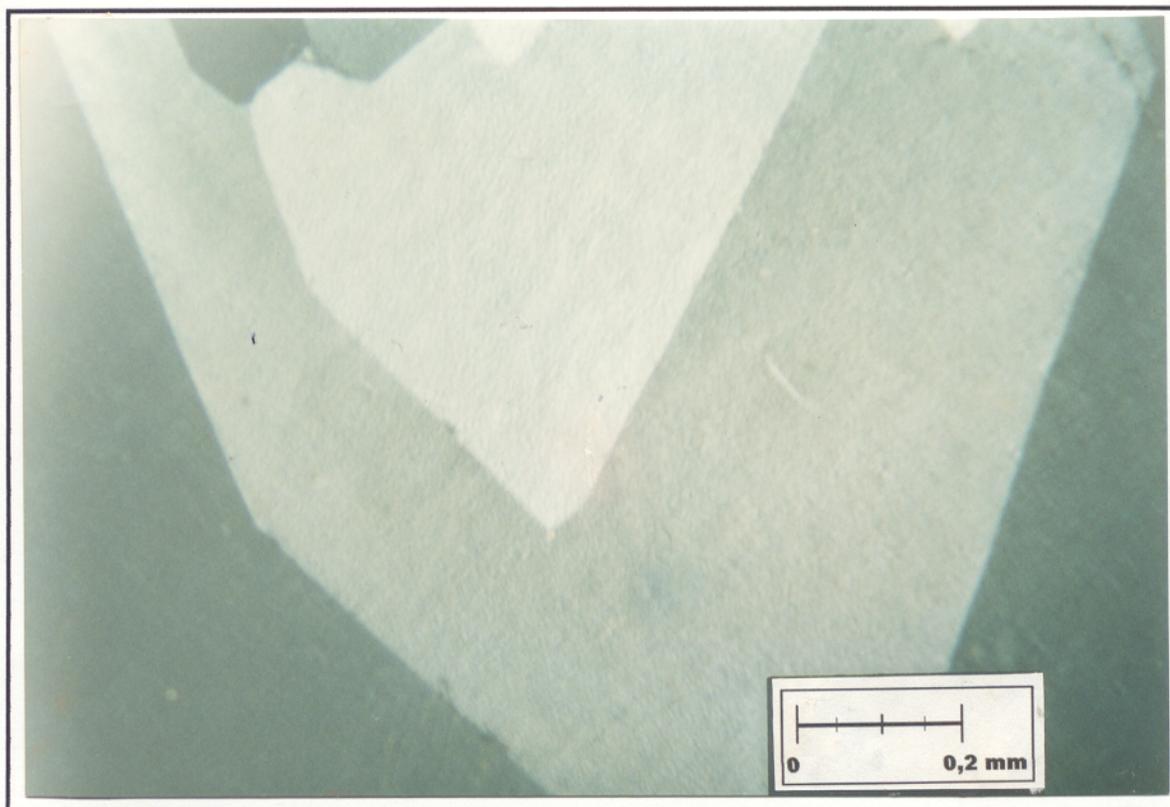


Figura 7 - Microfotografia da ametista de Pau D'Arco-PA, apresentando cristais com diversas fases de crescimento (nicóis cruzados, 25x).

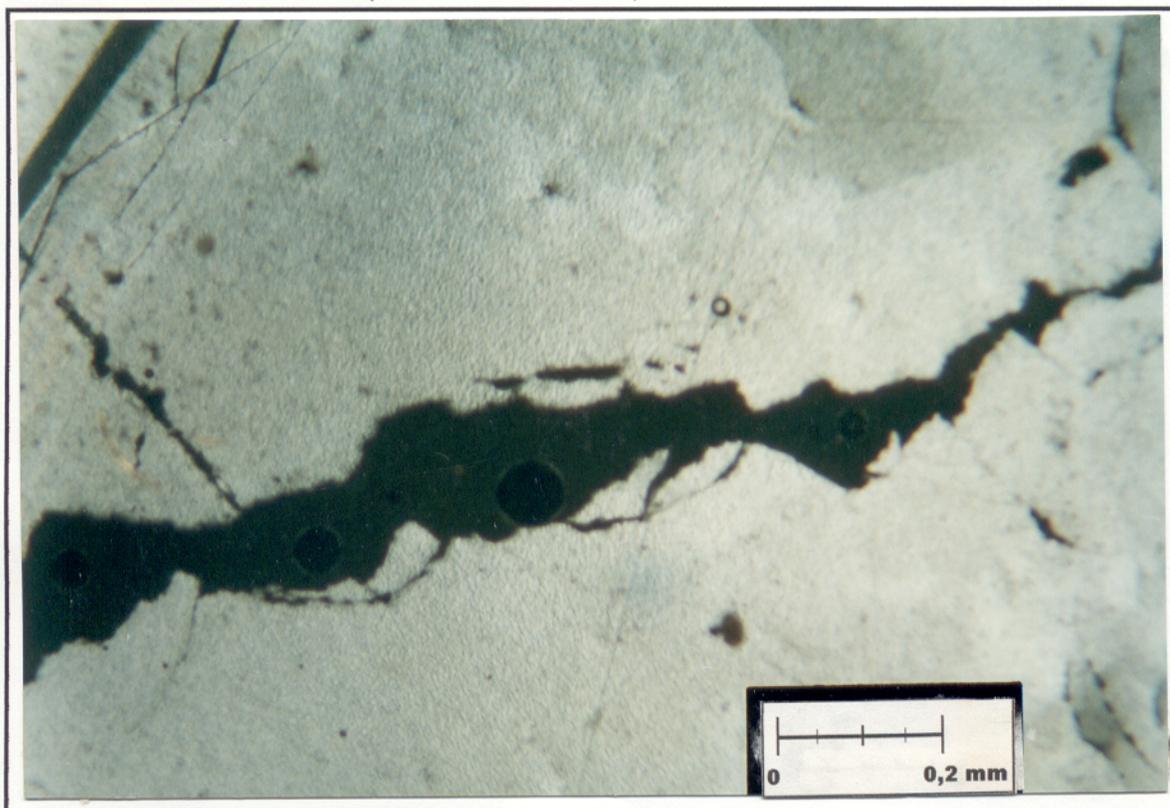


Figura 8 - Microfotografia da ametista de Pau D'Arco-PA, com fissuras preenchidas provavelmente por hidróxido de ferro (nicóis cruzados, 25x).

3.5 - INCLUSÕES MINERALÓGICAS

A ametista de Pau D'Arco, apresenta as seguintes inclusões mineralógicas: rutilo, carbonato (calcita) e opacos (provavelmente a hematita). O rutilo é o mais frequente, sendo identificado através das suas propriedades ópticas. Apresenta-se como agulhas concentradas, desenhando forma de leques, às vezes como pequenos cristais dispersos nas cores castanho avermelhado e amarelo forte (Figura 9).

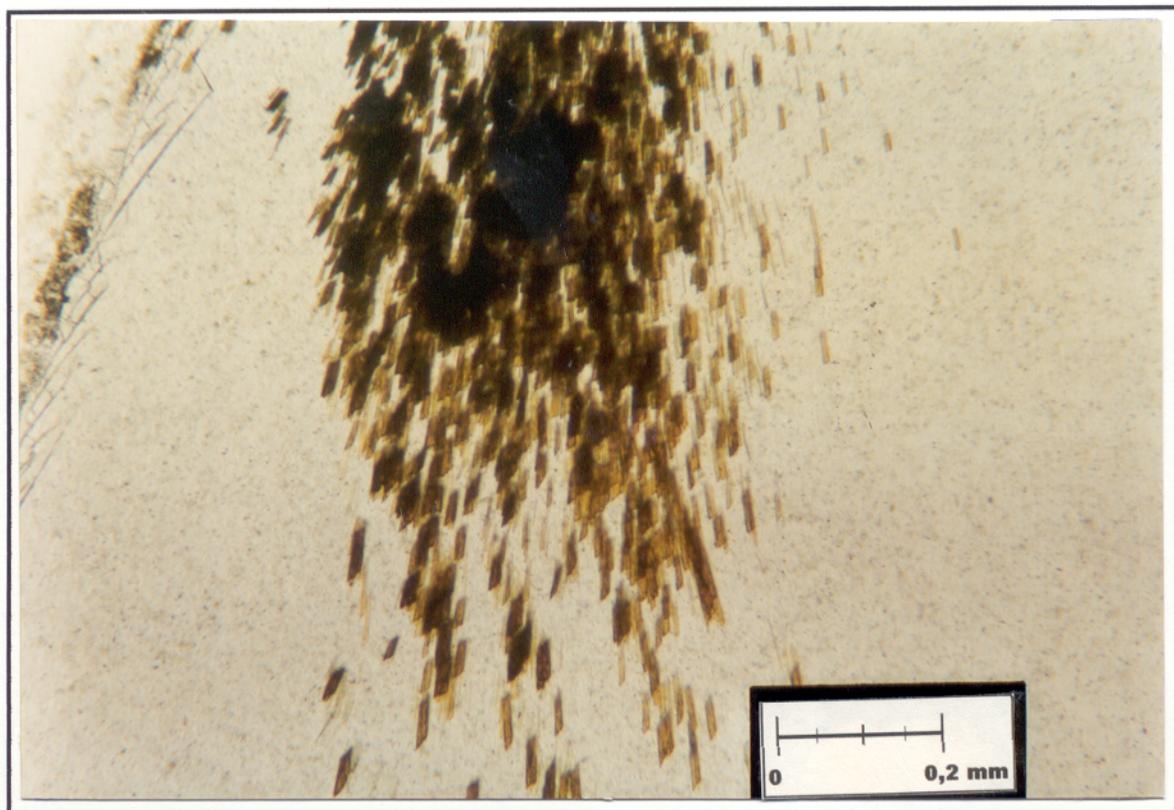


Figura 9 - Fotomicrografia de rutilo em forma de agulhas, desenhando leques, inclusos na ametista de Pau D'Arco-PA (nicóis cruzados, 25x).

O carbonato é encontrado na forma de pequenos cristais romboédricos incolores, por vezes amarelo claro, sugestivos de calcita.

3.6 - ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS

3.6.1 - Introdução

Para estudos microtermométricos das IF na ametista de Pau D'Arco, Alto Bonito e Alto Uruguai, foram consideradas somente as monofásicas e bifásicas (líquido + gás) com características de serem primárias.

Este estudo teve como objetivo tentar encontrar as temperaturas de cristalização deste mineral, como também, determinar a composição dos fluidos mineralizantes.

3.6.2 - Microscopia das inclusões fluidas na ametista de Pau D'Arco

Durante os estudos petrográficos, foram identificadas três tipos de inclusões fluidas: monofásicas, bifásicas e, somente uma trifásica.

- Inclusões fluidas monofásicas

São inclusões aquosas de fase líquida, claras e algumas escuras de fase gasosa. As dimensões são extremamente variadas, entre 10 e 50 μm , com formas geralmente alongadas, inclinadas ou ao longo do eixo c do cristal, relacionadas provavelmente aos planos de crescimento das faces dos cristais, acompanhando sempre as inclusões bifásicas.

- Inclusões fluidas bifásicas

São abundantes, apresentando à temperatura ambiente, duas fases: uma líquida e outra gasosa (l+g). As inclusões estudadas estão dispostas geralmente ao longo do eixo c do cristal, por vezes em pequenos grupos isolados ou, acompanhando planos de crescimento do mesmo, sugerindo serem primárias. As formas mais comuns são arredondadas, subarredondadas, alongadas e cristais negativos, com dimensões entre 10 e 100 μm . As razões V_v/V_t (volume da fase vapor/ volume total), variam de 0,05 a 0,1, onde a fase gasosa representa de 5 a 10% do volume da inclusão, sendo encontradas raramente, com até 85% (Figuras 10 a 13).

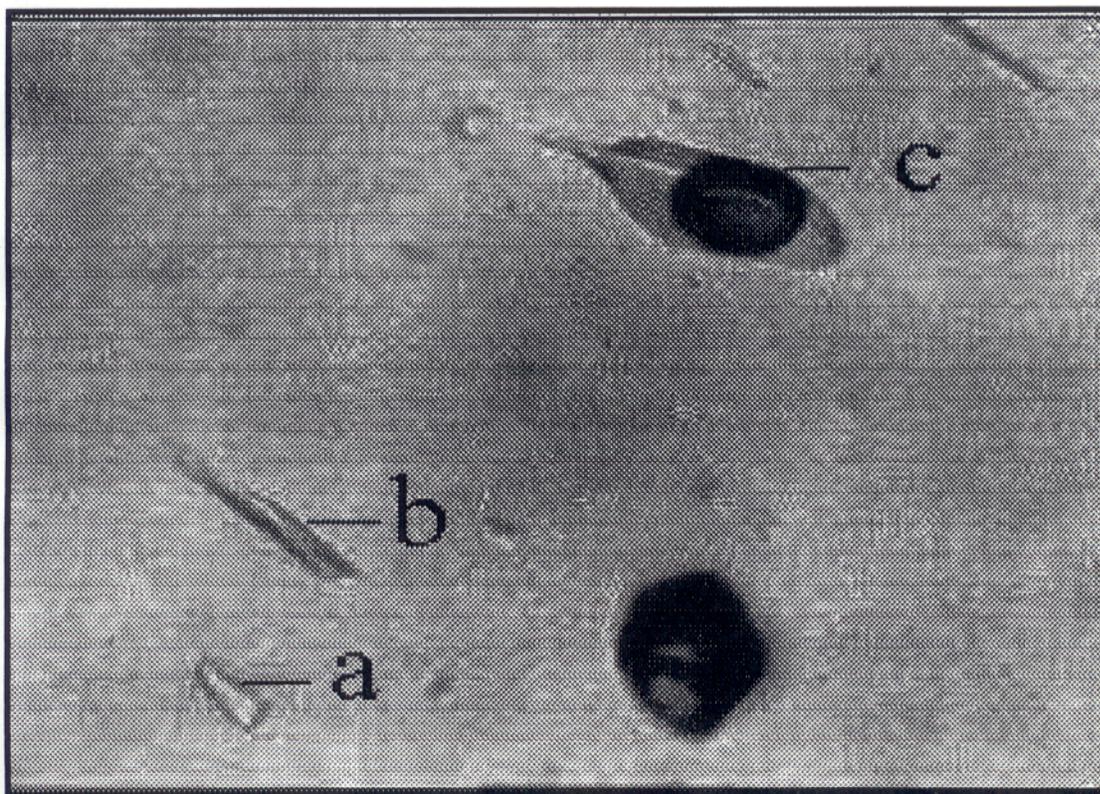


Figura 10 - Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas (a e b) com formas irregulares e, bifásica (c) subarredondada na ametista de Pau D'Arco-PA (PD-1) (nicóis paralelos, 25x).

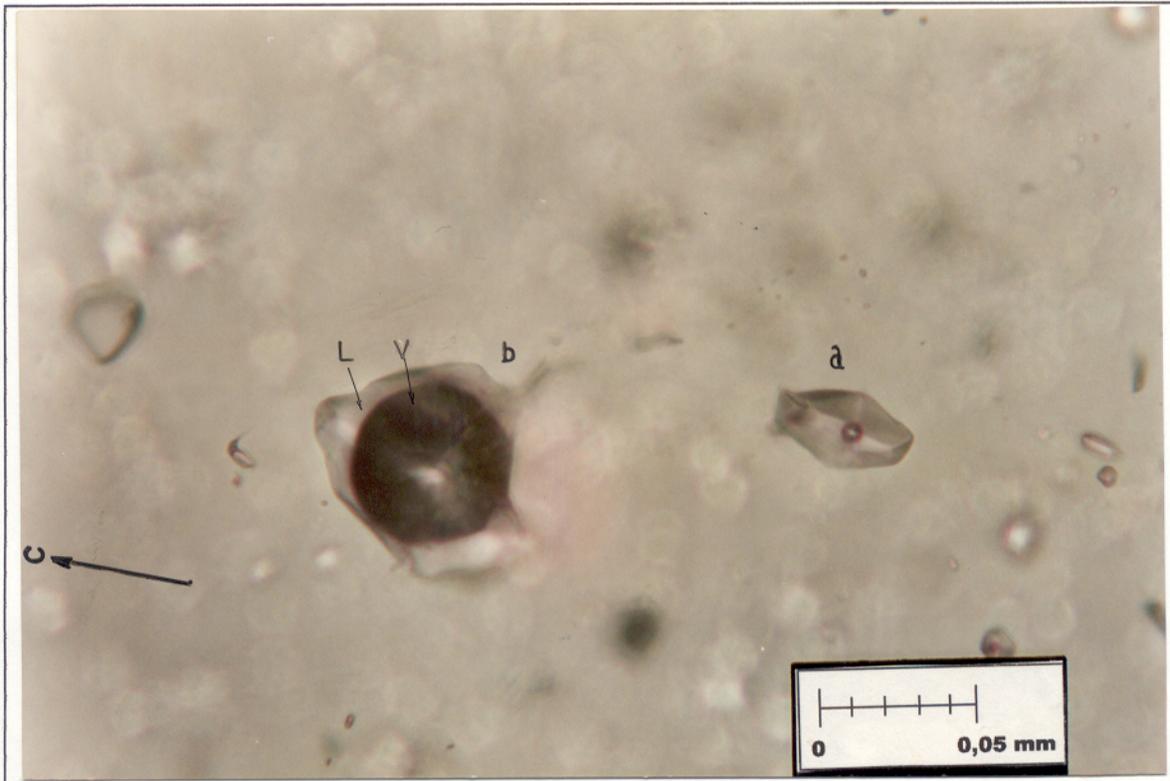


Figura 11 - Fotomicrografia de inclusões bifásicas primárias, paralelas ao eixo c do cristal. A inclusão "a", possui formato de cristal negativo. Na inclusão "b", destaca-se a bolha de gás que ocupa até 85% do espaço da cavidade da inclusão, mostrando também feição de escape de fluido (PD-1) (nicóis paralelos, 40x).

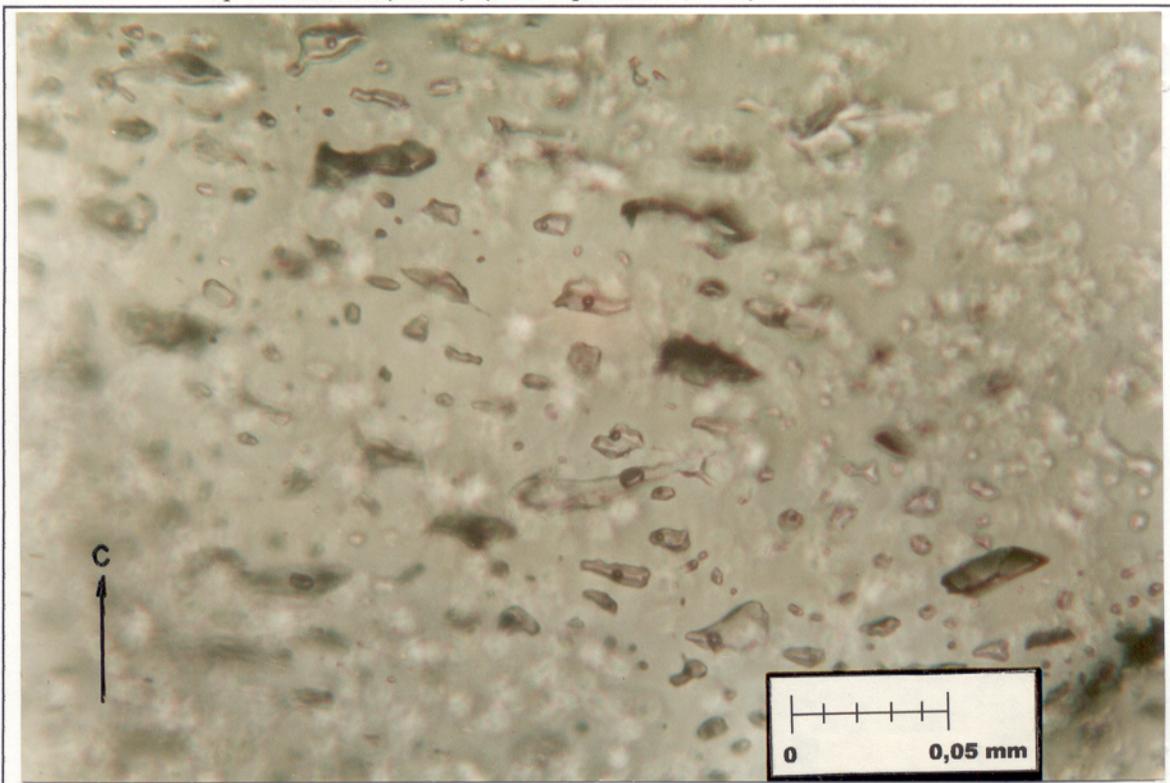


Figura 12 - Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas e bifásicas primárias na ametista de Pau D'Arco (PD-2), acompanhando planos de crescimento do cristal, mostrando várias formas (nicóis paralelos, 40x).

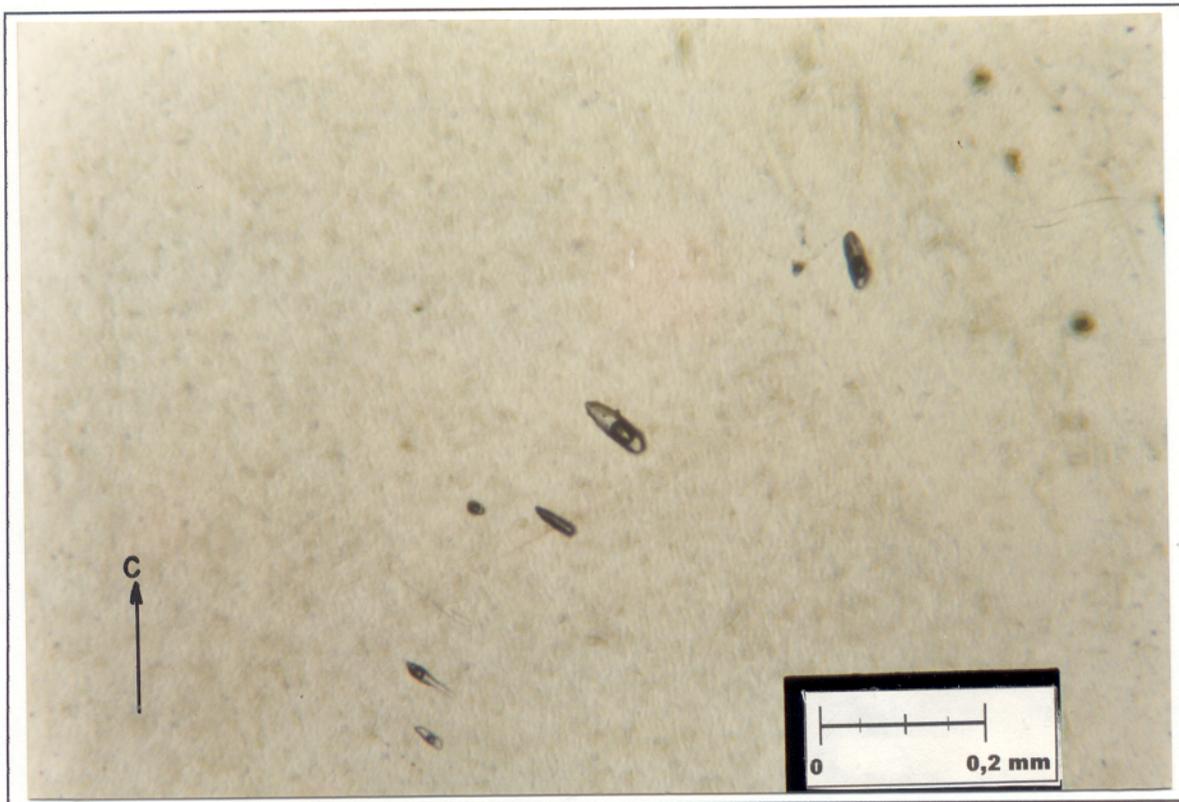


Figura 13 - Fotomicrografia de inclusões fluidas bifásicas primárias, com formas alongadas, na ametista de Pau D'Arco (PD-3), acompanhando o eixo c do cristal (nicóis paralelos, 25x).

Foram identificadas ainda, inclusões bifásicas que, pelo aspecto, podem ser secundárias ou pseudosecundárias por ocorrerem associadas a planos de fraturas, estas inclusões não foram consideradas neste estudo.

- Inclusões fluidas trifásicas

Apenas uma IF trifásica do tipo líquido+gás+sólido (l+g+s) foi encontrada nas seções estudadas. A fase sólida possui formato retangular, representando 5% do volume da inclusão (Figura 14). Esta inclusão, apesar de apresentar característica de ser primária, não foi considerada para estudos microtermométricos devido a sua rara ocorrência não sendo representativa nos cristais.



Figura 14 - Fotomicrografia de uma inclusão trifásica tipo líquido+gás+sólido (l+g+s), inclinada ao eixo c do cristal de ametista de Pau D'Arco-PA (nicóis paralelos, 40x).

3.6.3 - Resultados Microtermométricos

Durante os estudos microtermométricos, foram analisadas aproximadamente 300 inclusões fluidas entre monofásicas (l) e bifásicas (l+g), com características de serem primárias.

Não foram observados a formação de hidratos de sais durante os resfriamentos sucessivos realizados nas inclusões.

Apesar da ocorrência de fase carbônicas serem comuns em IF, sendo o CO₂ o composto mais frequente, na ametista de Pau D'Arco este, não foi encontrado. Para isso, usou-se o resfriamento de até -150 °C. Durante o aquecimento gradual, não foram observadas mudanças de fases para temperaturas na faixa de -56,6 °C, que é a temperatura de fusão do CO₂. Na sequência, as inclusões analisadas, apresentaram um aspecto granuloso semelhante a “casca de laranja”, sugerindo o início da fusão de gelo à temperaturas que variaram entre -52,4 e -52,1 °C, aproximadamente. O volume do líquido foi aumentando ao mesmo tempo em que ocorria a fusão dos cristais de gelo. Antes da fusão total, efetuou-se lentamente novo resfriamento, onde os cristais de gelo voltaram a crescer. Este resfriamento se estendeu até -75 °C e, novamente, entre -52,4 e -52,1 °C iniciou-se a fusão dos sólidos confirmando a temperatura do ponto eutético (Te), cujo valor é muito próximo da temperatura eutética dos sistemas H₂O-MgCl₂-CaCl₂, e/ou H₂O-NaCl-CaCl₂, cujos pontos eutéticos determinados são respectivamente -52,2 °C (SHEPHERD et al. 1985) e, -52,0 °C (Yanatieva, 1946 In: DAVIS et al. 1990). Neste último, a mesma temperatura foi confirmada por CRAWFORD (1981), porém Borisenko, citado por SHEPHERD et al. (1985) acusou temperatura de -55 °C para este sistema (Tabela 1).

Através das medidas de temperaturas de fusão de gelo (Tfg) foi possível distinguir três famílias de inclusões. A primeira (PD-1), formada por IF monofásicas, de formas irregulares a estiradas, ocorrendo isoladas e por vezes associadas as bifásicas, apresentam Tfg variando entre -5,3 e -1,1 °C, com salinidades equivalentes de 8,28 a 5,11 % em peso de NaCl. A segunda (PD-2), formada por IF monofásicas e bifásicas, predominando as bifásicas, com formas irregulares,

cristais negativos e alongadas, dispostas ao longo dos planos de crescimento do cristal, mostram Tfg na faixa de $-15,9$ a $-10,0$ °C, correspondendo a salinidades equivalentes a 19,37 a 13,94% em peso de NaCl. Na terceira família (PD-3), formada exclusivamente por IF bifásicas, apresentando formas alongadas e cristais negativos, ocorrendo em pequenos grupos, dispostas ao longo do eixo c do cristal. As temperaturas de fusão de gelo (Tfg) encontram-se entre $-21,2$ e $-16,3$ °C, indicando salinidades equivalentes de 23,18 a 19,68% em peso de NaCl (Figura 15).

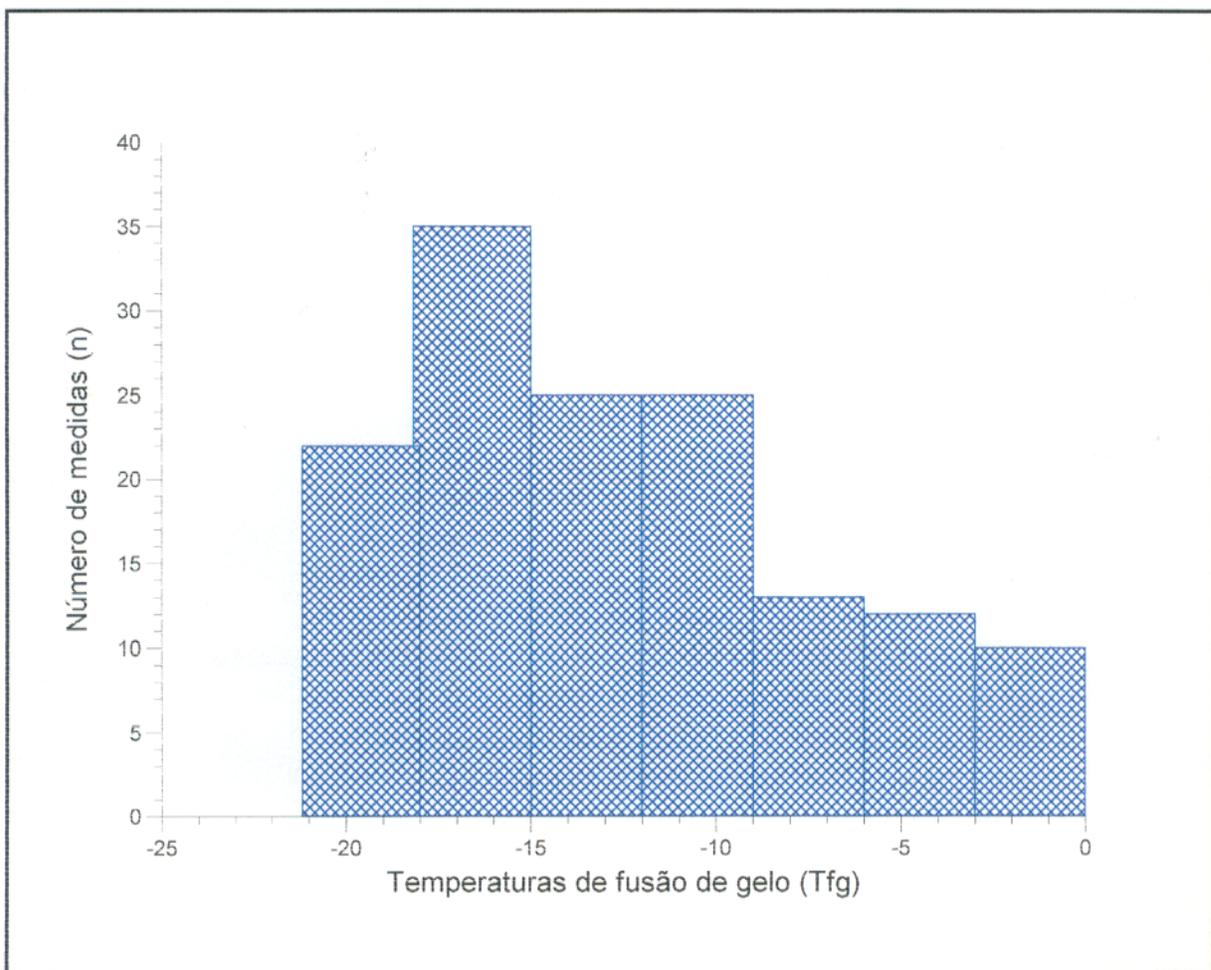


Figura 15 - Diagrama de frequência das temperaturas de fusão de gelo (Tfg), nas inclusões fluidas da ametista de Pau D'Arco-PA.

Durante o aquecimento, foram medidas as temperaturas de homogeneização (T_h) nas inclusões fluidas bifásicas (l+g) primárias. Observou-se que as inclusões fluidas de menor salinidade (PD-2), homogeneizaram-se na faixa de 120 a 140,1 °C, enquanto que as da família PD-3, a homogeneização ocorreu no intervalo de 293,6 a 383,1 °C (Figura 16).

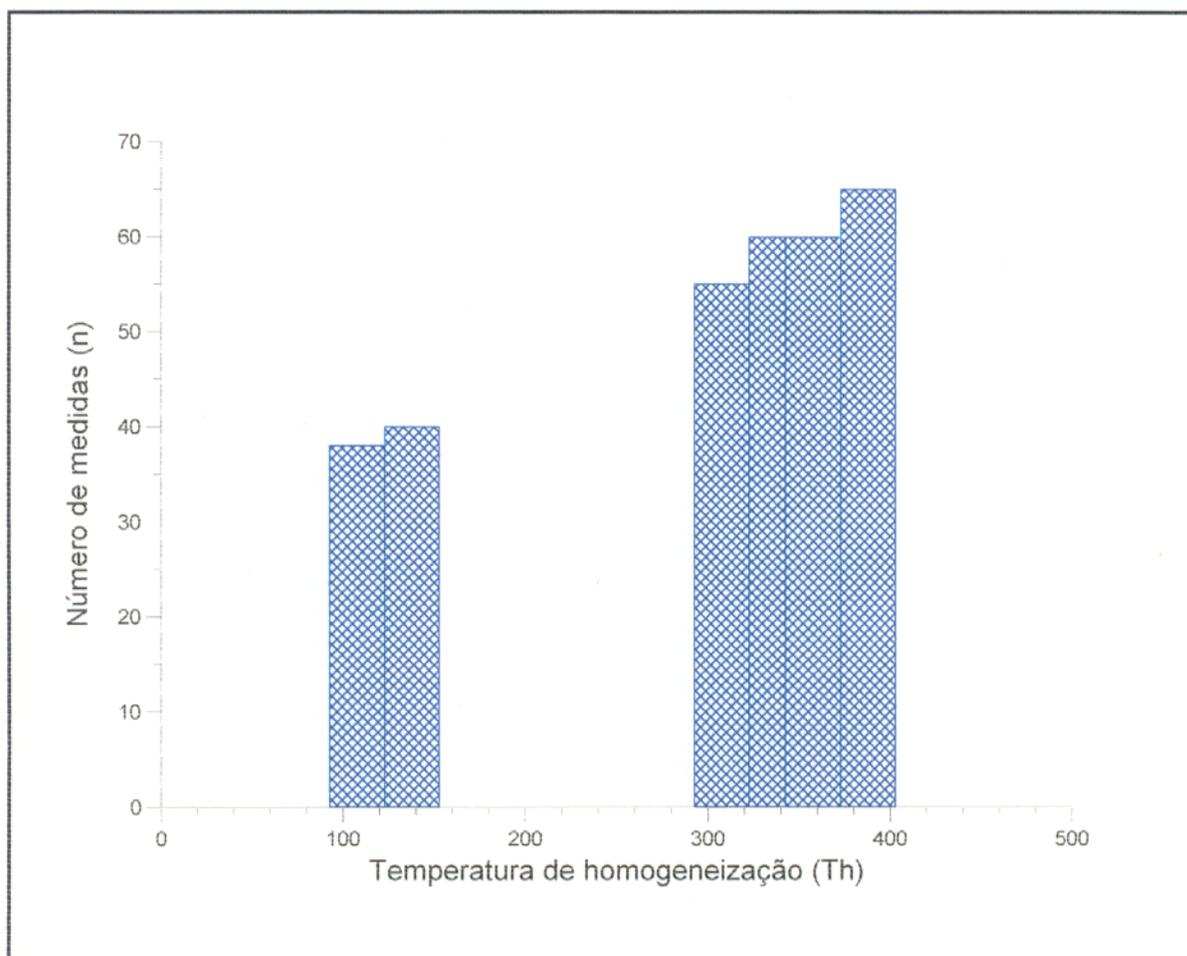


Figura 16 - Diagrama de temperatura de homogeneização para as inclusões fluidas da ametista de Pau D'Arco-PA.

Algumas inclusões fluidas bifásicas, apresentaram temperaturas de fusão, acima de 0°C (+ 1,4 e + 2,4 °C), que correspondem a situações de metaestabilidade. Não foi observado a formação de clatratos no decorrer de resfriamento em temperaturas de até -170 °C.

As densidades estimadas para as inclusões bifásicas, apresentaram valores de $0,85 \text{ g/cm}^3$ para a família PD-3, $1,05 \text{ g/cm}^3$ para a família PD-2 (Figura 17).

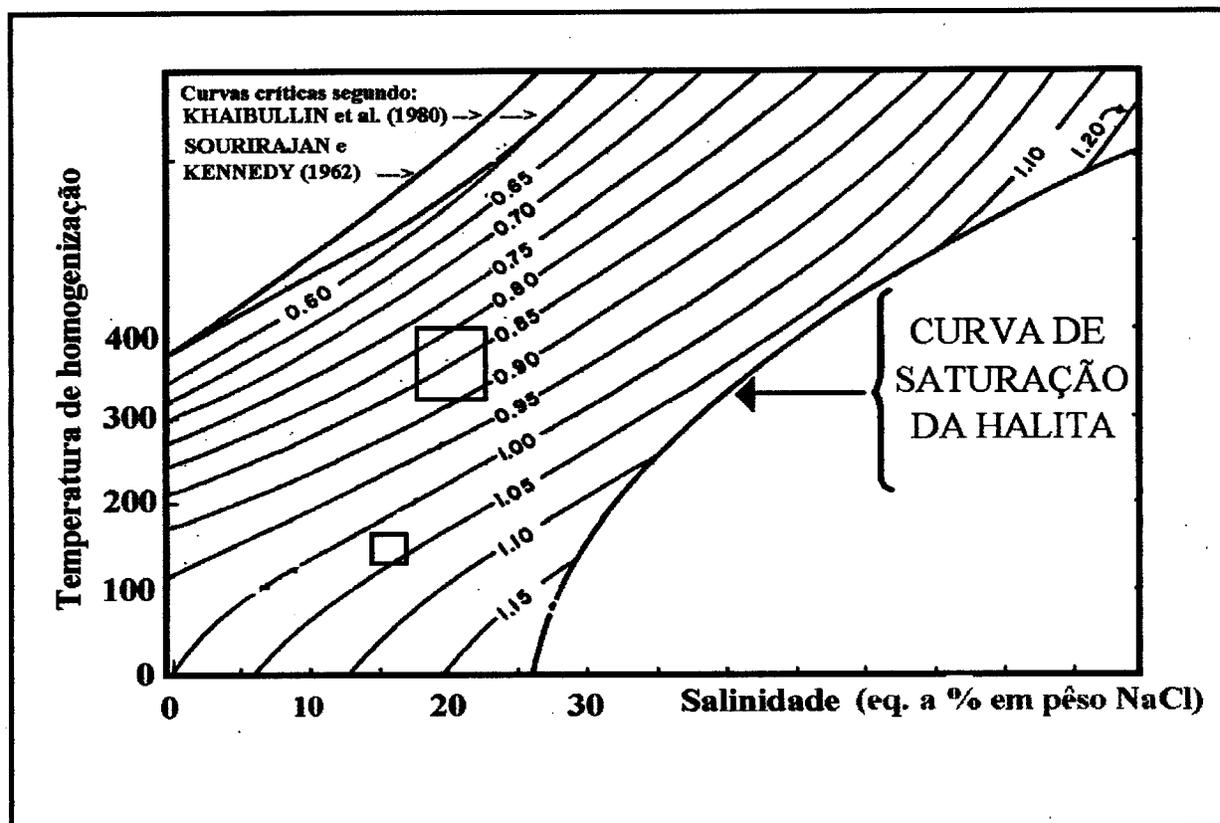


Figura 17 - Diagrama de temperatura de homogeneização (T_h) versus salinidade das inclusões fluidas bifásicas (l+g) da ametista de Pau D'Arco-PA, a partir das quais foram determinadas as densidades dos fluidos (modificado de ROEDDER, 1984).

Não foram feitas determinações exatas de pressão mínima de formação para essas inclusões fluidas, pelo fato de não existirem trabalhos específicos que mostrem a posição das isócoras em diagrams de T vs P no sistema $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$.

3.7 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os resultados das análises químicas para elementos maiores e elementos-traço da ametista

Pau D'Arco, estão apresentados na tabela 5.

Tabela 4 - Composição química da ametista de Pau D'Arco

ELEMENTOS	TEORES (%) e (ppm)	ELEMENTOS	TEORES (%) e (ppm)
SiO ₂	98,60	Sr	9
Al ₂ O ₃	0,46	Be	8
Fe ₂ O ₃	0,030	Cr	6
Na ₂ O	0,02	Ga	6
TiO ₂	0,0094	Se	2
P ₂ O ₅	<10	Zn	<200
K ₂ O	<0,01	Pb	<20
CaO	<0,01	Sn	<5
MgO	<0,01	Mn	<10
Perda ao fogo	0,06	Y	<10
F	120	Sc	<5
V	66	As	<1
Co	29	Hg	<50
Cl	22	Zr	<10
Rb	10		

A análise desses resultados, mostram que esta ametista é formada além de SiO₂ com teores de 98,60%, por Al₂O₃ (0,46%), Fe₂O₃ (0,030%), TiO₂ (0,0094%) e, ainda, elementos-traço como o F (120ppm), V (66ppm) e Be (8ppm). Esses dados, se comparados com aqueles apresentados por BLANKENBURG (1994) na tabela 5, para diferentes variedades coloridas de quartzo, incluindo a ametista, pode-se observar que o Al, Ti e Be apresentam teores relativamente altos, enquanto que o Fe e o F aparecem em quantidades semelhantes na ametista de Pau D'Arco.

Tabela 6 - Análises químicas para elementos-traço em cristal de rocha e variedades coloridas de quartzo (teores em ppm).

ELEMENTO	QUARTZO ROSA	CRISTAL DE ROCHA	QUARTZO FUMÊ	QUARTZO MORION	CITRINO	AMETISTA
Ag	---	---	1,7	---	2	3
Al	490	175	110	155	235	265
B	6	2	3	---	---	8
Ba	8	9	<8	<8	6	320
Be	---	---	---	---	---	2,3
Ca	8	15	17	19	22	180
Cu	9	26	19	18	23	19
F	<100	**	<100	**	**	200
Fe	85	70	30	40	50	355
Ga	---	---	---	---	---	15
Ge	1,9	1,3	1,8	2,9	1,6	1,6
K	5	5	9	6	9	160
Li	24	59	37	73	118	50
Mg	14	42	12	9	23	43
Mn	5	5	2	---	---	9
Na	45	37	42	48	36	100
Rb	4	<3	5	<3	2	**
Ti	32	8	9	11	13	12
Zr	---	---	---	---	---	2

Legenda: --- = não analisado Fonte: BLANKENBURG (1994)

** = sem dados

DEER et al. (1966) apresenta uma única análise de ametista com teores de Fe_2O_3 de 216 ppm e Al_2O_3 de 4 ppm, este último, bastante inferior ao obtido na ametista de Pau D'Arco.

3.8 - GÊNESE

A discussão sobre a gênese desta ametista, é parcialmente dificultada por falta de informações e vestígios da rocha encaixante. Desta maneira, foram usados os dados microtermométricos, petrográficos, químicos e, algumas sugestões podem ser feitas:

- Parece estar bastante claro, através dos estudos realizados, que, a origem desta ametista está relacionada a rochas deformadas, tendo sido gerada por processos hidrotermais formando

depósitos em forma de veios. Estes depósitos, pelas características regionais, podem ter sido formados em rochas de composição quartzítica que, ocorrem em toda a região.

- Os processos hidrotermais, são confirmados através dos estudos microtermométricos, mostrando que os fluidos que cristalizaram esta ametista possuíam salinidades entre 3,11 e 21,2% em peso de NaCl. Estas soluções, provavelmente eram de origem magmáticas e, posteriormente, durante a cristalização, tiveram a contribuição das não magmáticas, evidenciadas pelas diferenças marcantes nas temperaturas de homogeneização (383,1 °C e 100,0 °C). As medidas de temperaturas dos pontos eutéticos, confirmaram que estes fluidos eram compostos de H₂O-MgCl₂-CaCl₂, e H₂O-NaCl-CaCl₂ cujos pontos eutéticos determinados são de -52,4 °C e -52,1 °C (Tabela 1). Com base nestes resultados, provavelmente a temperatura aproximada de início de cristalização desta ametista estavam em torno de 380 °C. Em fases mais tardias, com o resfriamento gradual das soluções, as temperaturas caíram para níveis em torno de 100 °C gradativamente. Essa diferença (383,1 e 100°C) pode indicar evolução dos fluidos, com abertura do sistema e a possível mistura de soluções magmáticas com as não magmáticas mais frias e, águas meteóricas no sistema, evidenciada pela fusão de gelo à temperatura de 0 °C.

- Os processos hidrotermais estariam ligados provavelmente, a algum evento magmático que remobilizou SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, Ti O₂, F, V e Co (conforme composição química e mineralógica da ametista) das rochas encaixantes, precipitando essas soluções em fraturas e fissuras causadas por eventos cisalhantes que atuaram na região, cristalizando a ametista. Estes eventos são evidenciados através dos estudos petrográficos mostrando que os cristais possuem inúmeras fissuras, zoneamento de cor, cristais em crescimento paralelo, outros com várias fases de crescimento, ponto tríplice e extinção ondulante que, são feições características de recristalização.

- Provavelmente Fe fornecido pela rocha encaixante, poderia ter provocado os centros de cor que, aliados ao calor ou algum tipo de irradiação teria originado a cor lilás deste mineral. No entanto, esta ametista, apresenta uma cor muito saturada, normalmente os cristais tornam-se translúcidos e até opacos. Isso se deve, à exposição a alguma fonte de irradiação, como por exemplo, o calor fornecido pela própria rocha encaixante ou, através da desintegração do K^{40} presente em argilas potássicas que, geralmente se alojam em veios de quartzo. Isto foi comprovado por este autor, quando aplicou em laboratório, irradiação com raios-X em alguns cristais de ametista do Brasil, conseguindo aumentar a intensidade da cor em até 5x (ROSSMAN, 1994).

4 - A AMETISTA DO ALTO BONITO - PA.

4.1 - ASPECTOS GERAIS

Os cristais de ametista do Alto Bonito, apresentam-se em vários tamanhos, os maiores atingem até 30 cm de comprimento, geralmente bem formados. As pedras com cor forte são raras, no entanto, o índice de aproveitamento na lapidação chega a 30%, devido principalmente, a ausência de inclusões mineralógicas visíveis macroscopicamente e, também, as poucas fissuras e fraturas nos cristais.

4.2 - LOCALIZAÇÃO

A jazida de ametista, está localizada em Alto Bonito, no município de Marabá, sudeste do Estado do Pará (Figura 18).

4.3 - GEOLOGIA DO DEPÓSITO

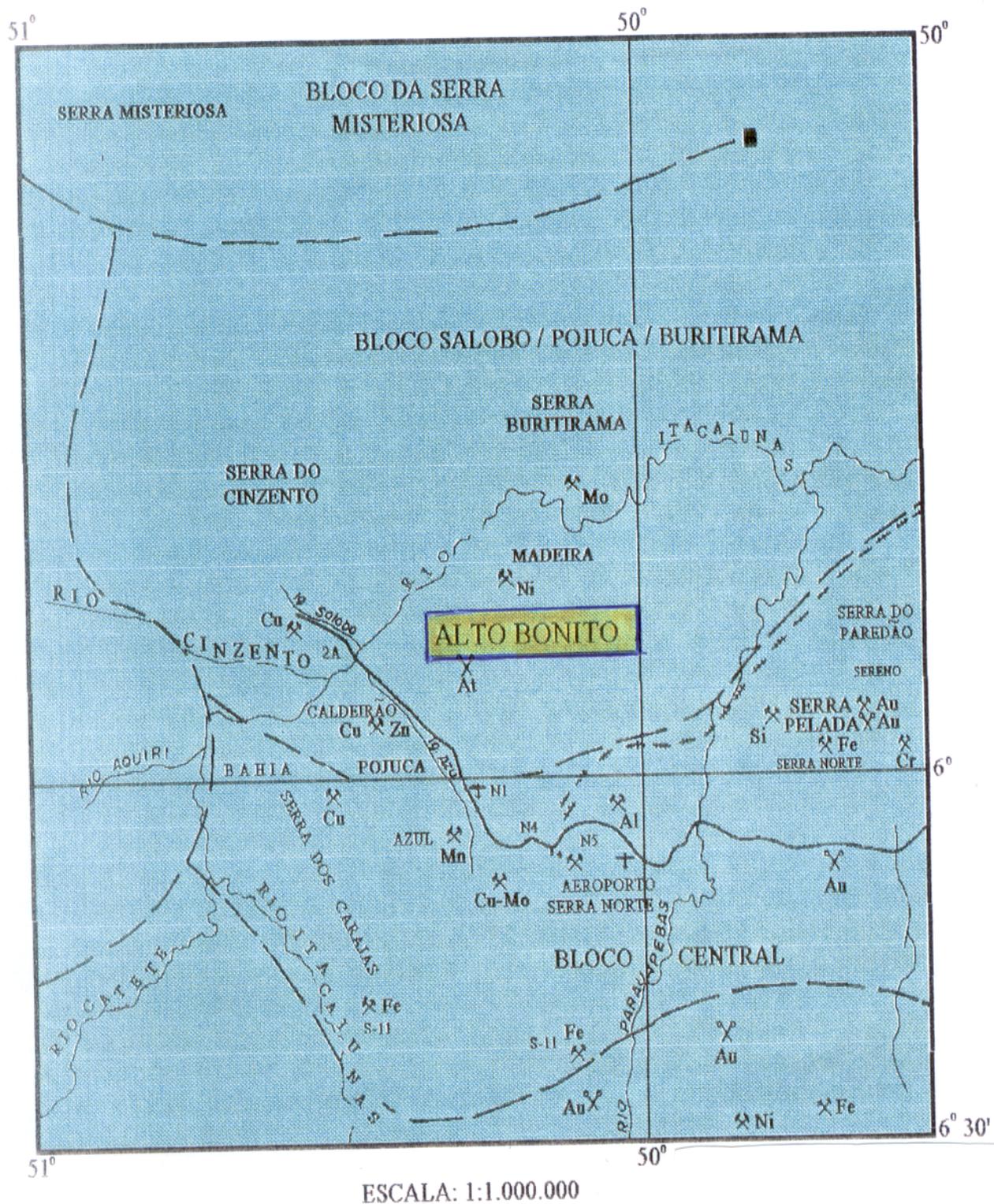
A ametista do Alto Bonito é encontrada em depósito primário e secundário (Figura 19).

4.3.1 - Depósito primário

Está associado aos quartzitos da sequência tipo Salobo MM1, de idade Proterozóica Inferior (± 1.800 m.a.). Estruturas como falhas e fraturas, foram preenchidas por cristais de ametista, sob a forma de veios (COLLYER & MÁRTIRES, 1986).

4.3.2 - Depósito secundário

É depósito detrítico de material mal selecionado como areias, óxido de Fe e Mn, cristais de quartzo hialino, quartzo róseo e ametista, que foram desagregados e transportados para as partes mais baixas da área (COLLYER & MÁRTIRES, 1986).



Legenda:

At=	ametista
Au=	ouro
Fe=	ferro
Mn=	manganês
Cu=	cobre
Mo=	molibdênio
Zn=	Zinco

Figura 18 - Mapa de localização à área de garimpo de ametista do Alto Bonito, (modificado de COLLYER & MÁRTIRES, 1986).

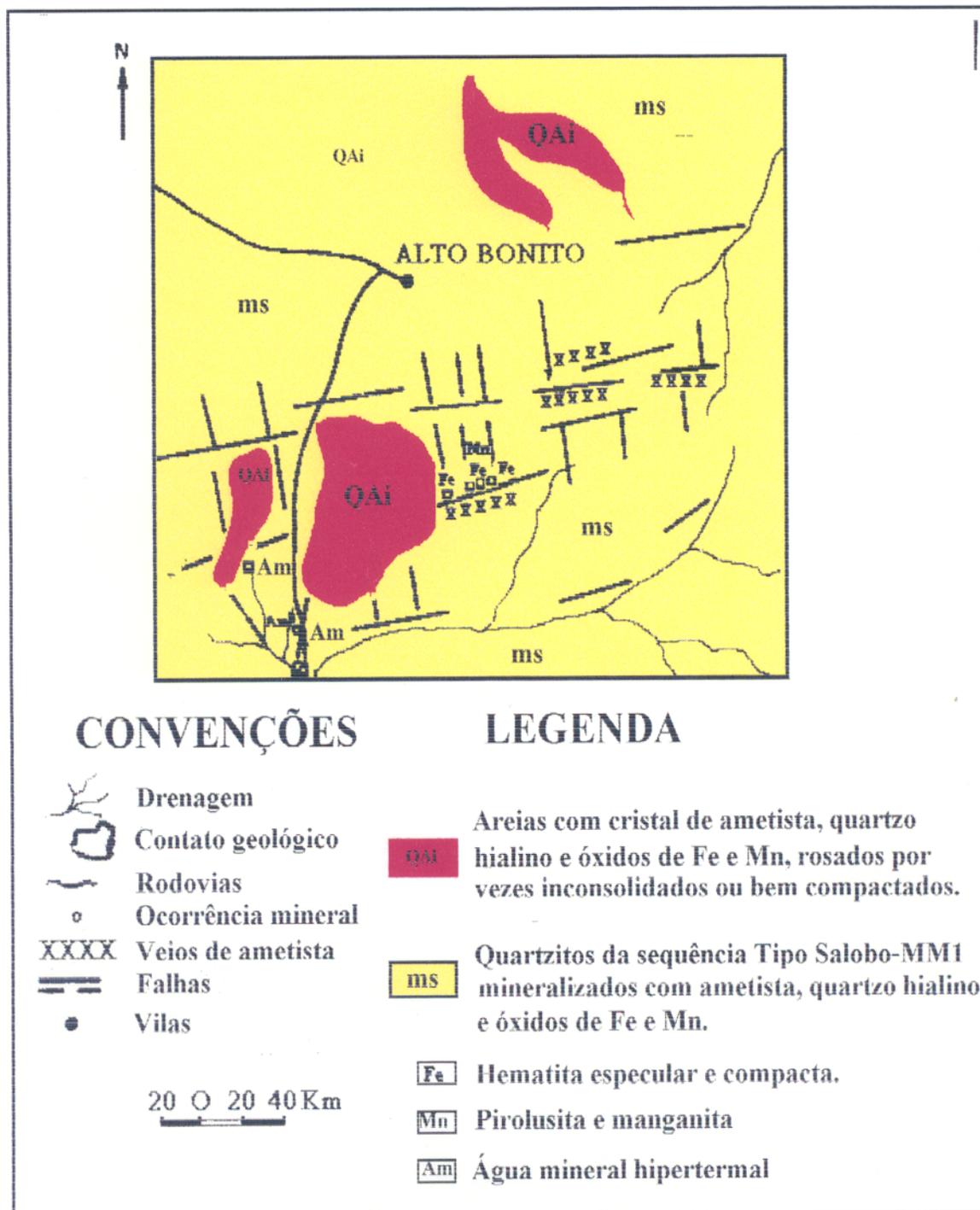


Figura 19 - Mapa geológico do garimpo de ametista do Alto Bonito (modificado de COLLYER & MÁRTIRES, 1986).

4.4 - PROPRIEDADES FÍSICAS E GEMOLÓGICAS

Além das propriedades físicas já descritas, comuns a variedades de quartzo, esta ametista destaca-se, principalmente, pelo grau de pureza, com poucas fissuras e ausência de inclusões mineralógicas macroscópicas. As pedras classificadas como “extras”, são raras e atingem tonalidade 3 (três) com grau de beleza “S” (especialmente bela e com brilho) na escala de SUWA (1994) (Tabela 4).

4.5 - MICROTEXTURAS

Estudos microscópicos, em lâminas delgadas, mostram que é comum a presença de cristais com crescimento paralelo, cristais intercrescidos e também, cristais com diversas fases de crescimento na ametista do Alto Bonito. Os cristais são bem desenvolvidos com faces definidas e contato retilíneo, definindo, localmente, ponto tríplice com extinção ondulante (Figuras 20 a 23).

As fissuras a nível de lâmina delgada, são secas, outras preenchidas por material de cor marrom avermelhado, por vezes negra, provavelmente hidróxido de ferro

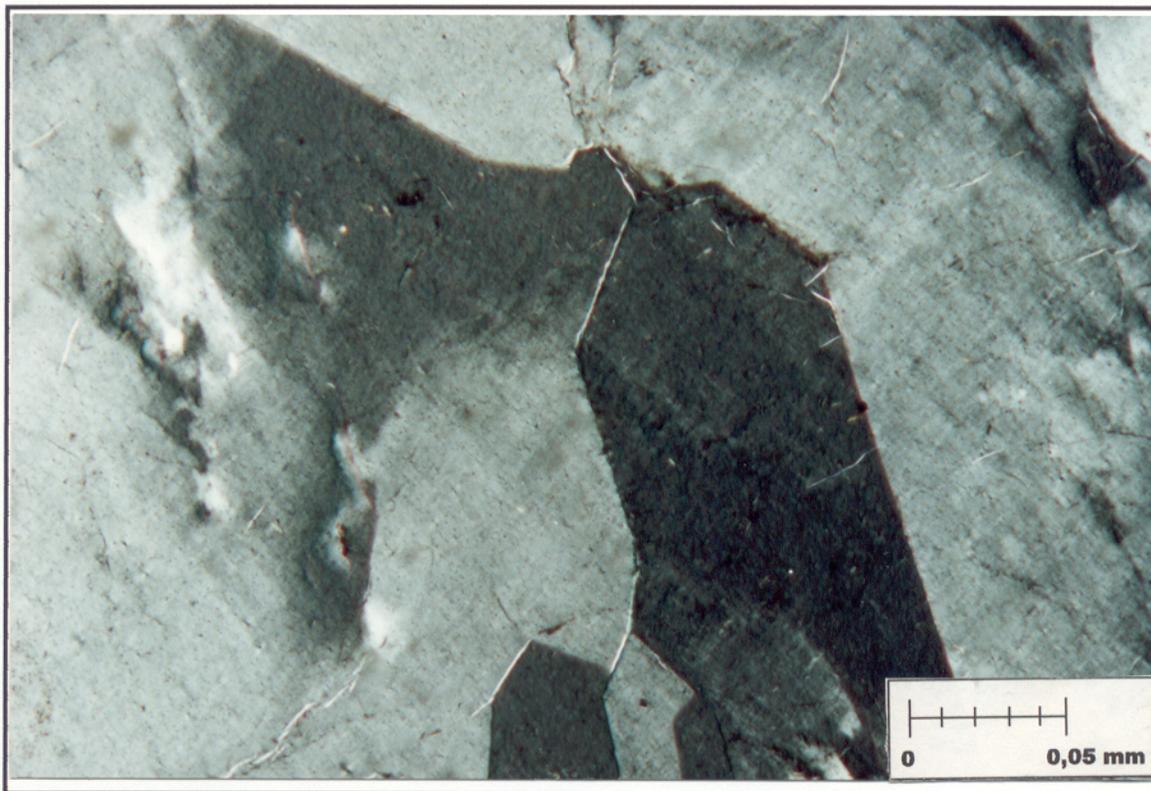


Figura 20 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito, mostrando vários cristais em crescimento paralelo (nicóis cruzados, 25x).

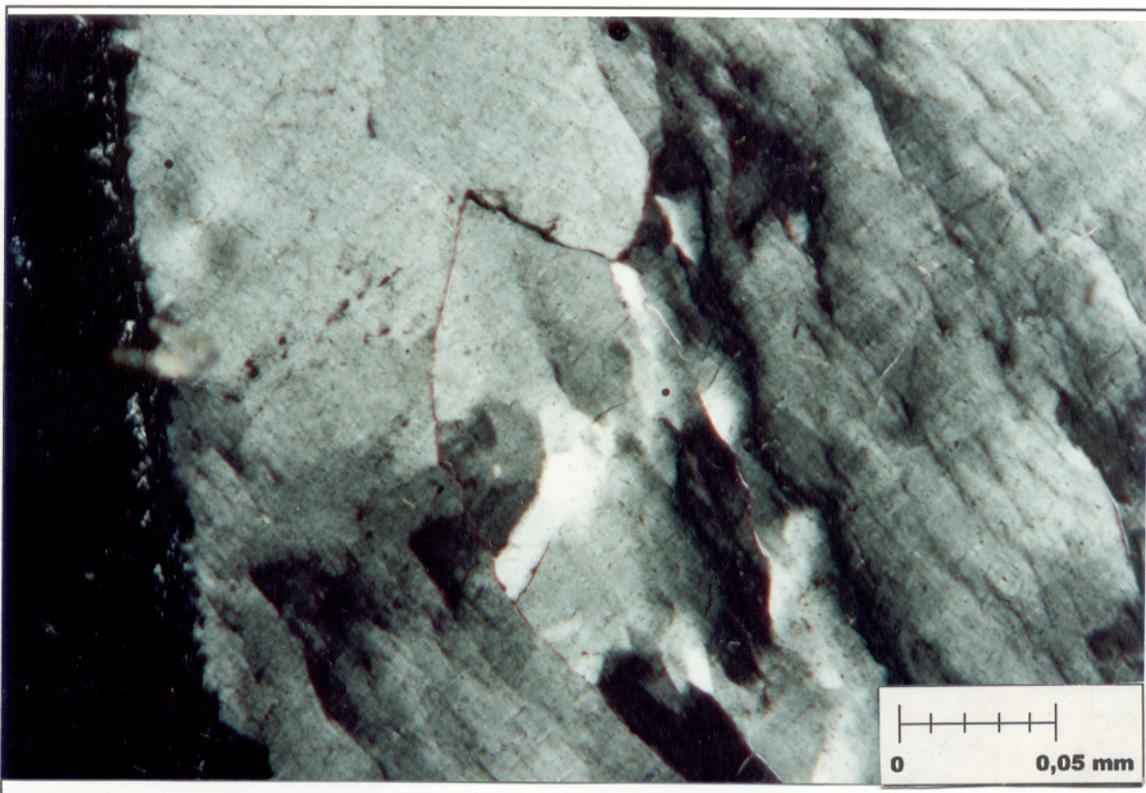


Figura 21 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito, mostrando alguns cristais intercrescidos (nicóis cruzados, 25x).

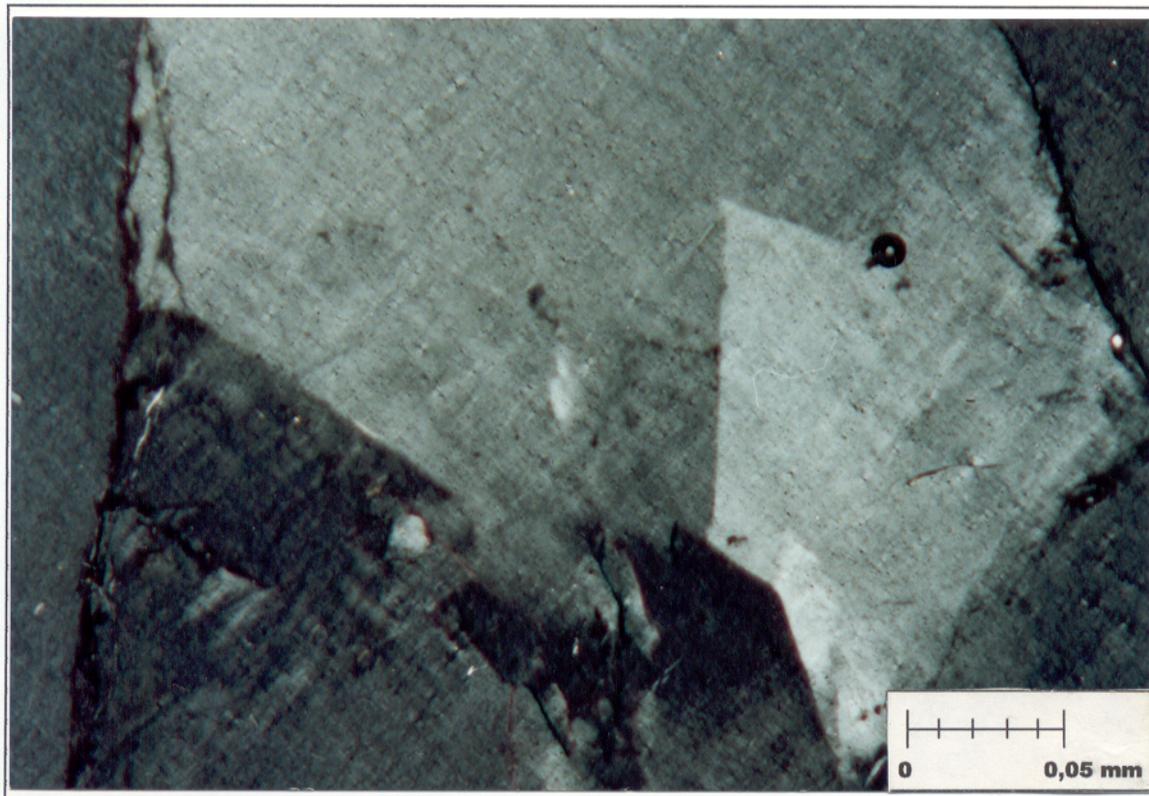


Figura 22 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito, mostrando um cristal com algumas fases de crescimento (nicóis cruzados, 25x).

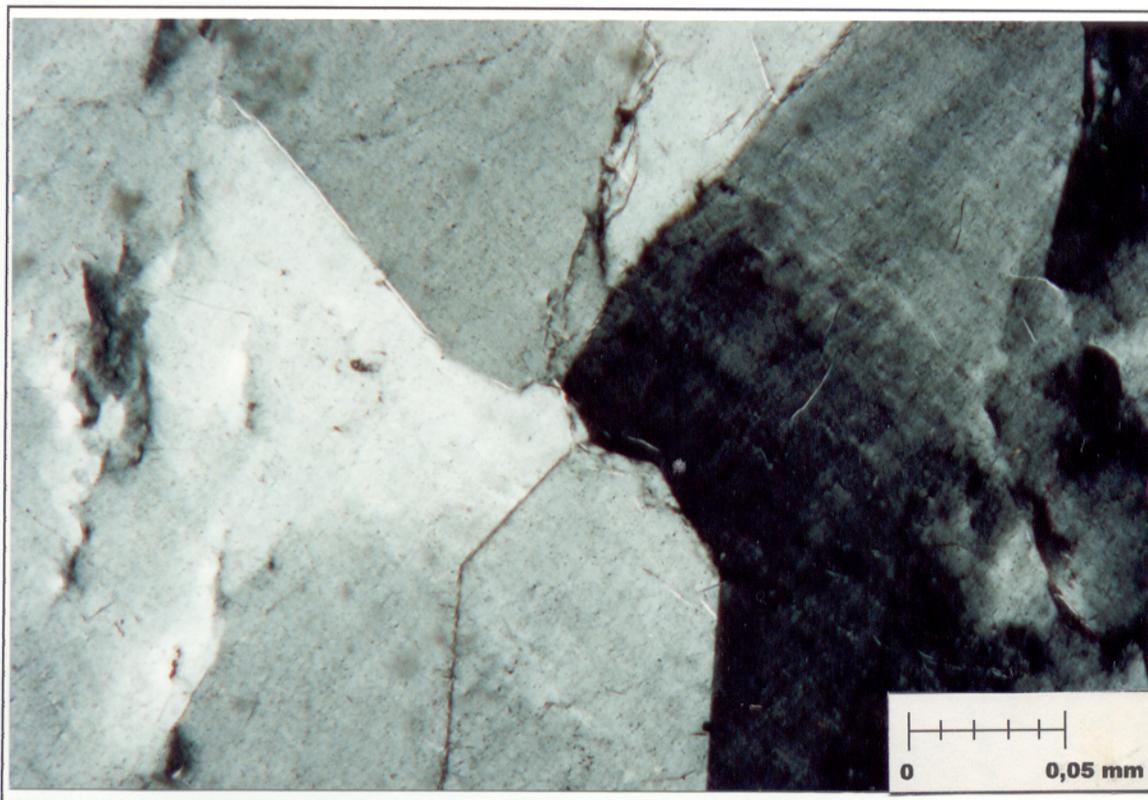


Figura 23 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Bonito, mostrando contato retilíneo predominante e, localmente ponto tríplice (nicóis cruzados, 25x).

4.6 - INCLUSÕES MINERALÓGICAS

Nesta ametista é rara a presença de inclusões mineralógicas, ocorrendo somente pequenos cristais de carbonato, semelhantes a calcita, identificados através das propriedades ópticas e, opacos, provavelmente hematita.

4.7 - ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS

Durante os estudos petrográficos, identificou-se dois tipos de inclusões fluidas: monofásicas e bifásicas.

- Inclusões fluidas monofásicas

São inclusões claras ou escuras, provavelmente, aquosas. As dimensões variam entre 5 e 80 μm , com formas variadas, destacando-se porém, as alongadas. Ocorrem geralmente ao longo do eixo c do cristal, acompanhando por vezes as inclusões bifásicas (Figura 24).

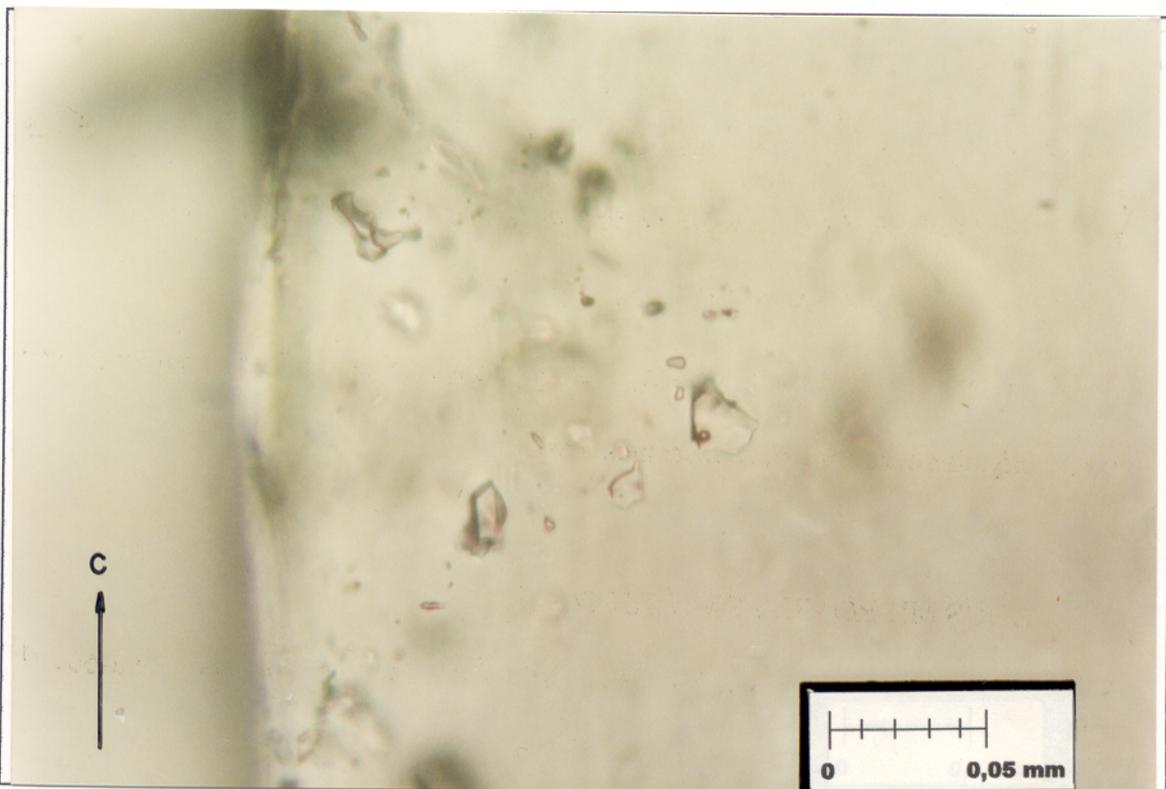


Figura 24 - Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas e bifásicas primárias com formas irregulares, dispostas ao longo do eixo c do cristal, na ametista do Alto Bonito-PA (nicóis paralelos, 40x).

- Inclusões fluidas bifásicas

São frequentes e, à temperatura ambiente, apresentam duas fases: uma gasosa e outra líquida (l+g). As inclusões estudadas, estão dispostas geralmente ao longo do eixo c do cristal, são bem delineadas, as vezes com formas arredondadas, alongadas e cristais negativos, estas características sugerem serem de origem primária. As dimensões são extremamente variadas, desde 5 até 100 μ m. A fase gasosa representa de 5 a 10% do volume total da inclusão (Figuras 25 e 26).

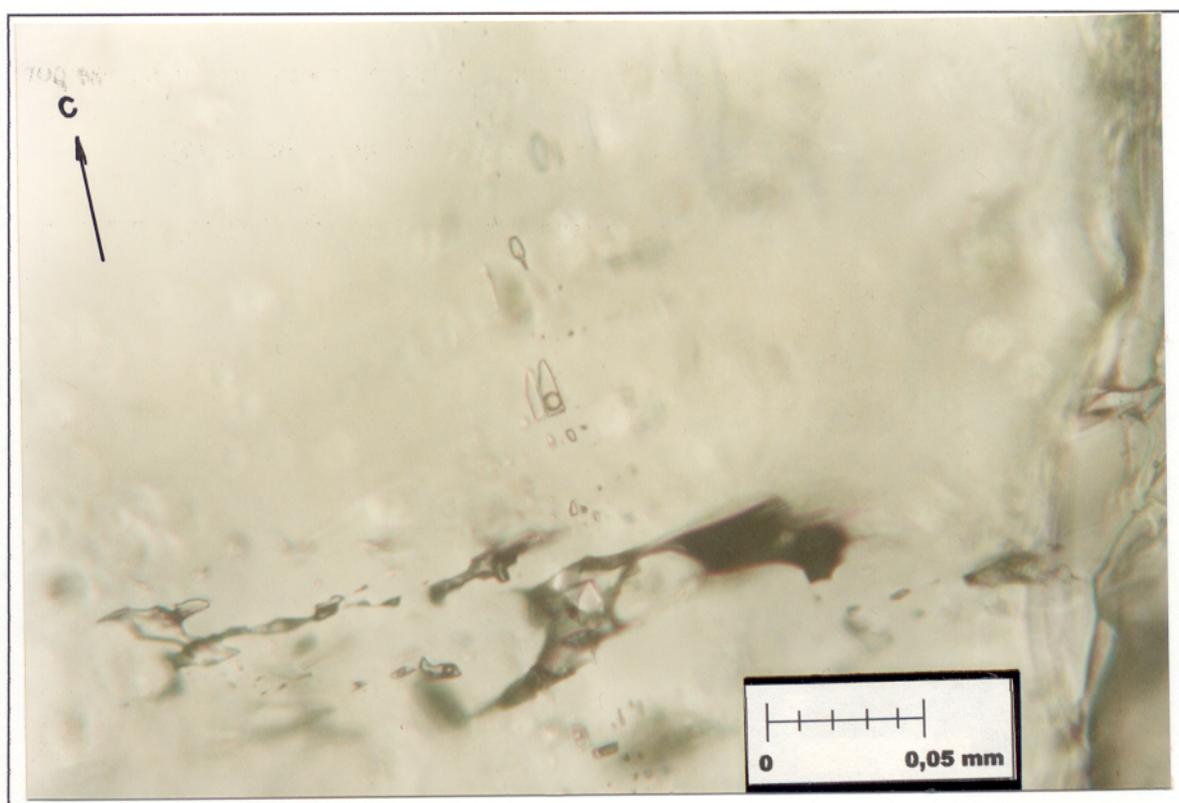


Figura 25 - Fotomicrografia de inclusões bifásicas (B) e monofásicas (M) primárias, paralelas ao eixo c do cristal, com formas irregulares na ametista do Alto Bonito-PA (nicóis paralelos, 40x)

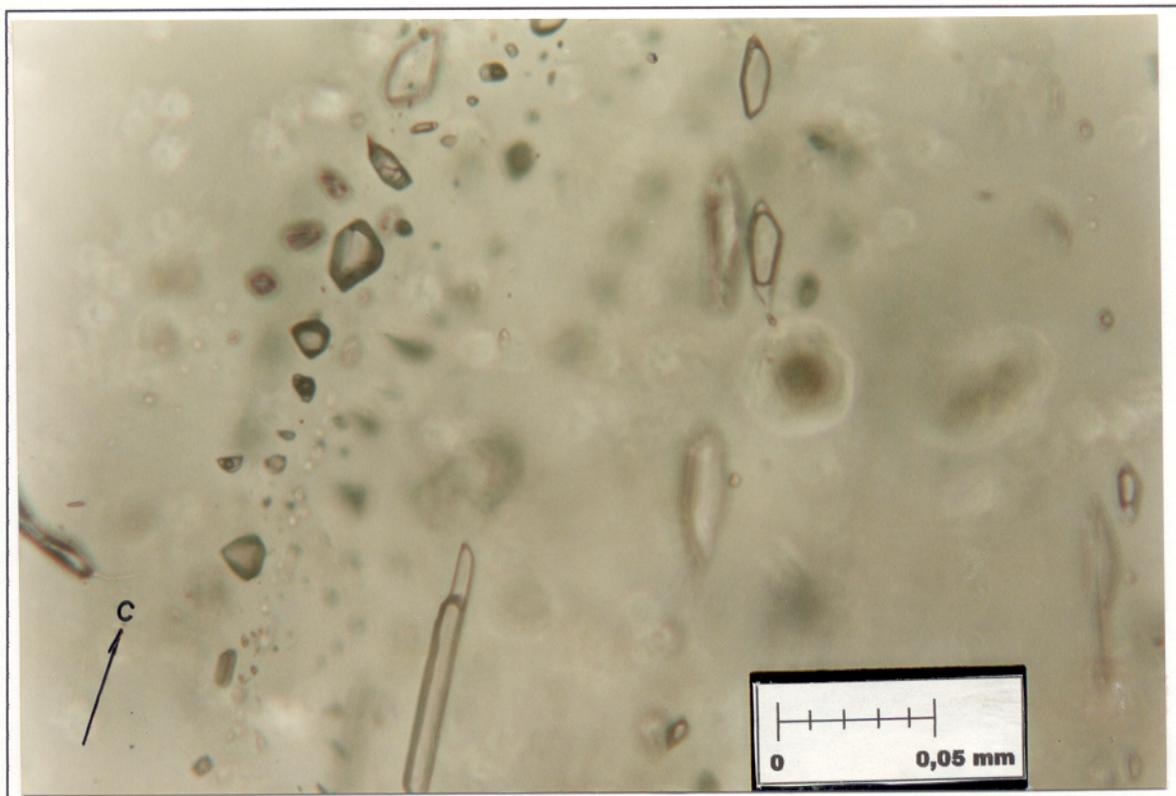


Figura 26 - Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas e bifásicas dispostas ao longo do eixo c do cristal, apresentando diversas formas, destacando a do cristal negativo e alongada na ametista do Alto Bonito-PA (nicóis paralelos, 40x).

Foram identificadas ainda, inclusões bifásicas próximas a fissuras cicatrizadas, algumas com feições de escape de fluidos, caracterizando serem secundárias ou pseudosecundárias. Estas inclusões foram descartadas para este estudo.

4.7.1 - Resultados microtermométricos

No decorrer dos estudos microtermométricos, não observou-se a formação de hidratos de sais através de resfriamentos sucessivos. Para a identificação da fase carbônica, usou-se o resfriamento até $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$, congelando as inclusões. Durante o aquecimento gradual, não observou-se mudança de fase para temperaturas na faixa de $-56,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, que é a temperatura de fusão do CO_2 . Na sequência, as inclusões apresentaram um aspecto granulado, semelhante a “casca de laranja”,

sugerindo o início da fusão de gelo à temperaturas que variaram entre $-51,4$ e $-49,3$ °C. Antes da fusão total dos cristais de gelo, efetuou-se novamente um lento resfriamento, fazendo com que estes cristais voltassem a crescer até a temperatura de -80 °C. Novamente durante o aquecimento, a primeira fusão dos sólidos aconteceu entre $-51,4$ e $-49,3$ °C, confirmando a temperatura do ponto eutético, cujo os valores são muito próximos das temperaturas eutéticas dos sistemas e $\text{H}_2\text{O-MgCl}_2\text{-CaCl}_2$ e $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2$ onde os pontos eutéticos determinados são respectivamente $-52,2$ e $-49,5$ °C (SHEPHERD et al. 1985) (Tabela 3).

Através da temperatura de fusão de gelo (Tfg) foi possível distinguir duas famílias de inclusões. A primeira (AB-1), formada por inclusões monofásicas, de formas irregulares, subarredondadas a arredondadas, apresentando Tfg variando entre $-3,3$ e $-1,2$ °C e, salinidade equivalente entre $5,41$ e $2,07\%$ em peso de NaCl. A segunda (AB-2), formada exclusivamente por IF bifásicas (l+g) com formas diversas, desde alongadas, subarredondadas, arredondadas e cristais negativos, mostram Tfg na faixa de $-19,6$ a $-14,3$ °C, com salinidades equivalentes entre $22,10$ e $18,04\%$ em peso de NaCl (Figura 27).

Durante o aquecimento, foram medidas as temperaturas de homogeneização (Th) nas inclusões fluidas bifásicas (l+g) primárias (AB-2). Observou-se que essas IF se homogeneizaram no estado líquido, em temperaturas que variam entre 200 e $390,4$ °C (Figura 28).

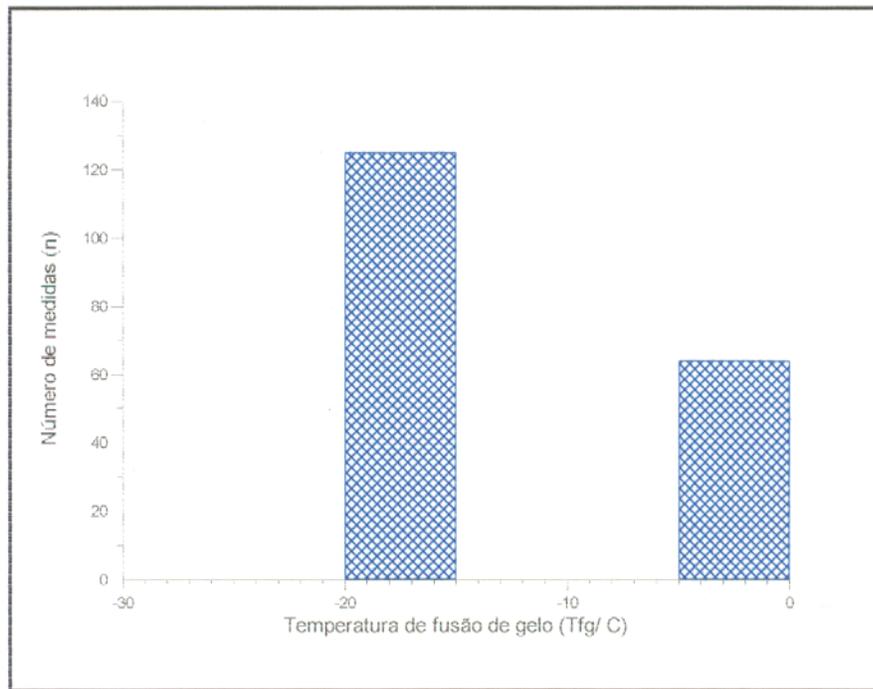


Figura 27 - Diagrama de frequência para temperaturas de fusão de gelo (Tfg), na ametista do Alto Bonito-PA.

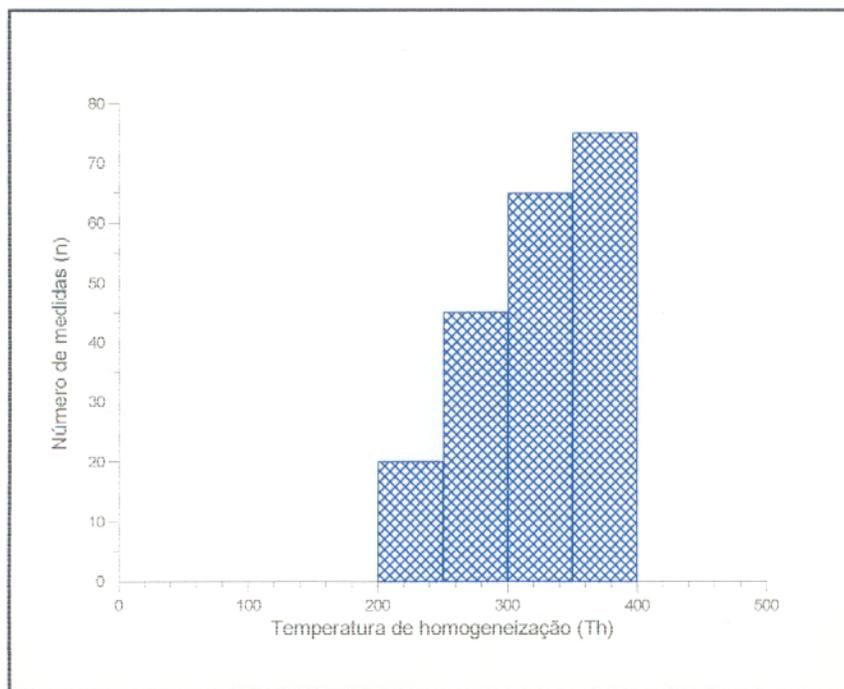


Figura 28 - Diagrama de frequência para temperaturas de homogeneização das inclusões fluidas bifásicas da ametista do Alto Bonito-PA.

A densidade dos fluidos estimada para as inclusões da família AB-2 é de 0,80 a 0,95 g/cm³ (Figura 29).

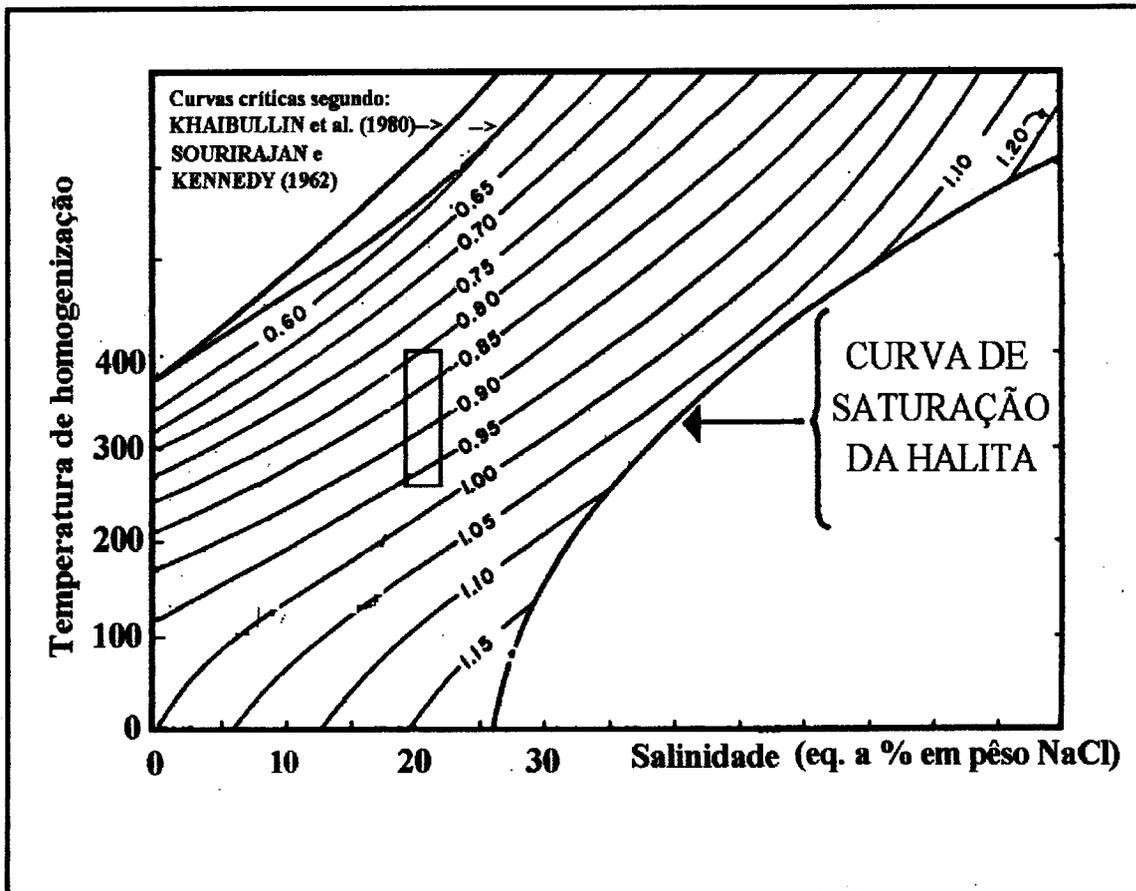


Figura 29 - Temperatura *versus* salinidade das inclusões fluidas bifásicas da ametista do Alto Bonito-PA, a partir das quais foram determinadas as densidades dos fluidos no diagrama de ROEDDER (1984).

Não foram realizadas determinações de pressão mínima de formação para essas inclusões fluidas pelo fato de, não existirem trabalhos específicos mostrando a posição das isócoras em diagrama de T vs P nos sistemas H₂O-MgCl₂-CaCl₂ e H₂O-CaCl₂.

Algumas inclusões fluidas bifásicas apresentaram temperaturas de fusão de gelo (T_{fg}) acima de 0 °C (+1,5 e + 2,0 °C) caracterizando metaestabilidades. Não foi observado a formação de clatratos durante o resfriamento até -150 °C.

4.8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA

As análises químicas para elementos maiores e elementos-traço da ametista do alto Bonito, estão representadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Composição química da ametista do Alto Bonito-PA.

ELEMENTOS	TEORES	ELEMENTOS	TEORES
SiO ₂	97,10	Pb	<20
Al ₂ O ₃	0,46	Zn	<200
Fe ₂ O ₃	0,075	Ba	<10
Na ₂ O	0,02	Co	<5
TiO ₂	0,0096	Sn	<5
P ₂ O ₅	<10	Mn	<10
K ₂ O	<0,01	Sr	<50
CaO	<0,01	Zr	<10
MgO	<0,01	Y	<10
Perda ao fogo	0,17	Sc	<5
V	88	As	<1
Be	6	Se	<1
F	163	Hg	<50

Os resultados mostram que a composição química desta ametista, como era de se esperar, é quase exclusivamente de SiO₂, com teores de 97,10%. Além de SiO₂, outros óxidos, como Al₂O₃ (0,46%), Fe₂O₃ (0,075%), TiO₂ (0,0096%) e, os elementos-traço, F (163ppm), V (88ppm) e Be (6ppm) também foram encontrados.

Comparando-se esses resultados, com aqueles conseguidos por BLANKENBURG (1994), para variedades coloridas de quartzo, entre elas a ametista, na Tabela 5, nota-se que, os teores de Al e Fe são relativamente elevados na ametista do Alto Bonito, enquanto que Ti, F e Be ocorrem em quantidades similares.

DEER et al. (1996), apresenta uma única análise de ametista com teores de Fe₂O₃ de 216 ppm e, Al₂O₃ de 4ppm, esse último bastante inferior ao obtido tanto na ametista de Pau D'Arco

como na do Alto Bonito. Os óxidos e elementos-traço presentes nesta ametista, provavelmente sejam devidos a inclusões minerais e/ou inclusões fluidas.

4.9 - GÊNESE

A ametista do Alto Bonito, ocorre em forma de veios e geodos, preenchendo as fraturas e fissuras dos quartzitos da Sequência Tipo Salobo MM1, com idade Proterozóica Inferior, indicativo de origem hidrotermal. Os estudos microtermométricos confirmam os processos hidrotermais, mostrando que os fluidos que cristalizaram esta ametista, possuíam salinidades equivalentes de 2,07 a 22,10% em peso de NaCl, sendo compostos de $H_2O-MgCl_2-CaCl_2$ e/ou $H_2O-CaCl_2$ determinados pelas temperaturas do ponto eutético de $-51,4$ e $-49,5$ °C (Tabela 1), com T_h entre $86,9$ e $390,4$ °C. Estas diferenças, sugerem que no início da cristalização a temperatura dos fluidos era de $390,4$ °C e, as soluções iniciais, provavelmente, eram de origem magmática. Em fases mais tardias, pode ter havido uma abertura do sistema, ocorrendo uma mistura com soluções não magmáticas, fazendo com que a temperatura de cristalização diminuísse gradativamente, além da dissolução dos sais, provocando uma queda na salinidade dos fluidos. Em fases finais de cristalização, pode ter havido uma contribuição de águas meteóricas no sistema, evidenciadas pela temperatura de fusão de gelo de $0^\circ C$.

Os processos hidrotermais que deram origem a esta ametista, provavelmente são iguais aqueles da ametista de Pau D'Arco, evidenciados pelos estudos microtermométricos e, também, pelos petrográficos, que mostram cristais com feições de recristalização e deformação, como fissuras, cristais em crescimento paralelos, zoneamento na cor, ponto tríplice e extinção ondulante.

5 - A AMETISTA DO ALTO URUGUAI-RS.

5.1 - ASPECTOS GERAIS

A ametista do Alto Uruguai, é encontrada em geodos, onde desenvolvem-se cristais de diferentes tonalidades, desde a malva pálida até a violeta escura (Figura 30).



Figura 30 - Geodo com ametista da região do Alto Uruguai, município de Ametista do Sul-RS.

Estes geodos, quando retirados da rocha encaixante, passam por um processo de seleção, que segundo os próprios garimpeiros da região, pelo formato e pelo tipo de “casca” do geodo (também chamado de tatu) pode-se saber se existe ametista adequada à lapidação ou não.

Outra maneira muito usada, é a abertura de orifícios nos geodos (Figura 31), onde é introduzida uma pequena lâmpada ligada a uma bateria de automóvel que, iluminando o interior, permite observar a qualidade dos cristais. Após esse exame, é que se decide se o geodo vai ser aberto para a lapidação ou será cortado em diferentes formas para a comercialização em feiras e lojas de artesanato mineral.



Figura 31 - Geodo com ametista. Mede cerca de 4 m de altura. Notar os orifícios por onde os garimpeiros analisam a qualidade dos cristais.

Os cristais de ametista crescem perpendicularmente às paredes dos geodos e assim, apresentam uma só terminação, representada por dois romboedros combinados, descrevendo uma pirâmide. O prisma hexagonal é, geralmente, pouco desenvolvido. Os cristais variam de milimétricos a centimétricos. As irregularidades na distribuição na cor são muito comuns, sendo raras as pedras de cor adequada para a lapidação. Entre os minerais que ocorrem associados à ametista, encontra-se o cristal de rocha, quartzo leitoso, calcita, zeólitas, ágata, e mais raramente gipso (variedade selenita), quartzo rosa e barita. Destes, a calcita é o mais comum, como cristais euédricos, destacando-se os romboédricos, o prismático e também o trapezoédrico (“dente-de-cão”) (Figuras 32 e 33).



Figura 32 - Segmento de um geodo de ametista com sobreposições de cristais trapezoédricos de calcita (“dente-de-cão”) (Coleção particular do Prof. Marcondes Lima da Costa).

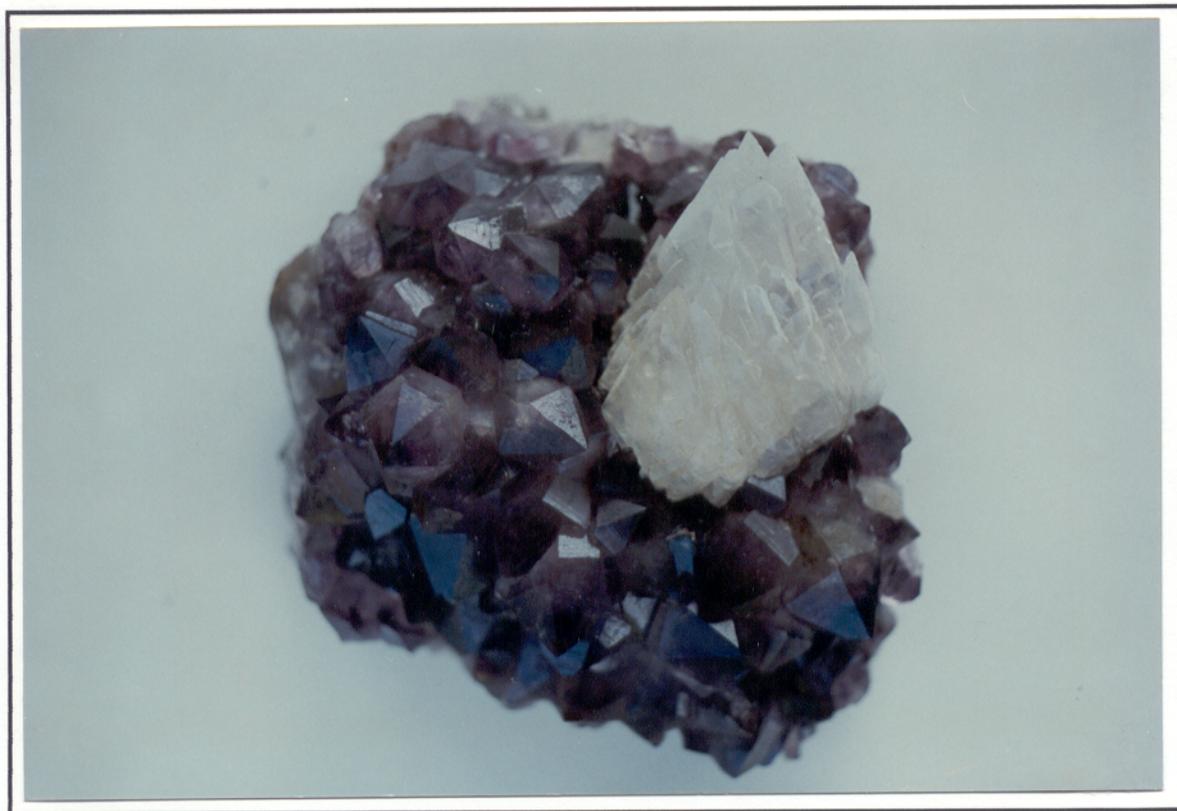


Figura 33 - Geodo de ametista com cristais de calcita (coleção particular do Prof. Marcondes Lima da Costa).

As dimensões variam de milimétricas a centimétricas. A calcita também é encontrada em agregados microcristalinos com estruturas concêntricas ou recobrando pequenos cristais de quartzo, mais raramente é encontrada como cristais lenticulares em agregados com forma de roseta. As cores são laranja, branco e hialino.

A selenita ocorre em poucos garimpos de ametista da região. Os cristais são euédricos, transparentes e sem inclusões macroscópicas.

A barita é rara e, também só ocorre em alguns garimpos da região do Alto Uruguai. Forma agregados mineralógicos com cristais centimétricos incolores ou esbranquiçados, geralmente translúcidos com hábito tabular a lamelar.

O quartzo róseo, ocorre restritamente como cristais euédricos frequentemente biterminados. O tamanho destes cristais raramente atinge 2 a 3 centímetros de comprimento formando, na maioria das vezes, agregados paralelos. A tonalidade rosa é bastante intensa, por vezes violácea, com distribuição heterogênea.

5.2 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO

Os principais depósitos de ametista na região do Alto Uruguai, localizam-se nos municípios de Planalto, Iraí, Frederico Westphalen e Ametista do Sul (Figura 34). São de fácil acesso, distando cerca de 450 km à NW de Porto Alegre, servidos por rodovias pavimentadas e acesso aos garimpos em rodovias de terra.

5.3 - GEOLOGIA DO DEPÓSITO

A ametista do Alto Uruguai, Estado do Rio Grande do Sul, é encontrada em geodos nos basaltos da Formação Serra Geral, da bacia do Paraná. Esta Formação, é constituída, tanto por rochas basálticas quanto por ácidas (riodacitos a riolitos, riolitos e basaltos a andesitos riolíticos), sugerindo então que, as rochas mais básicas situem-se na base a as mais ácidas no topo dos derrames (MINIOLI et al., 1971 e SCHMITT et al. 1991).

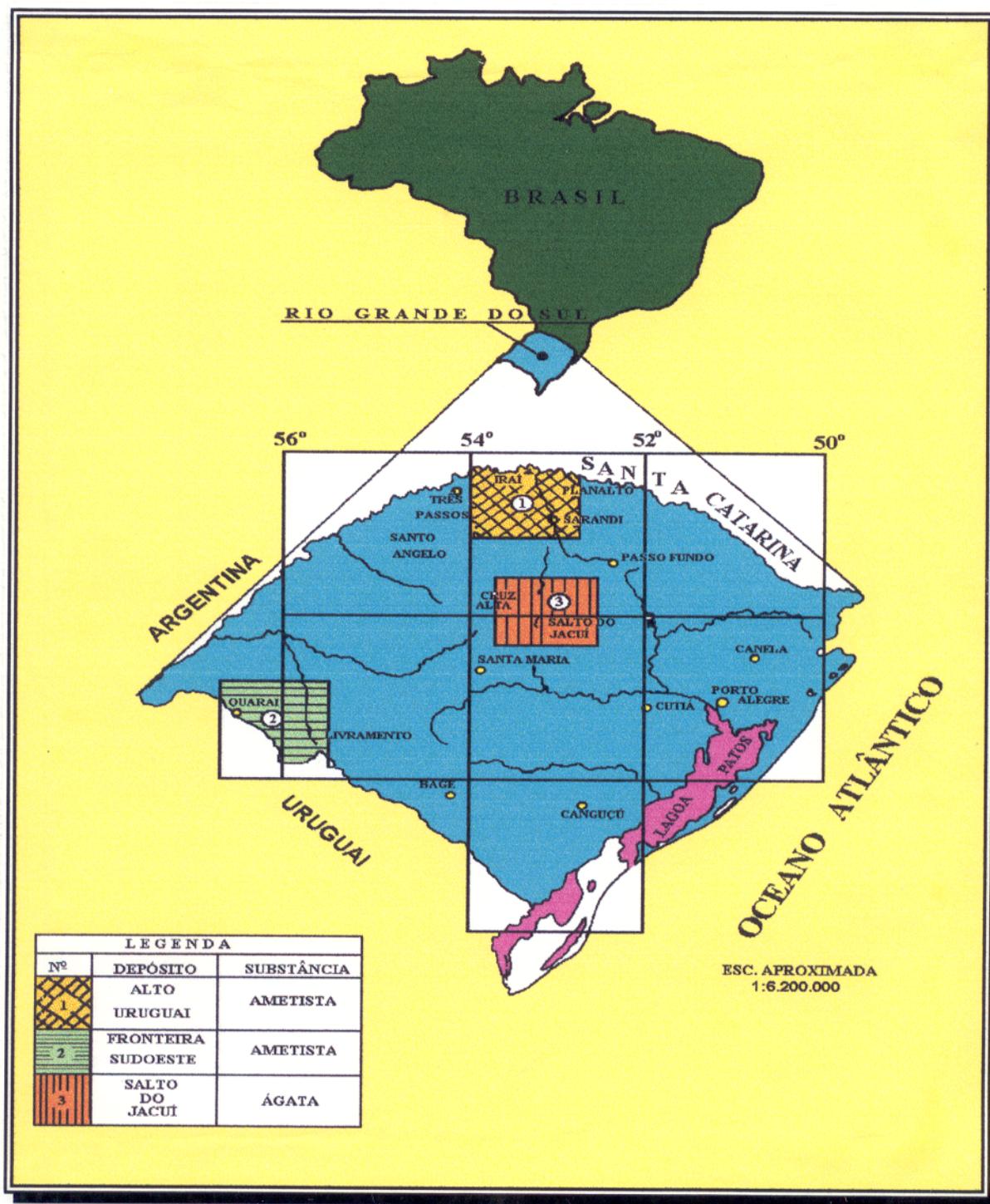


Figura 34 -Mapa de localização da área de ocorrência de ametista no Rio Grande do Sul, destacando-se a da região do Alto Uruguai (modificado de SCHMITT et al, 1991).

As áreas de ocorrência de ametista são bastante acidentadas nessa região, variando em altitude de 240 a 600 metros, formando morros com vertentes bastante íngremes (Figura 35). Predominam litologicamente, basaltos da Formação Serra Geral, intercalados com os arenitos metamorfisados da Formação Botucatu (Figura 36).



Figura 35 - Aspecto do relevo onde são explotados os geodos de ametista. Notar ao fundo rejeito da jazida.

Nas áreas de ocorrência de ametista, foram identificados por SZUBERT et al. (1978), sete derrames basálticos a partir dos rios da Várzea e Mel. Os derrames estão horizontalizados, com grande continuidade lateral e podem ser identificados facilmente em campo ou em fotografias aéreas na escala de 1:60.000

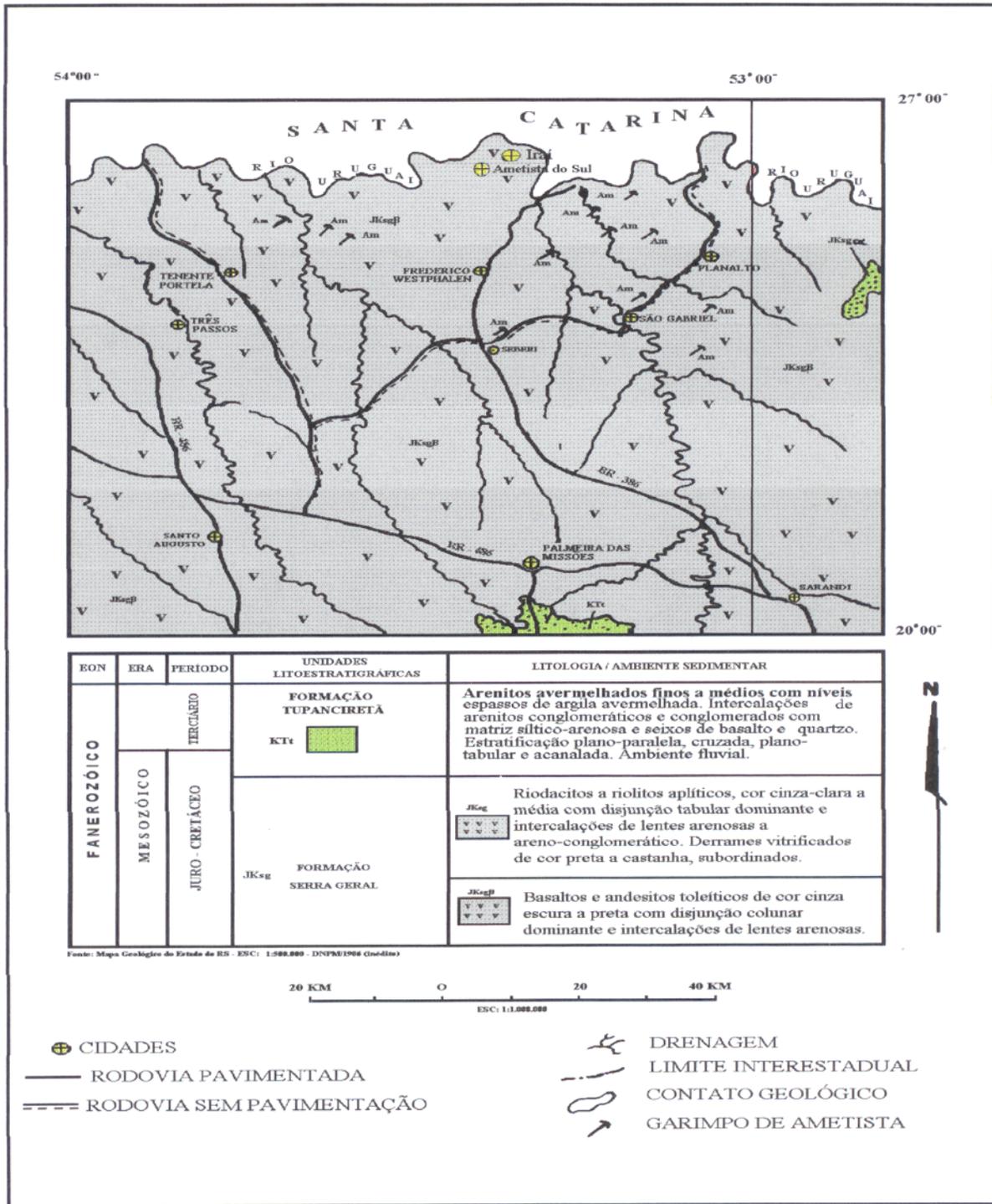


Figura 36 - Mapa geológico regional do Alto Uruguai-RS. (modificado de SCHMITT et al. (1991).

Intercalados entre os derrames ocorrem arenitos intertrápicos, metamorfisados e fortemente silicificados. Por vezes estruturas primárias como estratificação cruzada ou planar encontram-se preservadas (SCHMITT et al. 1991). Estes mesmos autores, observaram em vários jazimentos que, o derrame mineralizado apresenta características estruturais, do topo para a base, da seguinte forma (Figura 37):

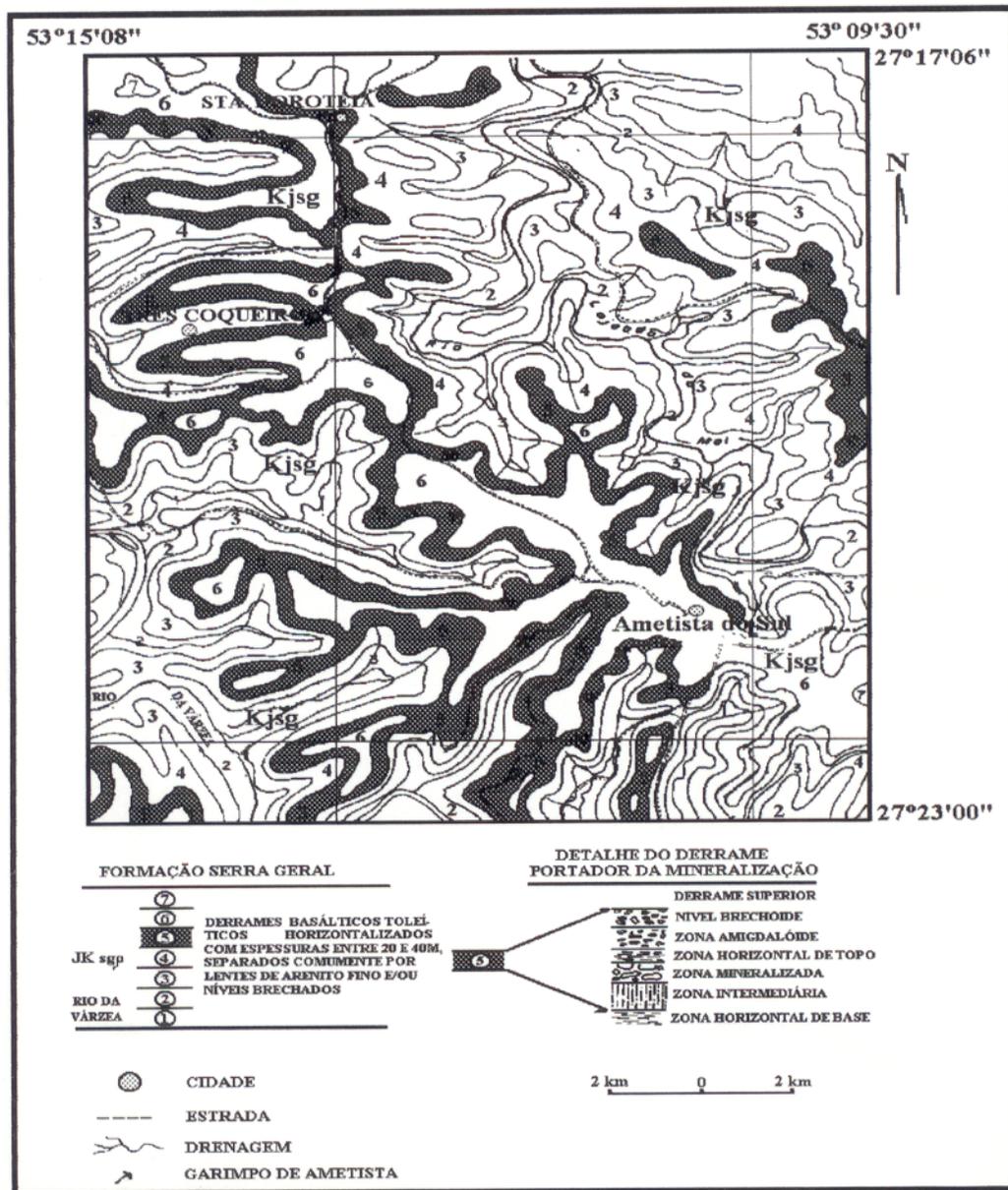


Figura 37 - Mapa geológico da região de Ametista do Sul no Alto Uruguai-RS (modificado de: SZUBERT et al. (1978) (modificado).

- 1) nível brechóide
- 2) zona amigdalóide
- 3) zona horizontal de topo
- 4) zona mineralizada
- 5) zona intermediária
- 6) zona horizontal de base

- Nível brechóide

Este nível separa o derrame mineralizado e o derrame sobrejacente. Apresenta espessura de 3 a 4 metros, às vezes até 8 metros. Constitui-se de fragmentos angulosos de basalto amigdalóide, imersos em uma matriz de granulação fina e cor avermelhada, formando um aglomerado fortemente silicificado.

A classificação da rocha que compõe este nível é dificultada pela falta de estudos petrográficos que identifiquem a matriz como um arenito silicificado ou como um produto de vulcanismo mais ácido que englobariam os fragmentos durante sua ascensão ou extravasamento (BOSSI & CAGGIANO (1974).

- Zona amigdalóide

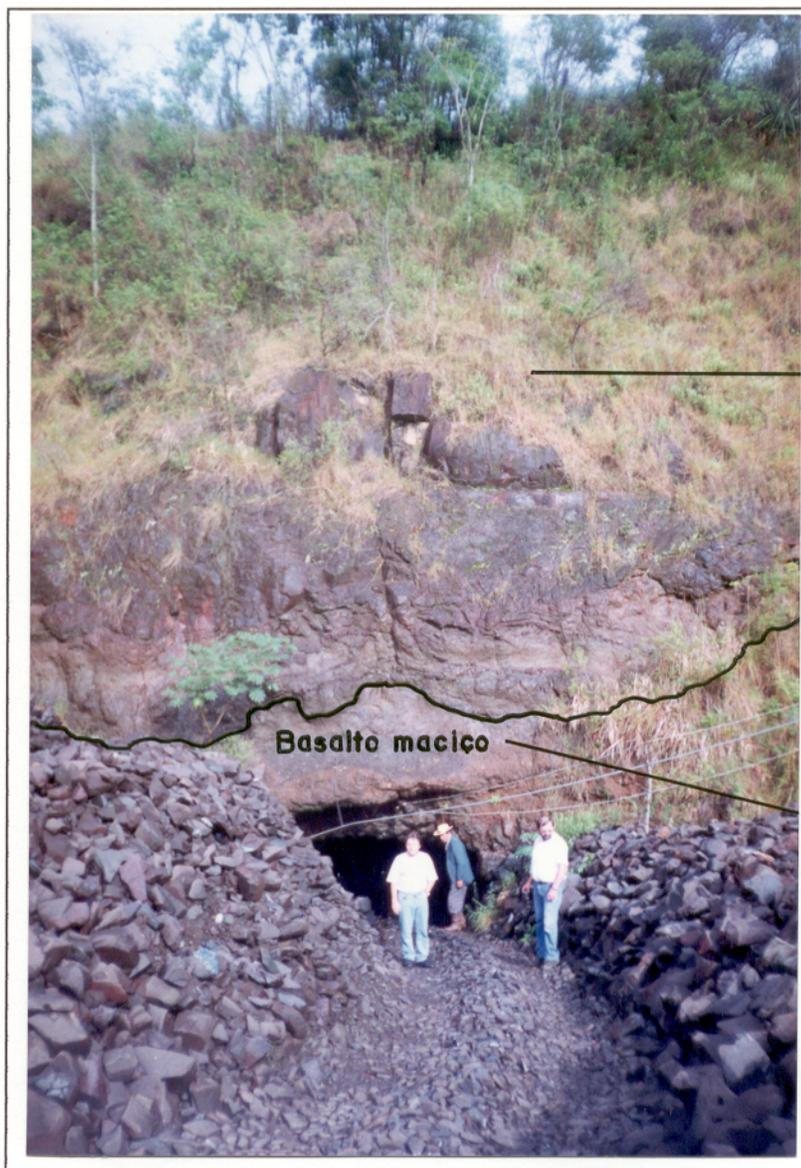
Esta zona ocorre abaixo do nível brechóide, com espessuras médias de 3 metros. As vesículas e amígdalas (milimétricas a centimétricas) são preenchidas por celadonita de coloração esverdeada, quartzo incolor e calcedônia (JUCHEM et al., 1987 e SCHMITT et al., 1991).

- Zona Horizontal de Topo

Na linguagem dos garimpeiros, esta zona basáltica é chamada de cascalho. Possui cerca de 1 (um) metro de espessura, caracteriza-se por apresentar fraturamento horizontal, podendo apresentar por vezes, pequenas vesículas.

- Nível Mineralizado

A mineralização de ametista, está contida em uma zona maciça com espessuras de 2 a 3 metros que é caracterizada por basaltos de coloração cinza-escuro a esverdeado e textura holocristalina (Figura 38).



--> Nível brechóide,
constituído de
fragmentos
angulosos de
basalto
amigdalóide

---> Zona
mineralizada
com geodos
de ametista

Figura 38 - Entrada de uma mina em basalto maciço, mineralizado em ametista, onde são encontrados os geodos e, recoberto por um nível brechóide constituído de fragmentos angulosos e basaltos amigdalóides.

Por vezes ocorre vesículas preenchidas por celadonita. Os jazimentos de ametista apresentam-se na forma de geodos contendo ametista, quartzo hialino às vezes leitoso, calcita e mais raramente gipso.

- Zona Intermediária e Zona Horizontal de Base

De acordo com alguns autores, entre eles (SZUBERT et al. 1978), a Zona Intermediária está representada por um fraturamento vertical e, abaixo desta, a Zona Horizontal de Base, está representada por rocha de granulação fina com um fraturamento horizontal bem definido.

5.4 - PROPRIEDADES GEMOLÓGICAS

A ametista do Alto Uruguai, tendo se desenvolvida no interior de geodos, possui poucas fissuras, com cristais bem formados, dando um alto índice de aproveitamento na lapidação (40%). Por outro lado, são raros os cristais com cor “extra”, porém a grande maioria de pedras de tonalidade de cores inferiores são tratadas à 450 °C e transformadas em “topázio Rio Grande” de cor amarelo citrino que tem boa aceitação no mercado.

Outra forma de comercializar cristais com inclusões minerais abundantes e tonalidades de cor fraca, é em forma de geodos cortados ou em pedaços, que são vendidos para turistas e colecionadores.

Quando se consegue pedras com cor “extra” estas atingem tonalidade 4 e grau de beleza “S” na escala de SUWA (1994) (Tabela 4).

5.5 - MICROTERTURAS

Os estudos realizados em microscópio petrográfico em lâminas delgadas, mostram que a ametista do Alto Uruguai, possui raras fissuras secas e cicatrizadas. Próximos a essas fissuras, são visíveis vários cristais de quartzo em crescimento paralelo, com as faces bem definidas e contato retilíneo predominante (Figura 39)

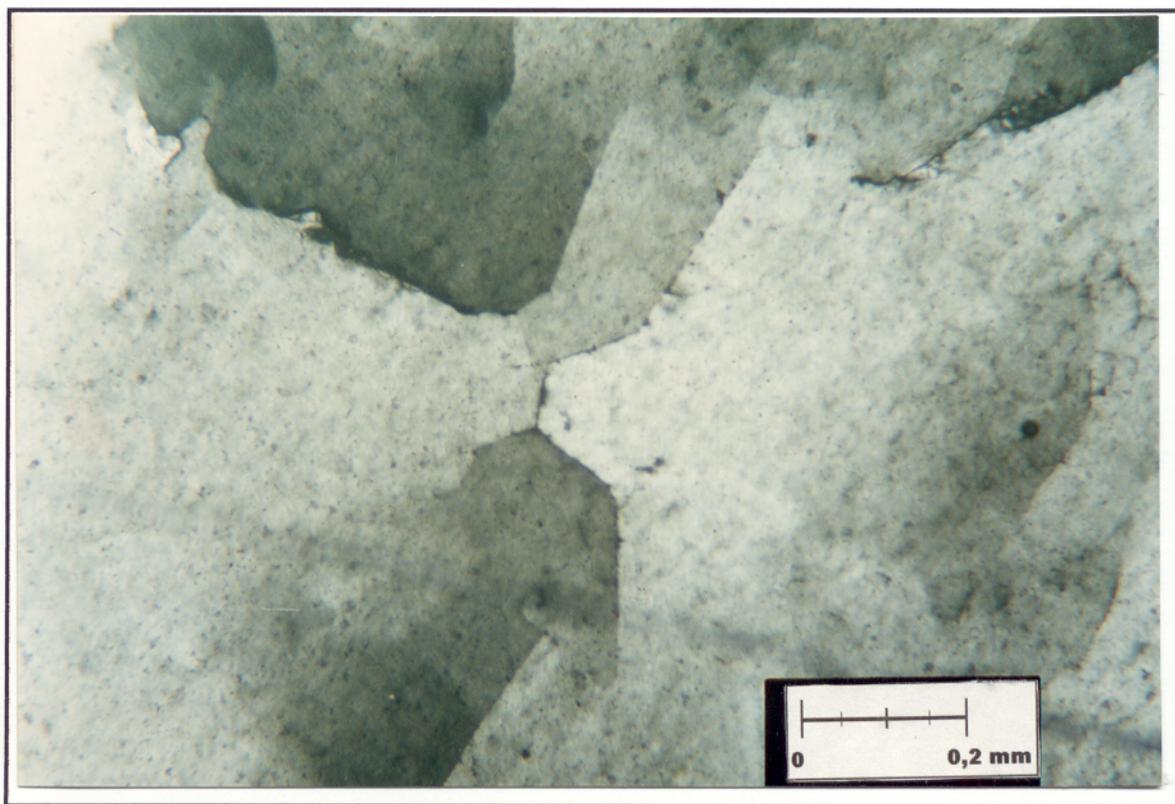


Figura 39 - Aspecto microtextural da ametista do Alto Uruguai-RS, com vários cristais em crescimento paralelo, contato retilíneo predominante (nicóis cruzados, 25x).

5.6 - INCLUSÕES MINERALÓGICAS

Pela microscopia e, também pelas análises de difração de raios-X, as inclusões determinadas são goethita, lepidocrocita, calcita, além de opacos não qualificáveis.

A goethita e a lepidocrocita, ocorrem em forma de agulhas, por vezes formando leques, outras em pequenos cristais isolados. Em lâmina delgada são muito parecidas podendo ser confundidas, sendo identificadas pelo pleocroísmo forte de cor vermelho-alaranjado, contrastando com o pleocroísmo não tão forte da goethita de cor amarelo-alaranjado e, confirmadas pela difração de raios-X. A calcita é uma inclusão comum nesta ametista e, ocorre como pequenos cristais, bem desenvolvidos (Figuras 40 a 43).



Figura 40 - Fotomicrografia de pequenos cristais de goethita identificados através das propriedades ópticas e difração de raios-X, nas ametistas do Alto Uruguai-RS (nicóis cruzados, 25x).

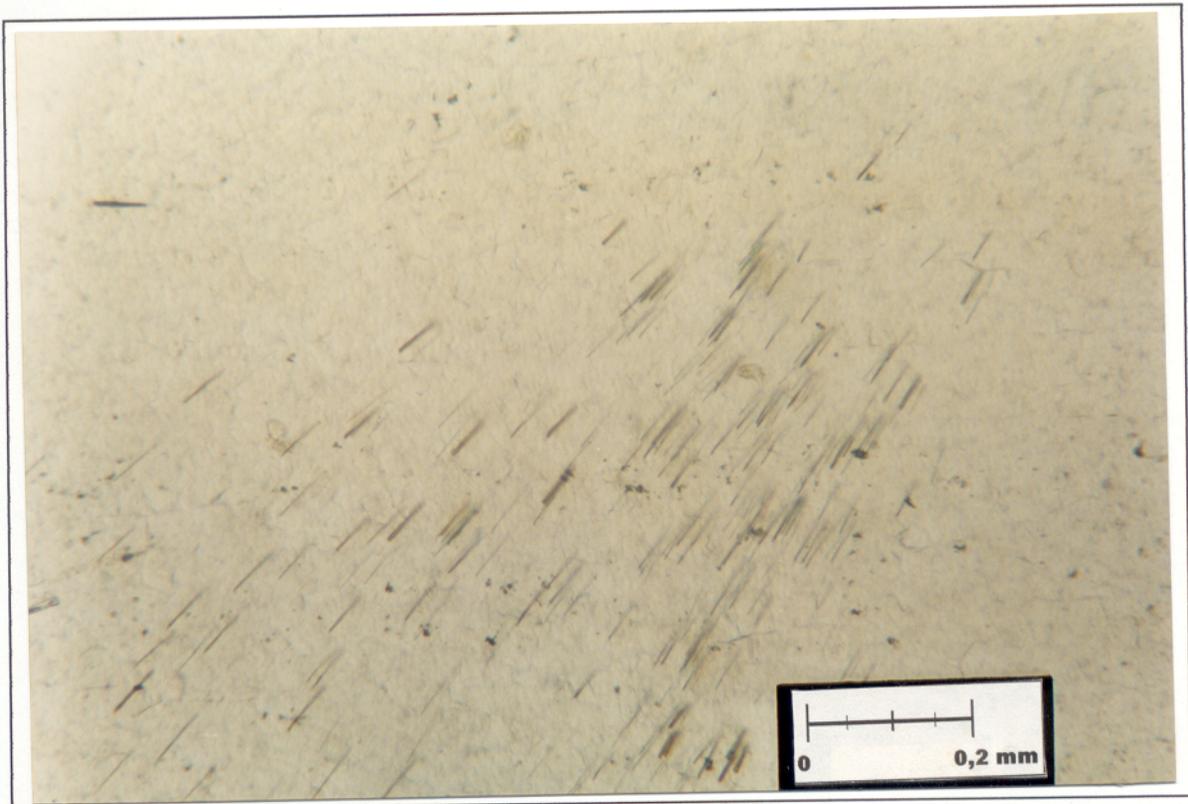


Figura 41- Fotomicrografia de lepidocrocita, identificadas através das propriedades ópticas e difração de raios-X, em forma de finas agulhas inclusas na ametista do Alto Uruguai-RS (nicóis cruzados, 25x).

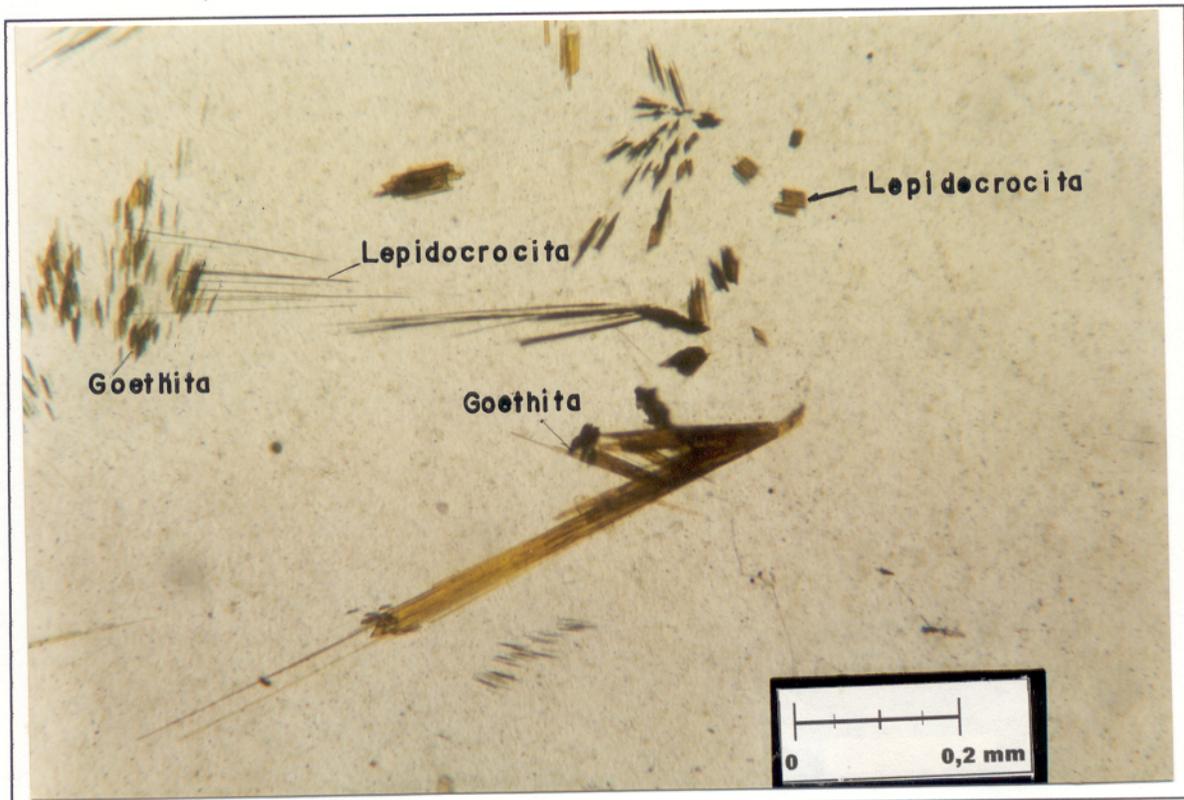


Figura 42- Fotomicrografia de cristais de calcita e goethita, identificados através de suas propriedades ópticas e, difração de raios-X, na ametista do Alto Uruguai-RS (nicóis cruzados, 25x).

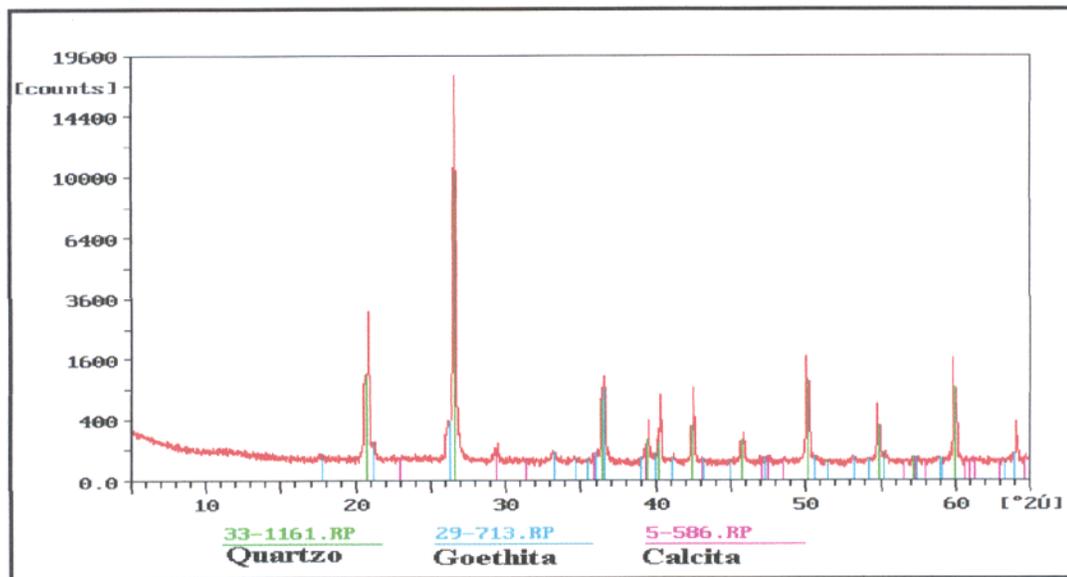


Figura 43 - Difratoograma de raios-X da ametista do Alto Uruguai-RS, onde se observa os picos do quartzo, goethita e calcita.

Os minerais opacos, possivelmente a hematita, são raros e ocorrem concentrados nos cristais de ametista.

5.7 - ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS

A ametista do Alto Uruguai é rica em inclusões fluidas monofásicas, apesar da presença significativa de inclusões fluidas bifásicas do tipo líquido + gás (l+g).

- Inclusões fluidas monofásicas

Elas são predominantes nos cristais. São inclusões aquosas, claras, de fase líquida, algumas escuras de fase gasosa com dimensões entre 5 e 50 μ m. Geralmente estão dispostas ao longo do eixo c do cristal e, por vezes, inclinadas a este, sugerindo estarem nos planos de crescimento das faces dos mesmos (Figura 44).

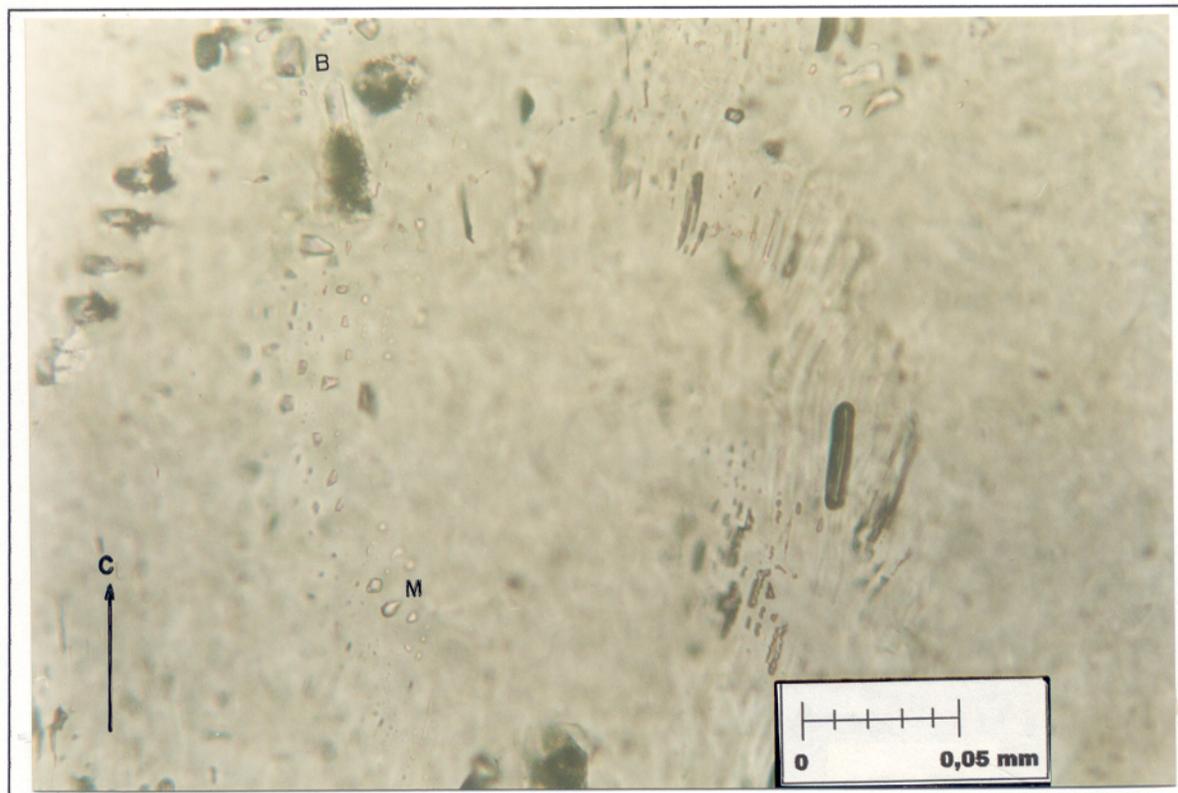


Figura 44 - Fotomicrografia de inclusões fluidas monofásicas (l) primárias, de diversas formas, dispostas ao longo do eixo *c* do cristal de ametista do Alto Uruguai-RS (nicóis paralelos, 40x).

- Inclusões fluidas bifásicas

Ocorrem com menos frequência, apresentando à temperatura ambiente duas fases: uma líquida e outra gososa (l+g). As inclusões estudadas, geralmente estão dispostas ao longo do eixo *c* dos cristais, acompanhando por vezes as IF monofásicas, com formas irregulares, arredondadas, subarredondadas e, raramente cristais negativos. Estas características sugerem serem de origem primárias. As razões V_v/V_t (volume da fase vapor/volume total) não ultrapassam a 0,05% da cavidade do cristal (Figuras 45 a 47).

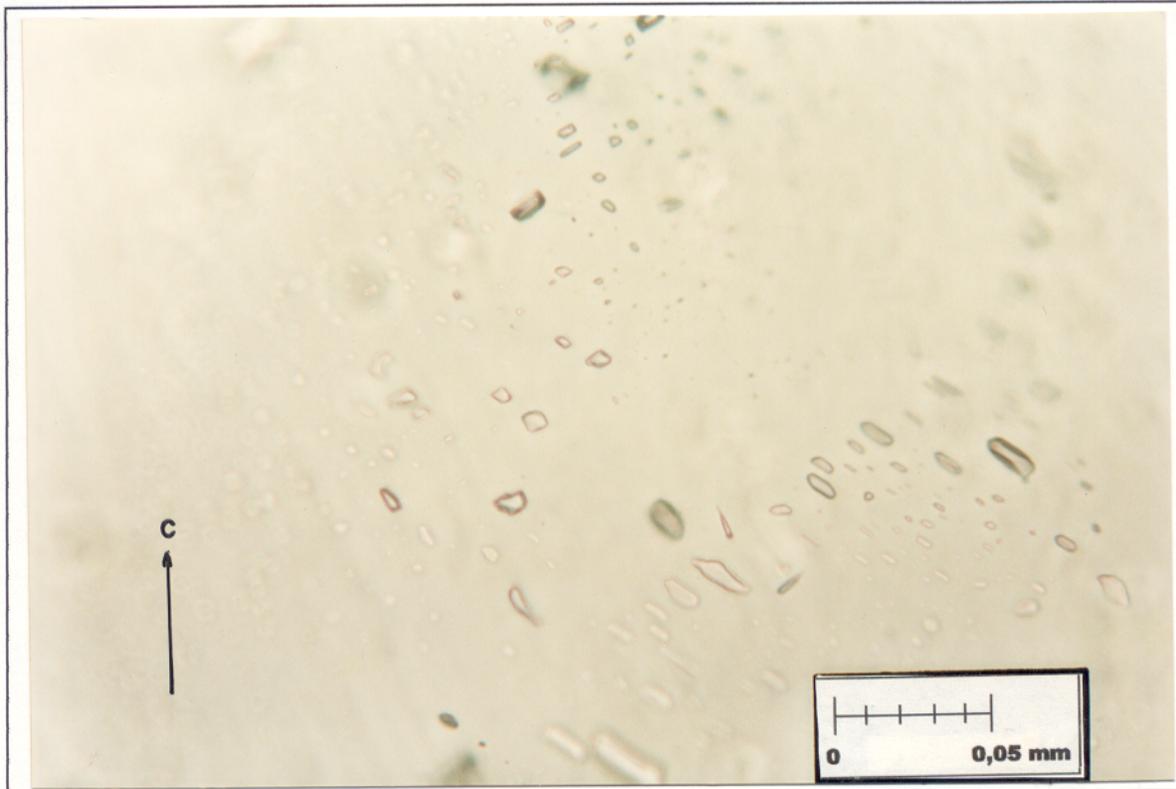


Figura 45 - Fotomicrografia da ametista do Alto Uruguai-RS, com inclusões fluidas bifásicas (l+g) primárias, dispostas ao longo do eixo *c* do cristal (nicóis paralelos, 40x).

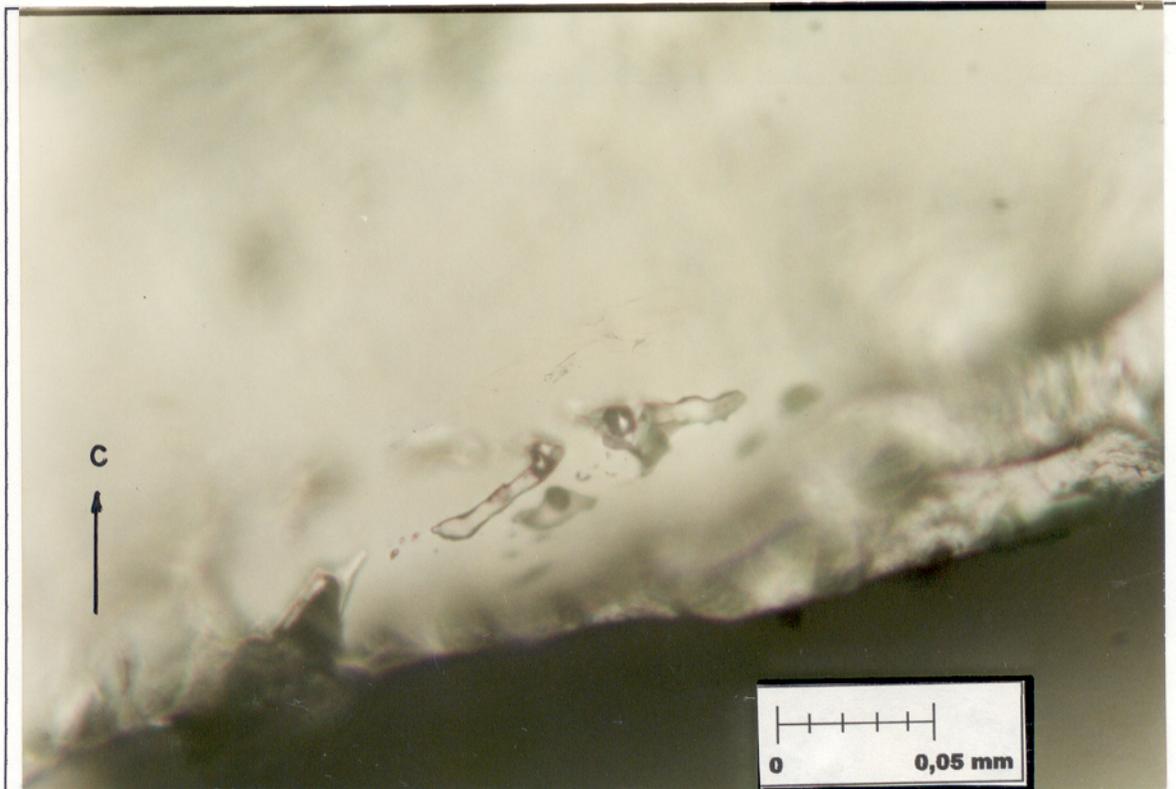


Figura 46- Fotomicrografia da ametista do Alto Uruguai-RS, com inclusões fluidas bifásicas primárias (l+g), com formas irregulares, inclinadas ao eixo *c* do cristal (nicóis paralelos, 40x).



Figura 47 - Fotomicrografia de inclusões fluidas bifásicas primárias (l+g), com formas subarredondadas e irregulares, dispostas ao longo do eixo *c* do cristal de ametista do Alto Uruguai-RS (nicóis paralelos, 40x).

5.7.1 - Resultados microtermométricos

Foram obtidas cerca de 250 medidas microtermétricas realizadas em inclusões fluidas monofásicas e bifásicas com características de serem primárias.

Para verificar a presença da fase carbônica, as IF foram resfriadas até -150°C , quando aconteceu o colapso da bolha de gás, indicando que houve o congelamento da fase aquosa. Durante o aquecimento gradual, não se observou nenhuma mudança de fase a $-56,6^{\circ}\text{C}$ que é a temperatura de fusão do CO_2 . Quando a temperatura de fusão atingiu $-36,4^{\circ}\text{C}$, um grupo de inclusões apresentaram um aspecto granular tipo “casca de laranja” mostrando que havia ocorrido a primeira fusão dos sólidos. Logo a seguir, um outro grupo de inclusões fluidas bifásicas e

monofásicas, apresentaram este aspecto para temperaturas de $-34,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, aproximadamente. Antes da fusão total do gelo, efetuou-se novo resfriamento até a temperatura de -65°C e, novamente, durante o aquecimento as temperaturas de $-36,4$ e $-34,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ foram confirmadas. Essa faixa de temperatura, coincide aproximadamente com as T_e dos sistemas $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{FeCl}_2$, $\text{H}_2\text{O}-\text{FeCl}_2$ e $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{MgCl}_2$, cujo valores são -37 e $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Borisenko, citado em SHEPHERD et al. 1985) (Tabela 3). Os íons de Cl^- , Na^+ e Fe^{++} ou Mg^{++} , encontrados nos fluidos podem ter sido fornecidos pelos basaltos que são as rochas encaixantes.

As temperaturas de fusão de gelo (Tfg), apresentaram valores bem distintos, sendo possível dividir as inclusões em duas famílias: a primeira (IR-1), formada por IF monofásicas, com temperaturas de fusão na faixa de $-1,6$ a $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, e salinidades equivalentes entre $2,74$ e $0,18\%$ em peso de NaCl. A segunda (IR-2), formada exclusivamente por IF bifásicas, com Tfg entre $-9,9$ e $-7,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ e, salinidades equivalentes na faixa de $13,83$ a $11,46\%$ em peso de NaCl (Figura 48).

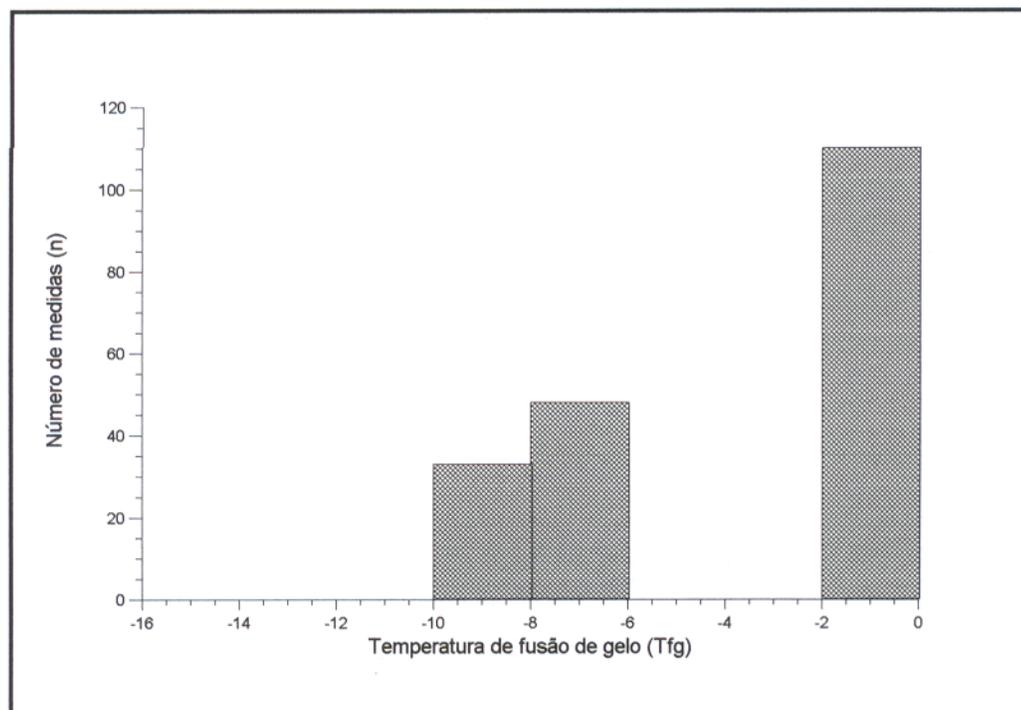


Figura 48 - Diagrama de frequência da temperatura de fusão de gelo (Tfg/ $^{\circ}\text{C}$), na ametista do Alto Uruguai-RS.

Durante o aquecimento, foram medidas as temperaturas de homogeneização (Th) nas inclusões fluidas bifásicas primárias, que ficaram na faixa de 181,4 a 239,5 °C (Figura 49).

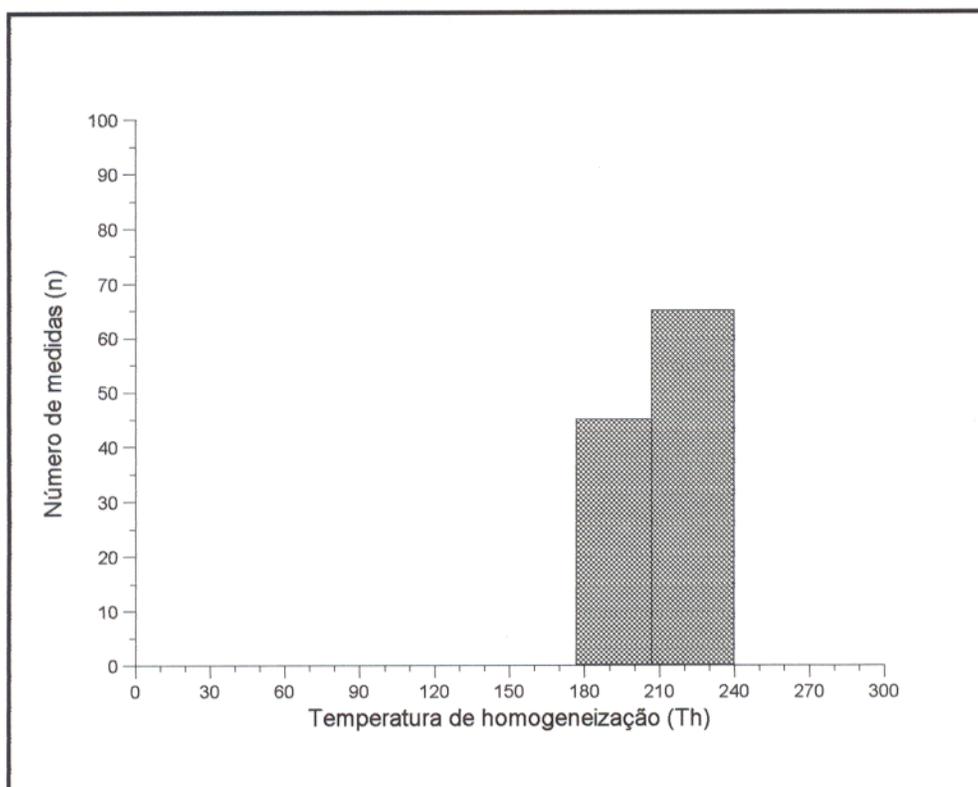


Figura 49 - Diagrama de frequência para temperaturas de homogeneização (Th/°C), nas inclusões fluidas da ametista do Alto Uruguai-RS.

Em certas IF monofásicas, observou-se a nucleação de uma bolha gasosa após o congelamento, que pode ocorrer devido ao fenômeno de dilatação da IF.

Algumas IF monofásicas, apresentaram temperaturas de fusão de gelo (Tfg) acima de 0°C (+0,5 e + 1,5 °C), caracterizando, possivelmente, uma situação de metaestabilidade. Isso pode acontecer, segundo ROEDDER (1984), sob certas condições, onde líquidos podem ser dilatados metaestavelmente, ocupando um volume maior (à uma densidade mais baixa) do que aqueles que

ocupariam em condições de equilíbrio. A pressão do líquido neste caso, é menor do que a pressão de vapor (hipotética) e é muitas vezes menores que zero (por ex: pressões negativas). Esta pressão metaestável irá persistir enquanto núcleos para uma fase vapor estiverem ausentes ou não se formarem.

A densidade dos fluidos estimada para as inclusões da família IR-2, foi de $0,95 \text{ g/cm}^3$ (Figura 50).

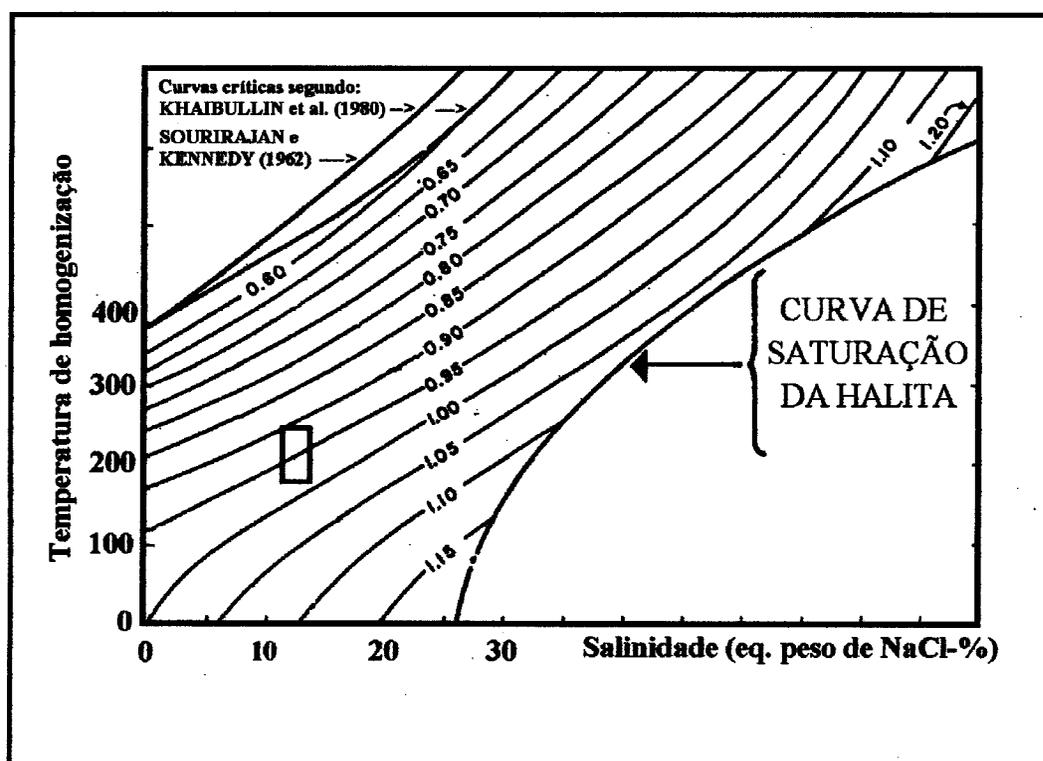


Figura 50 - Temperatura *versus* salinidade para as inclusões fluidas bifásicas da ametista do Alto Uruguai-RS, para determinação das densidades dos fluidos (modificado de ROEDDER (1984).

5.8 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Os resultados das análises químicas para os elementos maiores e elementos-traço da ametista do Alto Uruguai, estão representados na tabela 8.

Tabela 8 - Composição química da ametista do Alto Uruguai-RS.

ELEMENTOS	TEORES (%) e (ppm)	ELEMENTOS	TEORES (%) e (ppm)
SiO ₂	98,52	Co	<5
Al ₂ O ₃	0,46	Sn	<5
Fe ₂ O ₃	0,046	Sc	<50
Na ₂ O	0,02	Mn	<10
TiO ₂	0,0092	As	<1
P ₂ O ₅	<10	Sr	<50
K ₂ O	<0,01	Zr	<10
CaO	<0,01	Y	<10
MgO	<0,01	Be	<2
F	109	Ba	<10
V	48	Zn	<200
Cr	8	Se	<1
Pb	<20	Hg	<50

A ametista do Alto Uruguai, tem praticamente a mesma concentração de SiO₂ verificada nas ametistas de Pau D'Arco e Alto Bonito, da mesma forma Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e, os elementos-traço F, V e Cr (Tabelas 4 e 6). No entanto, comparando-se esses dados com aqueles apresentados por BLANKENBURG (1994) para variedades coloridas de quartzo, incluindo a ametista, na tabela 5, pode-se notar que Al e Ti na ametista do Alto Uruguai, apresentam teores relativamente elevados, enquanto que Fe e F ocorrem em quantidades semelhantes neste mineral.

5.9 - GÊNESE

O modo de ocorrência de ametista do Alto Uruguai, mostra que a sua formação está relacionada às atividades vulcânicas que ocorreram na região durante a formação da Serra Geral, sugerindo ser os processos hidrotermais responsáveis pela origem desta ametista. Esses processos, estariam ligados a fase final do vulcanismo, onde a geração dos geodos está associada a blocos de arenitos que teriam sido assimilados pelos derrames basálticos ainda em fusão. Desta forma, a água supercrítica liberada pela cristalização do basalto, dependendo da pressão, poderia dissolver o arenito, formando soluções aquosas com quantidades importantes de sílica. Essas soluções, com a queda da temperatura, formariam um depósito silicoso e, dependendo da velocidade de resfriamento, desenvolvem-se os cristais de ametista.

A origem hidrotermal é reforçada pelos resultados microtermométricos, mostrando que os fluidos iniciais que cristalizaram essa ametista, provavelmente eram de origem magmáticas, com salinidades equivalentes variando entre 0,18 e 13,83% em peso de NaCl. As temperaturas de início de cristalização deste mineral estavam na faixa de 181,4 a 240 °C, determinadas através das Th em IF bifásicas. Com a queda gradativa da temperatura do sistema, provocada provavelmente pela mistura de soluções não magmáticas, a temperatura poderia ter atingido até 100 °C em fase final de cristalização, evidenciadas pela presença predominante de IF monofásicas nos cristais, reforçada pela baixa salinidade e temperaturas de fusão de gelo na faixa de 0 °C a -1,6°C. As medidas de Te na faixa de -36,4 a -34,1 °C, determinaram que os fluidos eram compostos por H₂O-NaCl-FeCl₂, H₂O-FeCl₂ e H₂O-NaCl-MgCl₂, cujo valores estão muito próximos das temperaturas de ponto eutético determinadas de -37 e -35 °C (Borisenko, citado por SHEPHERD et al. 1985) (Tabela 1).

Como essa ametista se formou em geodos, os íons de Cl^- , Na^+ , Fe^{++} ou Mg^{++} encontrados nos fluidos, podem ter sido fornecidos pela própria rocha encaixante, neste caso, os basaltos.

Estes resultados são compatíveis com os processos hidrotermais em ambiente epitermal a mesotermal que possivelmente foram os processos responsáveis pela mineralização.

Possivelmente Al, Fe, Ti, V e F foram remobilizados da rocha encaixante, sendo assimilados pelas soluções mineralizantes, onde então, Fe formaria os centros de cor, gerando a cor lilás desta ametista.

Os cristais desta ametista apresentam poucas fissuras e ausência de deformações, sugerindo que tenham se desenvolvido em ambiente calmo, sem perturbações.

6 - CONCLUSÕES E COMPARAÇÕES

- As propriedades físicas das ametistas de Pau D'Arco, Alto Bonito e Alto Uruguai, são as mesmas do quartzo, no entanto, as tonalidades de cor variam de jazida para jazida. Enquanto as pedras classificadas como "extra" da ocorrência de Pau D'Arco-PA, atingem frequentemente a tonalidade de cor 7 e grau de beleza "S" na escala de SUWA (1994), a do Alto Bonito-PA, chega somente a 3 e as do Alto Uruguai-RS, embora raras, atingem até 4 na mesma escala de cor e beleza. Esta diferença de tonalidade de cor, provavelmente, está relacionada diretamente com o tempo de exposição dos cristais a algum tipo de radiação ionizante, como por exemplo, através da desintegração do ^{40}K presente nas argilas potássicas que, geralmente se alojam em veios de quartzo, como também as provocadas pelo U e Th durante e/ou após a cristalização do quartzo (ROSSMAN, 1994).

- Os estudos petrográficos, tanto a nível macroscópico, como microscópico, mostram que os cristais de ametista de Pau D'Arco e Alto Bonito, sofreram tensões cristalinas provocadas provavelmente, por eventos tectônicos e metamórficos posteriores as suas formações, gerando recristalização deste mineral. Essas tensões afetaram as ametistas causando zoneamento na cor, fissuras e fraturas, fazendo com que, a ametista de pau D'Arco tenha um aproveitamento de no máximo 10% e a do Alto Bonito até 30%, ao contrário das do Alto Uruguai-RS que, se desenvolveram em ambiente calmo, sem perturbações, com aproveitamento na lapidação de até 40%.

- Quanto as inclusões mineralógicas identificadas na ametista de Pau D'Arco, foram o rutilo, calcita e opacos (provavelmente a hematita), enquanto que na ametista do Alto Bonito, somente raros cristais de calcita e opacos (hematita ?) foram identificados. Estes minerais

presentes nas ametistas, podem ocorrer numa ampla faixa de temperatura e pressão, sendo comuns em vários tipos de rochas. Neste caso, a própria rocha encaixante poderia ter fornecido íons de Ti e Ca para a solução mineralizante e, estes, cristalizaram como inclusões nestas ametistas. Por outro lado, a ametista do Alto Uruguai, apresentou além da calcita e opacos (hematita?), a lepidocrocita e goethita. A presença da goethita e da lepidocrocita, pode ser explicada devido a quantidade de Fe disponível na rocha encaixante (no caso, os basaltos), aliados a presença de águas meteóricas (evidenciadas nas inclusões fluidas) em ambiente oxidante, cristalizando estes minerais como inclusões na ametista. A calcita, também, pode ocorrer em uma ampla faixa de T e P, podendo ser explicada pela presença abundante de Ca nos basaltos, juntamente com o oxigênio fornecido pela água, criaram condições para que este mineral cristalizasse como inclusão nesta ametista. Em uma fase mais tardia, com temperaturas mais baixas, as soluções restantes no sistema, precipitaram e cristalizaram cristais de calcita com hábitos e tamanhos diferentes, geralmente sobre os cristais de ametista, formando belas peças, muito procuradas pelos colecionadores e mineralogistas.

- Os estudos microtermométricos das jazidas de ametista de Pau D'Arco e do Alto Bonito, mostraram que os fluidos iniciais que foram responsáveis pelas mineralizações eram de salinidades baixas a moderadas (entre 2,07% e 23,18% em peso de NaCl), com temperaturas de cristalização na faixa de 120 até 383,1 °C, predominando na faixa de 293 a 383,1°C para a de Pau D'Arco e, de 200 a 390,4 °C, com predominância de 220 a 390,4 °C para a do Alto Bonito. Esses resultados são compatíveis com as condições de hidrotermalismo para a mineralização em condições hipotermiais a epitermais. Esses resultados mostram uma certa semelhança na composição dos fluidos que é de $H_2O-MgCl_2-CaCl_2$ e /ou $H_2O-NaCl-CaCl_2$ para a de Pau D'Arco

e de $\text{H}_2\text{O-MgCl}_2\text{-CaCl}_2$ e/ou $\text{H}_2\text{O-CaCl}_2$ para a do Alto Bonito, que foram determinadas pelas temperaturas dos pontos eutéticos dos sistemas. Por outro lado, as análises microtermométricas para a ametista do Alto Uruguai, apresentaram uma significativa diferença se, comparadas com as outras duas ocorrências estudadas. Os fluidos iniciais que cristalizaram esta ametista, eram de salinidade baixa (0,18% a 13,83% equivalente em peso de NaCl), com temperaturas de homogeneização na faixa de 181,4 a 239,5 °C, indicando condições mesotermiais para a sua formação. Em fases mais tardias, a Tfg ficou em torno de 0°C para IF monofásicas que são predominantes, indicando também, condições epitermais com temperaturas de cristalização provavelmente, em torno de 100 °C. Isso mostra que, os modos de ocorrências distintos das ametistas aqui estudadas, permitiram a separação em dois grandes grupos: hidrotermal em área de deformação e hidrotermal em área vulcânica, se espelhando claramente, nos seus aspectos relativos a inclusões mineralógicas e fluidas (Tabela 9)

Tabela 9 - Principais características dos fluidos das ametistas de Pau D'Arco, Alto Bonito e do Alto Uruguai

	Ametista de Pau D'Arco-PA.	Ametista do Alto Bonito-PA	Ametista do Alto Uruguai-RS
Temperatura do eutético (Te)	-52,4 e -52,1 °C	-51,4 e -49,3 °C	-36,4 e -34,1 °C
Composição dos fluidos	$\text{H}_2\text{O-MgCl}_2\text{-CaCl}_2$ $\text{H}_2\text{O-NaCl-CaCl}_2$	$\text{H}_2\text{O-CaCl}_2$ $\text{H}_2\text{O-MgCl}_2\text{-CaCl}_2$	$\text{H}_2\text{O-NaCl-FeCl}_2$ $\text{H}_2\text{O-NaCl-MgCl}_2$ $\text{H}_2\text{O-FeCl}_2$
Temperatura de fusão de gelo (Tfg)	-5,3 a -1,1 °C -15,9 e -10,0 °C -21,2 e -16,3 °C	-3,3 a -1,2 °C -19,6 a -14,3 °C	-0,1 a -1,6 °C -7,8 a -9,9 °C
Salinidade equivalente em peso de NaCl (%)	5,11 a 23,18 %	2,07 a 22,10 %	0,18 a 13,83%
Temperatura de homogeneização total	120 a 383,1 °C	200 a 390,4 °C	181,4 a 239,5 °C
Densidade	0,9 a 1,05 g/cm ³	0,80 a 1,0 g/cm ³	0,95 a 0,98 g/cm ³

- Estas ametistas, apesar de terem sido desenvolvidas em ambientes diferentes, mostram composição química semelhantes em termos de SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , divergindo, principalmente nos conteúdos de F, V, Co, e Cl (Tabela 10).

Tabela 10 - Comparações entre as composições químicas das ametistas de Pau D'Arco, Alto Bonito e Alto Uruguai.

ELEMENTOS (%) e (ppm)	AMETISTA DE PAU D'ARCO	AMETISTA DO ALTO BONITO	AMETISTA DO ALTO URUGUAI
SiO_2	98,60	97,10	98,52
Al_2O_3	0,46	0,46	0,46
Fe_2O_3	0,030	0,075	0,046
Na_2O	0,02	0,02	0,02
TiO_2	0,0094	0,0096	0,0092
P_2O_5	<10	<10	<10
K_2O	<0,01	<0,01	<0,01
CaO	<0,01	<0,01	<0,01
MgO	<0,01	<0,01	<0,01
Perda ao fogo	0,06	0,17	0,15
F	120 (ppm)	163 (ppm)	109 (ppm)
V	66	88	48
Co	29	<5	<5
Cl	22	**	**
Rb	10	**	**
Sr	9	<50	<50
Be	8	6	<2
Cr	6	**	8
Ga	6	**	**
Se	2	<1	<1
Zn	<200	<200	<200
Pb	<20	<20	<20
Sn	<5	<5	<5
Mn	<10	<10	<10
Zr	<10	<10	<10
Y	<10	<10	<10
Sc	<5	<5	<50
As	<1	<1	<1
Hg	<50	<50	<50

Legenda: ** = não analisado

- Quanto ao modo de ocorrência, a ametista de Pau D'Arco, ocorre em depósitos eluviais e coluviais, que foram formados devido a desagregação e transporte a curta distância de veios, provavelmente em rochas quartzíticas da Formação Couto Magalhães. A do Alto Bonito ocorre em depósitos primários em forma de veios encaixados em rochas quartzíticas da sequência Salobo MM1 e, ainda em depósitos eluviais formados pela desagregação dos veios. Enquanto que, as do Alto Uruguai, ocorrem em geodos nos basaltos da Formação Serra Geral da bacia do Paraná, que estão relacionados a atividades vulcânicas que atuaram na região.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANKERBURG, H-J. 1994 - **Quarzrohstoffe**. 2., überarbeitete Auflage. Ed. Deustcscher Verlag für Grunstoffindustrie Leipzig. Stuttgar. 296p.
- BOSSI, J. & CAGGIANO, W. 1974 - Contribuição a la Geologia de los Yacimientos de Ametista del Departamento de Artigas (Uruguay). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto alegre 1974. **Anais**. Porto Alegre, SBG v.4, p.51-60.
- CASSINI, C.T. & COSTA, M.L. 1994. A ametista de Pau D'Arco: Mineralogia, Quimismo e inclusões Fluidas. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DA AMAZÔNIA. 4., Belém, 1994. **Boletim de resumos expandidos**. Belém, SBG. p: 151-154.
- COLLYER, T.A., & MÁRTIRES, R.A.C. 1986 - O Depósito de Ametista do alto Bonito, Município de Marabá, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 34., Goiânia. **Anais**. p.2221-2228.
- COLLYER, T.A., MÁRTIRES, R.A.C.; MACHADO, J.I.L. 1988 - O Depósito de Ametista do Pau D'Arco. Município de Conceição do Araguaia, Pará. In: CONGR. BRAS. DE GEOLOGIA, 35, Belém, 1988. **Anais**. SBG. p.374-382.
- DAVIS, D.W.; OLWENSTEIN, T.K.; SPENCER, R. 1990. Melting behavior of fluid inclusions in Laboratory-grown halite crystal in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂ and NaCl-CaCl₂. **Geochim. Cosmochim. ACTA**, 54:591-601.
- DEER, W.A.; HOWER, R.A.; ZUSSMAN, J. 1966 - **Rock-Forming Mineral**. Ed. Longman Group Limited. New York. 528p.
- DEER, W.A.; HOWE, R.A.; ZUSSMAN, J. 1982 - **Rock-Forming Mineral**. 2 Ed. New York, Ed. Longman Group Limited. v.1. A Orthosilicates.

- DEER, W.A.; HOWE, R.A.; ZUSSMAN, J. 1992 - **An Introduction to the Rock-Forming Minerals**. 2 ed. Londres, Longman Scientific & technical. 696p.
- FUZIKAWA, K. 1985 - Inclusões fluidas: Métodos usuais de estudo e aplicações. **Boletim de Contribuições a Geologia e Petrologia**. Núcleo Minas Gerais. SBG-MG, p: 29-44.
- FUZIKAWA, K. & ALVES, J. V. 1995 - Interpretações sobre o comportamento e as mudanças de fase de uma inclusão aquo-carbônica durante a criometria. **REM**. 49(2): 123-126.
- HOLLISTER, L.S. and CRAWFORD, M.L. ed. 1981 - Short course in fluid inclusion, Applications to petrology. **Min. Assoc. of Canadá**, Toronto, 6:241-271.
- JUCHEM, P.L. HOFMEISTER, T.; BRUN, T.M.M. 1987 - **Ágata e Ametsita no Rio Grande do Sul**. In: **SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO DE GEOLOGIA**, 3, Curitiba, 1987. CNPq/PROPESP/UFRGS, 2:601-613.
- NASSAU, K. 1976 - A Origem da cor dos minerais e das gemas. **Gems & Gemology**. 22 (43/44): 16-57.
- POTY, B; LEROY, J; JACHIMOWICZ, L. 1976 - A new device for measuring temperatures under the microscope: the Chaixmeca microthermometry apparatus. **Bull. Soc. Franc. Mineral. Cristallograf.**, 99, 182-186.
- ROEDDER, E. & BODNAR, R.J. 1980 - Geologic pressure determinations from fluid inclusions studies. **Ann. Rev. Earth Planet. Sci.** 8. 263-301.

- ROEDDER, W.W. 1984 - **Fluid Inclusions**. Mineral Soc. Amer. 641p (Reviews in Mineralogy, 12).
- ROSSMAN, R.G. 1994 - **Colored Varieties of the Silica Mineral**. p. 433-467. Mineral Soc. Amer. (Reviews in Mineralogy, 29).
- SHEPHERD, T.J.; RANKIN, A.H.; ALDERTON, D.H.M. 1985 - **A practical guide to fluid inclusions studies**. Glasgow-London, Blakie, 237 p.
- SCHMITT, J.C.; CAMATTI, C.; BARCELLOS, R.C. 1991 - Depósito de ametista e ágata no estado do Rio Grande do Sul. In: SCHOBENHAUS, C.; QUEIROZ, E.T. de COELHO, C.E.S. **Principais depósitos Minerais do Brasil**. Gemas e Rochas Ornamentais. Brasília, DNPM/CPRM. v. 4A, p. 271-285.
- SCHUMANN, W. 1985. **Gemas do Mundo**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico. 254p.
- SZUBERT, E.C.; ORLANDI FILHO, V.; SHINTAKU, I. 1978 - Geologia dos jazimentos de ametista do Alto Uruguai, RS: Guias de Prospecção. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, Recife, 1978. **Anais**. p. 1833-92.
- SUWA, Y. 1994 - **Gemstones Quality and Value**. California, Ed. Gemological Institute of América and Suwa & Son, 142 p.
- WEISBROD, A.; POTY, B.; TOURET, J. 1976 - Les inclusions fluides en géochimie-petrologie: tendances actuelles. **Bulletin de la Societe Française de Mineralogie et de Crystallographie**, 99. 140-152.