

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**“ESTUDOS DE INCLUSÕES FLUIDAS EM
ROCHAS GRANULÍTICAS DO NORTE DO
ESTADO DO RIO DE JANEIRO”**

Carlos Eduardo A. Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Machado
Co-orientadora: Profa. Dra. Rosa Maria Silveira Bello

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF/08-10)**

TF
G635
CEA.e

**SÃO PAULO
2008**

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



**“ESTUDOS DE INCLUSÕES FLUIDAS EM
ROCHAS GRANULÍTIICAS DO NORTE DO
ESTADO DO RIO DE JANEIRO”**

Carlos Eduardo A. Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Machado
Co-orientadora: Profa. Dra. Rosa Maria Silveira Bello

**MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF/08-10)**

DEDALUS - Acervo - IGC



30900025620

**SÃO PAULO
2008**

TF
G635
CEA.2



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

ESTUDOS DE INFLUÊNCIA DE
ROCHAS GRANULÍTICAS DO NORTE DO
ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Carlos Eduardo A. Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Roberto Machado
Co-orientador: Prof. Dr. João Paulo de Sá

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(1992-1993)

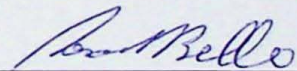
SÃO PAULO
1993

Monografia de Trabalho de Formatura

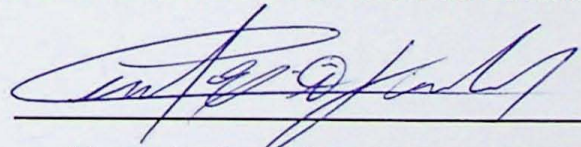
“Estudos de Inclusões Fluidas em Rochas Granulíticas do Norte do Estado do Rio de Janeiro.”

De acordo:

Orientador: Prof. Dr. Rômulo Machado



Co-orientadora: Dr. Rosa Maria da Silveira Bello



Aluno: Carlos Eduardo Afonso Gonçalves

Dedico este trabalho ao meu pai Antonio Carlos e minha mãe Eva Cristina, pelo esforço, estímulo e dedicação em todos estes anos.

AGRADECIMENTOS

Aos irmãos Rafael e André pelo incentivo e apoio por todo o curso.

Ao meu orientador Professor Doutor Rômulo Machado, pelas discussões técnicas e conselhos.

Agradecer o auxílio incondicional da minha co-orientadora Doutora Rosa Maria da Silveira Bello.

Aos meus colegas de turma e veteranos, que sempre tiveram por perto, nos momentos de desespero e comemorações.

Ao Daniel e Nikolai, parceiros desde os tempos de IAG.

A todos os professores que ao longo destes anos, contribuíram muito com o nosso crescimento profissional e intelectual e nos transformaram em geólogos.

Ao Instituto de Geociências e todos seus funcionários, que nos deram suporte em todos estes anos.

Especialmente, agradecer a Cristiane Andrioli, que esteve do meu lado ao longo de todo o curso, me incentivando e apoiando.

E a Deus por ter me acompanhado por todos estes anos.

ÍNDICE

1	RESUMO	1
2	ABSTRACT	1
3	INTRODUÇÃO	2
4	OBJETIVOS	2
5	ÁREA DE ESTUDOS	3
5.1	LOCALIZAÇÃO	3
5.2	CONTEXTO GEOLÓGICO	3
6	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO UTILIZADO	6
6.1	SOBRE AS INCLUSÕES FLUIDAS	7
6.1.1	Origem	7
6.1.2	Composição	7
6.1.3	Número de Fases Presentes (À Temperatura Ambiente)	9
7	MATERIAIS E MÉTODOS	10
7.1	EQUIPAMENTO UTILIZADO	10
7.2	MÉTODO MICROTERMOMÉTRICO	10
7.2.1	Temperatura de Fusão do CO_2 ($T_f\text{CO}_2$)	11
7.2.2	Temperatura de Homogeneização do CO_2 ($T_h\text{CO}_2$)	11
7.2.3	Temperatura do Ponto Eutético das Soluções Aquosas (TPE)	12
7.2.4	Temperatura de Fusão do Gelo (T_{fg})	12
7.2.5	Temperatura de Fusão de Clatratos (T_{fCl})	12
7.2.6	Temperatura de Homogeneização Total (T_{htot})	13
7.3	SISTEMAS EXPERIMENTAIS	14
7.3.1	Sistemas Compostos por Água Pura	14
7.3.2	Sistemas Compostos por CO_2	17
7.3.3	Sistemas Compostos por $\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	18
8	DADOS OBTIDOS	21
8.1	AMOSTRA AM-STX-56A	21
8.1.1	Grão 1	21
8.1.2	Grão 2	24
8.1.3	Grão 3	26
8.1.4	Grão 4	28
8.2	AMOSTRA AM-STX-56C	33
8.2.1	Grão 1	33
8.2.2	Grão 2	35
8.3	AMOSTRA AM-STX-79B	36
8.4	AMOSTRA AM-STX-105A	37
9	DISCUSSÃO DOS DADOS	39
10	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	43
11	BIBLIOGRAFIA	49
	ANEXO A	52
	ANEXO B	63
	ANEXO C	67

1 RESUMO

São apresentados neste trabalho os resultados dos estudos de inclusões fluidas realizados em cristais de quartzo presentes em rochas granulíticas do cinturão Paraíba do Sul/Ribeira no norte fluminense, a partir de amostras coletadas ao longo da seção Laje do Muriaé-Itaperuna (RJ). Na maioria dos casos, as inclusões fluidas primárias e pseudo-secundárias são essencialmente carbônicas, com $T_f\text{CO}_2$ ao redor de $-56,6^\circ\text{C}$, embora alguns cristais apresentem valores até $-58,0^\circ\text{C}$, indicando a presença de outros voláteis associados, embora em pequenas quantidades. Inclusões aquo-carbônicas e aquosas são bastante raras e, provavelmente, de origem posterior. Muitas inclusões contêm CO_2 de densidades relativamente elevadas, até $1,04\text{g/cm}^3$ ($T_h\text{CO}_2$ de $-21,2^\circ\text{C}$), embora este parâmetro apresente grandes variações. Com base nos dados obtidos foram construídas as respectivas isócoras (curvas de igual densidade). Observou-se que algumas delas cruzam a região P-T que delimita o evento metamórfico de alto grau (fácies granulito), sugerindo que elas foram aprisionadas durante este evento. Há também isócoras situadas acima e abaixo dessa região como reflexo da ocorrência de re-equilíbrio metamórfico sob condição de pressão mais baixa e mais elevada após o pico de metamorfismo, sugerindo trajetória P-T-t no sentido horário (na maioria dos grãos estudados) e anti-horário (em alguns grãos), respectivamente.

2 ABSTRACT

In this work are shown results of fluid inclusion studies in quartz crystals of granulites rocks from Paraíba do Sul/Ribeira Belts, north of Rio de Janeiro states. This study was made in samples collected along of Laje do Muriaé – Itaperuna (RJ) Section. There predominates primary and pseudo-secondary carbonic fluid inclusions, with melting temperatures of CO_2 around $-56,6^\circ\text{C}$, and values up to $-58,0^\circ\text{C}$, which indicates the presence of other associated volatiles but with a small quantities. Aquocarbonic and aqueo fluids inclusion are rares and probably of later origin. There are CO_2 inclusions with high density, up to $1,04\text{ g/cm}^3$ ($T_h\text{CO}_2 = -21,2^\circ\text{C}$), but this parameter presents a large variation. The isochors (equal density curves) have shown that some of them cross P-T box. This box represents a high grade metamorphic event (granulites facies), suggesting that the fluid inclusions studied were imprisoned during this event. There are isochors that pass above and below this box, which indicates a metamorphic re-equilibriums in conditions of higher or lower pressure before of the metamorphic peak, suggesting P-T-t trajectories in clockwise (in most grains studied) and counterclockwise (in some grains), respectively.

3 INTRODUÇÃO

Este projeto de pesquisa contempla o estudo de inclusões fluidas em minerais de rochas granulíticas do norte fluminense, pertencentes ao cinturão Paraíba do Sul/Ribeira. Os estudos foram conduzidos em amostras coletadas ao longo da seção Laje do Muriaé-Itaperuna (RJ). Objetiva-se com tais estudos identificar a ocorrência de inclusões carbônicas de densidade elevada que teriam sido aprisionadas durante o metamorfismo granulítico, condição compatível com a baixa atividade de água prevista para a formação desse tipo de rocha e daquela proveniente de eventuais processos metamórficos ocorridos posteriormente.

O estudo de inclusões fluidas envolve a caracterização da natureza e tipo de fluidos aprisionados nos minerais durante sua cristalização, recristalização ou cicatrização posterior de fraturas. Este tipo de estudo permite determinar as condições físico-químicas que vigoravam durante ou após a formação do mineral, neste último caso relacionado a um evento metamórfico posterior.

Os dados aqui obtidos serão complementados com outros dados que estão sendo gerados a partir de outras metodologias analíticas de projetos que se encontram em andamento sobre a mesma região, cujos resultados serão analisados posteriormente de forma integrada visando uma melhor compreensão dos processos metamórficos e tectônicos envolvidos na geração dessas rochas.

4 OBJETIVOS

Este projeto objetiva o estudo geotermobarométrico de rochas granulíticas da região do norte fluminense, pertencentes aos complexos Juiz de Fora/Paraíba do Sul, a partir do estudo de inclusões fluidas em cristais de quartzo. Para isto, é necessário determinar a composição dos fluidos, delimitar as inclusões originais, e definir se tais incluções foram aprisionadas durante o metamorfismo em fácies granulito ou em um evento posterior.

Os dados aqui obtidos serão integrados com dados que estão sendo obtidos nas mesmas amostras por outras metodologias com grande potencialidade analítica (p.ex., geotermobarometria e paragênese mineral), cujos resultados serão posteriormente integrados para um melhor entendimento do quadro de evolução metamórfica da região estudada.

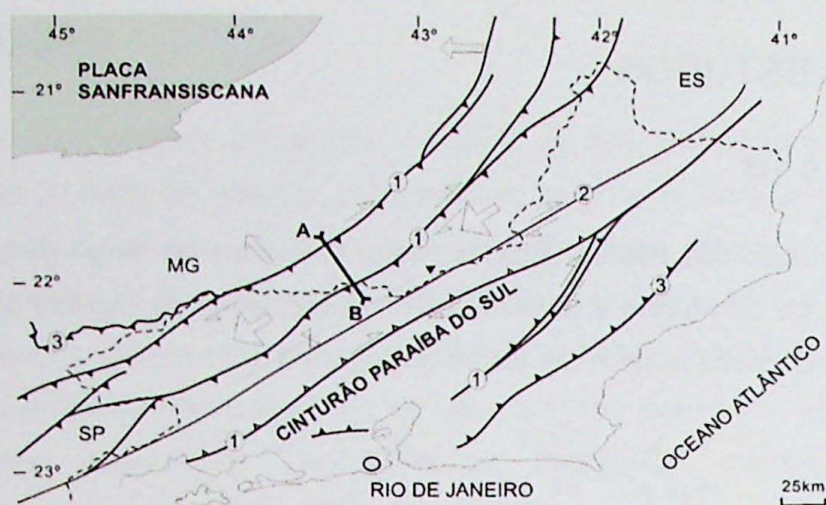


Figura 5.2 – Esboço estrutural do Cinturão Paraíba do Sul (CPS) no Estado do Rio de Janeiro e localização da Seção geológica onde as amostras foram coletadas (A-B). Legenda: Seta maior-fluxo de deformação principal; Seta menor - fluxo de deformação secundária; (1) Zona de cisalhamento oblíqua com movimento indicado; (2) Zona de cisalhamento direcional com movimento indicado; (3) Zona de cisalhamento inversa (Extraído de Vicente et al. 2007).

O desenvolvimento das estruturas tectônicas principais (precoces) tem sido associado a um quadro cinemático com movimentação de topo para SSW, sob condições metamórficas de alto grau e concomitantes com extensiva anatexia crustal caracterizada nas rochas do cinturão Paraíba do Sul (Dehler & Machado 2002, Machado *et al.* 2001). Essas estruturas foram superpostas por zonas de cisalhamento dúcteis, dobras e zonas de cisalhamento inversas, que teriam sido ativas durante o resfriamento e soerguimento progressivo da região (Dehler 2002). A geometria dessas estruturas e as principais unidades geológicas do norte do Rio de Janeiro e sul do Espírito Santo podem ser observadas no mapa geológico da Figura 5.3 (Karniol 2008).

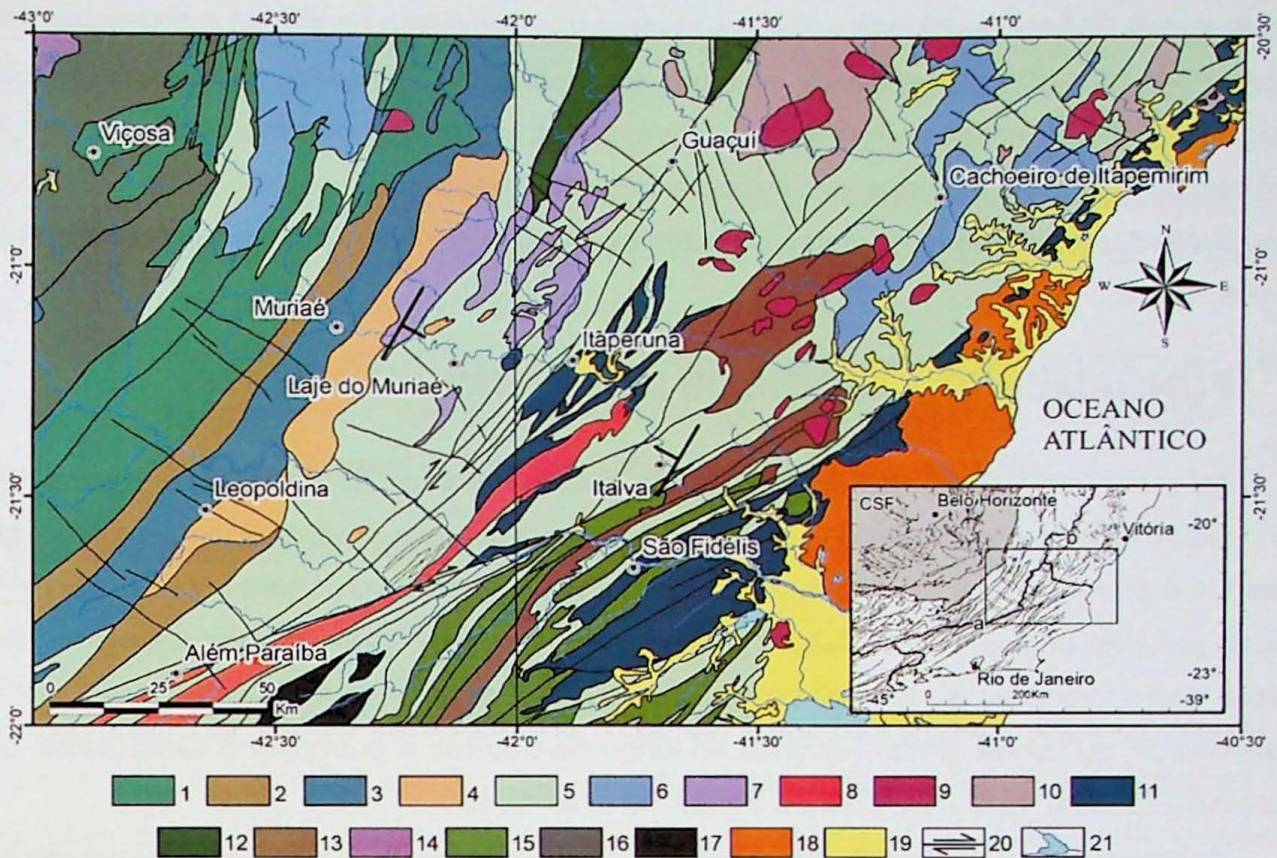


Figura 5.3– Mapa geológico da área com a localização do perfil Patrocínio do Muriaé-Italva, RJ, ao longo do qual foram coletadas as amostras estudadas. Legenda das unidades geológicas: 1- Complexo Juiz de Fora; 2- Suíte Quirino; 3- Suíte Muriaé; 4- Suíte Charnockítica Leopoldina; 5- Complexo Paraíba do Sul; 6- Suíte Galiléia, tonalitos Virgínia Velha, Alto Guandu, Bom Jesus do Galho, Cachoeiro; 7- Suítes Natividade e Varre-Sai, Granito Eugenópolis; 8- Suíte Granítica Serra da Araras; 9- Granitos Morro do Coco e Itaoca, maciços Santa Angélica, Alto Chapéu, Castelo, Rio Novo do Sul e Granitóides tipo-I pós-orogênicos; 10- Suíte Muniz Freire; 11- Suíte Bela Joana; 12- Suíte Caparaó e Charnockitóides; 13- Suíte Angelim; 14- Grupo Dom Silvério; 15- Suíte Desengano; 16- Complexo Piedade; 17- Complexo Rio Negro; 18- Grupo Barreiras; 19- Depósitos quaternários; 20- Zonas de cisalhamento; 21- Rios e lagos. O detalhe abaixo à direita mostra a posição da área em relação às principais estruturas regionais e o Cráton do São Francisco (CSF, em cinza), destacando-se o lineamento de Além Paraíba (a) e a zona de cisalhamento de Guaçu (b). Fonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil - Mapa Geológico do Brasil ao Milionésimo, folhas Rio de Janeiro e Vitória (SF23/SF24).

Dados regionais termobarométricos mostram valores compatíveis com condições de alto grau metamórfico (fácies granulito), como, por exemplo, os de Oliveira (1981), que ao utilizar como termobarômetro clinopiroxênios, em rochas da região da Itaperuna, norte do Rio de Janeiro, onde obteve temperaturas entre 844 e 887°C e pressões entre 6 e 7 kbar, ou ainda, os de Porcher (1997), a partir de amostras das regiões de Três Rios, Miracema e Santo Antônio de Pádua, todas no estado do Rio de Janeiro, que obteve temperaturas entre 807 e 877°C e pressões entre 6 e 6,7 kbar.

Neste contexto, foram escolhidas três amostras (AM-STX-56, AM-STX-79B e AM-STX-105A) para análise de inclusões fluidas, as quais foram coletadas ao longo o perfil Patrocínio do Muriaé-Itaperuna-Italva, durante os trabalhos de campo para a tese de doutorado de Tiago da Rocha Karniol (2008), orientado do professor Rômulo Machado.

As duas primeiras amostras correspondem a amostras de granulitos, coletados nas

proximidades de Laje de Muriaé, cidade situada entre Patrocínio de Muriaé e Itaperuna. Já a amostra AM-STX-105A foi coletada ao longo do perfil Itaperuna-Italva, e corresponde a um gnaiss aluminoso, no qual foram realizados cálculos geotermobarométricos a partir de análises químicas de minerais por meio de microsonda eletrônica por Karniol (2008). Os valores obtidos situam-se no intervalo de temperatura de 600 a 670°C e de pressão entre 5,7 e 6,7 kbar.

6 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DO MÉTODO UTILIZADO

As inclusões fluidas ocorrem devido ao aprisionamento das fases fluidas envolvidas em determinado processo geológico. Tais inclusões aparecem preenchendo cavidades nos minerais e podem conter sólidos aprisionados ocasionalmente ou minerais de saturação da própria solução original. Esses fluidos podem ter diferentes origens e composições e ficam retidos como inclusões durante os processos de cristalização e recristalização dos minerais hospedeiros, ou, ainda, podem ocorrer ao longo de fraturas e promover a cicatrização das mesmas (Roedder 1982, 1984, 1992 e Shepherd *et al.* 1985).

O estudo de inclusões fluídas permite determinar, de maneira geral, as condições físico-químicas vigentes durante ou após a cristalização (ou recristalização) do mineral hospedeiro, fornecendo assim informações importantes sobre os processos metamórficos relacionados à sua formação ou a eventos superimpostos (Fuzikawa, 1985).

Como o estudo de inclusões fluidas permite determinar os parâmetros físico-químicos dos fluidos envolvidos durante a formação dos minerais, este tipo de investigação passou a ter grande importância prática, pois possibilita:

- Maior entendimento na formação de um dado depósito mineral;
- Identificação de proveniência de gemas; separação entre gemas sintéticas e naturais, apesar das inclusões fluidas corresponderem a imperfeições que podem diminuir o valor comercial das gemas;
- Aplicação para pesquisa de hidrocarbonetos, pois a partir do estudo das inclusões fluidas ricas em óleo e gás em minerais diagenéticos de rochas sedimentares é possível identificar o caminho do óleo e mesmo das possíveis rochas armazenadoras;
- A determinação de dados de microtermometria em rochas ígneas e metamórficas pode auxiliar na elucidação de questões petrogenéticas e tectônicas, pois permite a caracterização físico-química dos fluidos envolvidos, tais como: composição, densidade, salinidade e condições de pressão e temperatura de aprisionamento, que podem ser representativas da própria cristalização do mineral.

Para o estudo de inclusões fluídas e interpretação dos dados microtermométricos deve-se assumir duas premissas básicas, já discutidas anteriormente por vários autores (Weisbrod *et al.* 1976, Roedder e Bodnar 1980, Fuzikawa 1985, Gandini 1994), a saber:

- (1) Os fluidos aprisionados como inclusões devem ser representativos de soluções presentes na cristalização, recristalização ou nos processos deformacionais que afetaram à rocha.
- (2) Considera-se, ainda, que o ambiente manteve-se isolado e inerte quimicamente desde o momento do aprisionamento da inclusão, não alterando, assim, as características físico-químicas do fluido.

6.1 SOBRE AS INCLUSÕES FLUIDAS

6.1.1 Origem

As inclusões fluídas, presentes nos minerais, podem ter origens distintas de acordo com a época em que foram aprisionadas. Aspectos relacionados à origem das inclusões são discutidos por diversos autores (Roedder 1984, Shepherd *et al.* 1985, dentre outros), destacando-se os seguintes:

- (1) Inclusões primárias, que ocorrem em geral de maneira isolada ou como agrupamentos de inclusões não orientadas, ou, ainda, segundo as faces de crescimento do mineral hospedeiro. São geradas durante a cristalização do mineral, englobando fluidos representativos daqueles que interagem durante a formação do mineral.
- (2) Inclusões secundárias, que ocorrem distribuídas segundo alinhamentos (trilhas) e chegam a ultrapassar as bordas do cristal, são aprisionadas pela cicatrização de fraturas desenvolvidas a partir de eventos posteriores à cristalização do mineral, podendo, neste caso, conter fluidos de composição distinta das inclusões anteriores (primárias).
- (3) Inclusões pseudo-secundárias, que ocorrem em alinhamentos e não vão além das bordas do cristal, são aprisionadas pela cicatrização de fraturas contemporâneas ao crescimento do mineral e contém o fluido original ou parte de evolução do mesmo.

6.1.2 Composição

As inclusões fluídas possuem, tipicamente, um líquido de baixa viscosidade (geralmente água) com um ou mais íons em solução, como Na, K, Mg, Ca, Cl, mais uma bolha de vapor d'água ou um gás comprimido, em geral CO₂ (Roedder, 1984). Elas podem ser constituídas por um ou mais componentes, sendo que as inclusões com mais de três componentes são as mais freqüentes na natureza.

As assembléias minerais desidratadas que caracterizam as rochas granulíticas, objeto de estudo deste trabalho, requerem que a atividade de água tenha sido tamponada a baixos níveis durante sua formação.

Segundo um modelo muito difundido, o influxo de fluidos ricos em CO_2 provenientes do manto seria o responsável pelo decréscimo na atividade da água e a conseqüente formação de associações minerais anidras constituintes dos granulitos, conforme discutido por Santosh & Omori (2008). Santosh *et al.* (2004) enfatizam que o CO_2 é o fluido dominante nas rochas de crosta profunda, sendo isto evidenciado pela presença de inclusões fluidas carbônicas. Estes autores propõem uma estratificação dos fluidos na crosta terrestre, da seguinte forma: as regiões superiores seriam dominadas por soluções aquosas ou salmouras com quantidades variáveis de CH_4 e/ou N_2 ; as regiões mais profundas seriam ricas em fluidos compostos por $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O}$, enquanto as regiões da crosta inferior seriam dominadas por CO_2 .

Santosh & Omori (2008) discutem vários exemplos de estudos sobre rochas granulíticas formadas em altas a ultra-altas temperaturas, e mostram que as inclusões fluidas ricas em CO_2 nos minerais em equilíbrio nessas rochas indicam que grande parte do fluido carbônico é de origem sin-metamórfica. Os exemplos mostram que CO_2 praticamente puro constituía a fase fluida dominante durante o pico do metamorfismo, bem como durante a história evolutiva termal dessas rochas, incluindo resfriamento isobárico, descompressão isotérmica e combinações destes processos que têm sido reconhecidos nos caminhos P-T-t retrógrados de diversos terrenos granulíticos. Isso é indicado pelas isócoras que passam pelo campo P-T, correspondente ao pico do metamorfismo, definido por paragêneses em equilíbrio, sugerindo que as inclusões ricas em CO_2 presentes em minerais dessas rochas preservam traços dos fluidos sin-metamórficos aprisionados durante esse evento. Os exemplos discutidos pelos autores mostram que muitas rochas de fácies granulito contêm diferentes populações de inclusões primárias e pseudo-secundárias com amplas variações de densidade, cujas isócoras não passam pelo campo P-T granulítico, sendo interpretadas como produto de aprisionamento em estágios posteriores ou como resultado de modificações de densidades ocorridas durante a história do metamorfismo retrógrado. Durante o soerguimento isotérmico, o caminho P-T retrógrado cruza progressivamente as isócoras de maior densidade e depois as de menor, ao longo de uma trajetória no sentido horário. Por outro lado, no caso de um resfriamento isobárico, o caminho P-T intercepta progressivamente as isócoras de maior densidade, ao longo de uma trajetória no sentido anti-horário.

Outros estudos de detalhe a partir de inclusões fluidas mostram também que o CO_2 foi a fase fluida dominante durante o pico do metamorfismo granulítico, sendo responsável pela formação de associações minerais desidratadas (Mohan *et al.* 2003, Santosh *et al.* 2004, Cuney *et al.* 2007, Nogueira *et al.* 2004, entre outros).

Santosh & Omori (2008) discutem também várias hipóteses sobre a origem dos fluidos carbônicos envolvidos na formação dos granulitos, tais como fluxos de CO₂ a partir do manto, decarbonatação de sedimentos carbonáticos impuros durante o metamorfismo de alto grau, oxidação de carbono biogênico aprisionado nos sedimentos, bem como a ação de outros fluidos que promovem a desidratação das rochas granulíticas. Um dos modelos discutidos foi proposto por Newton *et al.* (1980), que invoca a ocorrência de um fluxo de CO₂ a partir do manto e produz a desidratação de rochas da crosta inferior, para formar os granulitos, enquanto a água migra para cima e gera magmas graníticos em níveis mais rasos. Este modelo é suportado pelas observações de Touret (1971), que descreveu, a partir dos estudos das inclusões fluidas em rochas do sul da Noruega, a transição de soluções aquosas dominantes, em rochas de fácies anfibolito, para fluidos ricos em CO₂ nos granulitos.

No entanto, Santosh & Omori (2008) chama a atenção para um aspecto muito debatido e até desacreditado no modelo de Newton *et al.* (1980) que é a idéia de uma “onda carbônica” proveniente do manto que promoveria a desidratação da crosta continental inferior, expulsando a água para níveis mais superiores. Concordam também com muitos autores sobre a impossibilidade do fluido carbônico fluir livremente do manto para a crosta inferior, e propõem um modelo segundo o qual os fluidos seriam transportados por magmas derivados do manto que são depois intrusivos na crosta inferior.

Segundo os autores, as observações de campo, as características das inclusões fluidas e assinaturas dos isótopos de carbono sugerem que o CO₂ do metamorfismo granulítico provem de fontes profundas e resulta da degaseificação do manto sub-litosférico ou, subordinadamente, de fontes crustais por meio da decarbonatação de rochas cálcio-silicáticas. Os estudos dos autores sugerem, no entanto, como modelo preferencial, o aquecimento da crosta inferior pela subida de material do manto, levando em consideração o papel do manto como importante reservatório de minerais carbonáticos que liberam fluxos episódicos de CO₂ associados com a formação de charnockitos e granulitos sob condições de ultra-altas temperaturas. Com base em vários exemplos apresentados e de cálculos termodinâmicos, os autores mostram que o fluxo de CO₂ pode ocorrer tanto em escala regional como em escala local.

6.1.3 Número de Fases Presentes (À Temperatura Ambiente)

Inclusões monofásicas apresentam uma única fase (líquido, vapor ou gás).

Inclusões bifásicas apresentam, à temperatura ambiente, duas fases: líquido e gasosa; líquido e sólido; dois líquidos imiscíveis.

Inclusões trifásicas apresentam três fases, sob condições de temperatura ambiente. As fases mais comuns possuem duas fases líquidas (imiscíveis entre si) e uma fase gasosa. Podem, ainda, ocorrer inclusões de líquido, vapor e sólido; líquido, gás e sólido.

Inclusões multifásicas apresentam mais de três fases, sob condições de temperatura ambiente, como dois líquidos (imiscíveis entre si), um gás e um sólido.

7 MATERIAIS E MÉTODOS

7.1 EQUIPAMENTO UTILIZADO

As medidas microtermométricas foram realizadas no Laboratório de Inclusões Fluidas do Departamento de Mineralogia e Geotectônica do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (GMG-IGc-USP), mediante a utilização de uma platina de resfriamento e aquecimento modelo CHAIXMECA MTM 85 (Poty *et al.* 1976, Bello 1996), que permite análises no intervalo de -180 a $+600^{\circ}\text{C}$. O resfriamento é realizado pela passagem de nitrogênio líquido em canais internos situados no corpo da platina e o aquecimento é obtido por meio de uma resistência interna localizada em sua região central, próxima à amostra a ser analisada. Esse equipamento está acoplado a um sistema registrador de dados NEWPORT e a um microscópio binocular LEITZ WETZLAR, que possibilita a visualização da amostra durante todas as etapas de análise e o registro das temperaturas onde ocorrem as mudanças de fase de interesse.

O equipamento foi calibrado por meio dos padrões SYN FLINC (Synthetic Fluid Inclusions), para as seguintes temperaturas:

1. $-56,6^{\circ}\text{C}$ - Padrão 1 – Composição: $75\text{ mol\% H}_2\text{O} + 25\text{ mol\% CO}_2$;
2. $-21,2^{\circ}\text{C}$ - Padrão 2 - Composição eutética do sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ (23,2% em peso de NaCl);
3. $-10,7^{\circ}\text{C}$ - Padrão 3 – Composição eutética do sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{KCl}$ (19,6% em peso de KCl);

7.2 MÉTODO MICROTERMOMÉTRICO

Os estudos microtermométricos consistem basicamente em medir as temperaturas nas quais ocorrem mudanças de fase dos materiais aprisionados nas inclusões. Para isso, são feitas inicialmente medidas relacionadas às mudanças de fase que ocorrem em baixas temperaturas e, posteriormente, medidas relativas às mudanças em altas temperaturas, uma vez que, nessa etapa, muitas inclusões podem produzir a crepitação ou a fissuras dos minerais, levando ao escape do fluido.

As temperaturas relacionadas com mudanças de fases passíveis de serem medidas são as seguintes:

7.2.1 Temperatura de Fusão do CO_2 ($T_f\text{CO}_2$)

Esta temperatura é obtida a partir do resfriamento da amostra até o congelamento total

da inclusão, situação esta que ocorre muito rápido e dificulta a medida desse estágio durante o resfriamento, devido à metaestabilidade. Em função desse comportamento, a medida do $T_f\text{CO}_2$ é realizada durante o aquecimento natural da amostra, pela troca de calor com o ambiente.

Quando a fase de CO_2 presente é pura, a fusão ocorre à temperatura de $-56,6^\circ\text{C}$ (ponto triplo do CO_2 puro). Contudo, quando existem outros voláteis misturados ao CO_2 , a $T_f\text{CO}_2$ obtida é inferior, sendo uma função da quantidade do volátil associado.

Resfriando-se a amostra até a temperatura de -180°C não é possível detectar a presença de outros voláteis que possuem ponto triplo em temperaturas muito mais baixas que o valor limite do equipamento, como, por exemplo, o CH_4 (-182°C) e o N_2 (-210°C). No entanto, em alguns casos é possível detectar a presença desses componentes por suas temperaturas de homogeneização, que pode ocorrer até $-82,1^\circ\text{C}$ (CH_4) e -147°C (N_2) e representam os pontos críticos desses voláteis (Roedder 1984, Shepherd *et al.* 1985).

7.2.2 Temperatura de Homogeneização do CO_2 ($T_h\text{CO}_2$)

Esta temperatura é obtida no momento em que uma inclusão bifásica (CO_2 Líquido + vapor) se transforma em inclusão monofásica, ou seja, quando se tem um sistema homogêneo com apenas uma fase.

Tais medidas permitem a determinação da densidade do CO_2 contido na inclusão, por comparação com dados experimentais de P-V-T-X conhecidos (Roedder, 1984). A homogeneização do CO_2 deve ocorrer até a temperatura de $31,1^\circ\text{C}$, valor este que corresponde a sua temperatura crítica (Roedder 1984, Shepherd *et al.* 1985).

A homogeneização pode ocorrer sob três formas distintas (Roedder 1984, Shepherd *et al.* 1985), a saber:

- (1) Em sistemas de baixa densidade, ocorre a expansão total da bolha de CO_2 gasoso até o desaparecimento de sua fase líquida, caracterizando a homogeneização para a fase gasosa;
- (2) Em sistemas de mais alta densidade, a homogeneização ocorre para a fase líquida, ou seja, há a diminuição e desaparecimento total da bolha de CO_2 gasoso;
- (3) Em sistemas de densidade intermediária (densidade crítica) ocorre a homogeneização para o estado crítico, ou seja, há o desaparecimento do menisco que separa as fases líquida e gasosa do CO_2 , não havendo alteração em seus volumes.

7.2.3 Temperatura do Ponto Eutético das Soluções Aquosas (TPE)

A TPE corresponde ao aparecimento da primeira gota de líquido após o aquecimento

natural da solução aquosa congelada. Essa temperatura permite a determinação dos íons presentes na solução.

7.2.4 Temperatura de Fusão do Gelo (T_{fg})

Quando o sistema é composto por água pura, a sua temperatura de fusão (T_{fg}) ocorre a $0,015^{\circ}\text{C}$ (Roedder 1984, Shepherd *et al.* 1985). No entanto, é comum a presença de íons em solução aquosa como, por exemplo, Ca^{2+} , Cl^{-} , Na^{+} , K^{+} , Mg^{2+} , que agem no sentido de abaixar a temperatura de fusão do gelo.

Utilizando-se diagramas de sistemas de H_2O + sais, pode-se determinar a salinidade dessas soluções. No entanto, como o NaCl é um sal quase sempre presente e abundante nas soluções naturais, costuma-se utilizar o diagrama H_2O + NaCl , sendo a salinidade expressa em equivalentes à porcentagem em peso de NaCl .

Como acontece na determinação da $T_f\text{CO}_2$, as medidas são feitas após o congelamento total das soluções pois, durante o congelamento rápido das soluções, essa mudança de fase pode ocorrer em temperaturas inferiores às reais, devido à metaestabilidade.

7.2.5 Temperatura de Fusão de Clatratos (T_{fCl})

A formação dos clatratos está associada à cristalização de uma determinada substância, onde suas moléculas formam cavidades que podem abrigar moléculas ou átomos de outra substância e formar material sólido através de ligações iônicas entre elas. Em um sistema constituído por H_2O , CO_2 e sais em solução, a fórmula do clatrato será $\text{CO}_2 \cdot 5,75 \text{H}_2\text{O}$ (Collins, 1979; Roedder 1984; Shepherd *et al.* 1985; Fuzikawa 1985). Nesse caso, ocorre um aumento expressivo da salinidade da fase aquosa, impossibilitando a sua medida diretamente pela temperatura de fusão do gelo, pois esta apresenta valores inferiores ao esperado (real), em função da ligação entre H_2O e CO_2 (Fuzikawa 1985).

A salinidade dessas soluções, segundo Collins (1979), pode ser obtida por meio de diagramas de fase relativos ao sistema H_2O + CO_2 + NaCl , sendo os resultados expressos em equivalentes à porcentagem de peso de NaCl .

De acordo com Collins (1979), as medições são realizadas a partir da observação da deformação da bolha de CO_2 após a fusão total do gelo. Depois da fusão total destes compostos, a bolha volta ao normal e neste ponto registra-se a T_{fCl} . Muitas vezes, no entanto, é difícil observar essa mudança de fase, sendo necessário realizar um resfriamento cíclico, conforme discutido em Goldstein & Reynolds (1994). Por esse processo, anota-se a temperatura na qual a bolha parece ter voltado à forma natural ou próxima a ela, submetendo-a, nesse ponto, a um leve resfriamento; se com esse procedimento a bolha torna a se deformar, significa que o clatrato ainda estava presente. Para contornar o

problema, deixa-se a temperatura chegar um valor levemente superior ao atingido anteriormente (0,1°C, 0,5°C ou 1°C, dependendo da precisão desejada) e torna-se a resfriá-la levemente. Se a bolha não mais se deforma, significa que a dissolução do clatrato ocorreu dentro do intervalo de temperatura considerado. Por outro lado, se a bolha torna a se deformar, repete-se o processo.

Em alguns casos podem estar presentes minerais de saturação (sólidos), situação em que a sua dissolução fornecerá dados mais precisos sobre a salinidade (Roedder 1984; Shepherd *et al.* 1985). Com esses dados (T_{fg} , T_{fcl} , temperatura de dissolução dos sais, quando houver) e a utilização de equações de estado e diagramas apropriados pode-se determinar a composição química das soluções aquosas e as porcentagens de sais dissolvidos nas mesmas (Collins, 1979; Roedder 1984; Fuzikawa, 1985).

7.2.6 Temperatura de Homogeneização Total (T_{htot})

Esta medida, de grande importância, pode permitir obter as condições mínimas de temperatura e pressão de aprisionamento do fluido (Roedder 1984; Shepherd *et al.* 1985).

Assim como no caso de T_hCO_2 , a homogeneização total de sistemas aquosos e aquo-carbônicos pode ocorrer de três maneiras:

- (1) Expansão da bolha de gás ou vapor;
- (2) Diminuição da bolha de gás ou vapor;
- (3) Nos casos de homogeneização crítica, há o desaparecimento do menisco que separa as duas fases.

Há ainda situações em que se têm minerais de saturação, onde deve ser medida a T_{htot} por meio de sua dissolução, caso ocorra após a homogeneização das fases fluidas.

Quando ocorre o aprisionamento a partir de fluidos originalmente imiscíveis, por exemplo, soluções aquosas salinas e CO_2 , observa-se, numa mesma região da amostra, inclusões representativas dos termos extremos do sistema, ou seja, algumas compostas principalmente por H_2O + sais e outras essencialmente carbônicas, podendo haver também aquelas com distintas proporções volumétricas entre as fases. Nesses casos, o cruzamento das isócoras (linhas de densidade constante) referentes aos dois termos extremos, em diagramas P-T, permite definir as condições de P e T reais do aprisionamento (Roedder 1984; Shepherd *et al.* 1985). Porém, no caso de fluidos originalmente homogêneos, não é possível a determinação real de P e T, sendo estes parâmetros somente representativos das condições mínimas de aprisionamento. Nestas situações, devem ser feitos estudos geotermobarométricos, geológicos ou de paragênese mineral, para auxiliar na definição dos valores de pressão e temperatura mais próximos dos reais.

Por fim, após as determinações microtermométricas, os dados obtidos, uma vez tratados e analisados por meio de equações de estado e diagramas de equilíbrio estudados

experimentalmente, são depois avaliados em conjunto com as informações petrográficas e geológicas disponíveis, visando a compreensão do contexto metamórfico.

7.3 SISTEMAS EXPERIMENTAIS

Para a interpretação dos dados microtermométricos, são utilizados diversos diagramas bidimensionais e tridimensionais. Alguns desses diagramas são apresentados na Figura 7.1.

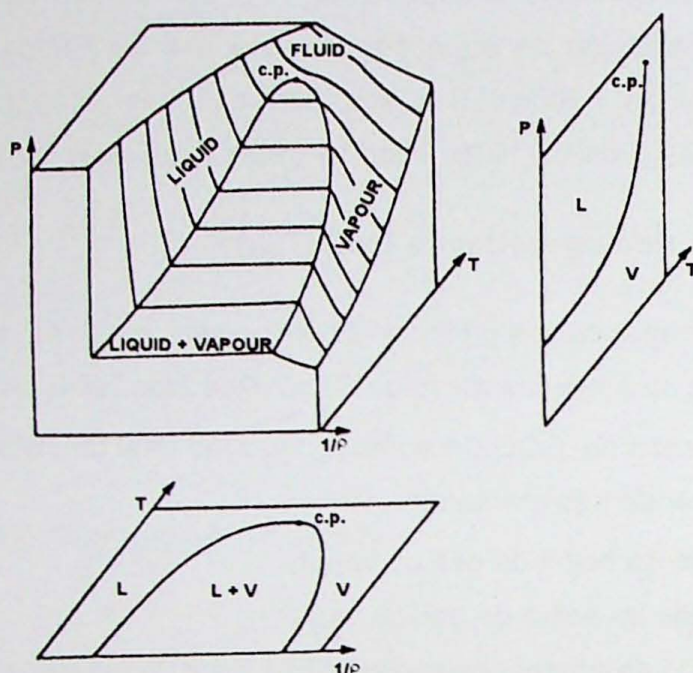


Figura 7.1 — Diagrama P-V-T para o sistema aquoso, mostrando ocorrência das fases líquida, vapor e coexistência entre as duas fases (Shepherd *et al.* 1985).

O diagrama da Figura 7.1, representando os parâmetros P-V-T, em sistema aquoso, é um exemplo de diagrama tridimensional utilizado, no qual podemos observar os cortes T-V(1/d) e P-T discutido posteriormente.

7.3.1 Sistemas Compostos por Água Pura

O diagrama Temperatura X Densidade apresentado a seguir (Figura 7.2) mostra os dois campos separados pela curva de homogeneização: acima da curva o sistema possui uma única fase (fluido homogêneo), e abaixo da mesma possui duas fases (líquida e vapor). Com a diminuição de temperatura e pressão, uma inclusão aprisionada no campo de uma única fase passará para o campo de coexistência de duas fases. Porém, no processo de aquecimento da inclusão, ocorrerá sua homogeneização, sendo que a densidade e a pressão de aprisionamento da mesma influenciarão para qual fase a inclusão será homogeneizada (líquido ou vapor). No caso de densidades maiores que aproximadamente $0,4 \text{ g/cm}^3$ (densidade crítica do sistema), a homogeneização se dará para o estado líquido, indicando que a inclusão foi aprisionada em maiores pressões; em densidades menores do

que esse valor, a homogeneização se dará para o estado gasoso, mostrando que o aprisionamento ocorreu sob condições de menores pressões; já para uma inclusão com densidade igual a $0,4 \text{ g/cm}^3$, a homogeneização se dará para o estado crítico, fato este marcado pelo desaparecimento do menisco que separa a bolha de vapor da fase líquida.

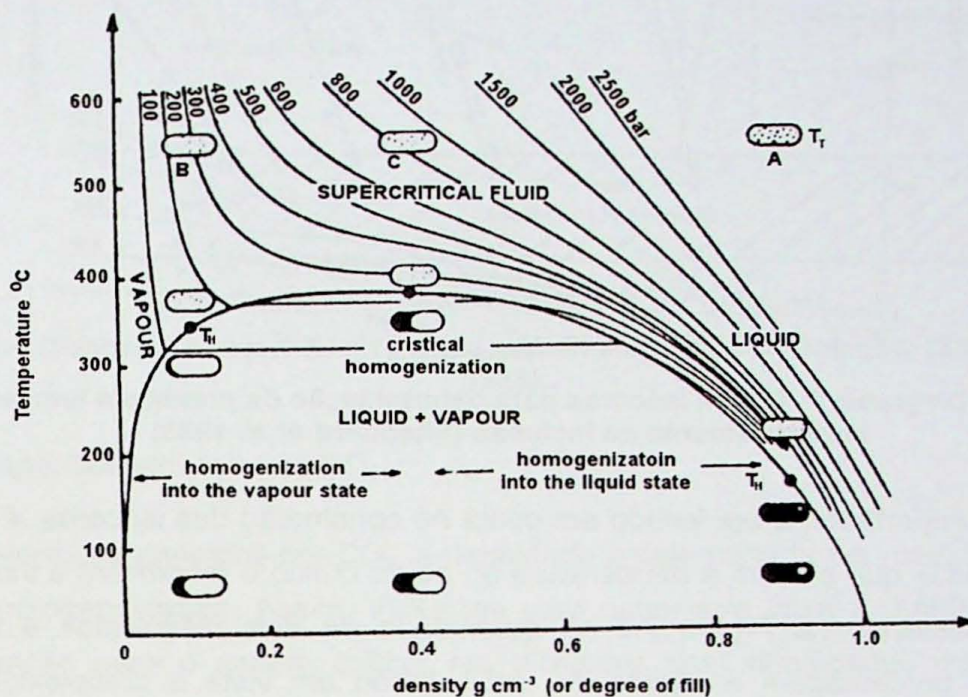


Figura 7.2 — Diagrama Temp. X Dens., mostrando os tipos de homogeneização de inclusões aquosas (Shepherd *et al.* 1985).

Assim, a partir das temperaturas de homogeneização, é possível se obter a densidade do fluido presente na inclusão. Com isso pode-se construir curvas de igual densidade, *isócoras*, pelas quais as inclusões seguem com o aumento de temperaturas até as condições de aprisionamento (Figura 7.3).

Para inclusões formadas em sistemas homogêneos, pode-se obter as mínimas pressão e temperatura de aprisionamento pela sua homogeneização total que ocorre em cima da curva, sendo os valores reais apresentados na parte superior do diagrama (Figura 7.2).

Desse modo, determinando-se as $T_{h_{tot}}$ e conhecendo-se a pressão real, estimada a partir de estudos geológicos, estruturais, paragenéticos etc, e a densidade do fluido, pode ser obtida a temperatura real de aprisionamento da inclusão, como pode ser visto nas Figura 7.2 e Figura 7.3 (Shepherd *et al.* 1985, Roedder 1984).

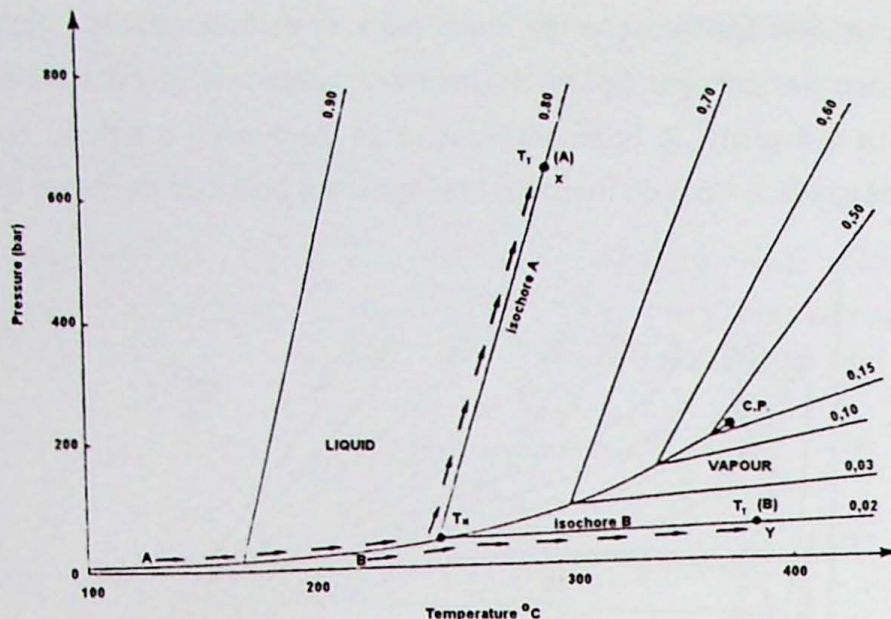


Figura 7.3 — Diagrama P-T, com isócoras para determinação da pressão e temperatura de aprisionamento da inclusão (Shepherd et al. 1985)

Um fator importante, a ser levado em conta na construção das isócoras, é a presença de sais dissolvidos que elevam a temperatura do ponto crítico e modificam a inclinação das isócoras apresentadas na Figura 7.3. A quantidade de sais dissolvidos é medida em equivalentes à porcentagem em peso de NaCl, tendo em vista a complexidade para a determinação de todos os sais presentes nas inclusões.

As salinidades podem ser obtidas por meio de equações de estado e diagramas binários de sistemas compostos por água e sais. Considere-se, por exemplo, o sistema $H_2O + NaCl$ (Figura 7.4)

Com o resfriamento das inclusões contendo até 23% em peso de NaCl, forma-se primeiro gelo e, depois, na temperatura do ponto eutético, cristaliza-se a hidrohalita a partir do líquido restante. Assim, no aquecimento natural, a última temperatura a ser medida refere-se à fusão do gelo, que permite a determinação da salinidade.

Em inclusões com proporções entre 23,3% a 26,3% em peso de NaCl, o primeiro sólido a se formar é a hidrohalita, e, em seguida, o gelo a partir do líquido remanescente. No aquecimento natural, o gelo funde antes da hidrohalita e a salinidade é determinada pela temperatura de dissolução da hidrohalita.

Nas inclusões com mais de 26,3% em porcentagem em peso de NaCl, onde ocorrem minerais de saturação, a temperatura de dissolução do sal é que determinará a salinidade por meio de diagramas de solubilidade. Se o valor obtido for maior do que o relativo à homogeneização das fases fluidas, será considerado como a verdadeira Th_{total} , sendo representativa da temperatura mínima de aprisionamento do fluido.

O diagrama apresentado a seguir (Figura 7.4) mostra as fases sólidas formadas ao se resfriar a amostra.

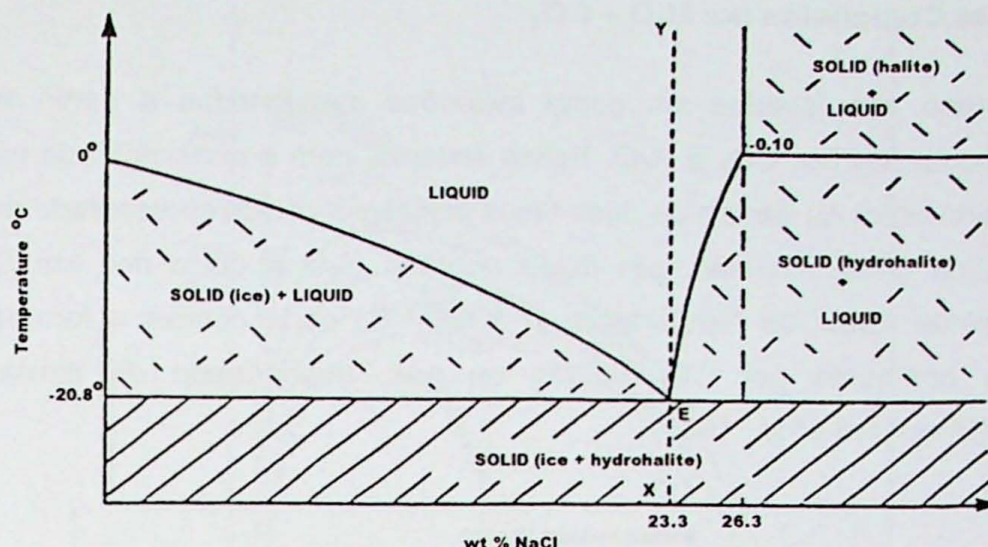


Figura 7.4 — Diagrama Temp X % em peso do NaCl dissolvido na solução. (Shepherd *et al*, 1985).

7.3.2 Sistemas Compostos por CO₂

Em sistemas compostos por CO₂, a densidade é determinada por meio da temperatura e tipo de homogeneização. Assim, inclusões com densidade igual a 0,468g/cm³ têm sua homogeneização para o estado crítico; em inclusões com densidades menores do que 0,468g/cm³, a homogeneização ocorre para o estado gasoso, enquanto que, para densidades maiores, a homogeneização ocorre para o estado líquido. Pode-se observar na Figura 7.5 que na homogeneização para o estado líquido, a densidade é maior quanto mais baixa for a T_h. Já quando a homogeneização se dá para o estado gasoso, a densidade cresce juntamente com o aumento de temperatura (Roedder, 1984).

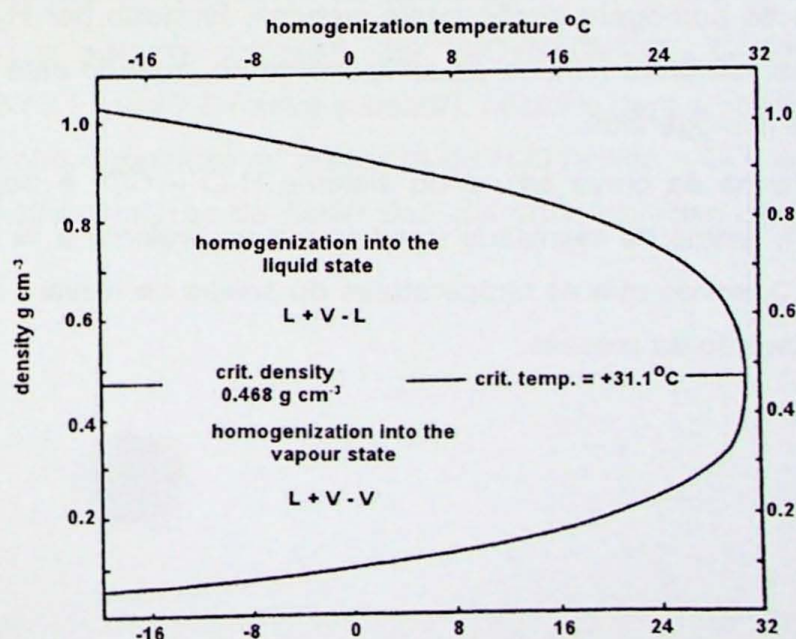


Figura 7.5 — Diagrama de Dens X T_hCO₂ (Shepherd *et al*, 1985). As temperaturas do ponto crítico e fusão do CO₂ são influenciadas pela presença de outros componentes no sistema, como, por exemplo, o CH₄.

7.3.3 Sistemas Compostos por H₂O + CO₂

Neste caso são levadas em conta inclusões aprisionadas a partir de um fluido homogêneo composto por CO₂ e H₂O. Nesse sistema, com a diminuição da temperatura e pressão, o fluido entra no campo de duas fases imiscíveis como representado na Figura 7.6, formando, numa única inclusão, um fluido rico em H₂O e outro rico em CO₂. Com o decréscimo ainda maior da temperatura ($T < 31,1^{\circ}\text{C}$) pode ocorrer a formação de uma terceira fase composta por CO₂ líquido ou gás, dependendo da densidade desse componente (Shepherd *et al.*, 1985).

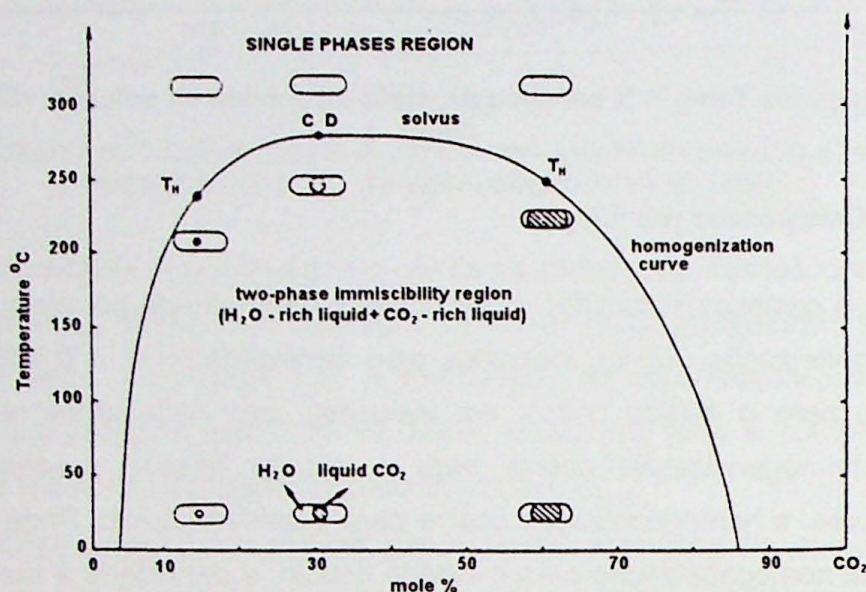


Figura 7.6 — Proporção entre as fases H₂O e CO₂ em inclusões aquocarbônicas e sua relação com a temperatura de homogeneização (Shepherd *et al.*, 1985).

A temperatura de homogeneização neste sistema, formado por H₂O e CO₂, também fornece somente a temperatura mínima de aprisionamento, quando este se deu a partir de fluidos originalmente homogêneos.

A posição e forma da curva *solvus* do sistema H₂O – CO₂ é dependente tanto da pressão (Figura 7.7), como da salinidade (medida em equivalente à % em peso de NaCl) (Figura 1 – Anexo C), sendo que as temperaturas do *solvus* se elevam com o aumento da salinidade e/ou diminuição da pressão.

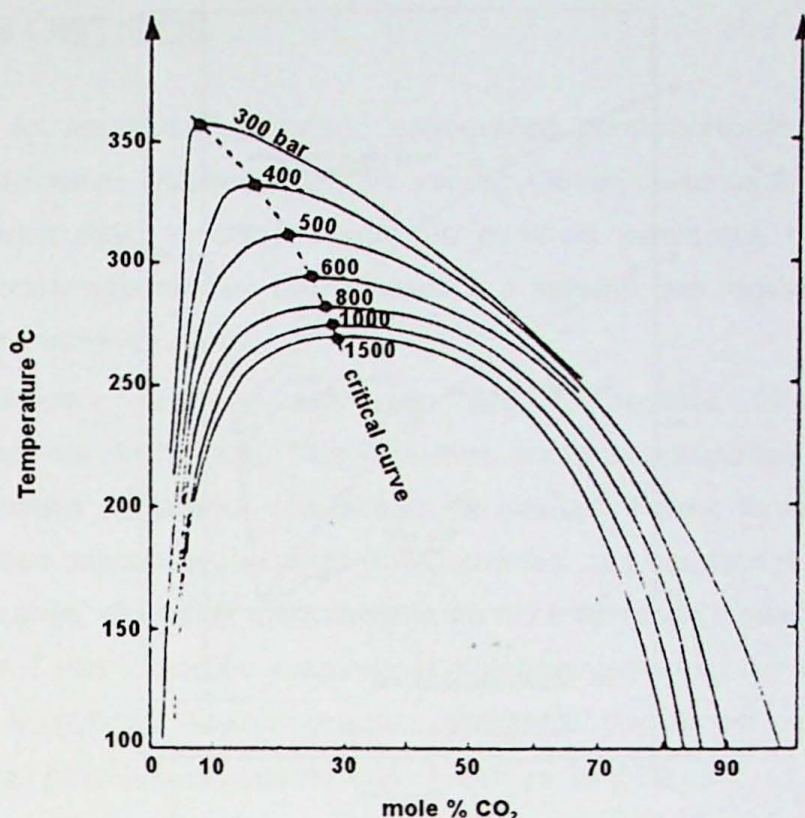


Figura 7.7 — Efeito da pressão na curva do *solvus* do sistema H₂O-CO₂ (Shepherd *et al*, 1985).

Um fator, a ser levado em conta, é a formação de clatratos. Neste caso, a temperatura de fusão do gelo pode fornecer uma falsa estimativa da salinidade, já que parte da água do sistema estaria ocupando espaços vazios na estrutura do clatrato, enquanto que a água que permanece na parte líquida passa a ter maior concentração de sais. Assim, segundo Collins (1979), a maior quantidade de sal na solução remanescente abaixa a temperatura de fusão do gelo, aumentando assim a estimativa da salinidade.

Considerando o sistema composto por H₂O+NaCl+CO₂, Collins (1979) discute o diagrama mostrado na Figura 7.8 (curva superior), utilizado para a obtenção das salinidades quando o clatrato sofre dissolução na presença de H₂O líquido + CO₂ (líquido) + CO₂ (gás). Pelo diagrama, as temperaturas de fusão dos clatratos fornecem diretamente o valor da salinidade.

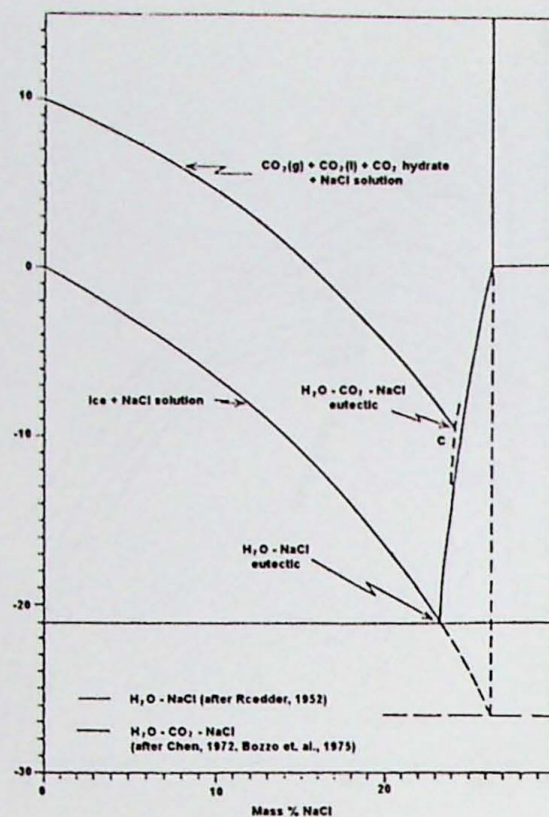


Figura 7.8 — Diagrama ilustrando a curva de fusão do gelo no sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl}$ e de dissolução dos clatratos no sistema $\text{H}_2\text{O} + \text{NaCl} + \text{CO}_2$ (Collins, 1979).

Quando o clatrato sofre dissolução na presença de H_2O (líquido) e CO_2 (líquido) ou de H_2O (líquido) e CO_2 (gás), a curva delimitada no diagrama anterior não permite a determinação das salinidades. Nesses casos, como o CO_2 já está homogeneizado, quando ocorre a dissolução do clatrato, a própria determinação de T_{hCO_2} é falsa, uma vez que ainda existe parte desse componente preso na estrutura do sólido. Desse modo, a determinação das salinidades é feita a partir das T_{fCl} e das temperaturas reais de homogeneização do CO_2 na ausência metaestável de clatratos, utilizando-se os diagramas obtidos por Diamond (1992), que estudou os campos de estabilidade H_2O (l) + CO_2 (l) + Clatratos e H_2O (l) + CO_2 (g) + clatratos (Figura 2 e Figura 3 – Anexo C). As T_{hCO_2} reais são obtidas resfriando-se lentamente a inclusão até a formação da bolha de gás, sem que haja a formação dos compostos clatratos. Essas condições podem ser atingidas uma vez que as temperaturas de nucleação dos clatratos, durante o resfriamento, situam-se numa faixa de -35 a -45°C , sendo, muitas vezes, inferiores às de nucleação do CO_2 (g). Assim, nos casos de inclusões que se homogeneizam em temperaturas não muito baixas, torna-se viável o uso da metodologia proposta por Diamond (1992) para a obtenção das salinidades nos campos mencionados.

Embora tenham sido discutidos acima os princípios envolvidos na caracterização das propriedades dos fluidos, a determinação de todos os parâmetros de interesse a partir das medidas microtermométricas pode ser feita por meio das equações de estado de sistemas apropriados englobadas nos pacotes de programas Clathrates de Bakker (1997) e Fluids (Bakker 2003).

8 DADOS OBTIDOS

Inicialmente foi realizado um estudo petrográfico pormenorizado de 12 fragmentos pertencentes a 3 amostras selecionadas para estudo. Observou-se as formas de ocorrência das inclusões, distribuição e relações com os minerais presentes na lâmina, visando estabelecer uma cronologia relativa das mesmas e a seleção das regiões mais adequadas para os estudos microtermométricos.

Foram estudadas inclusões primárias, isto é, aquelas formadas durante a recristalização dinâmica do mineral. Tais inclusões ocorrem agrupadas aleatoriamente ou como também isoladas no interior dos cristais de quartzo. Foram também obtidos dados relativos às inclusões pseudo-secundárias e secundárias, que ocorrem distribuídas ao longo de fraturas cicatrizadas, dispostas internamente ao mineral, e de inclusões que cruzam os limites dos cristais. Estas inclusões possuem morfologias variáveis, variando desde ovais e arredondadas até irregulares, havendo mesmo casos que constituem cristais negativos. As inclusões estudadas possuem dimensões que variam de 30 a 70 μm .

As inclusões, tanto primárias como pseudo-secundárias, são, em grande maioria, constituídas por CO_2 , cujas temperaturas de fusão variam de $-56,6$ (ponto triplo do CO_2 puro) até $-58,0$ e, mostram, em alguns casos, presença de outros voláteis associados, porém em quantidades relativamente pequenas. Foram também observadas inclusões aquocarbônicas, distribuídas aparentemente tanto de modo aleatório como isoladas, dispostas em trilhas ou em forma de lentes no quartzo.

8.1 AMOSTRA AM-STX-56A

Nesta lâmina, considerada o melhor corte da amostra (paralelo a lineação de estiramento mineral e perpendicular à foliação), foram analisados 4 grãos, cujos dados microtermométricos e os parâmetros obtidos por meio de cálculos realizados, utilizando-se programas computacionais criados por Bakker (1997 e 2003), são apresentados na forma de tabelas a seguir.

São também apresentados os histogramas referentes às temperaturas de mudanças de fase e às densidades totais dos fluidos.

8.1.1 Grão 1

Na Tabela 1 (Anexo A) encontram-se os dados microtermométricos obtidos para as inclusões do Grão 1 e as densidades totais determinadas a partir do pacote de programas *Fluids* de Bakker (2003).

O grão estudado mostra que em temperatura ambiente as inclusões são essencialmente carbônicas monofásicas (Fotomicrografia 8.1, 8.2 e Fotomicrografia 1 – Anexo B.). Essas inclusões apresentam $T_i\text{CO}_2$ variando entre $-57,4$ e $-57,9$ °C. Já os valores de $T_h\text{CO}_2$ acham-se mais concentrados ao redor de $-18,00$ °C (Figura 8.1 e Figura 8.2).

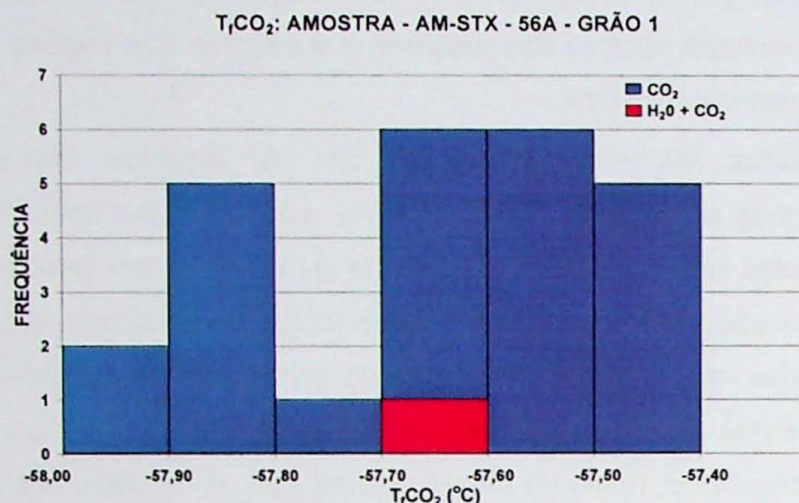


Figura 8.1 – Histograma de frequência de medidas de $T_i\text{CO}_2$ nas inclusões fluidas do grão 1.

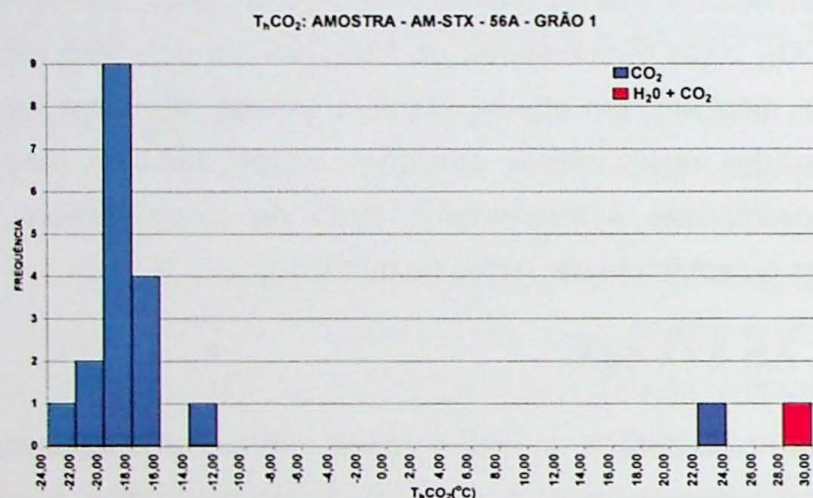


Figura 8.2 – Histograma de frequência de medidas de $T_h\text{CO}_2$ em inclusões do grão 1.

A partir destes dados, utilizando-se o programa BULK, do pacote de programas *Fluids* de Bakker (2003), foram calculados os valores de densidades das inclusões carbônicas, cujos valores estão concentrados entre $1,02$ e $1,04$ g/cm³ (Figura 8.3).

Neste grão foi observada somente uma inclusão aquo-carbônica, que pode ser vista na Fotomicrografia 1 – Anexo B.

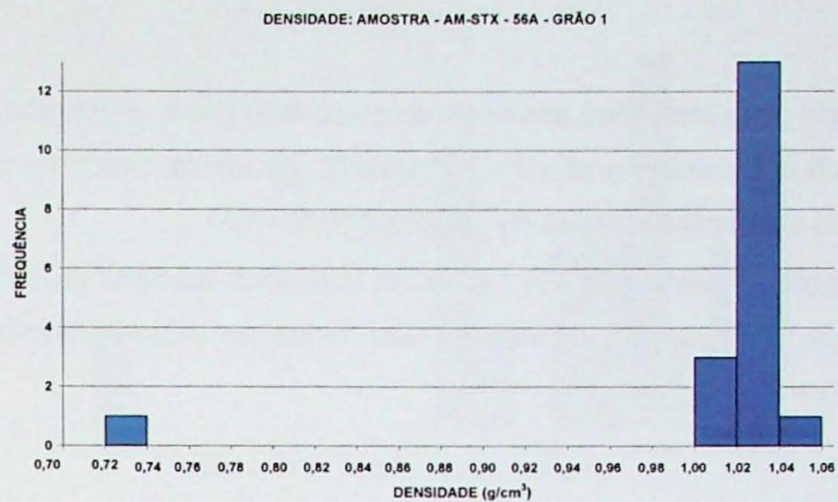
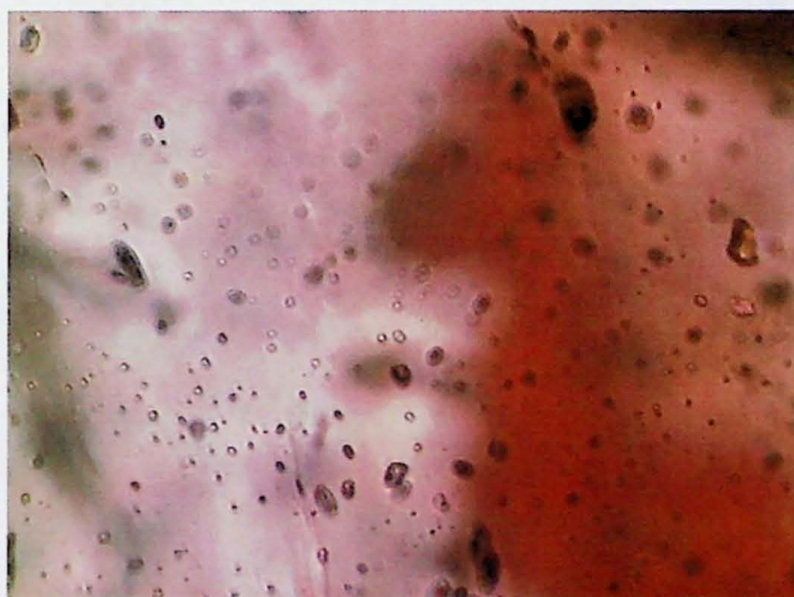


Figura 8.3 – Histograma de frequência das densidades calculadas a partir das inclusões do grão 1.



Fotomicrografia 8.1 – Grão 1.



Fotomicrografia 8.2 – Diversas inclusões no mesmo campo, essencialmente carbônicas, distribuídas aleatoriamente no Grão 1.

8.1.2 Grão 2

Ocorrem neste grão inclusões aquosas, aquo-carbônicas e, principalmente, carbônicas (Fotomicrografia 8.6 e Fotomicrografia 2 e 3 Anexo B); os dados obtidos a partir dos estudos microtermométricos são apresentados na Tabela 2 (Anexo A).

Os valores obtidos para o $T_f\text{CO}_2$, para as inclusões carbônicas estão concentrados entre -56,6 e -56,8 °C, enquanto os valores das inclusões aquo-carbônicas encontram-se situados num intervalo mais amplo.

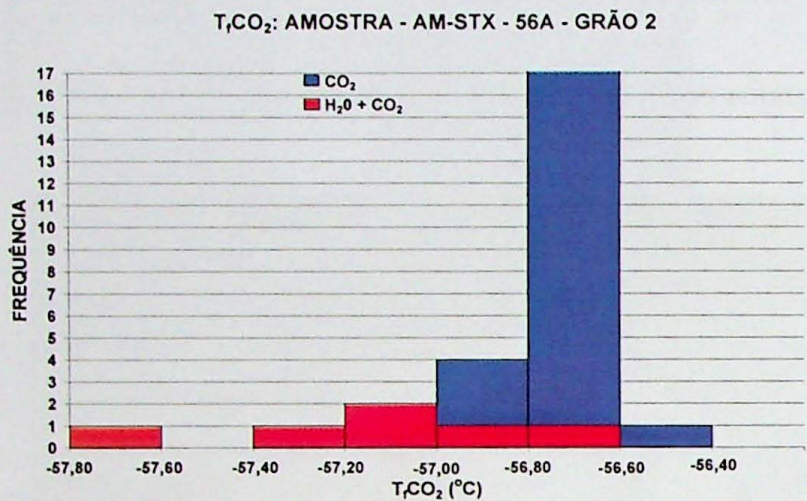


Figura 8.4 – Histograma de frequência de medidas de $T_f\text{CO}_2$ nas inclusões fluidas do grão 2.

Os dados de $T_h\text{CO}_2$ apresentam grande variação de valores, conforme pode ser observado no histograma da Figura 8.5.

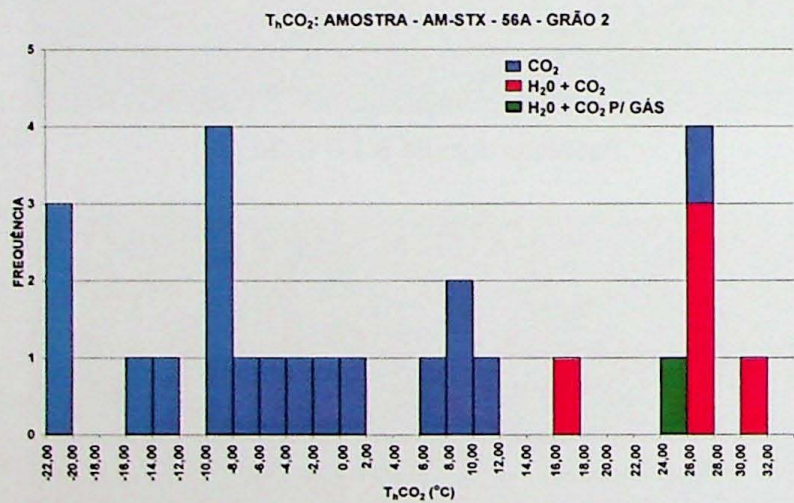


Figura 8.5 – histograma de frequência de medidas de $T_h\text{CO}_2$ em inclusões do grão 2.

A partir destes dados, e utilizando o programa BULK do pacote *Fluids* de Bakker (2003), foram calculados os valores de densidades das inclusões carbônicas, cujo intervalo varia principalmente entre 0,86 e 1,04 g/cm³.

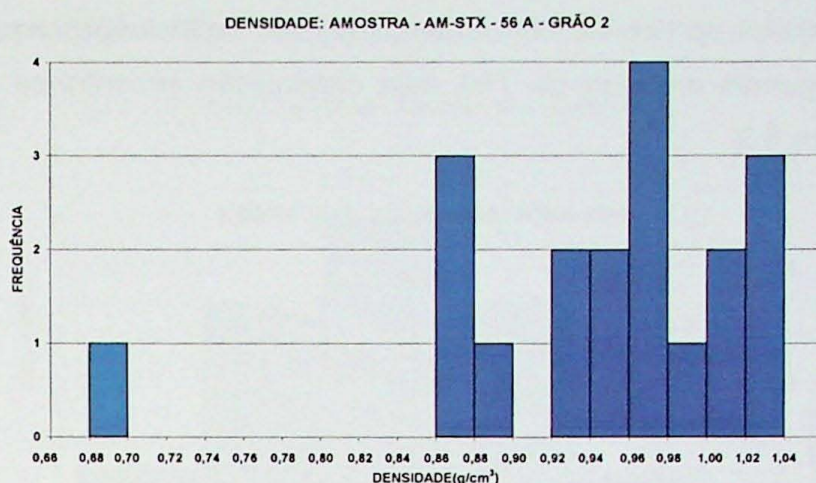


Figura 8.6 – Histograma de frequência das densidades calculadas das inclusões do grão 2.

Os dados de Tfg e TE, obtidos a partir das inclusões aquosas e aquo-carbônicas, apresentam grandes variações. Observa-se, no entanto, que essas variações são menores quando essas inclusões são consideradas separadamente (Figura 8.7 e 8.8), havendo clara distinção entre dois tipos de inclusões.

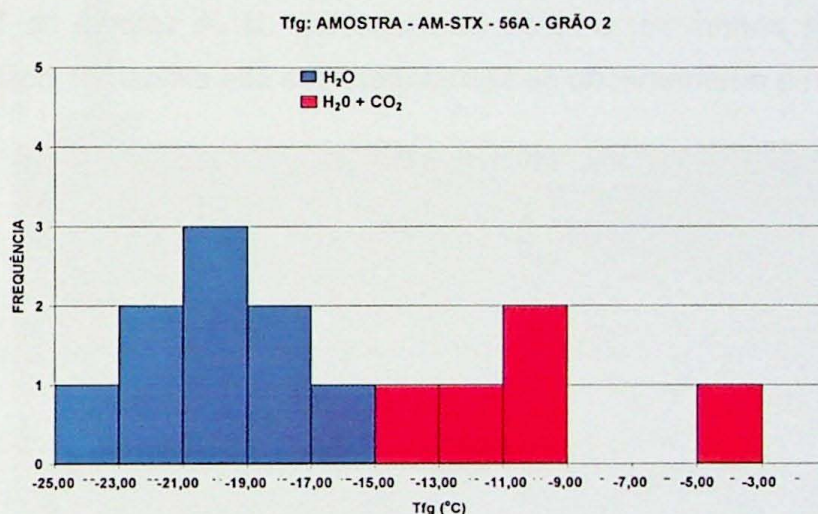


Figura 8.7 – histograma de frequência das medidas de Tfg das inclusões do grão 2.

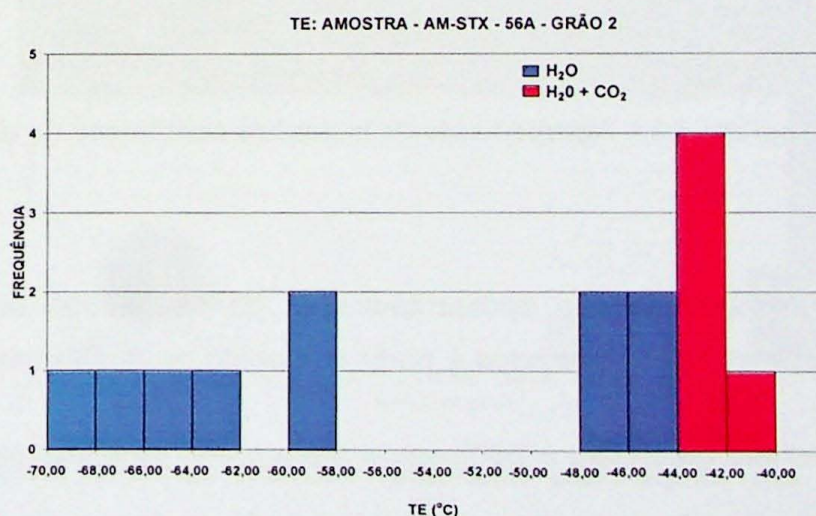


Figura 8.8 – Histograma de frequência das temperaturas do TE das inclusões do grão 2.

Apesar da amostra apresentar um número reduzido de inclusões aquo-carbônicas, foi possível realizar algumas medidas de T_{fcl} , cuja distribuição encontra-se representada no histograma da Figura 8.9.

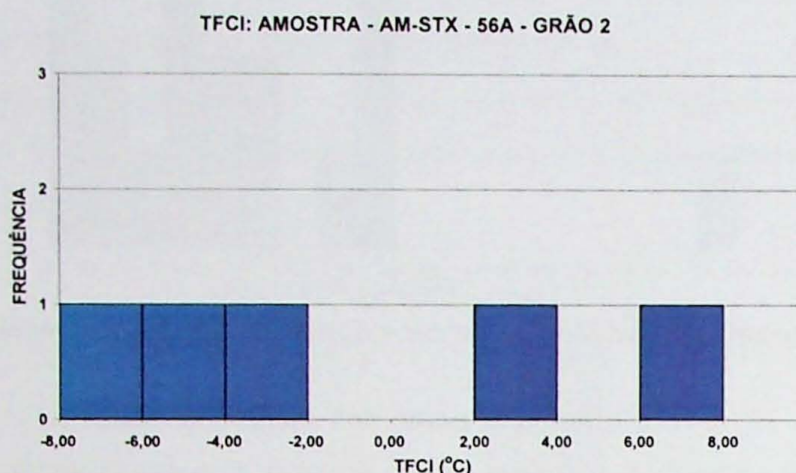


Figura 8.9 – Histograma de frequência das T_{fcl} das inclusões do grão 2.

Os valores de TE são indicativos de sistemas compostos por $H_2O + NaCl$, além de íons bivalentes que podem ser o cálcio ou magnésio. Já os valores de T_{fg} das inclusões aquosas permitiram a determinação de salinidades, que são discutidas posteriormente.



Fotomicrografia 8.3 – Agrupamento de inclusões carbônicas no grão 2.

8.1.3 Grão 3

Na Tabela 3 (Anexo A) são apresentados os dados obtidos por intermédio de microtermometria e de cálculos realizados a partir do pacote de programas *Fluids* de Baker (2003).

Nesse grão, em temperatura ambiente, ocorrem somente inclusões carbônicas monofásicas (Fotomicrografia 8.8, 8.9 e Fotomicrografia 4 Anexo B). Essas inclusões apresentam T_{fCO_2} que variam entre $-57,0$ e $-57,6$ °C. Já os valores de T_{hCO_2} estão mais

concentrados entre -18,00 e -20,00 °C (Figura 8.10 e 8.11).

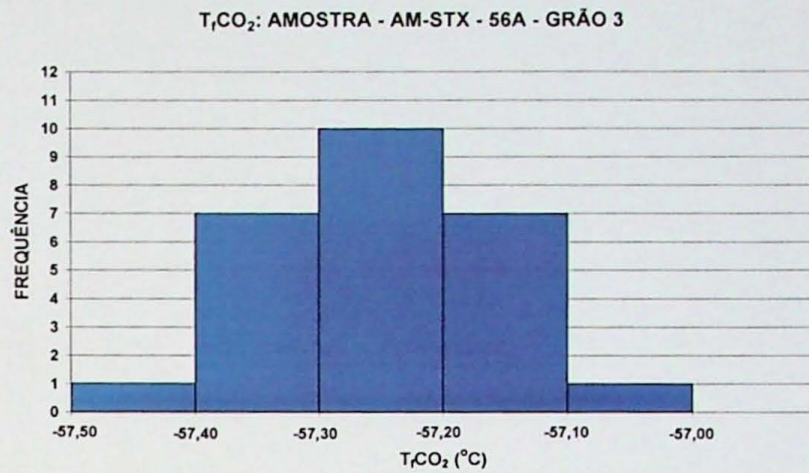


Figura 8.10 – Histograma de frequência de medidas de T_fCO₂ nas inclusões fluidas do grão 3.

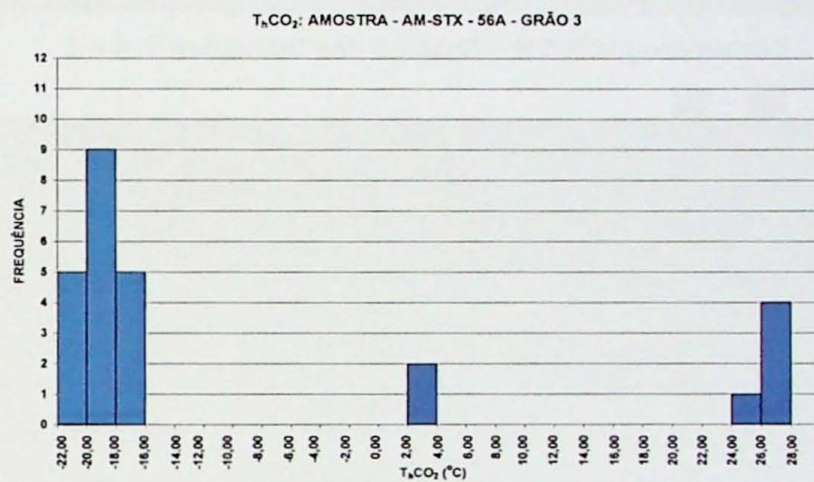


Figura 8.11 – Histograma de frequência de medidas de T_sCO₂ em inclusões do grão 3.

A partir destes dados, utilizando o programa BULK (Bakker 2003), foram calculados os valores de densidades, que se acham concentrados entre 1,02 e 1,04 g/cm³ (Figura 8.12).

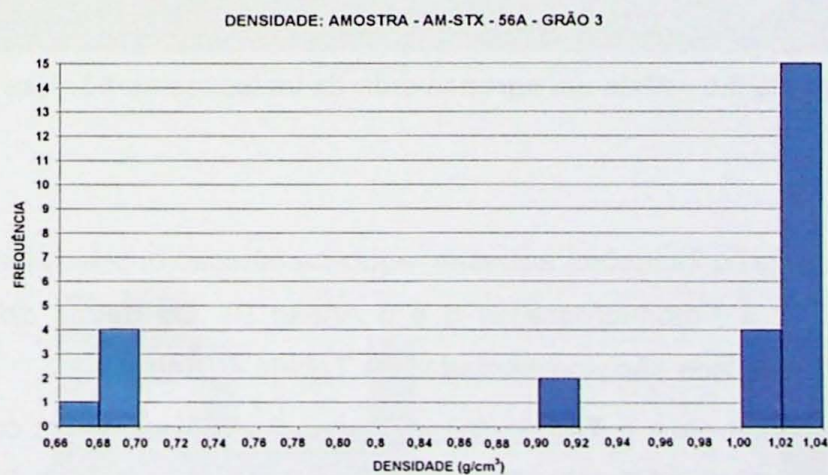
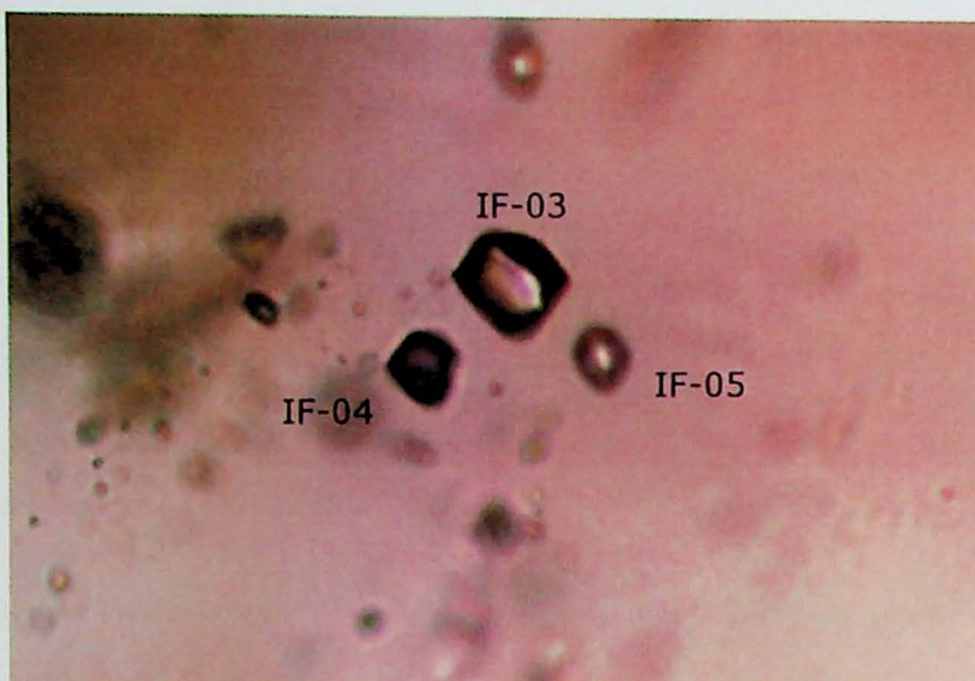


Figura 8.12 – Histograma de frequência das densidades calculadas das inclusões do grão 3.



Fotomicrografia 8.4 – Detalhe das inclusões 3, 4 e 5.



Fotomicrografia 8.5 – Mais um agrupamento de inclusões carbônicas no grão 3.

8.1.4 Grão 4

Ocorrem neste grão inclusões aquosas, aquo-carbônicas e, principalmente, carbônicas (Fotomicrografia 8.12 e Fotomicrografias 5 e 6 Anexo B). Os dados obtidos a partir dos estudos microtermométricos são apresentados na Tabela 4 (Anexo A).

Os valores obtidos para o $T_f\text{CO}_2$ das inclusões carbônicas estão concentrados entre temperaturas de $-56,70$ e $56,6$ °C. Por outro lado, os valores de $T_h\text{CO}_2$ estão, na sua maioria, no intervalo de temperatura de $16,0$ e $30,0$ °C, tendo apenas um dado no intervalo de -8 e -10 °C (Figura 8.13 e 8.14).

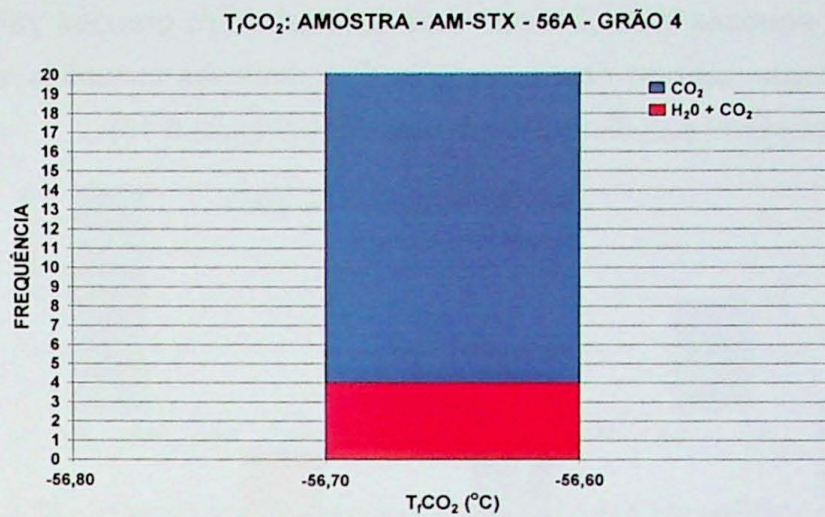


Figura 8.13 – Histograma de frequência de medidas de T_iCO₂ nas inclusões fluidas do grão 4.

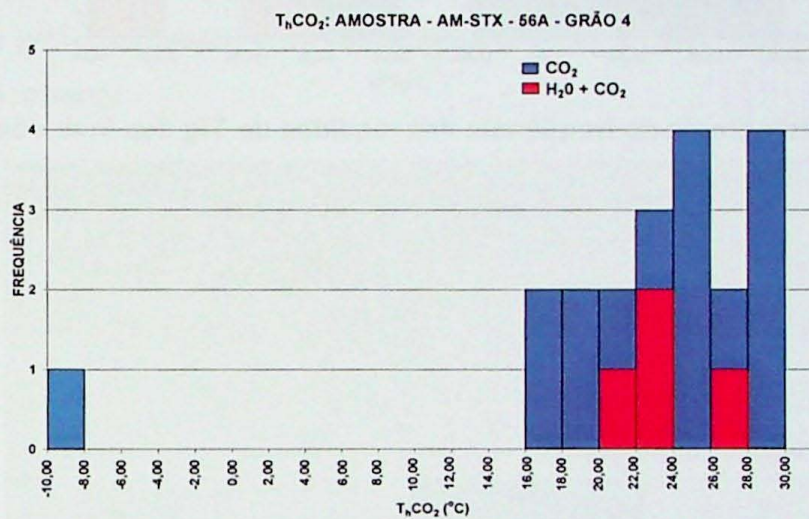


Figura 8.14 – Histograma de frequência de medidas de T_hCO₂ em inclusões do grão 4.

A partir destes dados, e utilizando o programa BULK do pacote de Bakker (2003), foram calculados as densidades das inclusões carbônicas, cujos valores variam, principalmente, entre 0,64 e 0,80 g/cm³ (Figura 8.15).

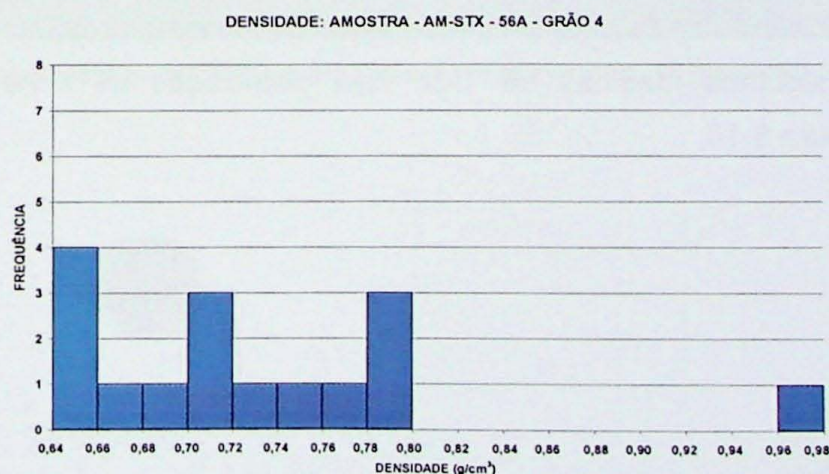


Figura 8.15 – Histograma de frequência das densidades calculadas das inclusões carbônicas do grão 4.

As inclusões aquosas e aquo-carbônicas apresentaram grandes variações em Tfg e TE. De forma análoga ao que ocorre no grão 2, quando as inclusões são consideradas separadamente, é possível sua distinção em dois tipos (Figura 8.15).

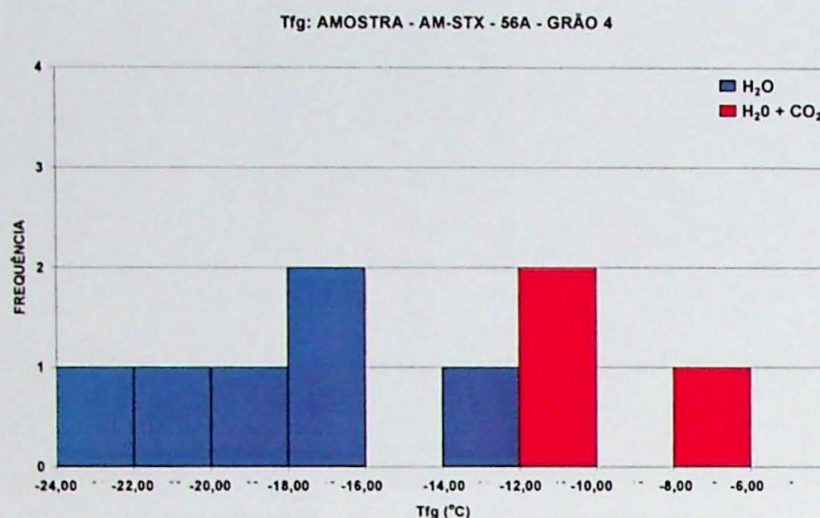


Figura 8.16 – Histograma de frequência das medidas de Tfg das inclusões do grão 4.

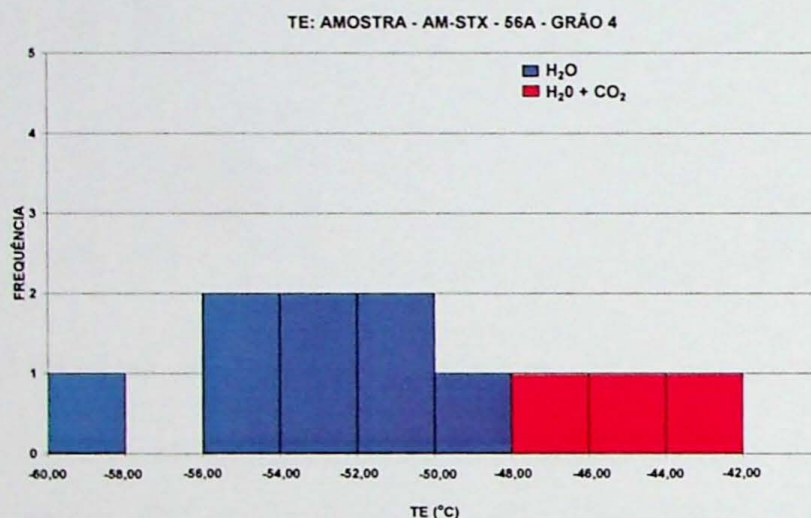


Figura 8.17 – Histograma de frequência das TE das inclusões do grão 4.

Apesar do número reduzido de inclusões aquo-carbônicas, apresentadas pelo grão 4, foram possíveis algumas medidas de TfCl, cuja distribuição se acha apresentada no histograma da Figura 8.18.

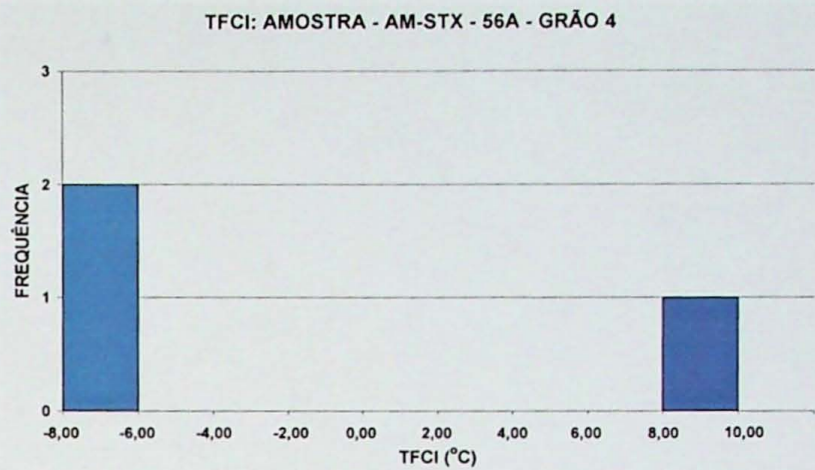
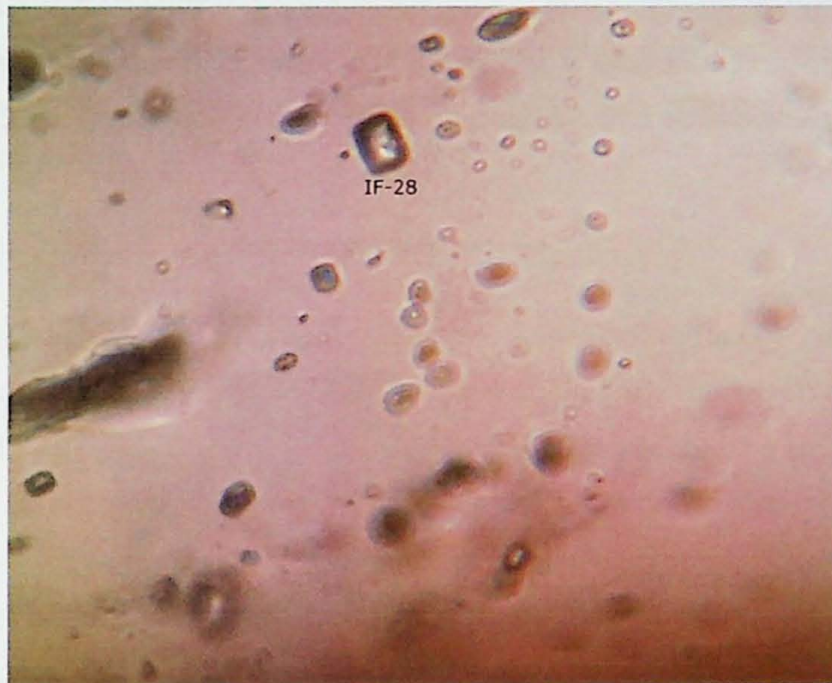


Figura 8.18 – Histograma de frequência das TfCI das inclusões do grão 4.

Do mesmo modo que no grão 2, os valores de TE são indicativos de soluções aquosas com sódio, cálcio e/ou magnésio, e as salinidades obtidas a partir dos valores de Tfg serão discutidas posteriormente.



Fotomicrografia 8.6 – Idem grão 4, com detalhe da inclusão 28.



Fotomicrografia 8.7 – Idem grão 4, com detalhe das inclusões 29 e 30.

Com a utilização dos programas Bulk e Q2 dos pacotes *Fluids* e *Clathrates* de Bakker (1997, 2003) foram calculadas também as densidades das inclusões aquosas e aquo-carbônicas, que são apresentadas a seguir. Os histogramas (Figura 8.19 e 8.20) mostram conjuntamente as densidades calculadas para as inclusões aquosas e aquo-carbônicas dos Grãos 1, 2 e 4,.

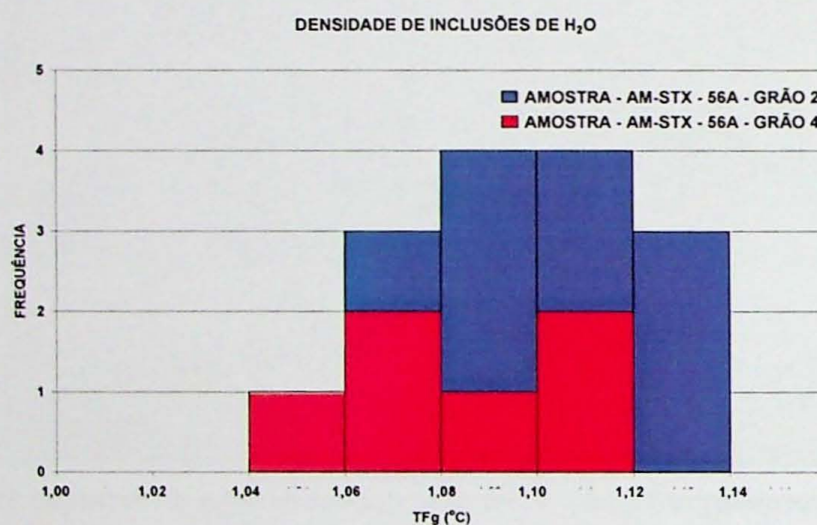


Figura 8.19 – Histograma de freqüência das densidades calculadas das inclusões aquosas.

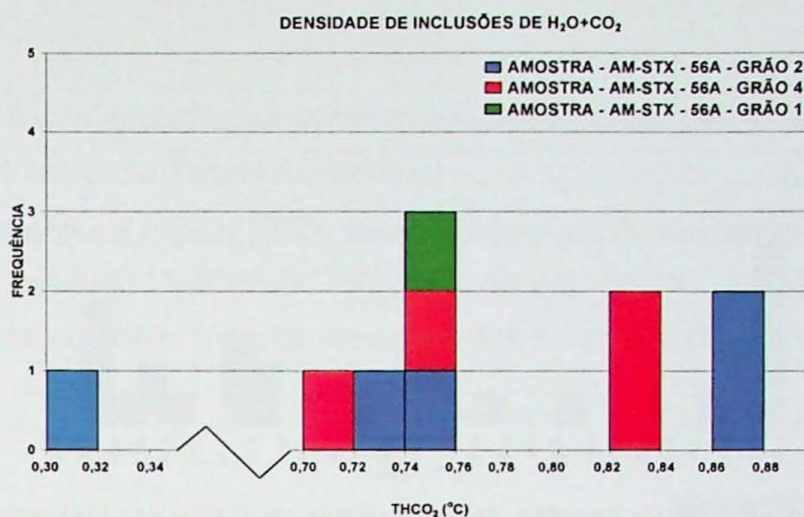


Figura 8.20 – Histograma de frequência das densidades calculadas das inclusões aquo-carbônicas.

8.2 AMOSTRA AM-STX-56C

A segunda amostra (AM-S TX-56C), com corte perpendicular à foliação e a lineação de estiramento mineral, embora não tenha sido considerada adequada para a realização de medidas microtermométricas, foram obtidos dados de dois grãos, cujos resultados são apresentados a seguir:

8.2.1 Grão 1

Nesse grão foram encontradas inclusões essencialmente carbônicas; os dados microtermométricos e resultados obtidos encontram-se na Tabela 5 (Anexo A).

Nesse grão foram observadas principalmente inclusões carbônicas, dispostas isoladamente no interior do cristal. Ocorrem, também, segundo trilhas intragranulares junto às inclusões aquosas, porém não foram efetuadas medidas (Fotomicrografia 8.8).

Os valores obtidos para o $T_f\text{CO}_2$ das inclusões carbônicas estão concentrados, principalmente, entre $-56,6$ e $-57,0$ °C. Já os valores de $T_h\text{CO}_2$ apresentam grande variação, situando-se entre $-32,0$ e $30,0$ °C (Figura 8.21 e 8.22).

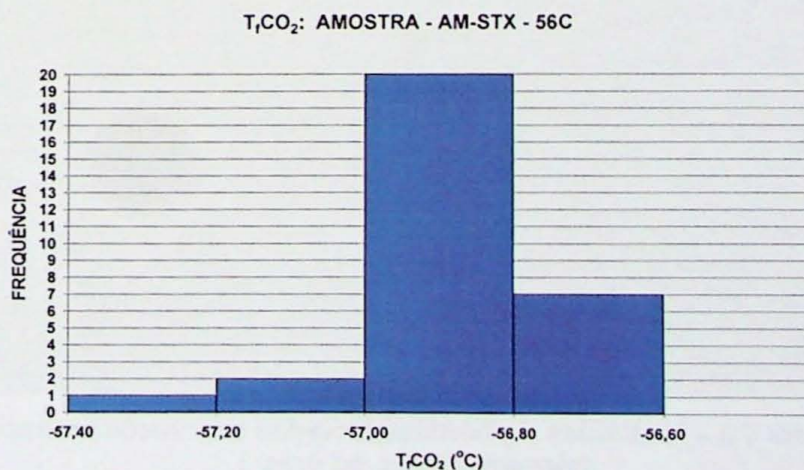


Figura 8.21 – Histograma de frequência de medidas de $T_f\text{CO}_2$ nas inclusões fluidas do grão 1.

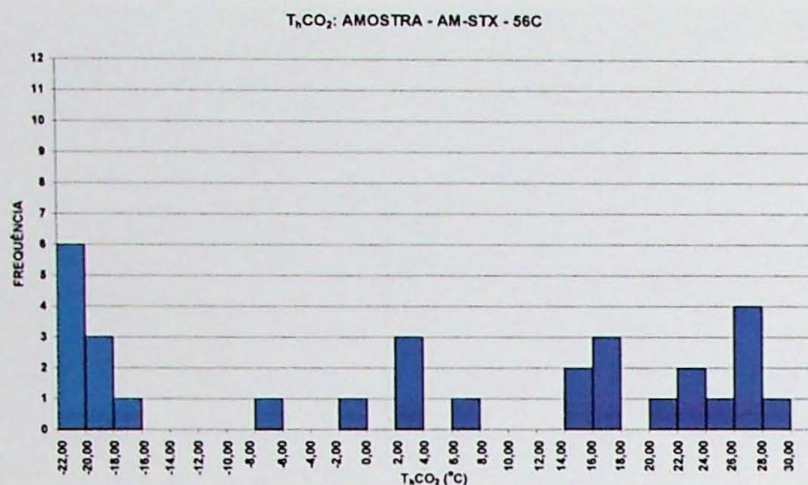


Figura 8.22 – Histograma de frequência de medidas de T_hCO₂ em inclusões do grão 1.

A partir destes dados, e utilizando o programa BULK de Bakker (2003), foram calculados as densidades, cujos valores variam entre 0,60 e 1,04 g/cm³ (Figura 8.23).

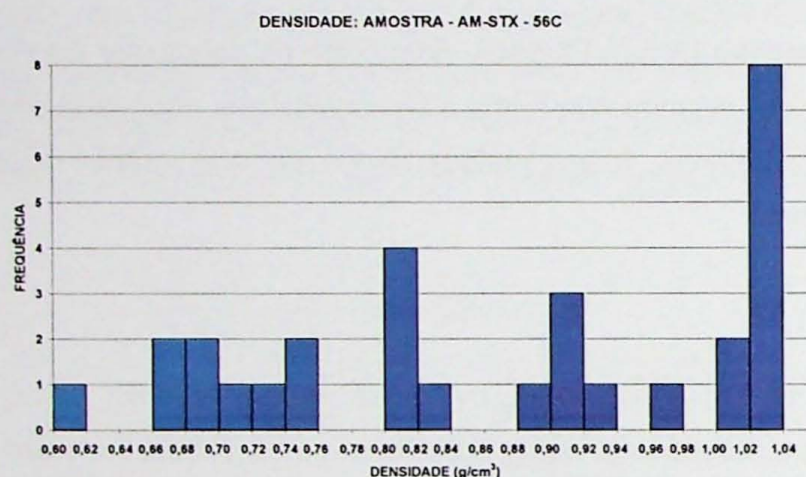
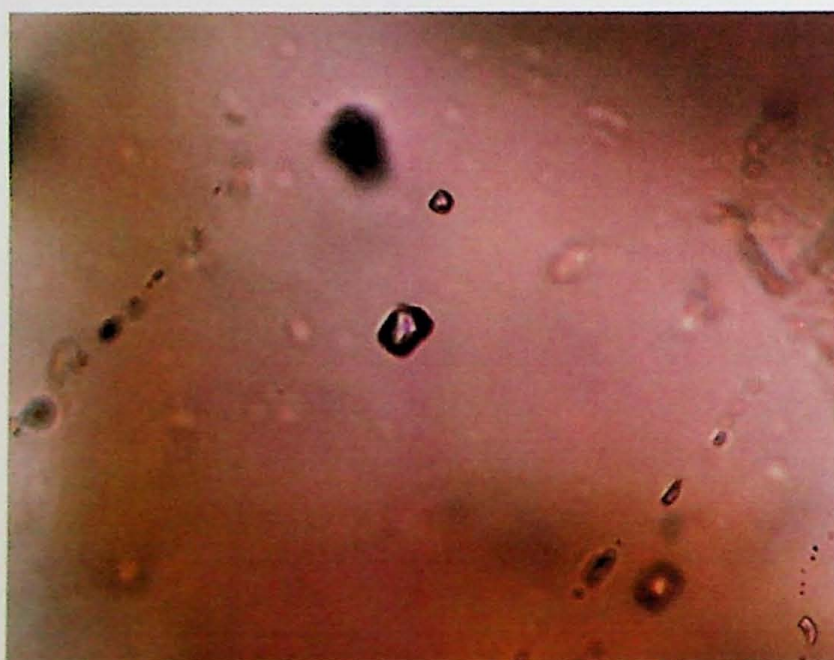


Figura 8.23 – Histograma de frequência das densidades calculadas das inclusões do grão 1.



Fotomicrografia 8.8 – Inclusões carbônicas isoladas e inclusões compondo trilhas intragranulares no grão 1.

8.2.2 Grão 2

Neste grão foram encontradas somente inclusões carbônicas, cujos dados obtidos e calculados encontram-se na Tabela 6 (Anexo A)

Os valores obtidos para o $T_f\text{CO}_2$ das inclusões carbônicas estão distribuídos entre -57,0 e -56,6 °C, havendo uma maior concentração em -56,6°C. Já os valores de $T_h\text{CO}_2$ apresentam grande variação, situando-se entre -19,6 e -10,0 °C (Figura 8.24 e 8.25).

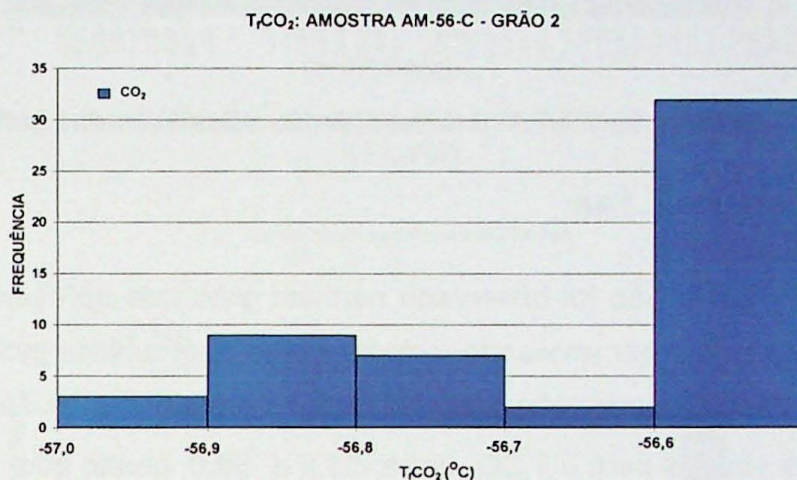


Figura 8.24 – Histograma de frequência de medidas de $T_f\text{CO}_2$ nas inclusões fluidas do grão 2.

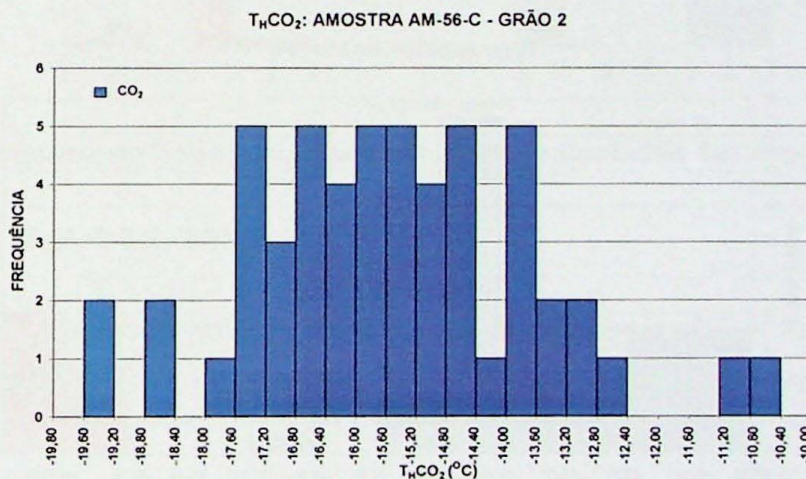


Figura 8.25 – Histograma de frequência de medidas de $T_h\text{CO}_2$ em inclusões do grão 2.

As densidades calculadas a partir do programa BULK de Bakker (2003) apresentam valores no intervalo de 0,99 e 1,04 g/cm³ (Figura 8.26).

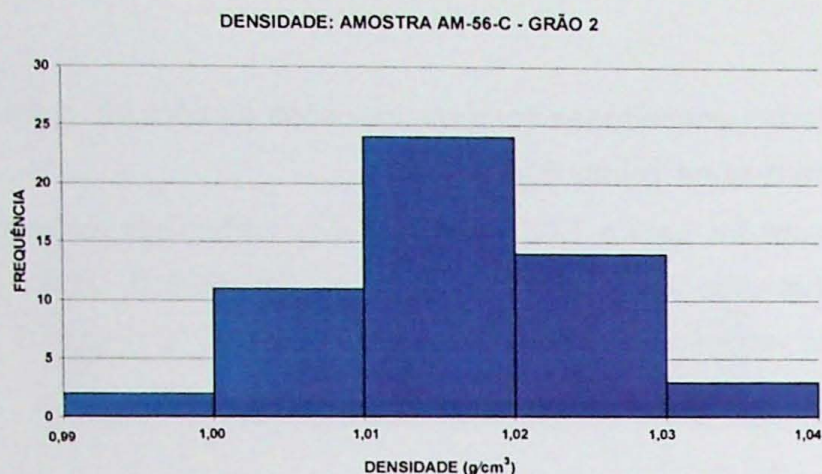


Figura 8.26 – Histograma de frequência das densidades calculadas das inclusões do grão 2.

8.3 AMOSTRA AM-STX-79B

Como nesta amostra não foi observado nenhum grão que apresentasse um número suficiente de inclusões para ser analisado, selecionou-se para análise inclusões isoladas de diversos grãos. Os dados tratados são apresentados conjuntamente na Tabela 7 (Anexo A).

Foram obtidos valores para o $T_f\text{CO}_2$ entre -56,8 e -58,0, sendo que, nas inclusões que houve a homogeneização do gás, as temperaturas são mais elevadas e aproximam-se do CO_2 puro (Figura 8.27).

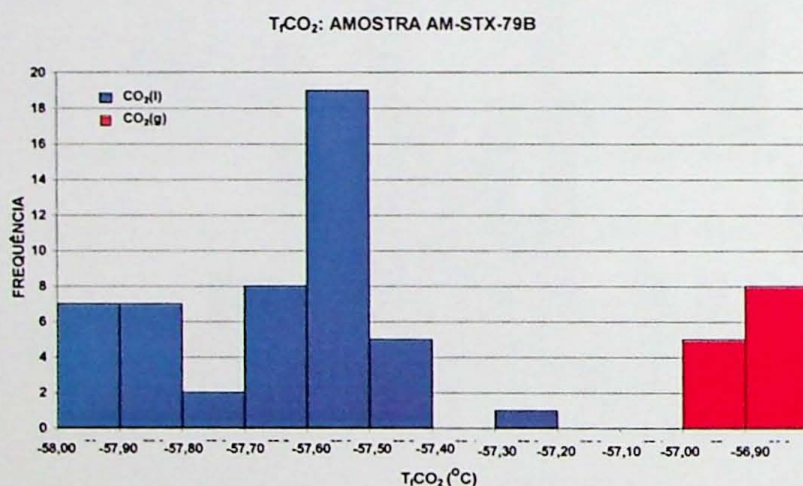


Figura 8.27 – Histograma de frequência de medidas de $T_f\text{CO}_2$ nas inclusões fluidas da amostra AM-STX-79B.

Os valores de $T_h\text{CO}_2$ apresentam grande variação, com as inclusões que sofreram homogeneização para o líquido apresentam os intervalos de valores muito distintos daqueles de menores densidades que sofreram homogeneização para o gás, conforme pode ser observado na Figura 8.28. Esta mesma separação pode ser observada nos dados de densidades, calculados a partir do programa BULK de Bakker (2003), conforme pode ser observado na Figura 8.29.

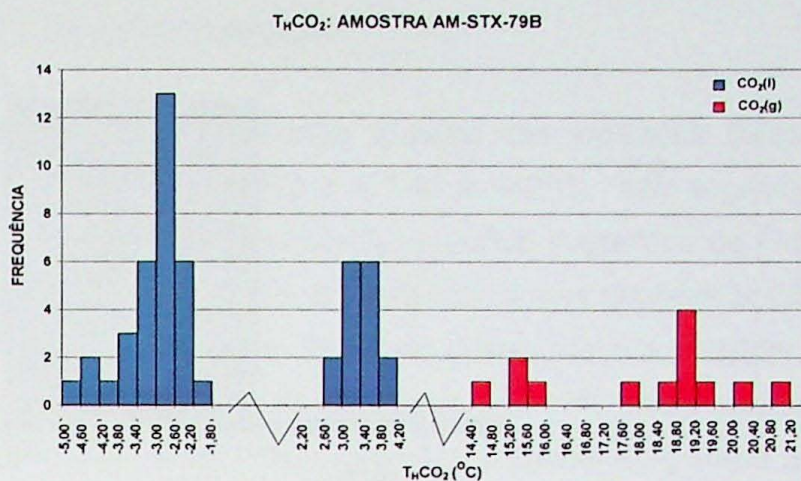


Figura 8.28 – Histograma de freqüência de medidas de T_hCO₂ em inclusões da amostra AM-STX-79B.

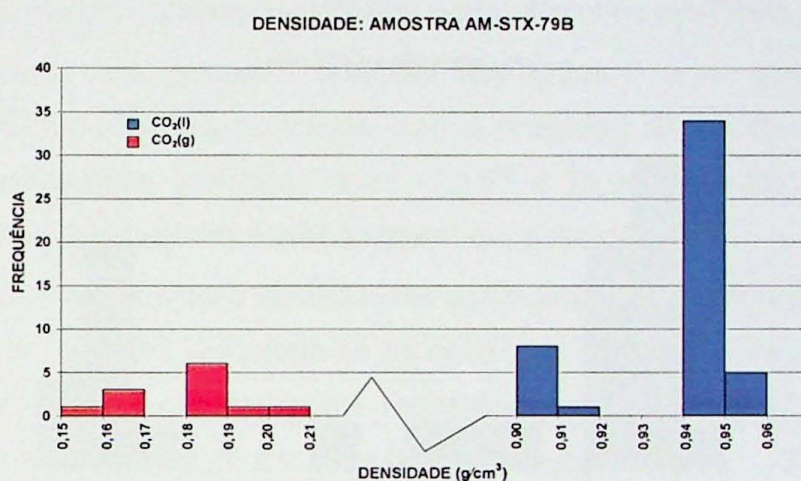


Figura 8.29 – Histograma de freqüência das densidades calculadas das amostra AM-STX- 79B.

8.4 AMOSTRA AM-STX-105A

Assim como na amostra anterior, os dados de inclusões carbônicas de diversos grãos desta amostra (AM-STX-105 A) são apresentados e tratados em conjunto, Tabela 8 (Anexo A).

Os valores obtidos para o T_fCO₂ das inclusões carbônicas encontram-se situados principalmente ao redor de -56,6 °C, enquanto os valores de T_hCO₂ apresentam grande variação, situando-se entre -10,0 e 20,0 °C.(Figura 8.30 e 8.31).

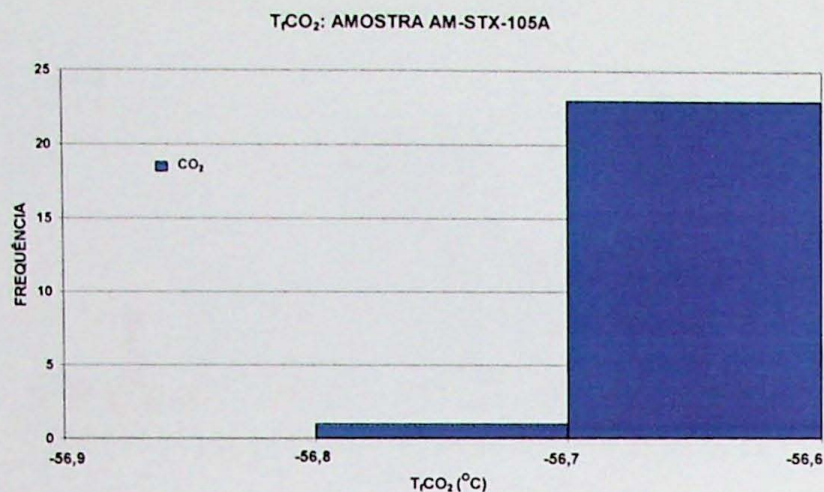


Figura 8.30 – Histograma de frequência de medidas de T_fCO₂ nas inclusões fluidas amostra AM-STX-105A.

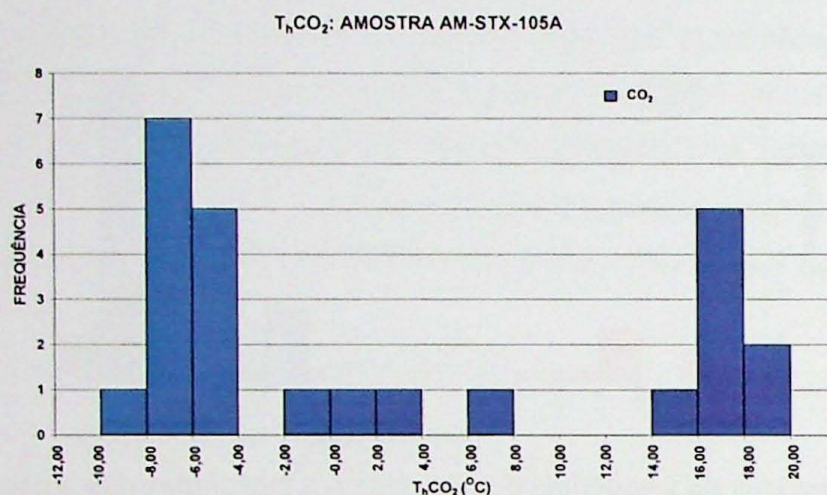


Figura 8.31 – Histograma de frequência de medidas de T_hCO₂ em inclusões amostra AM-STX-105A.

As densidades calculadas, a partir do programa BULK de Bakker (2003), apresentam valores que variam entre 0,78 e 1,00 g/cm³.

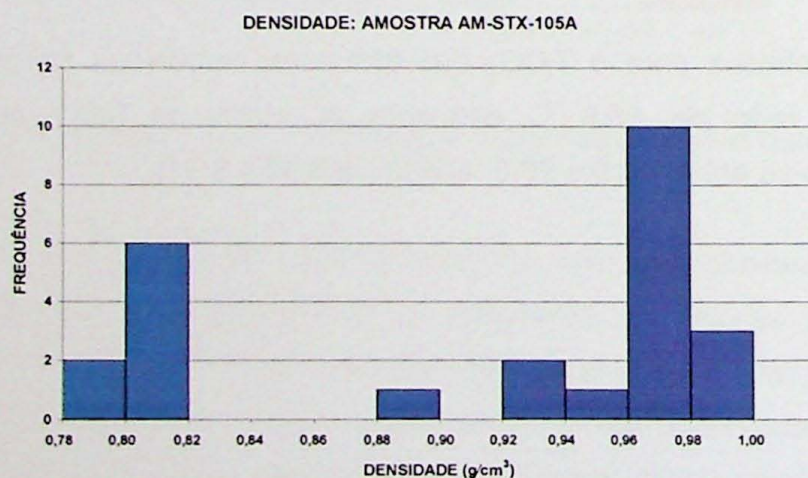


Figura 8.32 – Histograma de frequência das densidades calculadas da amostra AM-STX-105A.

9 DISCUSSÃO DOS DADOS

As temperaturas eutéticas obtidas a partir das inclusões fluidas aquo-carbônicas presentes nos grãos 2 (-44 a -40°C) e 4 (-48 a -42°C) são sugestivas de um sistema aquoso contendo NaCl + CaCl₂ e/ou MgCl₂, segundo sugestões de Goldstein & Reynolds (1994) e dados de Davis *et al.* (1990), embora outros íons também possam estar presentes e mascarar os valores de TE obtidos. Deve ser destacado que Roedder (1984) e Goldstein & Reynolds (1994) sugerem que eutéticos abaixo de -40°C são indicativos da presença de íons bivalentes, como Ca²⁺ e Mg²⁺. Nas inclusões aquosas dos grãos 2 e 4 da amostra AM-STX-56A, as temperaturas eutéticas variam de -70 a -58°C e de -60 a -48°C, respectivamente, sugerindo ou a adição de outros íons, como, por exemplo o Al³⁺, ou mesmo a metaestabilidade do sistema anterior, como discutido em Davis *et al.* (1990).

As T_{fg} medidas nas inclusões aquosas dos grãos 2 e 4, permitiram determinar salinidades a partir de cálculos realizados com o programa BULK de Bakker (2003). Os valores obtidos apresentam variações entre 20,57 e 25,30% (Grão 2) e entre 20,24 e 24,91% (Grão 4), em equivalentes à porcentagem em peso do NaCl.

Apesar do pequeno número de inclusões aquo-carbônicas nos grãos 2 e 4, foi obtida a salinidade a partir das T_{fCl}, utilizando-se as equações de estado presentes no programa Q2 de Bakker (2003), cujos valores variam, respectivamente, entre 4,97 a 25,87% (Grão 2) e entre 2,92 e de 27,83% (Grão 4), em peso do NaCl equivalente.

Os valores de T_{fCO₂} inferiores à -56,6°C (ponto triplo do CO₂ puro), existentes em muitas amostras, são indicativos da presença de outros voláteis associados a esse componente, os quais podem ser obtidos apenas com auxílio de espectroscopia Raman.

A partir dos dados aqui apresentados foram confeccionados, para cada grão estudado, gráficos de T_{fCO₂} X T_{hCO₂}, que serão apresentados a seguir (Figura 9.1 a 9.8). Esses diagramas são importantes, pois uma relação de dependência entre T_{fCO₂} e T_{hCO₂} mostra o condicionamento dessas temperaturas às composições.

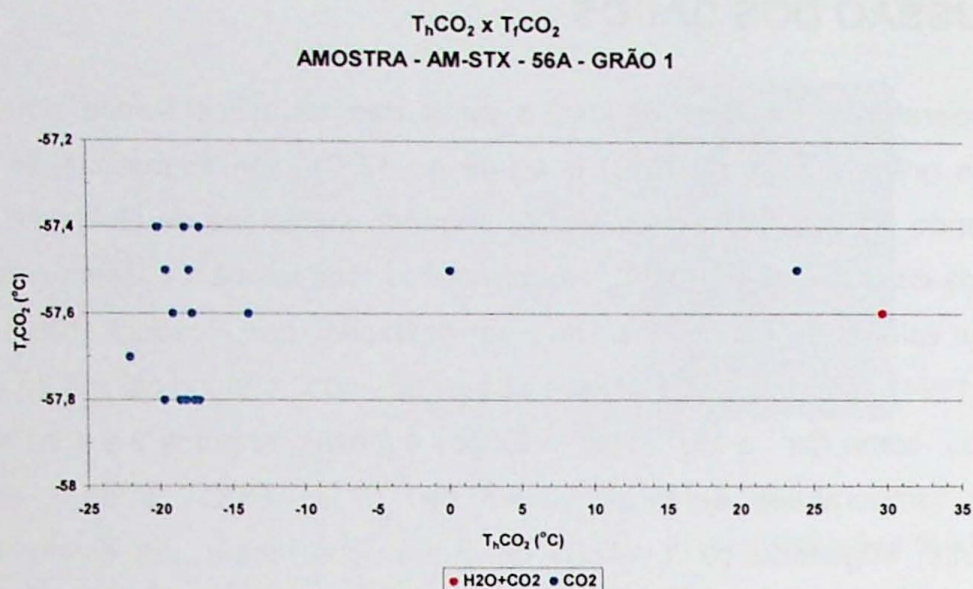


Figura 9.1 – Gráfico $T_fCO_2 \times T_hCO_2$ da amostra AM-STX-56A – Grão 1.

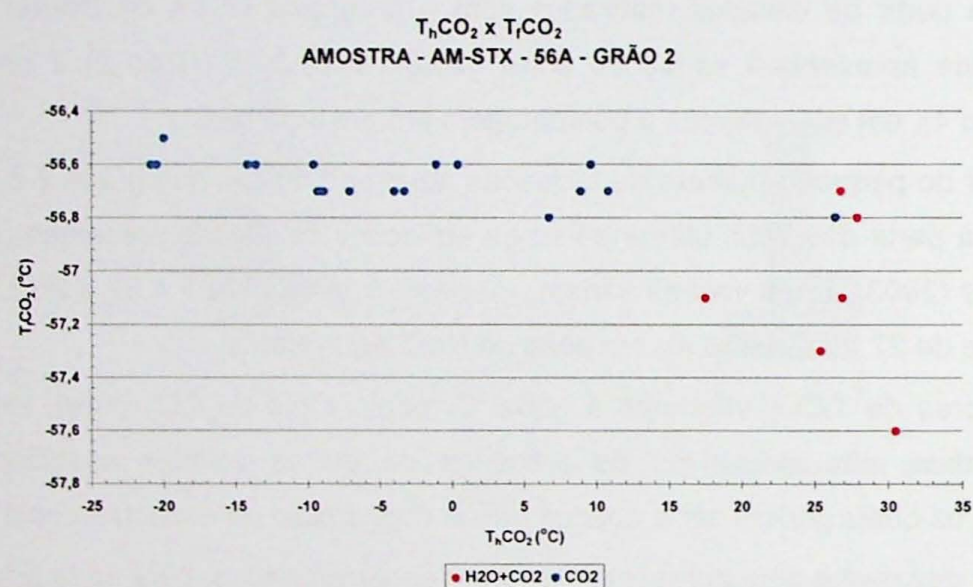


Figura 9.2 – Gráfico $T_fCO_2 \times T_hCO_2$ da amostra AM-STX-56A – Grão 2.

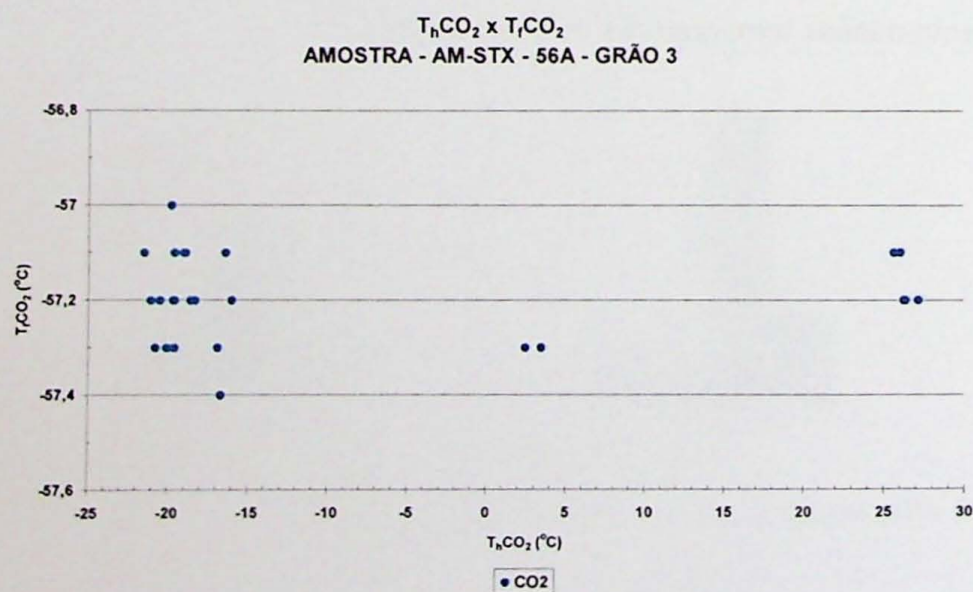


Figura 9.3 – Gráfico $T_fCO_2 \times T_hCO_2$ da amostra AM-STX-56A – Grão 3.

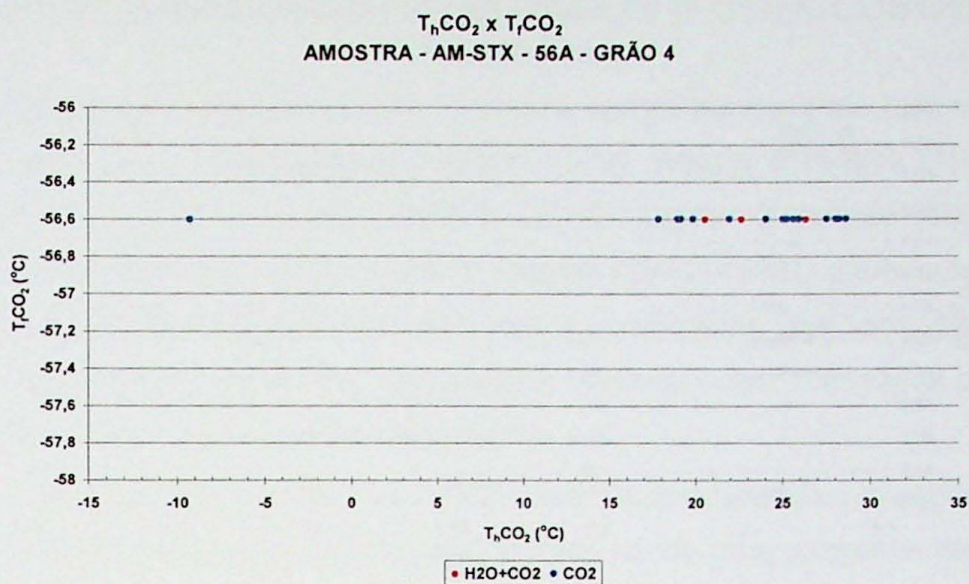


Figura 9.4 – Gráfico $T_f\text{CO}_2 \times T_h\text{CO}_2$ da amostra AM-STX-56A – Grão 4.

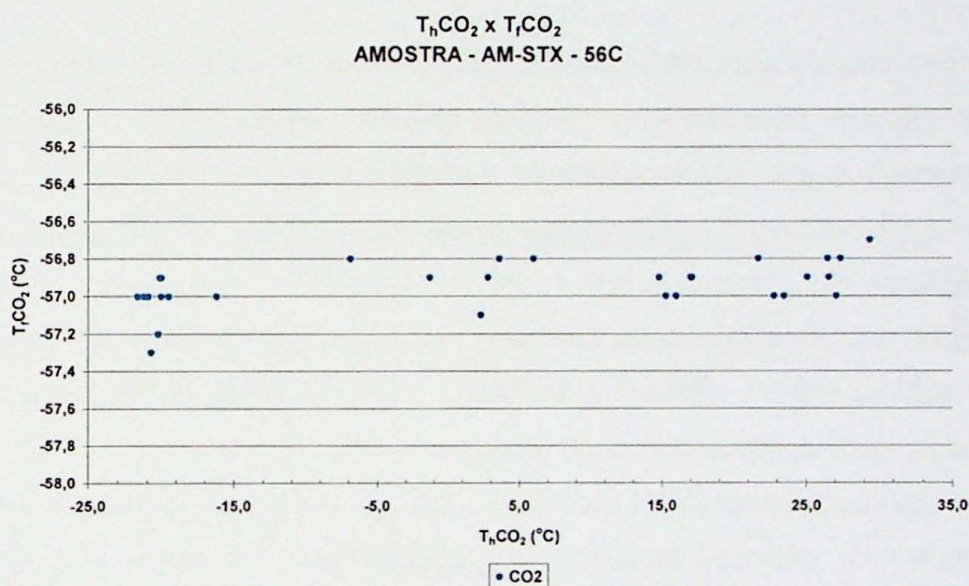


Figura 9.5 – Gráfico $T_f\text{CO}_2 \times T_h\text{CO}_2$ da amostra AM-STX-56C.

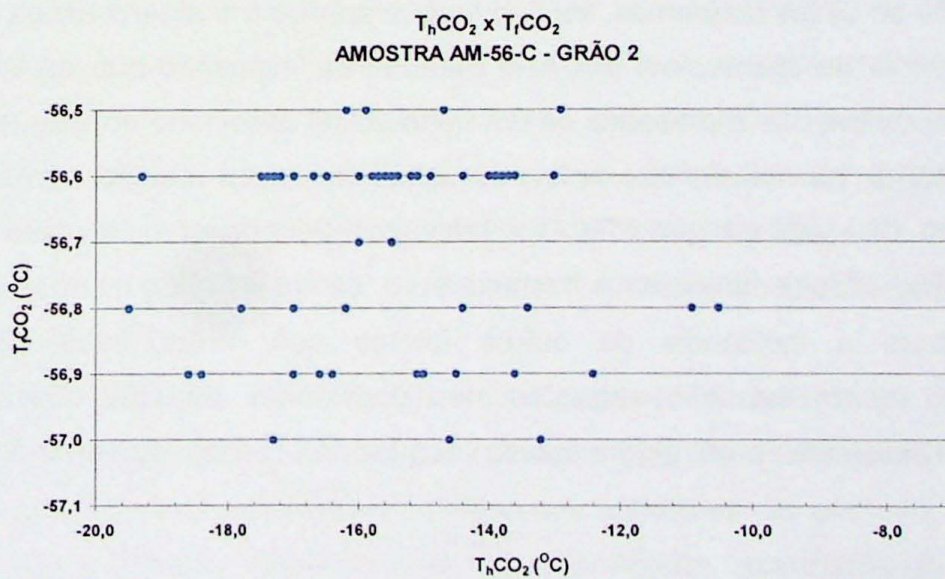


Figura 9.6 – Gráfico $T_f\text{CO}_2 \times T_h\text{CO}_2$ da amostra AM-56C – Grão 2.

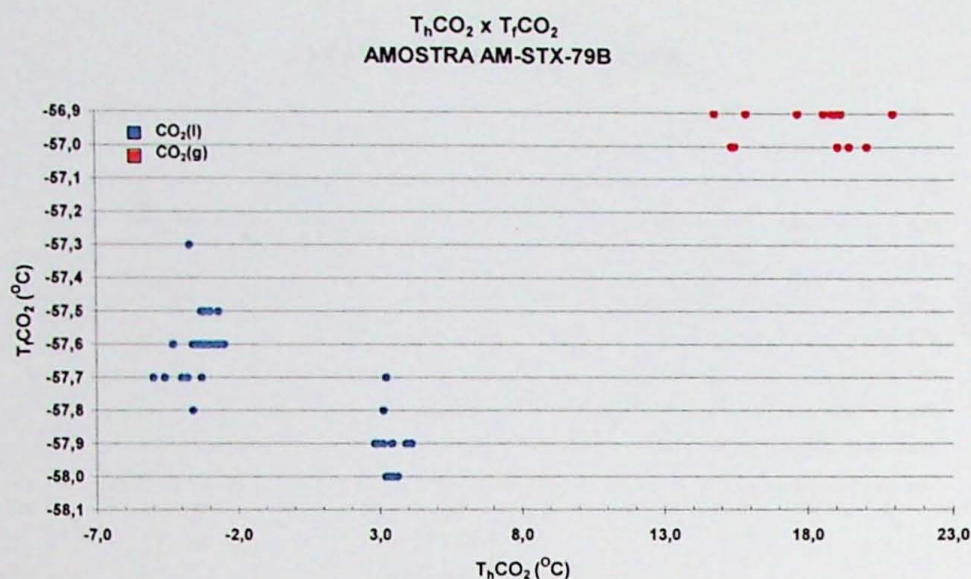


Figura 9.7 – Gráfico $T_f\text{CO}_2 \times T_h\text{CO}_2$ da amostra AM-STX-79B.

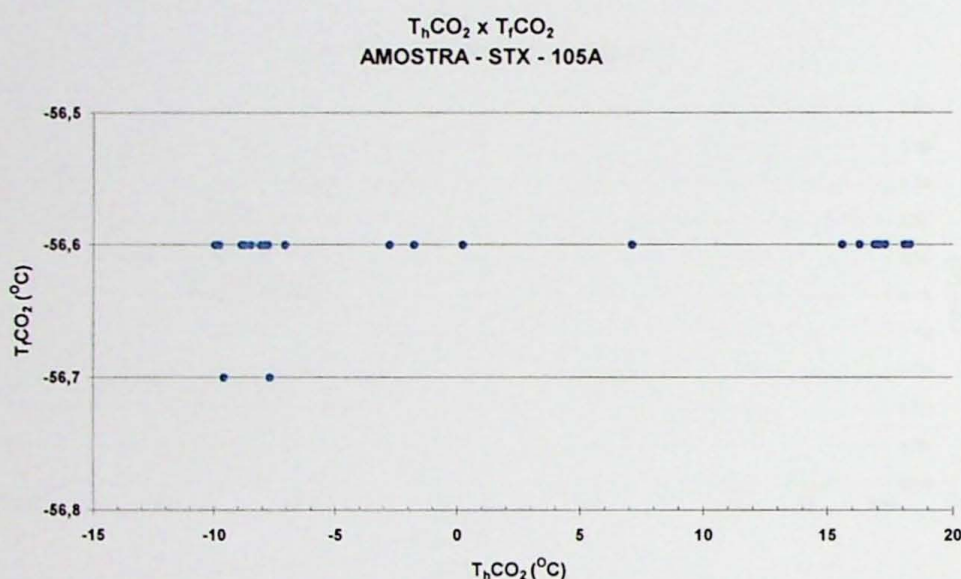


Figura 9.8 – Gráfico $T_f\text{CO}_2 \times T_h\text{CO}_2$ da amostra STX-105A.

Analisando-se esses diagramas, verifica-se que apenas em alguns casos é observada uma leve tendência de decréscimo nos dois parâmetros, indicando que as variações nas $T_h\text{CO}_2$ estão condicionadas à presença de um outro volátil associado ao CO_2 (por exemplo, o CH_4). No entanto, na maioria das amostras estudadas, essa relação não é observada, havendo mesmo situações em que a $T_f\text{CO}_2$ é praticamente constante, às vezes com valores indicativos de que esse componente é bastante puro, sendo a $T_h\text{CO}_2$ muito variável. Essas relações mostram a existência de outros fatores que, adicionados às diferenças composicionais, teriam causado variações nas densidades do CO_2 . Essas variações poderiam ser relacionadas com algum tipo de reequilíbrio ocorrido posterior à formação da rocha.

10 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

As modificações e reequilíbrios de inclusões fluidas previamente formadas têm sido objeto de discussão de vários autores. Kerrich (1976), Wilkins & Barkas (1978), Roedder (1984), Crawford & Hollister (1986), Hollister (1990), Bakker & Jansen (1990) e Bakker (1992), Johnson & Hollister (1995), Vityk & Bodnar (1995, 1998), entre outros, discutem detalhadamente as modificações das características primárias das inclusões fluidas em quartzo, tais como escape de fluidos, crepitação e “necking down”, causadas por processos de deformações dúcteis nos minerais hospedeiros.

Kerrich (1976) e Wilkins & Barkas (1978) mostram que quando o quartzo é submetido a deformações crescentes, as inclusões originais vão sendo progressivamente modificadas, tornando-se cada vez mais importantes os processos de escape de fluidos e “necking down”, podendo inclusive ser eliminadas para os limites dos cristais com a recristalização total.

Muitos destes autores têm demonstrado que as deformações provocam a remoção seletiva da água em inclusões aquocarbônicas, originalmente homogêneas, com o conseqüente enriquecimento nas proporções volumétricas do CO₂ e decréscimo em sua densidade. Kerrich (1976) mostrou que essas deformações provocam uma diminuição no fator de preenchimento das inclusões [$F = V_l / (V_l + V_v)$] e também um acréscimo nas suas temperaturas de homogeneização total, em resposta ao decréscimo nas densidades totais provocado pela saída de parte do fluido. Crawford & Hollister (1986) mostram que a água pode migrar para os limites do cristal quando uma microfratura intercepta a inclusão, causando um acréscimo no volume do CO₂. Hollister (1990) discute o processo de escape seletivo da água causado por modificações posteriores da inclusão, indicando que nesses casos ocorre um reequilíbrio nas suas densidades, em resposta às modificações nas pressões confinantes, e também no enriquecimento em componentes como NaCl e CaCl₂ e, portanto, um acréscimo na salinidade das soluções aquosas. Bakker & Jansen (1990) e Bakker (1992) realizaram estudos sobre reequilíbrios experimentais, considerando diferentes condições de pressão e temperatura, em inclusões fluidas aquocarbônicas sintetizadas em quartzo sob condições hidrotermais. Estes autores demonstraram que, devido ao escape preferencial da água, podem ser geradas inclusões com ampla variedade de composições e densidades a partir de um único fluido original, devido à não uniformidade nos processos de reequilíbrio.

Vityk & Bodnar (1995, 1998) discutem as variações das densidades das inclusões e, portanto, das inclinações das isócoras a partir de experimentos de reequilíbrios de inclusões sintéticas de composição conhecida em diferentes condições de pressão e temperatura. Foram realizados estudos experimentais de reequilíbrios, considerando as seguintes situações:

- Descompressão isotérmica e aquecimento isobárico, que resultam em inclusões cuja pressão interna se torna maior que a pressão confinante, ou seja, há o desenvolvimento de uma sobrepressão interna. Nesses casos, as várias etapas de reequilíbrio consideradas mostraram que ocorre um decréscimo nas densidades das inclusões, implicando num caminho P-T-t no sentido horário.
- Resfriamento isobárico e compressão isotérmica, que resultam em inclusões cuja pressão interna se torna menor que a confinante (subpressão interna). Nesta situação (caminhos P-T-t no sentido anti-horário) ocorre, de modo geral, um acréscimo nas densidades das inclusões reequilibradas. Porém, neste caso, algumas inclusões sofrem um pequeno decréscimo nas densidades.

Os experimentos revelaram que podem ocorrer grandes variações nas texturas das inclusões e, em suas densidades, dependendo do caminho P-T-t seguido pelas mesmas durante a fase de reequilíbrio produzida por processos posteriores ao seu aprisionamento.

Além disso, foi demonstrado que todos os tipos de reequilíbrio podem envolver fraturamento, estiramento e contração das inclusões, dissolução ou recristalização de suas paredes, além de perda preferencial de componentes fluidos ou preenchimento por um fluido de densidade diferente. Conseqüentemente, podem ocorrer mudanças nos volumes das inclusões originais, resultando em grandes variações nas densidades e, portanto, nas inclinações das isócoras.

Tomando como base as discussões anteriores, pode-se definir, nas amostras estudadas, as inclusões aprisionadas durante o pico metamórfico de alto grau e as inclusões formadas e/ou reequilibradas por eventuais processos que ocorreram após o metamorfismo granulítico.

A partir da definição do sistema por meio da composição dos fluidos, fornecida pelas temperaturas de fusão, e dos dados de densidade, obtidos pelas temperaturas de homogeneização, foram construídas as respectivas isócoras (curvas de igual densidades no espaço P-T), relativas às inclusões carbônicas de todas amostras analisadas. Os dados obtidos mostram a ocorrência de inclusões carbônicas primárias com densidades variáveis, desde valores elevados, comuns em rochas granulíticas, até relativamente baixos. No entanto, como uma inclusão pode ter sido aprisionada em qualquer ponto da isócora, cuja inclinação é indicativa de sua densidade, mesmo as inclusões de alta densidade não implicam necessariamente condições de aprisionamento em altas temperaturas e pressões, uma vez que elas podem ter sido formadas em regiões P-T mais baixas das isócoras (Roedder 1984, Shepherd *et. al.* 1985, Goldstein & Reynolds 1994, Santosh *et. al.* 2004).

Assim, para que determinadas inclusões carbônicas representem a fase fluida ambiente, elas devem ter sido aprisionadas na época do equilíbrio do mineral hospedeiro, durante as condições P-T do pico do metamorfismo de alto grau, e suas isócoras, portanto, devem cruzar o campo de pressões e temperaturas definidos pelas associações

paragenéticas e/ou geotermobarométricas. Se as isócoras passarem acima ou abaixo dessa região P-T, pode-se inferir que ocorreram modificações e reequilíbrios provenientes de eventos posteriores, ou seja, uma evolução do fluido no sentido anti-horário, representando assim um resfriamento aproximadamente isobárico, ou, no sentido horário, indicando descompressão aproximadamente isotérmica (Vityk & Bodnar 1995, 1998, Mohan *et al.* 2003, Nogueira *et al.* 2004, Santosh *et al.* 2004, Cuney *et al.* 2007, entre outros).

No presente trabalho foram determinadas as densidades das inclusões carbônicas de cada grão estudado, a partir da utilização do software ISOC, que faz parte do pacote *Fluids* de Bakker (2003), tendo sido construídas as respectivas isócoras nos diagramas P-T. Para a delimitação do campo P-T do metamorfismo e para a interpretação das inclusões fluidas nesse contexto, foram considerados, nesses diagramas, os dados geotermobarométricos disponíveis em estudos anteriores, já publicados sobre a região (Oliveira, 1981; Porcher, 1997).

Estes gráficos são apresentados a seguir:

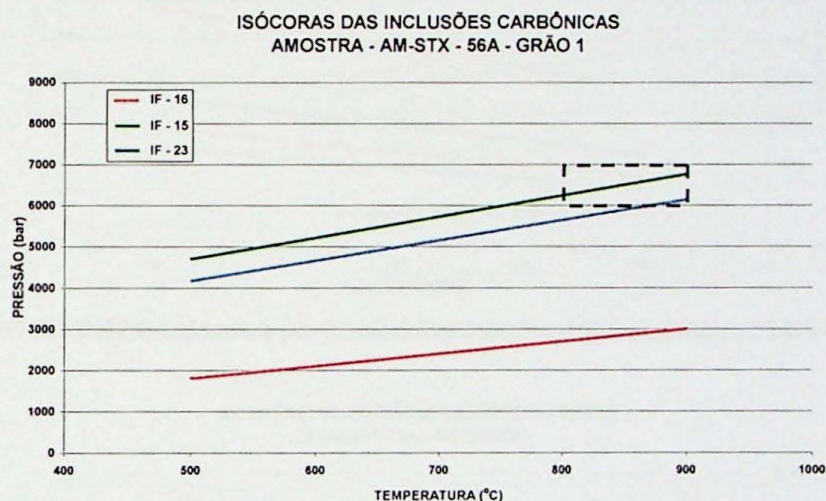


Figura 10.1 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-STX-56A – Grão 1.

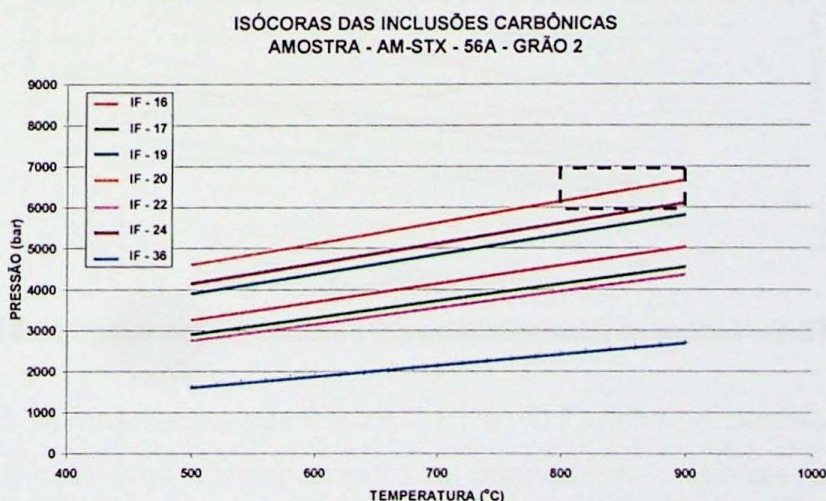


Figura 10.2 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-STX-56A – Grão 2.

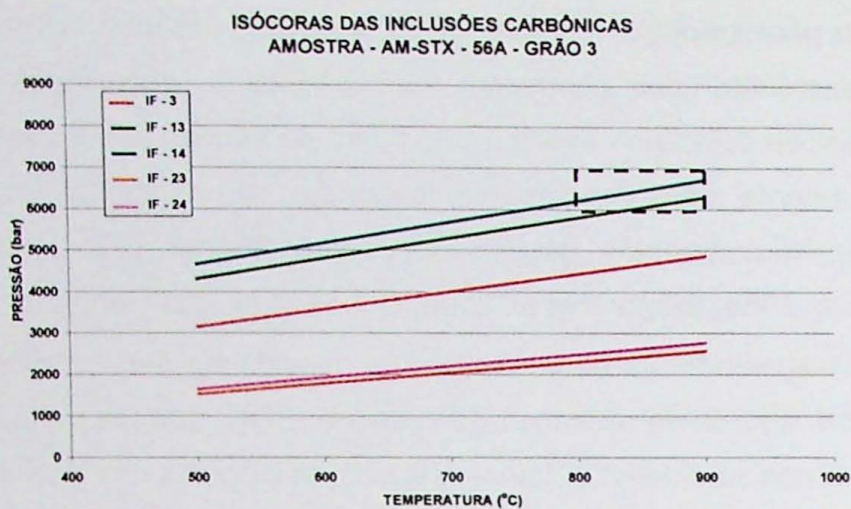


Figura 10.3 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-STX-56A - Grão 3.

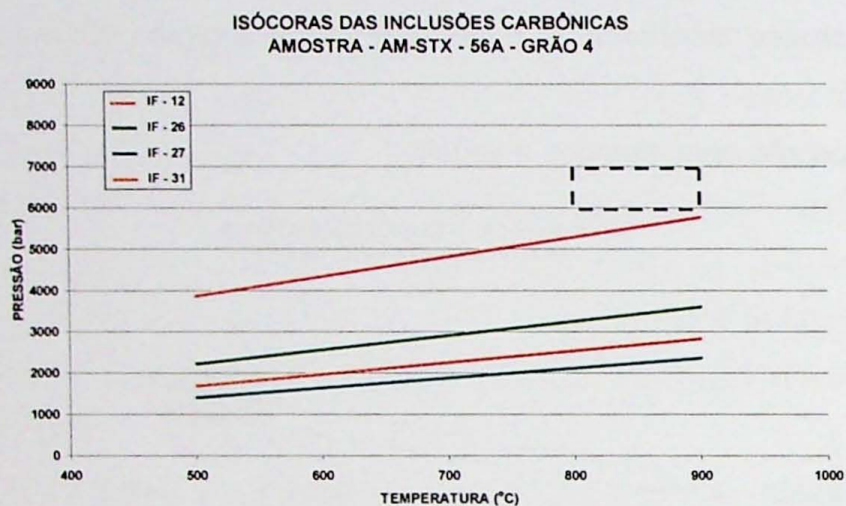


Figura 10.4 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-STX-56A - Grão 3.

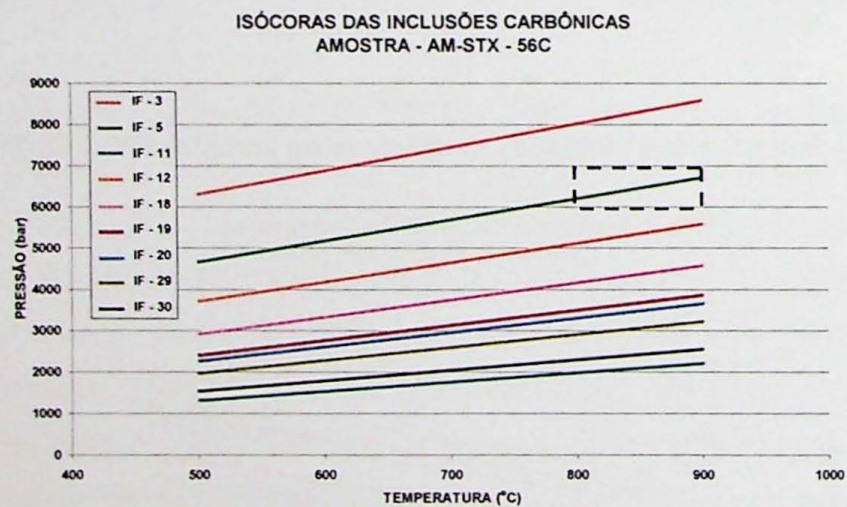


Figura 10.5 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-STX-56C.

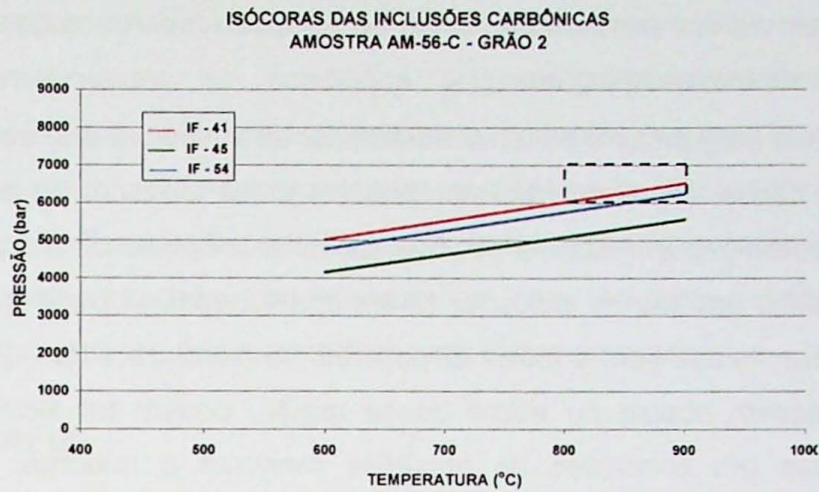


Figura 10.6 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-56C – Grão 2 .

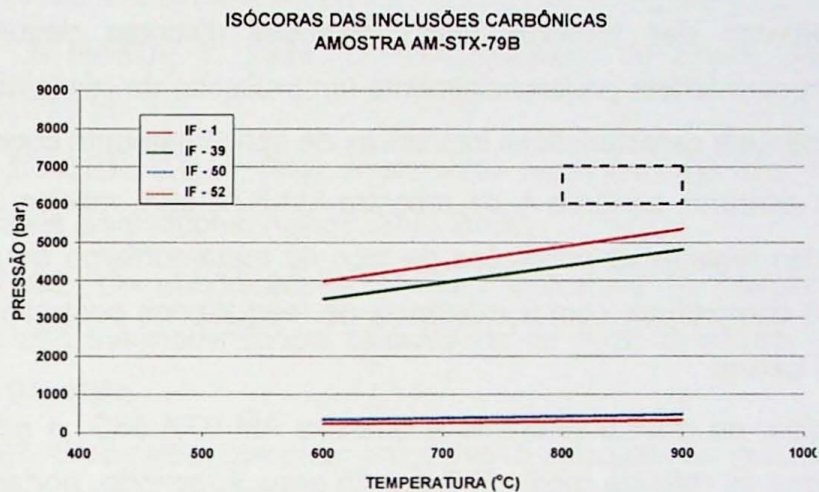


Figura 10.7 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-STX-79B.

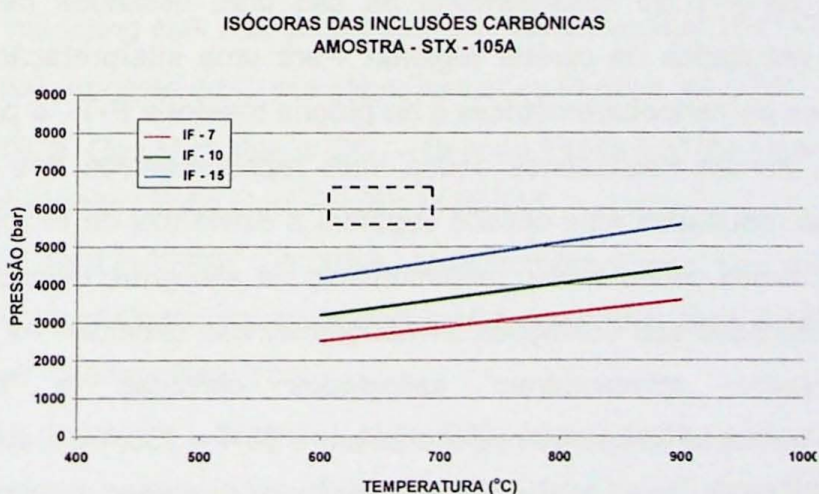


Figura 10.8 – Isócoras das inclusões carbônicas da amostra AM-STX-105A.

Nos gráficos apresentados nas Figura 10.1 à 10.7, acha-se destacado um retângulo (linhas tracejadas) com área correspondente ao intervalo de pressões entre 6 e 7 kbar e temperaturas entre 800 e 900 °C, determinadas a partir dos dados geotermobarométricos disponíveis na literatura (Oliveira 1981 e Porcher 1997). Já na Figura 10.8, encontra-se destacada a área correspondente às pressões de 5,7 a 6,7 kbar e temperaturas entre 600 e

670°C, dados estes obtidos por Karniol (2008) na mesma amostra, e que corresponde um gnaiss aluminoso de mais baixo grau.

A partir desses diagramas é possível determinar as inclusões que contêm registros de fluidos sin-metamórficos, representadas por aquelas cujas isócoras cruzam o campo P-T definido por termobarometria. Assim, é possível delimitar o campo do metamorfismo de alto grau (fácies granulito) em que as inclusões foram aprisionadas, a partir da intersecção dos dados das inclusões fluidas com aqueles disponíveis na literatura. Além disso, as inclusões cujas isócoras passam abaixo ou acima dessa região, podem ter sido aprisionadas ou sofrido reequilíbrios em condições de pressões menores e maiores, respectivamente, sugerindo para os eventos posteriores ao pico metamórfico uma trajetória P-T-t no sentido horário, em alguns casos, e também anti-horário, em outros. No caso das amostras estudadas, os desvios das isócoras para condições distintas daquelas do pico do metamorfismo parecem refletir preferencialmente um processo de reequilíbrio, uma vez que as inclusões apresentam características indicativas de aprisionamento cogenético.

O diagrama referente ao Grão 4, da amostra AM-STX-56A, mostra que nenhuma das inclusões estudadas registra as condições de pico do metamorfismo de alto grau, pois os dados obtidos são compatíveis com a existência de reequilíbrios posteriores sob condições de pressões mais baixas.

Por outro lado, no gráfico referente à amostra AM-STX-56C, a isócora da inclusão fluida 3 passa acima da referida região P-T de alto grau, sugerindo, portanto, que ela tenha sido reequilibrada sob condições de pressões mais elevadas.

Os valores de P-T do metamorfismo de alto grau utilizados nessa interpretação correspondem a resultados de caráter regional. Para uma interpretação mais conclusiva sobre as condições geotermobarométricas e da própria trajetória P-T-, a partir dos dados de inclusões fluidas, seriam necessários dados mais representativos das condições locais. Mesmo assim, os resultados aqui obtidos sugerem a existência de inclusões aprisionadas em condições próximas ou durante o metamorfismo de alto grau, bem como de inclusões que foram reequilibradas sob condições termobarométricas distintas. As poucas inclusões aquosas observadas apresentaram salinidades elevadas e temperaturas de homogeneização bastante baixas (temperaturas entre 98,4 e 130,4°C), sugerindo que o seu aprisionamento se deu num momento posterior ao pico do metamorfismo principal, provavelmente durante o resfriamento regional. No caso das raras inclusões aquo-carbônicas, não foram obtidos dados de temperaturas de homogeneização total, uma vez que todas elas sofreram crepitação durante o estágio de aquecimento antes de sua mudança de fase. Desse modo, para que essas inclusões pudessem ser interpretadas no contexto evolutivo do terreno metamórfico, são necessários estudos adicionais, considerando-se um número maior de amostras.

Em função do que foi discutido acima, observa-se que, apesar de ocorrerem grandes

variações nas densidades das inclusões carbônicas, os diagramas isocóricos revelam que muitas delas preservaram as condições originais de aprisionamento durante o metamorfismo de alto grau, não sendo o resultado, portanto, das modificações com escape de água discutidas pelos autores mencionados anteriormente. Outras amostras, apesar de não terem sido identificadas feições texturais indicativas de modificações posteriores, apresentam grandes variações nas densidades das inclusões, evidenciando, assim, reequilíbrio posterior ao pico do metamorfismo em fácies granulito.

11 BIBLIOGRAFIA

- ALMEIDA F.F.M.; HASUI, Y.; CARNEIRO C.D.R. 1975. Lineamento de Além-Paraíba. *An Acad Bras Ciênc.*, 47, 1975:575.
- ALMEIDA, F.F.M. & HASUI, Y. 1984. *O Pré-Cambriano do Brasil*, São Paulo, Edgard Blücher (Ed), 378 pp.
- BAKKER, R.J. & JANSEN, J.B.H. 1990. Preferential water leakage from fluid inclusions by means of mobile dislocations. *Nature*, 345: 58-60.
- BAKKER, R.J. 1992. On modifications of fluid inclusions in quartz: Re-equilibration experiments and thermodynamical calculations on fluids in natural quartz. *Geologica Ultraiectina*, 94, 189p.
- BAKKER, R.J. 1997. Clathrates: computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures. *Computers & Geosc* 23:1-18.
- BAKKER, R.J. Package FLUIDS 1. 2003. Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology* 194:3-23.
- BELLO, R.M.S. 1996. Apostila do Curso sobre Inclusões Fluidas. *IG-USP*.
- COLLINS, P.L.F. 1979. Gas Hydrates in CO₂ – Bearing Fluids and the Use Freezing Data for Estimation of Salinity. *Econ Geol*, 74 (6): 1435-144.
- CRAWFORD, M.L.; HOLLISTER, L.S..1986. Metamorphic fluids: The evidence from fluid inclusions. In: *Fluid-Rock Interations during Metamorphism*, (eds Walther, J.V. & Wood, B.J.), Springer –Verlag, New York.
- CUNEY, M.; COULIBALY, Y.; BOIRON M.C. 2007.High-density early CO₂ fluids in the ultrahigh-temperature granulites of Ihouhaouene (In Ouzzal, Algeria). *Lithos* 96: 402-414.
- DAVIS, D.W.; LOWENSTEIN, T.K.; SPENCER, R.J. 1990. Melting behavior of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems NaCl-H₂O, NaCl-KCl-H₂O, NaCl-MgCl₂- H₂O, and NaCl-CaCl₂- H₂O. *Geoch Cosm Acta* 54: 591-601.
- DEHLER, N.M. 2002. *Extrusão tectônica oblique em regime transpressivo no Cinturão Paraíbaes, RJ*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, São Paulo, 170p.

- DEHLER, N.M. & MACHADO R. 2002. Geometria e cinemática da aba sul da estrutura divergente do Rio Paraíba do Sul ao longo da seção Areal-Três Rios, Rio de Janeiro. *Rev Bras Geoc.*, 32 (4): 481-490.
- DIAMOND, L.W. 1992. Stability of CO₂ hydrate + CO₂ liquid + CO₂ vapour + aqueous KCL-NACL solutions: experimental determination and application to salinity estimates of fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 56 (1): 273-280.
- FUZIKAWA, R. 1985. Inclusões Fluidas Métodos Usuais de Estudo e Aplicações. In: *Contribuições à Geologia e a Petrologia. Boletim Especial*, Núcleo de Minas Gerais, SBG: 29-44.
- GANDINI, L. P. 1994. *Mineralogia, Inclusões Fluidas e Aspectos Genéticos do Topázio Imperial da Região de Ouro Preto, Minas Gerais*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências da USP.
- GOLDSTEIN, R.H. & REYNOLDS, T.J. 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. *SEPM SHORT COURSE 31* (Society for Sedimentary Geology), 199pp.
- HOLLISTER, L.S. 1990. Enrichment of CO₂ in fluid inclusions in quartz by removal of H₂O during crystal-plastic deformation. *Journal of Structural Geology*, 12: 895-901.
- JOHNSON, E.L. & HOLLISTER, L.S. 1995. Syndeformational fluid trapping in quartz: determining the pressure-temperature conditions of deformation from fluid inclusions and the formation of pure CO₂ fluid inclusions during grain-boundary migration. *Journal of Metamorphic Geology*, 13: 239-249.
- KARNIOL, T. R. 2008. *Tectônica da Conexão Cinturão Ribeira/Faixa Araçuaí – Divisa do Rio de Janeiro com Espírito Santo*. Tese de Doutorado IGC-USP, São Paulo.
- KERRICH, R. 1976. Some effects of tectonic recrystallisation on fluid inclusions in vein quartz. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 59: 195-202.
- MACHADO R. & DEHLER, N.M., ENDO, I. 2001. Tectônica Extensional Neoproterozóica na Província Mantiqueira. In: *VIII Simp Nac Tect*, SBG, *Anais*, p69-71.
- MOHAN, A.; SINGH, P.K; SACHAN, H.K. 2003. High-density carbonic fluid inclusion in charnockites from Eastern Ghats, India, petrologic implications. *Journal of Asian Earth Sciences* 22:101-113.
- NEWTON, R.C.; SIMITH, J.V.; WINDLEY, B.F. 1980. Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth. *Nature*, 288, 45-50.
- NOGUEIRA, J.R; CHOUDHURI, A.; BELLO, R.M.S. 2004. Inclusões Fluidas em granulitos e caminhos P-T-t retometamórficos para o Complexo Juiz de Fora. *Rev Bras Geoc.*, 34 (4): 509-520.
- OLIVEIRA M.A.F 1981. Granulitos da faixa Paraíba do Sul: caracteres químicos dos piroxênios e valores geotermobarométricos. *Rev. Bras. Geoc.*, 11: 222-226.
- PORCHER C.C. 1997. *Relações entre metamorfismo e deformação na Faixa Ribeira*:

- Regiões de Três Rios e Santo Antônio de Pádua (RJ)*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 315 p.
- POTY, B.; LEROY, J.; JACHIMOWICZ, L. 1976. Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope: l'installation de microthermométrie Chaixmeca. *Bulletin de la Société Française de Mineralogie et de Cristallographie*, 99: 182-186.
- ROEDDER, E. 1982. Fluid Inclusions in Gemstones: Valuable Defects. In: *Internacional Geological Symposium*, Santa Monica. Proceedings, Geological Institute of America, pp. 479-502.
- ROEDDER, E. 1984. Fluid Inclusions. Reviews in Mineralogy, v. 12, RIBBE, P.H. (ed.). *Mineralogical Society of America*, 646p.
- ROEDDER, E. 1992. Fluid Inclusions Evidence for Imiscibility in Magmatic Differentiation. *Geoch Cosmoch Act.*, 56 (1),: 5-20.
- ROEDDER, E.; BODNAR, R. J. 1980. Geologic Pressure Determinations from Fluid Inclusions Studies. *Earth and Plan Sci.*, 8:263-301.
- SANTOSH, M.; OMORI, S. 2008. CO₂ flushing: A plate tectonic perspective. *Gondwana Research*, 13, 86-102.
- SANTOSH, M.; TSUNOGAE, T.; YOSHIKURA, S. 2004-b. "Ultrahigh density" carbonic fluids in deep crustal granulites. *J. Mineral. Petrol. Sci.* 99, 164-179.
- SHEPHERD, T.J. RANKIN, A. H. e ALDERTON, D.H.H. 1985, A Practical Guide to Fluid Inclusions Studies. *Blackie and Son LTDA.*, New York, 239p.
- TOURET, J.L.R. 1971. Le facies granulite en Norvege meridionale. II. *Lês inclusions fluides*. *Lithos*, 4, 423-435.
- VICENTE, L.C.; DEHLER, N.M.; MACHADO R; KARNIOL, T.R. 2007. Extrusão tectônica e transporte lateral de massa na porção central do cinturão Paraíba do Sul, seção Três Rios - Matias Barbosa (RJ/MG). *Rev Bras Geoc.*, 37 (2), 2007:281-292.
- VITYK, M.O. & BODNAR, R.J. 1998. Statistical microthermometry of synthetic fluid inclusions in quartz during decompression reequilibration. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132: 149-162.
- VITYK, M.O.; BODNAR, R.J. 1995. Do fluid inclusions in high-grade metamorphic terranes preserve peak metamorphic density during retrograde decompression? *Amer Miner*, 80, p.641-644.
- WEISBROD, A.; POTY, B.; TOURET, J. 1976. Les Inclusions Fluides en Geochimie-Petrologie: Tendances Actuelles. *Bull Soc Franc Mineral et Cristall*, 99(2/3).
- WILKINS, W.T. & BARKAS, J.P. 1978. Fluid inclusions, deformation and recrystallization in granite tectonites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 65: 293-299.

ANEXO A

Tabela 1 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da amostra AM-STX-56A Grão 1.

Nº IF	Tipo IF	T _f CO ₂	T _h CO ₂	Tipo hom.	TE	Tcl	Dens. (g/cm ³)	Salinidade em % NaCl	Fator de preenchimento
1	CO ₂	-57,9	-	-	-	-	-	-	-
2	CO ₂	-57,9	-	-	-	-	-	-	-
3	CO ₂	-57,8	-	-	-	-	-	-	-
4	CO ₂	-57,4	-18,3	L	-	-	1,023711	-	-
5	CO ₂	-57,6	-19,1	L	-	-	1,027454	-	-
6	CO ₂	-57,5	-19,6	L	-	-	1,029778	-	-
7	CO ₂	-57,5	-18	L	-	-	1,022299	-	-
8	CO ₂	-57,6	-17,8	L	-	-	1,021355	-	-
9	CO ₂	-57,4	-20,2	L	-	-	1,032552	-	-
10	CO ₂	-57,8	-19,7	L	-	-	1,030242	-	-
11	CO ₂	-57,8	-17,3	L	-	-	1,018988	-	-
12	CO ₂	-57,8	-17,6	L	-	-	1,02041	-	-
13	CO ₂	-57,8	-18,2	L	-	-	1,02324	-	-
14	CO ₂	-57,8	-18,6	L	-	-	1,025118	-	-
15	CO ₂	-57,7	-22,1	L	-	-	1,04123	-	-
16	CO ₂	-57,5	23,8	L	-	-	0,72783	-	-
17	CO ₂	-57,4	-17,3	L	-	-	1,018988	-	-
18	H ₂ O+CO ₂	-57,6	29,6	L	-37,3	-11	0,748747	29,04	0,55
19	CO ₂	-57,5	-19,6	L	-	-	1,029778	-	-
20	CO ₂	-57,4	-20,1	L	-	-	1,032091	-	-
21	CO ₂	-57,5	-19,6	L	-	-	1,029778	-	-
22	CO ₂	-57,5	-	-	-	-	-	-	-
23	CO ₂	-57,6	-13,9	L	-	-	1,002545	-	-

Tabela 2 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da amostra AM-STX-56A Grão 2.

Nº IF	Tipo IF	T _r O ₂	T _h CO ₂	Tipo hom.	TE	Tfg	Tcl	Dens. (g/cm ³)	Salinidade em % NaCl	Fator de preenchimento
1	H ₂ O+CO ₂	-57,3	25,4	G	-42,4	-12,5	-6,1	0,315761	25,87	0,90
2	H ₂ O+CO ₂	-57,1	17,5	L	-43,3	-13,8		-	-	-
3	H ₂ O+CO ₂	-57,1	26,9	L	-42,5	-10,2	-2,6	0,744308	20,99	0,75
4	H ₂ O+CO ₂	-57,6	30,5	L _c	-42,9	-4	7,2	0,735563	4,97	0,60
5	H ₂ O	-	-	-	-46,7	-18	-	1,091821	-	-
6	H ₂ O+CO ₂	-56,7	26,8	L	-	-	2,6	0,877016	12,96	0,40
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	CO ₂	-56,6	9,6	L	-	-	-	0,864067	-	-
9	H ₂ O+CO ₂	-56,8	27,9	L	-41,4	-10,2	-	-	-	-
10	H ₂ O	-	-	-	-44	-22,7	-	1,114187	-	-
11	H ₂ O	-	-	-	-45,3	-16,8	-	1,085472	-	-
12	H ₂ O	-	-	-	-46,9	-22,8	-	1,114624	-	-
13	CO ₂	-56,7	-4	L	-	-	-	0,950587	-	-
14	CO ₂	-56,7	10,8	L	-	-	-	0,855121	-	-
15	CO ₂	-56,7	-7,1	L	-	-	-	0,967603	-	-
16	CO ₂	-56,6	0,4	L	-	-	-	0,924993	-	-
17	CO ₂	-56,8	6,7	L	-	-	-	0,884599	-	-
18	CO ₂	-56,6	-14,2	L	-	-	-	1,004021	-	-
19	CO ₂	-56,6	-9,6	L	-	-	-	0,9808	-	-
20	CO ₂	-56,6	-20,9	L	-	-	-	1,035768	-	-
21	CO ₂	-56,5	-20	L	-	-	-	1,031629	-	-
22	CO ₂	-56,7	8,9	L	-	-	-	0,869157	-	-
23	CO ₂	-56,6	-20,5	L	-	-	-	1,033933	-	-
24	CO ₂	-56,6	-13,6	L	-	-	-	1,001063	-	-
25	H ₂ O	-	-	-	-58,8	-18,6	-	1,09489	-	-
26	H ₂ O	-	-	-	-58,7	-20,8	-	1,128863	-	-
27	H ₂ O	-	-	-	-62,8	-23,4	-	1,128979	-	-
28	CO ₂	-56,7	-9,3	L			-	0,979239	-	-
29	H ₂ O	-	-	-	-67,9	-19,3	-	1,075262	-	-
30	CO ₂	-56,7	-9	L	-	-	-	0,977673	-	-
31	CO ₂	-56,7	-8,9	L	-	-	-	0,977149	-	-
32	CO ₂	-56,7	-3,3	L	-	-	-	0,946635	-	-
33	CO ₂	-56,6	-1,1	L	-	-	-	0,933928	-	-
34	H ₂ O	-	-	-	-68,7		-	-	-	-
35	H ₂ O	-	-	-	-64,6	-19,8	-	1,124004	-	-
36	CO ₂	-56,8	26,4	L	-	-	-	0,68758	-	-

Tabela 3 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da amostra AM-STX-56A Grão 3.

Nº IF	Tipo IF	T _f CO ₂	T _h CO ₂	Tipo hom.	Dens. (g/cm ³)
1	CO ₂	-57,4	-16,7	L	1,01613
2	CO ₂	-57,3	-20,1	L	1,032091
3	CO ₂	-57,3	2,5	L	0,912079
4	CO ₂	-57,3	3,5	L	0,905748
5	CO ₂	-57,3	-20,8	L	1,03531
6	CO ₂	-57,3	-19,6	L	1,029778
7	CO ₂	-57,2	-18,6	L	1,025118
8	CO ₂	-57,2	-20,5	L	1,033933
9	CO ₂	-57,2	-21,1	L	1,036683
10	CO ₂	-57,3	-19,6	L	1,029778
11	CO ₂	-57,2	-19,7	L	1,030242
12	CO ₂	-57,2	-18,3	L	1,023711
13	CO ₂	-57,2	-16	L	1,012773
14	CO ₂	-57,1	-21,5	L	1,038507
15	CO ₂	-57,1	-16,4	L	1,014694
16	CO ₂	-57,2	-19,6	L	1,029778
17	CO ₂	-57	-19,8	L	1,030705
18	CO ₂	-57,1	-18,9	L	1,026521
19	CO ₂	-57,1	-19	L	1,026988
20	CO ₂	-57,1	-19,6	L	1,029778
21	CO ₂	-57,3	-16,9	L	1,017085
22	CO ₂	-57,2	26,4	L	0,68758
23	CO ₂	-57,2	27,2	L	0,672523
24	CO ₂	-57,1	25,7	L	0,699518
25	CO ₂	-57,2	26,3	L	0,689348
26	CO ₂	-57,1	26,1	L	0,69282

Tabela 4 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da amostra AM-STX-56A Grão 4.

Nº IF	Tipo IF	T _f O ₂	T _h CO ₂	Tipo hom.	TE	T _{fg}	T _{cl}	Dens. (g/cm ³)	Salinidade em % NaCl	Fator de Preenchimento
1	H ₂ O	-	-	-	-59	22,8	-	1,110948	-	-
2	H ₂ O	-	-	-	-54,5	16,4	-	1,065983	-	-
3	H ₂ O	-	-	-	-55,3	20,5	-	1,118743	-	-
4	H ₂ O	-	-	-	-51,3	-	-	-	-	-
5	H ₂ O+CO ₂	-56,6	20,5	L	-44,9	-10	-7,2	0,838441	27,32	0,55
6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	CO ₂	-56,6	28,1	L	-	-	-	0,653093	-	-
8	CO ₂	-56,6	28,2	L	-	-	-	0,65072	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	CO ₂	-56,6	28	L	-	-	-	0,655418	-	-
12	CO ₂	-56,6	-9,3	L	-	-	-	0,97239	-	-
13	CO ₂	-56,6	25,9	L	-	-	-	0,696208	-	-
14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	H ₂ O	-	-	-	-49,2					
16	H ₂ O+CO ₂	-56,6	22,6	L	-	-10	-7,6	0,828945	27,83	0,60
17	H ₂ O+CO ₂	-56,6	26,3	L	-43,9	-6,9	8,3	0,70468	2,92	0,95
18	H ₂ O+CO ₂	-56,6	22,6	L	-46	-	-7,2	0,748921	27,32	0,97
19	CO ₂	-56,6	27,5	L	-	-	-	0,666389	-	-
20	H ₂ O	-	-	-	-51,7	18,8	-	1,107924	-	-
21	H ₂ O	-	-	-	-52,6	-17	-	1,094295	-	-
22	H ₂ O	-	-	-	-53,2	12,2	-	1,056526	-	-
23	CO ₂	-56,6	18,9	L	-	-	-	0,784879	-	-
24	CO ₂	-56,6	19,8	L	-	-	-	0,775571	-	-
25	CO ₂	-56,6	19,1	L	-	-	-	0,782846	-	-
26	CO ₂	-56,6	17,8	L	-	-	-	0,795732	-	-
27	CO ₂	-56,6	28,6	L	-	-	-	0,640672	-	-
28	CO ₂	-56,6	25	L	-	-	-	0,710554	-	-
29	CO ₂	-56,6	24	L	-	-	-	0,725075	-	-
30	CO ₂	-56,6	21,9	L	-	-	-	0,752029	-	-
31	CO ₂	-56,6	25,2	L	-	-	-	0,707482	-	-
32	CO ₂	-56,6	25,6	L	-	-	-	0,701145	-	-

Tabela 5 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da Amostra AM-STX-56C.

Nº IF	Tipo IF	T_f CO₂	T_h CO₂	Tipo hom.	Dens. (g/cm³)
1	CO ₂	-57,3	-20,7	L	1,034851
2	CO ₂	-57,0	-20,9	L	1,035768
3	CO ₂	-57,0	-16,2	L	1,013735
4	CO ₂	-57,0	-21,2	L	1,037139
5	CO ₂	-57,0	-21,6	L	1,038962
6	CO ₂	-56,9	-20,0	L	1,031629
7	CO ₂	-57,0	27,1	L	0,674503
8	CO ₂	-56,9	26,6	L	0,683972
9	CO ₂	-57,0	22,8	L	0,743491
10	CO ₂	-57,0	23,5	L	0,73188
11	CO ₂	-56,7	29,4	L	0,616942
12	CO ₂	-56,8	-6,9	L	0,966527
13	CO ₂	-56,9	-1,3	L	0,935102
14	CO ₂	-56,8	26,5	L	0,685788
15	CO ₂	-57,0	-20,0	L	1,031629
16	CO ₂	-56,9	-20,1	L	1,032091
17	CO ₂	-56,8	3,6	L	0,905108
18	CO ₂	-56,8	6,0	L	0,88935
19	CO ₂	-56,9	14,8	L	0,822943
20	CO ₂	-56,9	17,1	L	0,802372
21	CO ₂	-57,0	-19,5	L	1,029314
22	CO ₂	-57,2	-20,2	L	1,032552
23	CO ₂	-57,1	2,3	L	0,913331
24	CO ₂	-56,9	2,8	L	0,910193
25	CO ₂	-56,9	17,0	L	0,803305
26	CO ₂	-57,0	16,0	L	0,812433
27	CO ₂	-57,0	15,3	L	0,818619
28	CO ₂	-56,9	25,1	L	0,709025
29	CO ₂	-56,8	21,7	L	0,754399
30	CO ₂	-56,8	27,4	L	0,668468

Tabela 6 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da Amostra AM-STX-56C – grão 2.

Nº IF	Tipo IF	T _f CO ₂	T _h CO ₂	Tipo hom.	Dens. (g/cm ³)
1					
2	CO ₂	-56,8	-16,2	L	1,012730
3	CO ₂	-56,6	-15,2	L	1,008900
4	CO ₂	-56,6	-15,4	L	1,009870
5	CO ₂	-56,6	-17,2	L	1,018510
6	CO ₂	-56,6	-15,6	L	1,010840
7	CO ₂	-56,6	-16,0	L	1,012770
8	CO ₂	-56,6	-14,4	L	1,005000
9	CO ₂	-56,6	-16,7	L	1,016130
10	CO ₂	-56,7	-16,0	L	1,012770
11	CO ₂	-56,7	-15,5	L	1,010360
12	CO ₂	-56,6	-13,0	L	0,998086
13	CO ₂	-56,6	-15,8	L	1,011810
14	CO ₂	-56,6	-13,7	L	1,001560
15	CO ₂	-56,6	-15,5	L	1,010360
16	CO ₂	-56,6	-15,7	L	1,011330
17	CO ₂	-56,6	-15,1	L	1,008420
18	CO ₂	-56,6	-14,9	L	1,007450
19	CO ₂	-56,6	-17,0	L	1,017560
20	CO ₂	-56,6	-13,6	L	1,001060
21	CO ₂	-56,6	-13,9	L	1,002540
22	CO ₂	-56,6	-16,5	L	1,015170
23	CO ₂	-56,6	-17,3	L	1,018990
24	CO ₂	-56,6	-14,0	L	1,003040
25	CO ₂	-56,6	-16,7	L	1,016130
26	CO ₂	-56,6	-17,5	L	1,019940
27	CO ₂	-56,6	-15,5	L	1,010360
28	CO ₂	-56,6	-17,4	L	1,019460
29	CO ₂	-56,6	-15,6	L	1,010840
30	CO ₂	-56,6	-19,3	L	1,028390
31	CO ₂	-56,5	-12,9	L	0,997588
32	CO ₂	-56,5	-15,9	L	1,012290
33	CO ₂	-56,5	-16,2	L	1,013730
34	CO ₂	-56,5	-14,7	L	1,006470
35	CO ₂	-56,6	-13,8	L	1,002050
36	CO ₂	-56,8	-17,0	L	1,017560
37	CO ₂	-56,9	-15,1	L	1,008420
38	CO ₂	-56,9	-18,6	L	1,025120
39	CO ₂	-56,8	-17,8	L	1,021360
40	CO ₂	-56,9	-14,5	L	1,005490
41	CO ₂	-56,8	-19,5	L	1,029310
42	CO ₂	-56,8	-14,4	L	1,005000

43	CO ₂	-56,8	-10,5	L	0,985447
44	CO ₂	-56,8	-10,9	L	0,987495
45	CO ₂	-56,9	-12,4	L	0,995087
46	CO ₂	-56,9	-17,0	L	1,017560
47	CO ₂	-57,0	-17,3	L	1,018990
48	CO ₂	-57,0	-14,6	L	1,005980
49	CO ₂	-57,0	-13,2	L	0,999081
50	CO ₂	-56,8	-13,4	L	1,000070
51	CO ₂	-56,9	-13,6	L	1,001060
52	CO ₂	-56,9	-16,4	L	1,014690
53	CO ₂	-56,9	-18,4	L	1,024180
54	CO ₂	-56,9	-16,6	L	1,015650
55	CO ₂	-56,9	-15,0	L	1,007930

Tabela 7 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da Amostra AM-STX-79B.

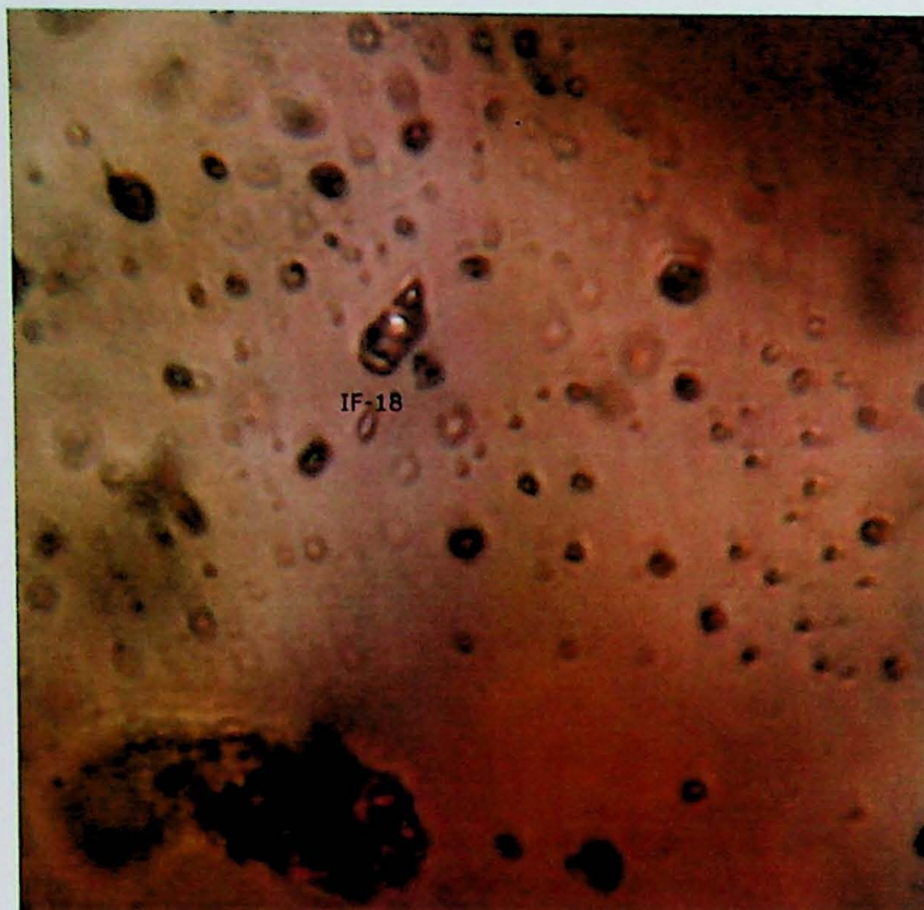
Nº IF	Tipo IF	T _f CO ₂	T _h CO ₂	Tipo hom.	Dens. (g/cm ³)
1	CO ₂	-57,7	-5,0	L	0,95616
2	CO ₂	-57,7	-4,6	L	0,95394
3	CO ₂	-57,6	-	L	-
4	CO ₂	-57,8	-3,6	L	0,94833
5	CO ₂	-57,5	-2,7	L	0,94321
6	CO ₂	-57,6	-2,5	L	0,94207
7	CO ₂	-57,5	-3,0	L	0,94493
8	CO ₂	-57,6	-2,6	L	0,94264
9	CO ₂	-57,6	-2,8	L	0,94379
10	CO ₂	-57,6	-2,8	L	0,94379
11	CO ₂	-57,5	-3,3	L	0,94664
12	CO ₂	-57,6	-2,6	L	0,94264
13	CO ₂	-57,6	-2,7	L	0,94321
14	CO ₂	-57,7	-3,8	L	0,94946
15	CO ₂	-57,7	-4,0	L	0,95059
16	CO ₂	-57,7	-3,3	L	0,94664
17	CO ₂	-57,6	-3,1	L	0,94550
18	CO ₂	-57,6	-3,2	L	0,94607
19	CO ₂	-57,6	-3,4	L	0,94720
20	CO ₂	-57,6	-3,2	L	0,94607
21	CO ₂	-57,6	-3,4	L	0,94720
22	CO ₂	-57,7	-3,3	L	0,94664
23	CO ₂	-57,3	-3,7	L	0,94664
24	CO ₂	-57,6	-4,3	L	0,95227
25	CO ₂	-57,6	-3,2	L	0,94607
26	CO ₂	-57,6	-3,3	L	0,94664
27	CO ₂	-57,6	-3,4	L	0,94720
28	CO ₂	-57,5	-3,3	L	0,94664
29	CO ₂	-57,6	-3,0	L	0,90893
30	CO ₂	-57,7	-4,0	L	0,95059
31	CO ₂	-57,6	-3,1	L	0,94550
32	CO ₂	-57,5	-3,2	L	0,94607
33	CO ₂	-57,6	-3,6	L	0,94833
34	CO ₂	-58,0	3,2	L	0,90766
35	CO ₂	-58,0	3,4	L	0,94720
36	CO ₂	-58,0	3,6	L	0,90511
37	CO ₂	-57,9	2,8	L	0,91019
38	CO ₂	-57,9	3,1	L	0,94550
39	CO ₂	-58,0	3,5	L	0,90575
40	CO ₂	-57,9	4,1	L	0,90189
41	CO ₂	-58,0	3,3	L	0,94664
42	CO ₂	-57,8	3,1	L	0,94550
43	CO ₂	-57,9	3,4	L	0,94720

44	CO ₂	-58,0	3,6	L	0,90511
45	CO ₂	-57,9	3,9	L	0,90318
46	CO ₂	-57,9	2,9	L	0,90956
47	CO ₂	-57,9	3,1	L	0,94550
48	CO ₂	-57,7	3,2	L	0,94607
49	CO ₂	-58,0	3,4	L	0,94720
50	CO ₂	-57,0	19,4	g	0,18883
51	CO ₂	-56,9	14,7	g	0,15900
52	CO ₂	-56,9	15,8	g	0,16543
53	CO ₂	-56,9	18,9	g	0,18589
54	CO ₂	-56,9	18,5	g	0,18303
55	CO ₂	-56,9	19,1	g	0,18735
56	CO ₂	-56,9	17,6	g	0,17685
57	CO ₂	-57,0	15,3	g	0,16543
58	CO ₂	-57,0	19,0	g	0,18661
59	CO ₂	-56,9	20,9	g	0,20143
60	CO ₂	-56,9	18,8	g	0,18517
61	CO ₂	-57,0	20,0	g	0,19416
62	CO ₂	-57,0	15,4	g	0,16305

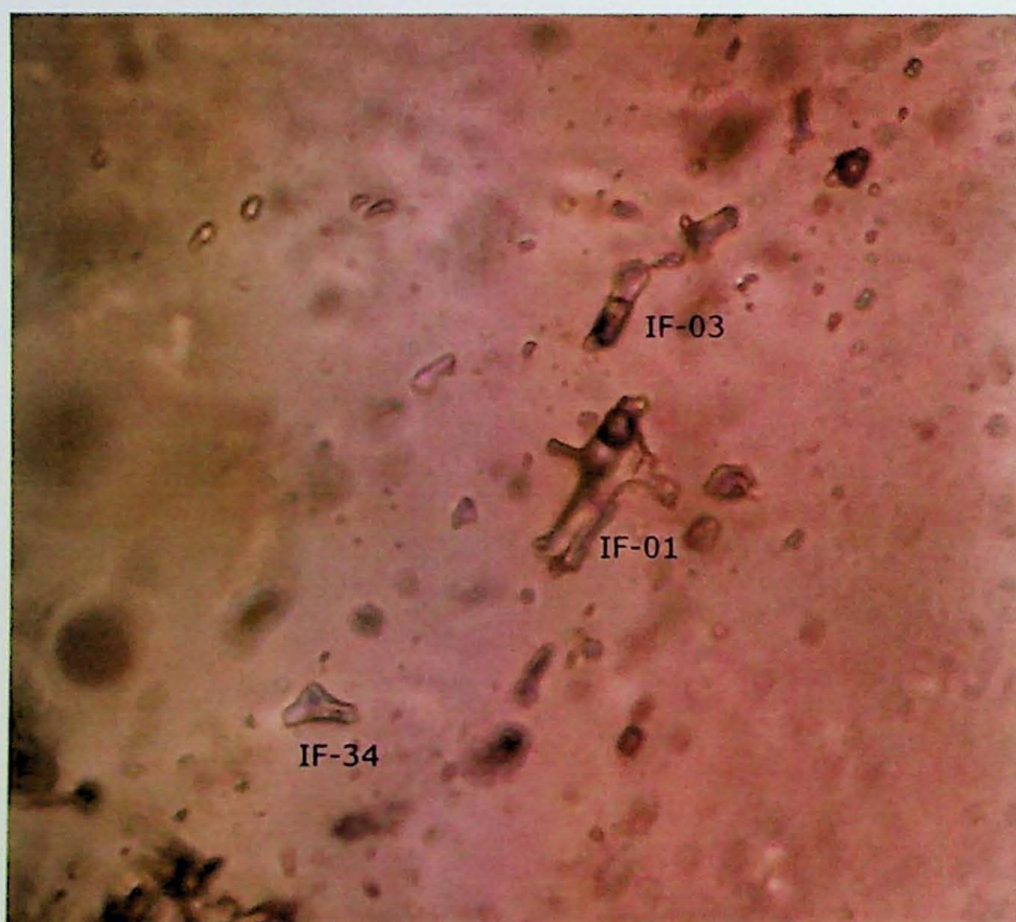
Tabela 8 – Dados microtermométricos e densidades calculadas da Amostra AM-STX-105A.

Nº IF	Tipo IF	T_f CO₂	T_h CO₂	Tipo hom.	Dens. (g/cm³)
1	CO ₂	-56,6	0,2	L	0,92620
2	CO ₂	-56,6	-7,1	L	0,96760
3	CO ₂	-56,6	-7,9	L	0,97187
4	CO ₂	-56,6	-1,8	L	0,93802
5	CO ₂	-56,6	18,1	L	0,79283
6	CO ₂	-56,6	17,1	L	0,80237
7	CO ₂	-56,6	16,9	L	0,80423
8	CO ₂	-56,6	17,3	L	0,80049
9	CO ₂	-56,6	-7,9	L	0,97187
10	CO ₂	-56,6	7,1	L	0,88185
11	CO ₂	-56,6	-8,9	L	0,97715
12	CO ₂	-56,6	-9,8	L	0,98184
13	CO ₂	-56,6	-7,8	L	0,97134
14	CO ₂	-56,6	-10	L	0,98287
15	CO ₂	-56,6	-8,5	L	0,97505
16	CO ₂	-56,7	-7,7	L	0,97081
17	CO ₂	-56,6	-8,8	L	0,97663
18	CO ₂	-56,6	-8,1	L	0,97294
19	CO ₂	-56,6	-2,8	L	0,94379
20	CO ₂	-56,6	18,3	L	0,79087
21	CO ₂	-56,6	17	L	0,80331
22	CO ₂	-56,6	15,6	L	0,81599
23	CO ₂	-56,6	16,3	L	0,80973
24	CO ₂	-56,7	-9,6	L	0,98080
25	CO ₂	-56,6	-8,8	L	0,97663

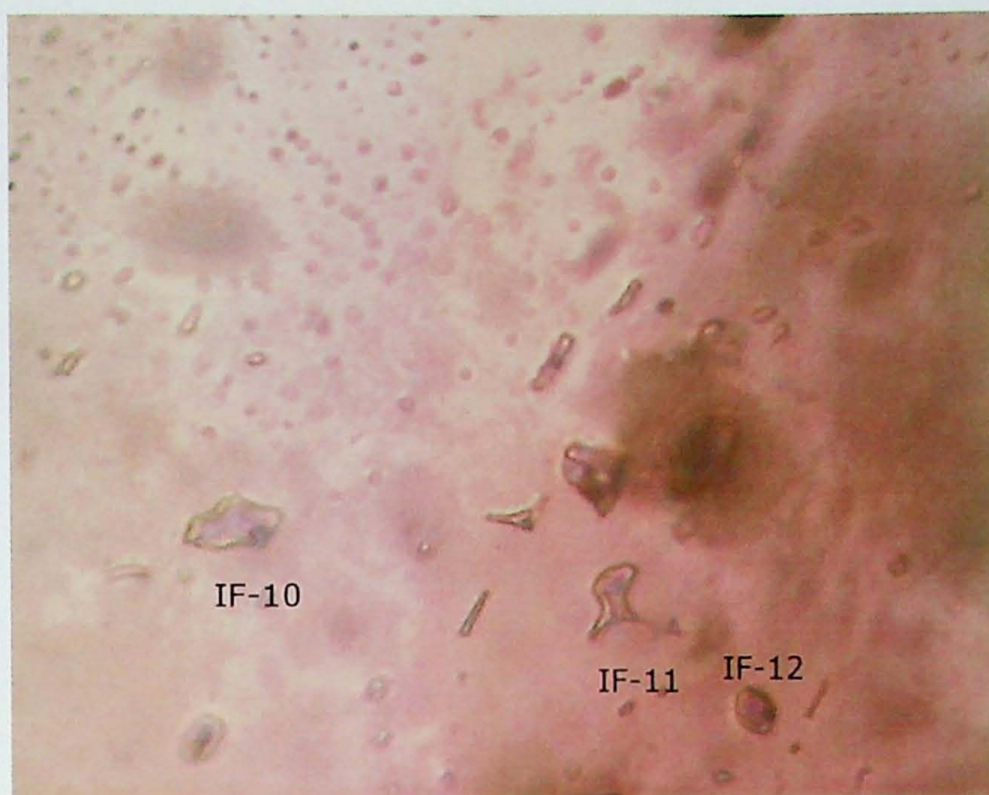
ANEXO B



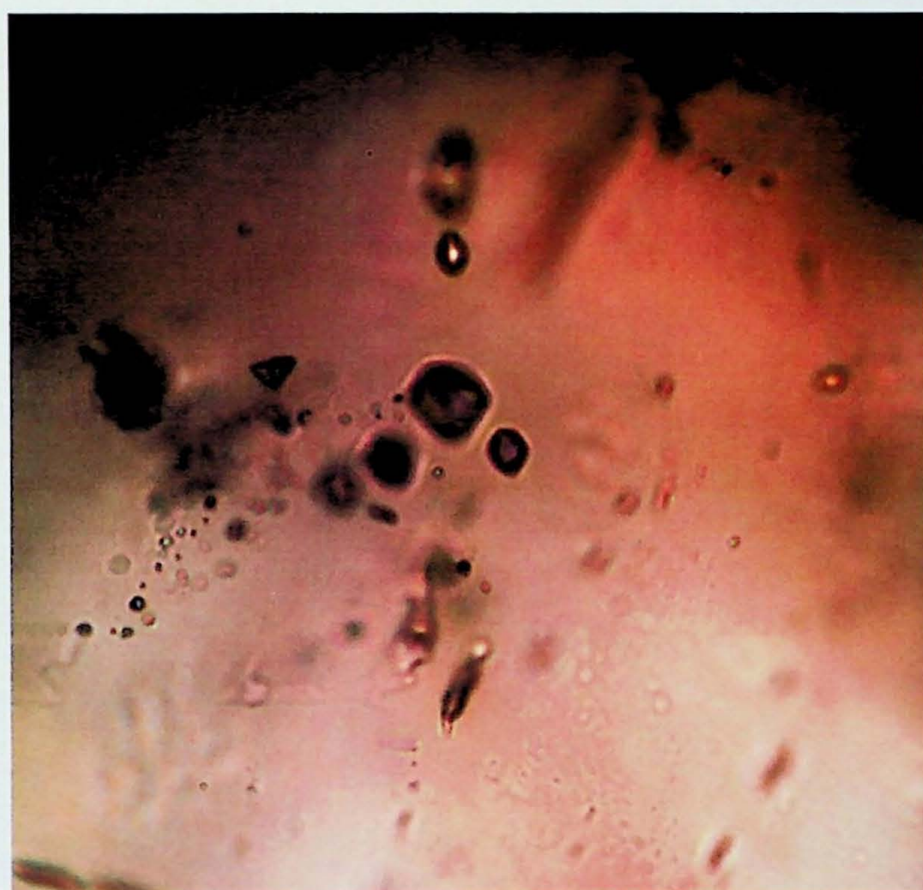
Fotomicrografia 1 – Inclusão 18, única inclusão aquo-carbônica, amostra STX-56A grão 1.



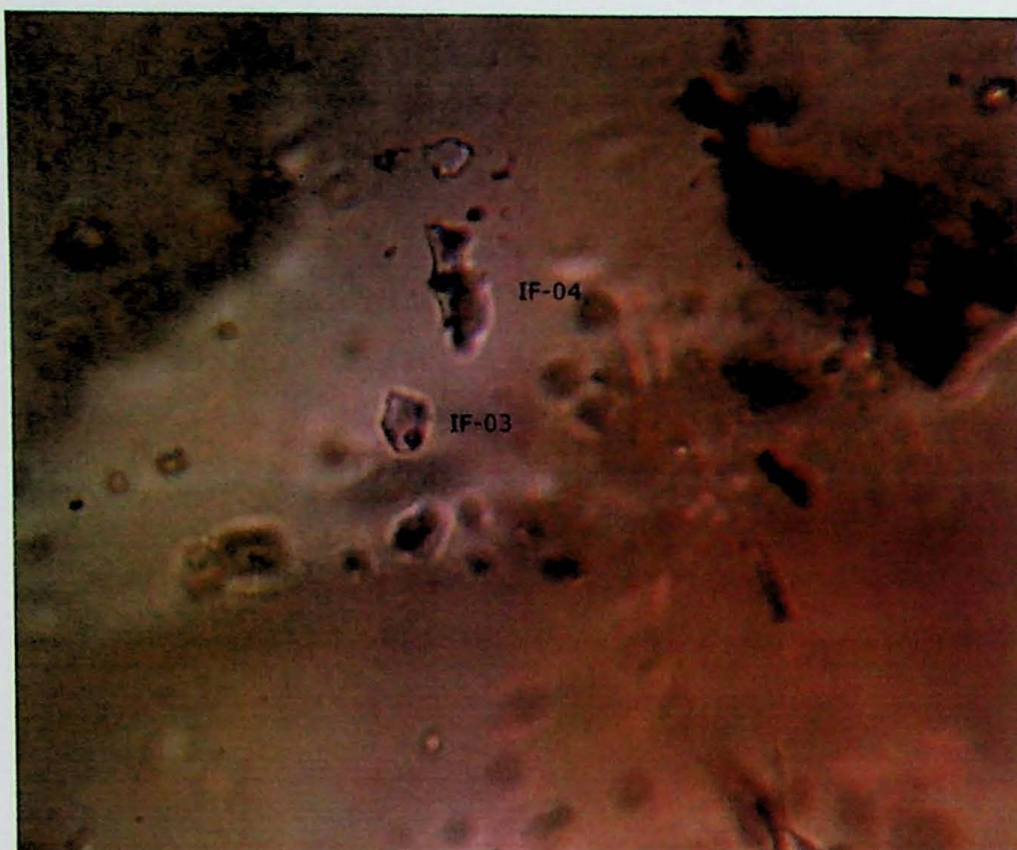
Fotomicrografia 2 – Inclusões aquo-carbônicas e aquosas, amostra STX-56A grão 2.



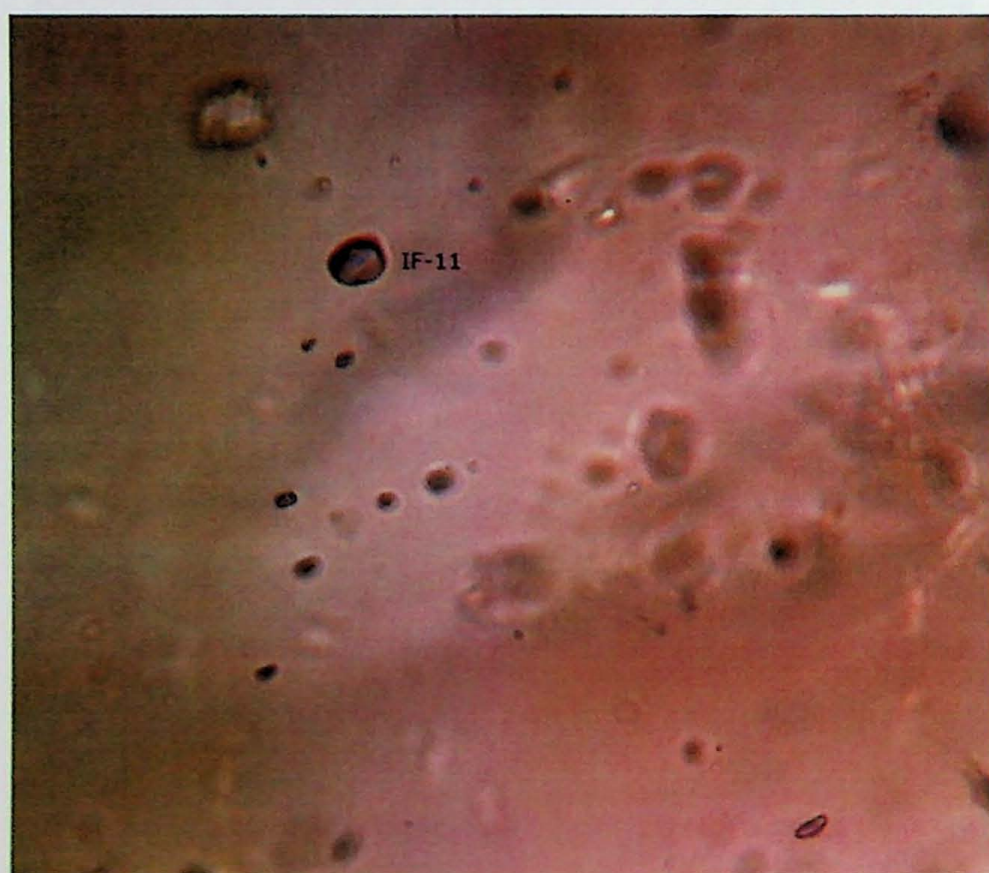
Fotomicrografia 3 – Outro campo de visão da amostra STX-56A grão 2, mostrando inclusões carbônicas (menores dimensões), além de inclusões aquocarbônicas e aquosas.



Fotomicrografia 4 – Agrupamento de inclusões carbônicas na amostra STX-56A Grão 3.



Fotomicrografia 5 – Inclusões aquosas da amostra STX-56A grão 4.



Fotomicrografia 6 – Agrupamento de inclusões carbônicas na amostra STX-56A grão 4, mostrando detalhe da inclusão 11.

ANEXO C

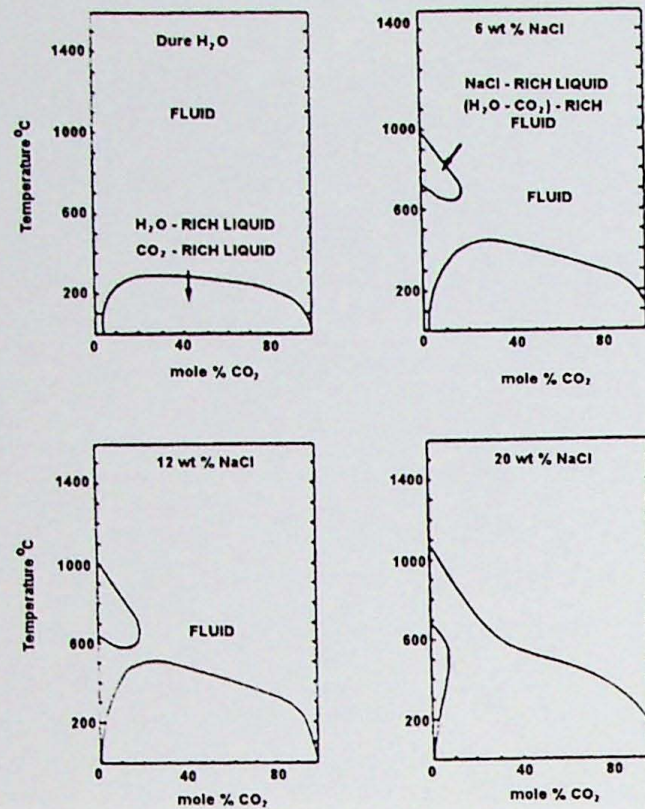


Figura 1 – Efeito da salinidade na posição e tamanho da curva de *solvus* em sistemas $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ (Shepherd *et al*, 1985).

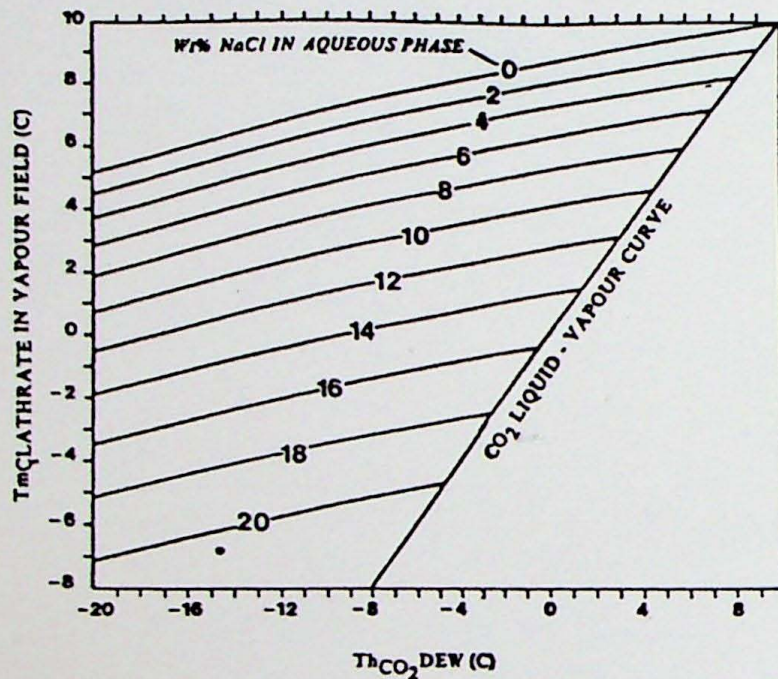


Figura 2 — Diagrama ilustrando dissolução do clatrato no campo do vapor Diamond (1992).

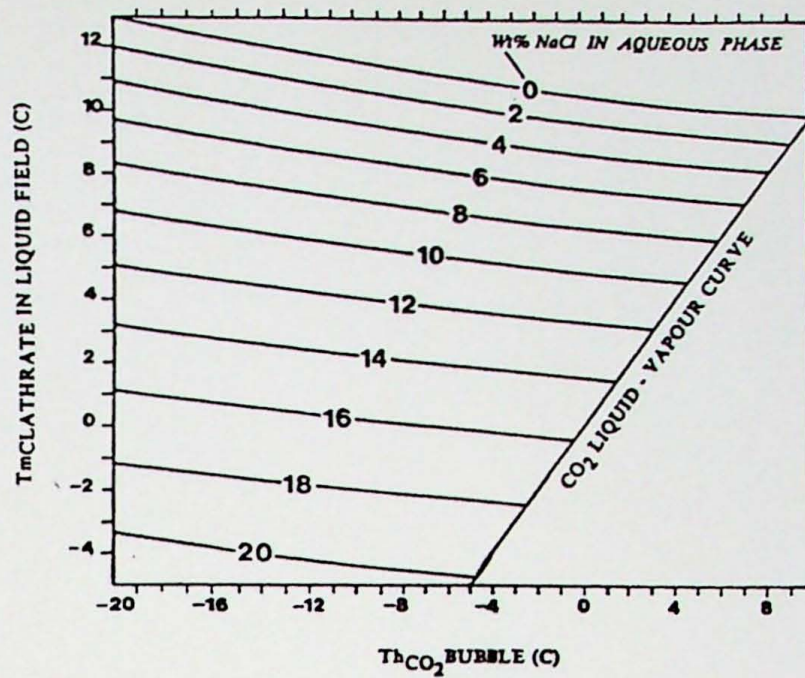


Figura 3 — Diagrama ilustrando dissolução do clatrato no campo do líquido Diamond (1992).

