Mónica Gabriela da Silva Sousa

Estudo de mineralizações de F-Ba-Zn-Pb. Dedução das suas condições de formação. Os exemplos de Hammam Zriba e Bou Jaber (Tunísia)



FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Prospecção e Avaliação de Recursos Geológicos

Departamento de Geologia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Porto 2005

Hélène Couto

Mónica Gabriela da Silva Sousa

Estudo de mineralizações de F-Ba-Zn-Pb. Dedução das suas condições de formação. Os exemplos de Hammam Zriba e Bou Jaber (Tunísia)



FACULDADE DE CIÊNCIAS
UNIVERSIDADE DO PORTO

Tese submetida à Faculdade de Ciências da Universidade do Porto para a obtenção do grau de Mestre em Prospecção e Avaliação de Recursos Geológicos

Reg. 1812
Cota 553.06
(043.2) (SOU m/B
ex. 1

Departamento de Geologia
Faculdade de Ciências da Universidade do Porto
Porto 2005

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
FACULDADE DE CIÊNCIAS DO PORTO
BIBLIOTECA

Teses de mestrado

Todo o trabalho é fruto do empenho pessoal, mas também da colaboração, a diferentes níveis, de várias pessoas.

Esta dissertação de Mestrado não é excepção e transparece o resultado da troca de conhecimentos e vivências que tiveram lugar durante o desenvolvimento desta tese.

Gostaria, pois, de exprimir os meus agradecimentos a todos aqueles que de uma forma ou de outra contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Fernando Noronha por me dar a oportunidade de trabalhar em investigação e pela revisão da dissertação. Agradeço-lhe também todos os ensinamentos, orientação científica, apoio e amizade.

Ao Professor Abdelkrim Charef e ao Dr. Amar M'Layeh um obrigada muito especial pela excelente hospitalidade e por toda a ajuda e apoio que me prestaram.

Às Doutoras Armanda Dória, Maria dos Anjos Ribeiro, Alexandra Guedes, Helena Couto, Deolinda Flores e Isabel Fernandes pelo constante apoio e pela ajuda sempre que as dúvidas surgiam.

À Doutora Alexandra Guedes pela colaboração na micro-espectroscopia Raman.

À Doutora Deolinda Flores pela colaboração na microscopia de fluorescência.

A todos os colegas, amigos e funcionários do Departamento de Geologia, pelo seu apoio na realização do presente trabalho.

À D. Manuela Valongueiro e D. Lurdes, por toda a colaboração prestada.

Ao Sr. Pinto pela cuidada preparação das lâminas delgadas e espessas.

A todos os amigos, em especial à Maria João, à Filipa, à Claúdia Fernandes, à Susana, ao Eduardo, ao Paulo Ricardo e ao Rui Ramos pelo constante incentivo e troca de opiniões.

Aos meus pais que me ensinaram ao longo da minha vida a querer saber sempre mais e a ansiar por novos objectivos.

Ao Armando, por tudo, por ser o meu equilíbrio e me ajudar a ultrapassar os momentos mais difíceis.

Agradeço ainda ao Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, na pessoa do seu presidente, o Professor Doutor Fernando Noronha, pelo apoio institucional fornecido e ao Centro de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, na pessoa do seu Coordenador Científico, o Professor Doutor Fernando Noronha, pelas facilidades concedidas para a realização do presente trabalho.

Resumo i
Abstract iv
Lista de Figuras vii
Lista de Fotos xi
Lista de Tabelas xiii

I Parte – Introdução Geral

1. Introdução 1
2. Objectivos 2
3. Métodos de Trabalho 3
3.1 Trabalho de Campo e Trabalho Laboratorial 3
3.2 Estudo das Inclusões Fluidas 3
3.2.1 Considerações Gerais 3
3.2.2 Metodologias e Técnicas de Estudo das Inclusões Fluidas 10
3.2.2.1 Microtermometria 11
3.2.2.2 Micro-Espectroscopia Raman 20
3.2.2.3 Composição da Fase Volátil 21
3.2.2.4 Cálculo da Composição e Densidade Globais 22
3.2.2.5 Determinação das Condições P-T-V-X de Aprisionamento dos Fluidos 23
3.2.2.6 Microscopia de Fluorescência 25
3.2.3 Classificação e Nomenclatura das Inclusões fluidas 30

II Parte – Os Jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber

1. Localização Geográfica 32
2. Trabalhos Precedentes 33
3. Os Jazigos do tipo Mississipy Valley (MVT) 38
4. Hammam Zriba 49
4.1 Tectónica, Enquadramento Geológico e Estratigrafia 49
4.1.1 Tectónica 49
4.1.2 Enquadramento Geológico 54
4.1.3 Estratigrafia 54
4.2 História Mineira 57
4.3 Estudo Petrográfico e Mineralógico 57
4.4 Estudo dos Fluidos 62
4.4.1 Tipologia e Cronologia Relativa dos Fluidos 63
4.4.2 Caracterização Microtermométrica 65
4.4.2.1 Minério Rubané 65
4.4.2.2 Minério Intracársico 70
4.4.2.3 Estruturas geódicas e fracturas ou veios tardios 73
4.4.3 Composição da Fase Volátil 77
4.4.4 Cálculo da Composição e Densidade Globais 77
4.4.5 Microscopia de Fluorescência 78
4.5 Determinação das Condições P-T-V-X de Aprisionamento dos Fluidos 82
4.6 Discussão e Conclusão 85
5. Bou Jaber 88
5.1 Tectónica, Enquadramento Geológico e Estratigrafia 88
5.1.1 Tectónica 88
5.1.2 Enquadramento Geológico 91
5.1.3 Estratigrafia 93
5.2 História Mineira 95
5.3 Estudo Petrográfico e Mineralógico 96

5.4 Estudo dos Fluidos 104
5.4.1 Tipologia e Cronologia Relativa dos Fluidos 105
5.4.2 Caracterização Microtermométrica 107
5.4.2.1 Sedimento Intracársico 110
5.4.2.2 Minério Rubané rico em Barite e Fluorite 116
5.4.2.3 Zonas com grandes cristais de barite 119
5.4.3 Composição da Fase Volátil 125
5.4.4 Cálculo da Composição e Densidade Globais 125
5.4.5 Microscopia de Fluorescência 126
5.5 Determinação das Condições P-T-V-X de Aprisionamento dos Fluidos 129
5.6 Discussão e Conclusão 132
6. Síntese Comparativa entre os Jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber 135

III Parte – Considerações Finais

1. Discussão dos Resultados 139
2. Conclusões 144

Bibliografia 146

Anexo

Tendo em vista o estudo das condições de deposição de jazigos de F-Ba-Pb-Zn da província fluoretada tunisina, foram caracterizados os fluidos associados às fluorites e barites de Hammam Zriba e Bou Jaber.

Os estudos petrográficos, microtermométricos, de espectroscopia Raman e de microscopia de fluorescência revelaram a ocorrência de várias incursões de fluidos com diferentes composições. Foram observados fluidos aquosos (predominantes) pertencentes ao sistema H_2O-NaCl-$CaCl_2$, fluidos com petróleo e fluidos com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp). Nas amostras do jazigo de Bou Jaber foram observados, também, fluidos carbónicos pertencentes ao sistema $CO_2 \pm CH_4$ e fluidos aquocarbónicos pertencentes ao sistema H_2O-CO_2-CH_4-NaCl. Estes tipos de fluidos encontram-se em inclusões primárias, pseudosecundárias e/ ou secundárias.

As inclusões fluidas aquosas apresentam uma grande amplitude de valores no que diz respeito à salinidade, variando entre inclusões pouco salinas até inclusões com salinidade elevada [3,1 a 25,2 p. % eq.NaCl (inclusões primárias) e 8,7 a 22,8 p. % eq.NaCl (inclusões secundárias) - Hammam Zriba; 0,0 a 26,2 p. % eq.NaCl (inclusões primárias) e 3,1 a 26,8 p. % eq.NaCl (inclusões pseudosecundárias/ secundárias) - Bou Jaber]. Esta grande dispersão de valores sugere que nestes dois jazigos poderá ter existido a circulação e a mistura de dois fluidos de salinidades diferentes.

A composição da fase aquosa das inclusões com dois líquidos imiscíveis [Lw+Lp; 1,9 a 24 p. % eq.NaCl (inclusões primárias - Hammam Zriba); 13,0 a 25,5 p. % eq.NaCl (inclusões primárias - Bou Jaber] semelhante à composição das inclusões fluidas do tipo Lw e a coexistência dos três tipos de inclusão, Lw, Lp e Lw+Lp na mesma amostra, sugere que estes fluidos são contemporâneos. É de supor que esta mistura de fluidos transportou uma fase imiscível de

petróleo aprisionada e preservada em inclusões fluidas com dois líquidos imiscíveis.

A presença de CO_2 na fase volátil das inclusões fluidas com petróleo e a coexistência deste tipo de inclusão com inclusões carbónicas e aquocarbónicas, nomeadamente em Bou Jaber, poderá indicar a existência de um fluido constituído por $H_2O+CO_2+CH_4$+petróleo que terá ficado aprisionado em inclusões de tipologia diferente.

As temperaturas mínimas de aprisionamento para os fluidos aquosos de Hammam Zriba variam entre 99 e 170°C (inclusões primárias) e entre 111 e 158°C (inclusões secundárias). As temperaturas mínimas de aprisionamento para os fluidos aquosos de Bou Jaber variam entre 92 e 213°C (inclusões primárias) e entre 87 e 131°C (inclusões secundárias). Os fluidos com petróleo de Hammam Zriba apresentam temperaturas mínimas de aprisionamento que variam entre 99 e 142°C (inclusões primárias) e entre 92 e 154°C (inclusões secundárias) e os de Bou Jaber apresentam temperaturas mínimas de aprisionamento entre 102 e 200°C (inclusões primárias) e entre 69 a 130°C (inclusões secundárias). Não foi possível determinar as temperaturas de homogeneização das inclusões carbónicas e aquocarbónicas de Bou Jaber.

A microscopia de fluorescência permitiu identificar algumas inclusões com petróleo que em microscopia de transmissão eram semelhantes à inclusões fluidas aquosas. As cores de fluorescência deste tipo de inclusões variam entre azul-branco, azul, amarelo-esverdeado e amarelo. O valor de I546 varia entre 2,308 e 10,304 para as inclusões primárias e é de 0,514 para as inclusões secundárias de Hammam Zriba. Este valor varia entre 8,782 e 21,03 para as inclusões primárias de Bou Jaber. O valor de Q650/500 varia entre 0,158 e 0,498 para as inclusões fluidas primárias e é de 0,514 para as inclusões fluidas secundárias de Hammam Zriba. Este valor varia entre 0,276 e 0,405 para as inclusões de Bou Jaber. Os valores de Q650/500 e as cores de fluorescência

observadas indicam uma composição alifática para os hidrocarbonetos presentes nos dois depósitos minerais.

No caso de Hammam Zriba, foi calculada uma pressão de aprisionamento de 116 ± 5 bar que corresponde a uma profundidade máxima de 1155 ± 50 m.

A delimitação dos domínios de variação P-T reais de aprisinamento dos fluidos primários e secundários de Bou Jaber foi obtida pelo método de intersecção de isócoras de inclusões, supostamente sincrónicas. Os fluidos primários da fçuorite I apresentam condições de aprisionamento de T= 110 a 145ºC e P= 300 a 450 bar e o aprisionamento dos fluidos secundários ocorreu a T= 95 a 150ºC e P= 295 a 450 bar. Os fluidos primários da barite III apresentam condições de aprisionamento de T= 125 a 275ºC e P= 525 a 1200 bar. Estes resultados parecem indicar uma subida de temperatura e pressão da fluorite I para a barite III.

Quer em Hammam Zriba, quer em Bou Jaber, a deposição do minério parece estar relacionada com uma mistura de dois fluidos com salinidades diferentes, um pouco salino (água meteórica?) e outro com salinidade mais elevada relacionado com as séries do Triásico e/ ou com fluidos basinais pós-colisionais.

The study of the deposition conditions of F-Ba-Pb-Zn deposits was conducted by the characterization of the associated fluids in fluorites and barites of Hammam Zriba and Bou Jaber ore deposits.

Petrography, microthermometry, Raman spectroscopy and fluorescence microscopy studies carried out in fluorite and barite fluid inclusions indicate several fluid incursions with multiple compositions. Aqueous fluids (predominant) within the H_2O-NaCl-$CaCl_2$ system, petroleum fluids and two immiscible liquids fluids (Lw+Lp) were observed. In the samples regarding to the Bou Jaber ore deposit carbonic fluids within the $CO_2 \pm CH_4$ system and aqueous-carbonic fluids within the H_2O-CO_2-CH_4-NaCl system were also observed. These multiple fluids are sealed in primary, pseudo-secondary and/ or secondary fluid inclusions.

Aqueous fluid inclusion data shows a widespread salinity values from low salinity to high salinity inclusions [3.1 to 25.2 wt.% NaCl equivalent (primary inclusions) and 8.7 to 22.8 wt.% NaCl equivalent (secondary inclusions) - Hammam Zriba deposit; 0.0 to 26.2 wt.% equivalent (primary inclusions) and 3.1 to 26.8 wt.% NaCl equivalent (pseudo-secondary/ secondary inclusions) - Bou Jaber deposit)]. This high range salinity values indicates the circulation and a mixture of two brines (fluids) of different composition.

The aqueous phase composition of the two immiscible liquid fluid inclusions [Lw+Lp; 1.9 to 24 wt.% NaCl equivalent (primary inclusions from Hammam Zriba); 13.0 to 25.5 wt.% NaCl equivalent (primary inclusions from Bou Jaber)] similar to the composition of the aqueous fluid inclusions and the coexistence of aqueous, petroleum and two immiscible fluid inclusions in the same sample indicates that these fluids are coeval. It is likely that these brine mixture have transported an immiscible petroleum phase sealed and preserved in two immiscible liquid fluid inclusions.

The presence of CO_2 in the petroleum fluid inclusions volatile phase and the coexistence of this type of inclusion with carbonic and aqueous-carbonic fluid inclusions, in Bou Jaber ore deposit, may indicate that a fluid within the $H_2O+CO_2+CH_4$+petroleum system should have been imprisoned within different type of inclusions.

The aqueous fluids minimal trapping temperatures range from 99 to 170ºC for primary inclusions and from 111 to 158ºC for secondary inclusions from Hammam Zriba and from 92 to 213ºC for primary inclusions and between 87 to 131ºC for secondary inclusions from Bou Jaber. Petroleum fluids present minimal trapping temperatures ranging from 99 to 142ºC for primary inclusions and between 92 to 154ºC for secondary inclusions from Hammam Zriba and between 102 to 200ºC for primary inclusions and from 69 to 130ºC for secondary inclusions from Bou Jaber. Homogenization temperatures of Bou Jaber carbonic and aqueous-carbonic fluid inclusions were not determined.

Some petroleum fluid inclusions were identified by fluorescence microscopy. The petroleum fluid inclusions show white-blue, blue, green-yellow and yellow fluorescence colours. The I546 value ranges between 3.308 and 10.304 for primary fluid inclusions and is 0.514 for secondary fluid inclusions from Hammam Zriba. The I546 value ranges between 8.872 and 21.308 for primary fluid inclusions from Bou Jaber. The Q650/500 value ranges between 0.158 and 0.498 for primary fluid inclusions and is 0.514 for secondary fluid inclusions from Hammam Zriba. This value ranges between 0.276 and 0.405 for Bou Jaber fluid inclusions. The Q650/500 values and the observed fluorescence colours indicate an aliphatic composition for the hydrocarbons present in the two ore deposits.

According to the P-T-V-X model for Hammam Zriba ore deposit the trapping pressure is 116 ± 5 bar, corresponding to a maximum burial of 1155 ± 50 m.

The delimitation of the P-T trapping domains concerning the primary and secondary fluids from Bou Jaber was obtained by de isochoric intersection method. The FI primary fluids shows conditions corresponding to T= 110 to 145ºC and P= 300 to 450 bar. The P-T conditions estimated for the fluorite I secondary fluids are: T= 95 to 150ºC and P= 295 to 450 bar. The barite III primary fluids were trapped at temperatures ranging from 125 to 275ºC and pressures ranging from 525 to 1200 bar. These results suggest a temperature rising from fluorite I to barite III.

At Hammam Zriba and Bou Jaber deposits, the ore deposition may be related to a mixture of two different salinity fluids, one with low salinity (meteoric water?) and one with higher salinity related to the Triassic series and/ or with post-collision basinal fluids.

Fig. I-1a Calibração da Platina Chaixmeca em Fevereiro e Junho de 2004

Fig. I-1b Calibração da Platina Linkam em Junho de 2004

Fig. I-2 Diagrama de fase do sistema $NaCl-H_2O$ a baixas temperaturas segundo dados apresentados por Hall *et al.* (1988), Sterner *et al.* (1988) e Bodnar *et al.* (1989). P = Peritéctico (0,1ºC, 26,3 wt% NaCl); E = Eutéctico (-21,2ºC, 23,2 wt% NaCl) (Bodnar 2003c)

Fig. I-3 Comparação do Programa McFlincor de Brown & Hagemann (1994) e do programa ISOC do conjunto de Software FLUIDS de Bakker (2003) na projecção de isócoras (nesta projecção foi utlizada a mesma IF).

Fig. II-1 Localização geográfica dos jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber (modificado de http://www.lib.utexas.edu/tunisia.html)

Fig. II-2 Distribuição dos depósitos do tipo Mississipy Valley e distritos: 1 Polaris; 2 Eclipse; 3 Nanisivik; 4 Gayna; 5 Bear-Twit; 6 Godlin; 7 Pine Point; 8 Esker; 9 Sardinia; 10 Washington Land; 11 Robb Lake; 12 Monarch-Kicking Horse; 13 Giant; 14 Irankuh district; 15 Gays River; 16 Newfoundland; 17 Mealine; 18 Upper Mississipy Valley; 19 Southest Missouri (Old Lead Belt, Viburnum Trend, Indian Creek); 20 Central Missouri; 21 Tri-State; 22 Northen Arkansas; 23 Austinville; 24 Friedensville; 25 Central Tennessee; 26 East Tennessee; 27 San Vicente; 28 Vazante; 29 Ireland (e.g. Navan, Lisheen, Galmoy); 30 Carcow-Silesia; 31 Apline district; 32 Pering-Bushy Park; 33 Sorby Hills; 24 Coxco; 35-37 Lennard Shelf (e.g. Cadjebut, Blendvale, Twelve-Mile Bore); 38 El-Abad-Mekta district; 39 Reocin; 40 Cévennes; 41 Bou Grine (Sangster 1990)

Fig. II-3 Situações geológicas em que ocorrem os jazigos do tipo MVT, segundo Evans (1993)

Fig. II-4 Comparação entre orógenos do tipo colisional, tipo Andino e tipo inversão. O orógeno do tipo colisional (em cima) resulta da colisão entre uma margem passiva e um arco, baseado em exemplos do Neogeno de Timor, Nova Guiné e Taiwan e vários exemplos antigos que incluem a orogenia Tacónica e a orogenia Ouachita (América do Norte). O orógeno do tipo Andino (meio) é baseado nos modernos Andes e nos sistemas Laramide do Creácico – Paleocénico tardio na zona oeste da América do Norte. A astenosfera em convecção contribui para a subsidência da *foreland* numa escala regional ampla (Mitrovica *et al.* 1989 *in* Bradley e Leach 2003), colocando este tipo de sistema de *foreland* à parte de outros. O orógeno do tipo inversão (em baixo) é flanqueado em ambos os lados por bacias do tipo *foreland* originadas por compressão, baseado nos Pirinéus (Muñoz 1992 *in* Bradley e Leach 2003) (Bradley e Leach 2003)

Fig. II-5 Modelo sequencial da colisão entre uma margem passiva e um arco.
A – Período ante-colisional
B – Período colisional
C – Período pós-colisional com *uplift* devido à descarga por erosão
D – Período pós-colisional com *uplift* devido ao colapso da placa oceânica subductada
(Bradley e Leach 2003)

Fig. II-6 Blocos diagramas mostrando a evolução de uma *foreland*. O diagrama superior mostra que, durante a convergência de placas, um cinturão de compressão submarino carrega a margem passiva, formando a bacia do tipo *foreland*, o domínio extensional e o *forebulge*. A convergência de placas causa continuamente que estas migrem através da placa *foreland*. A bacia *foreland* continua subpreenchida devido à migração do centro de deposição. A mineralização de barite ao longo do eixo do *foredeep* é baseada em exemplos de Ouachitas (Maynard e Okita 1991). No diagrama inferior, a convergência de placas cessou e a bacia do tipo *foreland* está preenchida com sedimentos, criando condições hidrológicas favoráveis à mineralização do tipo MVT. Esta situação é correspondente à mineralização na região de Ozark (Bradley e Leach 2003)

Fig. II-7 Duas sequências alternativas para a génese de depósitos do tipo MVT em cinturões de compressão. Em A, os depósitos formam-se em estratos planos e são posteriormente deformados. Em B, a deformação do estrato hospedeiro precede o período mineralizante (Bradley e Leach 2003)

Fig. II-8 Carta Tectónica simplificada da Tunísia com a localização dos jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber (adaptado de Ben Ayed et Viguier 1981 *in* Ben Ayed et Zargouni 1990)

Fig. II-9 Corte transversal do horst de Hammam Zriba. 1: calcários do Eocénico inferior; 2: margas paleocénicas; 3: alternâncias margo-calcárias do Maestrichiano; 4: calcário do Campaniano médio-superior; 5: mineralizações; 6: calcário do Portlandiano; 7: falhas (adaptado de Melki 1990)

Fig. II-10 Mapa Geológico de Hammam Zriba. Q: Quaternário: aluviões; ES: Eocénico superior: Margas; EI: Eocénico inferior: calcários; Ma-Pa: Maestrichiano – Paleocénico indiferenciado; Pa: Paleocénico: margas Ma: Maestrichiano: alternâncias de calcários e de margas; C: Campaniano médio-superior e margas; Po: Portlandiano: calcários maciços; / fracturas adaptado de Melki 1990)

Fig. II-11a Histograma representativo da Th das IF da Fluorite Rubané (FI)

Fig. II-11b Diagrama de correlação de versus Th referente a IF aquosas (Lw) da FI

Fig. II-11c Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) FI

Fig- II-11d Histograma representativo da TfCO2 das IF com petróleo [Lp-(c)] da FI

Fig. II-12a Histograma representativo da Th das IF da Fluorite da FII

Fig. II-12b Diagrama de correlação de versus Th referente a IF aquosas (Lw) da FII

Fig. II-12c Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) da Fluorite do minério intracársico (FII)

Fig. II-13a Histograma representativo de Th das IF da Fluorite da FIII

Fig. II-13b Diagrama de correlação de versus Th referente a IF aquosas (Lw) da FIII

Fig. II-13c Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) da FIII

Fig. II-14a Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da FI; Q= 0,158

Fig. II-14b Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF S da FI; Q= 0,514

Fig- II-14c Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da FII; Q= 0,166

Fig. II-14d Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da FIII; Q= 0,498

Fig. II-15a Isócoras representativas das IF P, PS e S da FI

Fig. II-15b Isócoras representativas das IF P e S da FII

Fig. II-15c Isócoras representativas das IF P e S da FIII

Fig. II-16 Modelo P-T-V-X da área de Hammam Zriba, considerando dados relativos à FI (adaptado de Benchilla *et al.* 2003)

Fig. II-17 Isócoras representativas das IF aquosas das FI, FII e FIII com a representação da intersecção da pressão de aprisionamento determinada por Benchilla et al. (2003)

Fig. II-18 Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) nas Fluorites FI, FII e FIII

Fig. II-19 Mapa geoestrutural de Jebel Bou Jaber (modificado de Amouri 1986)

Fig. II-20a Corte esquemático do jazigo principal de Bou Jaber (modificado de Bouhlel 1987 *in* Bouhlel 1993):
1 – Margas verdes e calcários margosos (Vraconiano)
2 – Calcários laminados e argilas negras (Albiano superior s.s.)
3 – Corpos mineralizados (A1, A2 e A3)
4 – Calcários recifais do Gargasiano inferior
5 – Calcários em bancadas estratificadas do Gargasiano inferior

Fig. II-20b Cortes esquemáticos ilustrando a zonalidade da estrutura e da mineralogia, da parte externo até ao centro, dos diferentes coropos mineralizados do jazigo principal de Bou Jaber (modificado de Bouhlel 1987 *in* Bouhlel 1993)
1 – Margas verdes e calcários margosos (Vraconiano)
2 – Calcários laminados e argilas negras (Albiano superior s.s.)
H.G. – Superfície endurecida
3 – Brechas de karst ricas em Pb-Zn
4 – Minério rubané rico em barite e fluorite
5 – Bolsadas, maciços e geódes com grandes cristais de barite
6 – Calcários recifais do Gargasiano inferior
7 – Argilas negras ricas em blenda e pirite
8 – Calcários em bancadas estratificadas do Gargasiano inferior

Fig. II-21a Histograma representativo da Th das IF da Fluorite da FI

Fig. II-21b Diagrama de correlação de versus Th referente a IF aquosas (Lw) da FI

Fig. II-21c Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) da FI

Fig. II-21d Histograma representativo da das IF da fluorite FI

Fig. II-21e Histograma representativo da salinidade (p. % eq. de NaCl) das IF da FI

Fig. II-21f Histograma representativo da $TfCO_2$ das IF carbónicas da FI

Fig. II-21g Diagrama de correlação de $TfCO_2$ versus $ThCO_2$ referente a IF carbónicas (Lc) da FI

Fig. II-22a Histograma representativo da Th das IF da BII

Fig. II-22b Diagrama de correlação de versus Th referente a IF aquosas (Lw) da BII

Fig. II-22c Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) da BII

Fig. II-22d Histograma representativo da das IF da BII

Fig. II-22g Histograma representativo da salinidade (p. % eq. NaCl) das IF da BII

Fig. II-23a Histograma representativo da Th das IF da BIII

Fig. II-23b Diagrama de correlação de versus Th referente a IF aquosas (Lw) da BIII

Fig. II-23c Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) da BIII

Fig. II-23d Histograma representativo da das IF da BIII

Fig. II-23e Histograma representativo da salinidade (p. % eq. NaCl) das IF da BIII

Fig. II-24 Diagrama de correlação de Th versus % fase vapor nas IF da BIII

Fig. II-25a Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da BII; Q= 0,276

Fig. II-25b Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da BIII; Q= 0,405

Fig. II-26a Isócoras respresentativas dos fluidos aquosos e carbónicos da FI

Fig. II-26b Isócoras respresentativas dos fluidos aquosos e carbónicos da BII e da BIII

Fig. II-27 Diagrama de correlação de salinidade versus Th referente a IF aquosas (Lw) na FI, na BII e na BIII

Fig. II-28a Diagrama de correlação de *versus* Th referente a IF aquosas e IF com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp) das fluorites e barites de Hammam Zriba e Bou Jaber

Fig. II-28b Histograma representativo da Th das IF P com petróleo das fluorites e barites de Hammam Zriba e Bou Jaber

Fig. II-29 Diagrama de correlação de *versus* Th referente a IF de Hammam Zriba e Bou Jaber, comparado com o intervalo de e Th dos depósitos do tipo MVT, reportados por Touray (1989)

Fig. III-1 Modelo da migração do fluido mineralizante e localização do depósito de Hammam Zriba e possíveis rochas fonte (S= encurtamento possível; Benchilla *et al.* 2003)

Foto II-1	Jazigo de Hammam Zriba
Foto II-2	Mineralização (M) intercalada entre os calcários do Portlandiano (Po) e os calcários do Campaniano médio-superior (C)
Foto II-3a	Amostra de mão do minério rubané
Foto II-3b	Lâmina delgada vista ao microscópio óptico de luz transmitida do minério rubané (N//): F: fluorite, Ba: barite (HZ)
Foto II-4a	Amostra de mão do minério intracársico (HZ)
Foto II-4b	Amostras de mão do minério intracársico (brecha) (HZ)
Foto II-4c	Lâmina delgada vista ao microscópio de luz transmitida do minério intracársico (N//): F- fluorite, Ba- barite (HZ)
Foto II-4d	Lâmina delgada vista ao microscópio de luz transmitida do minério intracársico (NX): F- fluorite, Ba- barite (HZ)
Foto II-5a	Amostra de mão contendo o minério rubané e a fluorite geódica tardia (HZ)
Foto II-5b	Amostra de mão contendo o minério intracársico e a fluorite geódica tardia (HZ)
Foto II-6a	Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lw na fluorite
Foto II-6b	Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lw, P e S, na fluorite
Foto II-7a	Inclusão fluida bifásica P incolor do tipo Lp-(c) na fluorite
Foto II-7b	Inclusões fluidas bifásicas S de cor amarela do tipo Lp-(c) na fluorite
Foto II-8a	Inclusões fluidas do tipo Lp-(c) P com fluorescência azul e azul-branco
Foto II-8b	Inclusões fluidas do tipo Lp-(c) P com fluorescência azul
Foto II-8c	Inclusões fluidas do tipo Lp-(c) S com fluorescência azul-branco
Foto II-9	Jazigo "Est" – Bou Jaber
Foto II-10	Relevo isolado e escarpado da região de Bou Jaber edificado durante a Orogenia Maghrebiana
Foto II-11a	Amostra de mão do minério intracársico (BJ)
Foto II-11b	Lâmina delgada vista ao microscópio de transmissão do sedimento intracársico (n//): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena (BJ)
Foto II-11c	Lâmina delgada vista ao microscópio de transmissão do sedimento intracársico (nx): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena (BJ)
Foto II-12a	Amostra de mão do minério rubané (BJ)
Foto II-12b	Lâmina delgada vista ao microscópio de transmissão do minério rubané (n//): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena)

Foto II-12c Lâmina delgada vista ao microscópio de transmissão do minério rubané (nx): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena (BJ)

Foto II-13a Amostra de mão da BIII (BJ)
Foto II-13b Lâmina delgada vista ao microscópio de transmissão BIII (n//): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena (BJ)

Foto II-13c Lâmina delgada vista ao microscópio de transmissão da BIII (nx): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena BJ)

Foto II-13d Amostra de mão da barite III com preenchimento de vazio por barite transparente, fluorite cúbica transparente e romboedros de calcite (BJ)

Foto II-13e Ampliação da zona de preenchimento do vazio (BJ)

Foto II-14a Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lw na fluorite (BJ)

Foto II-14b Inclusões fluidas bifásicas P do tipo Lw na fluorite (BJ)

Foto II-14c Inclusões fluidas bifásicas S do tipo Lw na fluorite (BJ)

Foto II-15a Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lp-(c) na fluorite (BJ)

Foto II-15b Inclusão fluida bifásica P do tipo Lp-(c) na fluorite (BJ)

Foto II-15c Inclusões fluidas bifásicas e trifásicas S do tipo Lp-(c) na fluorite (BJ)

Foto II-16 Inclusão fluida monofásica P do tipo Lc na fluorite (BJ)

Foto II-17a Inclusões fluidas bifásicas P do tipo Lw na barite (BJ)

Foto II-17b Inclusões fluidas bifásicas PS/S do tipo Lw na barite (BJ)

Foto II-18a Inclusão fluida bifásica P do tipo Lp-(c) na barite (BJ)

Foto II-18b Inclusão fluida trifásica do tipo P Lw-p-(c) na barite (BJ)

Foto II-19 Inclusão fluida monofásica P do tipo Lc e inclusão fluida bifásica P do tipo Lw-c na barite (BJ)

Foto II-20a Inclusões fluidas do tipo Lp-(c) P com fluorescência azul-branco na FI (BJ)

Foto II-20b Inclusões fluidas do tipo Lp-(c) P com fluorescência amarelo na FI (BJ)

Foto II-20c Inclusões fluidas do tipo Lp-(c) P com fluorescência azul e amarelo na BIII (BJ)

Foto II-20d Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lp-(c) P e trifásica Lw-p-(c) P com fluorescência azul-branco na BIII (BJ)

Tabela II-1 Síntese dos resultados microtermométricos dos três tipos deposicionais de fluorite em Hammam Zriba

Tabela II-2 Síntese dos resultados da composição e densidade globais obtidos nas IF dos três tipos deposicionais de fluorite de Hammam Zriba (composições expressas em moles% e densidade em $g.cm^{-1}$)

Tabela II-3 Síntese dos resultados microtermométricos da fluorite e das barites de Bou Jaber

Tabela II-4 Síntese dos resultados da composição da fase volátil e da composição e densidade globais obtidos nas IF da fluorite e das barites de Bou Jaber (composições expressas em moles% e densidade em $g.cm^{-1}$)

I parte

Introdução Geral

I Parte – Introdução, Objectivos, Métodos de Trabalho (Trabalho de Campo e Trabalho Laboratorial, Estudo das Inclusões Fluidas)

1. *Introdução*

O estudo da natureza e da evolução de fluidos crustais é já reconhecido como de primordial importância para a compreensão dos processos geológicos, em particular os relacionados com a génese de concentrações minerais.

Sendo as únicas amostras disponíveis dos paleofluidos, as inclusões fluidas (IF) permitem perceber os processos físicos e químicos que estiveram na origem do crescimento dos minerais, bem como dos paleoambientes que presidiram à sua formação.

Com uma grande dispersão geográfica as mineralizações de F-Ba-Zn-Pb têm vindo a ser continuamente estudadas. A investigação dos fluidos associados a estas mineralizações é mais uma ferramenta para o conhecimento da sua génese.

A província fluoreada tunisina, na qual se insere o jazigo de Hammam Zriba e o distrito mineiro de Bou Jaber são dois bons exemplos de mineralizações de F-Ba-Zn-Pb. No primeiro caso a mineralização ocorre na discordância entre os calcários maciços do Portlandiano e os calcários do Campaniano. No segundo caso os vários corpos mineralizados ocorrem nos carbonatos do Apciano nos dois flancos de um anticlinal.

O presente estudo pretende contribuir para a caracterização dos fluidos associados às mineralizações de F-Ba-Zn-Pb do norte da Tunísia, nomeadamente, dos jazigos de Hammam Zriba e de Bou Jaber e o seu estudo comparativo.

2. *Objectivos*

Tendo como meta contribuir para a evolução dos conhecimentos sobre os fluidos associados às mineralizações de Hammam Zriba e Bou Jaber definiram-se como objectivos:

- a dedução das características fisico-químicas de deposição das fluorites e barites destes dois jazigos e

- a reconstituição das condições P-T-V-X de circulação dos fluidos.

3. Métodos de Trabalho

3.1 Trabalho de Campo e Trabalho Laboratorial

Como ferramentas para o desenvolvimento deste estudo foram utilizados a petrografia e o estudo das IF em barites e fluorites dos jazigos anteriormente mencionados.

Foi efectuada a separação das amostras colhidas durante o trabalho de campo seguindo-se o estudo petrográfico através de lâminas delgadas e o estudo das IF através de lâminas espessas utilizando o microscópio de transmissão.

O estudo petrográfico teve como objectivo a correcta definição das associações minerais presentes, bem como a cronologia relativa à deposição das diferentes fases.

O estudo das IF teve como objectivo a caracterização físico-química dos fluidos mineralizantes e a reconstituição P-T-V-X de circulação de fluidos. Este estudo foi realizado através da microtermometria (criometria e termometria), da espectroscopia Raman e da microscopia de fluorescência.

3.2 Estudo das Inclusões Fluidas

3.2.1 Considerações Gerais

No estudo geológico de uma determinada região, para além das análises da mineralogia, estudo da tectónica, da hidrogeologia, da geoquímica, entre outras, é também de grande importância o estudo de inclusões fluidas. Estas pequenas cavidades preenchidas por fluidos selados nos minerais servem como mais uma ferramenta na determinação dos fenómenos que estiveram

presentes na formação de um determinado mineral ou rocha. Admite-se, portanto, com base em considerações teóricas e experimentais, que as inclusões fluidas têm uma composição global muito semelhante à dos fluidos seus precursores, sendo o único meio directo de examinar as características das soluções que formam uma ou várias fases constituintes dos sistemas que são os minerais ou as rochas.

As inclusões fluidas são cavidades preenchidas por fluidos selados nos minerais. Elas constituem uma relíquia da fase fluida que interveio no processo genético de um mineral, sendo o único meio directo de examinar as características das soluções que formam uma ou várias fases constituintes dos sistemas que são os minerais ou as rochas.

O objectivo principal do estudo das inclusões fluidas é a reconstituição das características físico-químicas de circulação dos fluidos contribuindo deste modo, para uma melhor compreensão das interacções fluido-rocha.

As inclusões fluidas podem ser consideradas como cápsulas que armazenam informação acerca de temperaturas, pressões, composição e densidades dos paleofluidos, bem como condições de pH, fO_2 e fS, entre outras. Pode-se, então, através das inclusões fluidas reconstituir pelo menos parte da história do mineral hospedeiro.

Geneticamente consideram-se quatro tipos de inclusões fluidas: primárias (P), secundárias (S), pseudosecundárias (PS) (Roedder 1981, 1984) e indeterminadas (I) (Goldstein 2003).

Quando estas irregularidades são seladas durante a cristalização do mineral hospedeiro, sendo, portanto, amostras da solução presente no momento da formação do mineral, são designadas por **primárias**, pois foram incluídas

durante o crescimento do cristal e contêm uma amostra do fluido responsável pela precipitação do mineral.

No caso de terem sido seladas após a precipitação do mineral são designadas por **secundárias**. Os fluidos presentes nestas inclusões são aprisionados devido a ocorrerem deformações no cristal, que tanto podem ser frágeis como dúcteis. Estas deformações podem, portanto, resultar na formação de microfracturas de tamanho micrométrico, deformação de superfícies do cristal e planos de cisalhamento. Quando estas características se desenvolvem é provável que sejam preenchidos com o fluido presente durante ou após a deformação. O fluido pode ser aprisionado entre as superfícies deformadas quer por precipitação subsequente (numa escala submicroscópica) ou por processos de dissolução-reprecipitação. Assim que são formados, os planos de deformação são cicatrizados pelo transporte de iões para dentro da fractura havendo uma supersaturação da solução em relação ao mineral precipitado.

Quando as fracturas são cicatrizadas durante o crescimento do cristal, os fluidos nelas presentes são designados por **pseudosecundários**, uma vez que os processos de aprisionamento são similares aos das inclusões fluidas secundárias. Se o crescimento do cristal continuar após um episódio deformacional, então as inclusões fluidas aprisionadas nas microfracturas retêm um registo dos fluidos presentes após esse evento deformacional, mas antes de um novo episódio de crescimento do cristal. Estes fluidos aprisionados ao longo de microfracturas são fluidos que banharam o cristal durante um intervalo de tempo de crescimento do cristal.

Por vezes, a origem das inclusões fluidas no que diz respeito à sua formação, não pode ser determinada com certeza e a sua origem é dita como sendo **indeterminada**.

A composição das inclusões fluidas depende da natureza física e química do meio fluido no momento do aprisionamento. Segundo Weisbrod (1981) há a distinguir os seguintes tipos de inclusões: inclusões aquosas (tipo L), inclusões ricas em CO_2 (tipo C), inclusões com fases sólidas inclusas (tipo S) e inclusões com vidro e/ou *melt* cristalizado (tipo G).

As inclusões aquosas são o tipo mais vulgar. São essencialmente constituídas por uma solução aquosa. À temperatura ambiente contêm duas fases, uma líquida (φL) e uma gasosa (φG), esta sob a forma de uma bolha, ou somente uma fase líquida.

As inclusões ricas em CO_2 dividem-se em dois subtipos consoante a sua composição: inclusões carbónicas e inclusões aquo-carbónicas. Para além do CO_2, podem também ocorrer, embora em menor quantidade, outros compostos tais como o CH_4, N_2 e SH_2.

As inclusões carbónicas são constituídas por CO_2 sob a forma de CO_2 líquido (CO_2l) e/ou gasoso (CO_2g). Se está presente somente CO_2 gasoso, ou se este é dominante, isto é indicativo de muito baixa densidade, estas inclusões podem também receber a designação de tipo V. Este último tipo é, por exemplo, vulgar em minerais que se formam a partir de uma fase fluida gasosa ou de fluidos heterogéneos em ebulição.

As inclusões aquo-carbónicas são constituídas para além do CO_2 por uma solução aquosa.

As inclusões com fases sólidas inclusas são formadas a partir de soluções complexas ou muito concentradas. Podem conter uma ou mais fases sólidas (φS) que podem ter a forma de cristais, *daughter minerals*, além de uma φL e/ou φG. São, portanto polifásicas.

Uma identificação dos *daughter minerals*, juntamente com uma estimativa das suas proporções relativas, pode dar uma indicação acerca da composição, em termos de componentes maiores, da inclusão fluida.

As inclusões com vidro e/ou *melt* cristalizado formam-se por aprisionamento de um *melt* que depois cristalizou ou não, dependendo isso de vários factores tais como a taxa de arrefecimento, da presença ou não de voláteis e da composição do *melt*.

Para além dos tipos referidos podem ocorrer inclusões dominantemente constituídas por outros fluidos como, por exemplo, hidrocarbonetos, ou ainda inclusões complexas que representam tipos mistos ou intermédios dos atrás referidos.

Uma vez que as inclusões com petróleo irão ser abordadas ao longo deste trabalho interessa descrever sumariamente este tipo de fluidos. Na literatura são utilizados os termos "inclusões com hidrocarbonetos" ("*hydrocarbon inclusons*") ou "inclusões com óleo" ("*oil inclusões*") para descrever este tipo de inclusões. No presente trabalho irá ser adoptada a nomenclatura sugerida por Burruss (2003a), "inclusões com petróleo" ("*peroleum inclusions*"), uma vez que petróleo é o termo genérico para fluidos ricos em hidrocarbonetos produzidos durante a evolução térmica das bacias sedimentares.

As IF com petróleo são caraterizados pela sua extrema complexidade (e.g. Burruss 1981; Munz 2001; Burruss 2003a).

Os principais componentes do petróleo são hidrocarbonetos, componentes com azoto-enxofre-oxigénio (N-S-O) e gases inorgânicos, como o N_2, CO_2 e H_2S. Os hidrocarbonetos no petróleo podem ser subdivididos em:

1) **Parafinas**, que consistem em alcanos normais e ramificados. Os alcanos são muitas vezes designados por hidrocarbonetos saturados, uma vez que todos os átomos estão unidos por ligações simples;

2) **Naftalinas e Cicloalcanos**, que consistem em compostos com estruturas cíclicas. As naftalinas são, também, componentes saturados, que apenas contêm ligações simples;

3) **Aromáticos**, que são compostos que contêm estruturas cíclicas com ligações duplas. O composto aromático mais simples é o benzeno, C_6H_6, consistindo numa estrutura em anel com 6 átomos de carbono.

O composto mais simples é o metano, CH_4. O metano tem um ponto crítico a baixa temperatura e só existirá como um fluido supercrítico ou gás em condições geológicas. Assim que o número de átomos de carbono nas moléculas aumenta, a combinação destes átomos também aumenta. Compostos com a mesma fórmula mas com estruturas diferentes são designados por isómeros. O número de isómeros aumenta rapidamente com o aumento do número de átomos de carbono. O aumento no número de átomos de carbono na molécula leva também a um aumento na temperatura crítica e descida na pressão crítica. À temperatura ambiente, o pentano, por exemplo, existirá sob a forma de um líquido, e compostos com um número mais elevado de átomos de carbono (e.g. naftalina, $C_{10}H_8$) estarão em fase sólida. A complexidade química dos fluidos com petróleo resulta, portanto, em complexas mudanças de fase, como se verá adiante.

O estudo das inclusões fluidas na caracterização das condições físico-químicas que presidiram aos diferentes processos geológicos, está condicionado por duas hipóteses fundamentais (Weisbrod *et al.* 1976):

– o fluido aprisionado é representativo da solução original;

– o fluido uma vez aprisionado, num reservatório supostamente estanque e quimicamente inerte, mantém as suas características físico-químicas (composição e densidade).

Com base em considerações teóricas e experimentais admite-se que as inclusões fluidas têm uma composição global muito semelhante à dos fluidos seus precursores. No entanto, existem diferenças grandes na composição que se têm de ter em conta se as inclusões aprisionaram fluidos heterogéneos como os que resultam de situações de imiscibilidade nos fluidos precursores e ainda, mais vulgarmente, de fenómenos de ebulição. Isto significa que o estudo de inclusões com composições X e Y diferentes e resultantes do aprisionamento de um fluido heterogéneo (X+Y) não dá nenhuma indicação acerca das proporções relativas de X e Y no fluido original.

Também, certas modificações físicas ocorridas nas inclusões após o seu aprisionamento, podem conduzir à interpretação incorrecta dos resultados obtidos. Cita-se, por exemplo, a possibilidade de o fluido contido na inclusão já não ser representativo do fluido inicial, ou porque houve uma *fuga*, ou porque a forma da inclusão e, consequentemente, o seu volume variou. A primeira situação designa-se por *leakage*. A mudança da forma designa-se por *necking-down* e a variação de volume por *decrepitação*.

A perda de fluido (*leakage out*) pode ocorrer na decrepitação como também, resultar da microfissuração causada pela deformação do mineral hospedeiro. A microfracturação poderá causar a reabertura de inclusões preexistentes e a sua contaminação por fluidos tardios (*leakage in*). Este tipo de modificação é mais frequente em minerais facilmente cliváveis, como a calcite e a barite ou em minerais que apesar de serem mais resistentes foram deformados, por

acção de tensões, ou sujeitos a temperaturas superiores às da sua formação, ocorrendo a explosão ou decrepitação das inclusões primárias.

A decrepitação (natural ou em laboratório) das inclusões ocorre quando a pressão no seu interior se torna superior à resistência das paredes da inclusão (Leroy 1979), conduzindo a uma fuga total ou parcial do seu conteúdo.

O estrangulamento (*necking-down*) de uma inclusão é a separação de uma inclusão inicial única, em duas ou mais inclusões com composições e densidades diferentes e está geralmente relacionado com a deformação do mineral hospedeiro. Obviamente, quer a composição, quer a densidade do fluido não são, neste caso, representativos do fluido original.

Uma vez que a maior parte das inclusões fluidas é extremamente pequena, <10 μm em diâmetro, o que significa que uma inclusão contém apenas um total de ~10^{-10}g de material, ela não pode ser analisada por técnicas químicas usuais.

3.2.2 Metodologias e Técnicas de Estudo das Inclusões Fluidas

Para se proceder ao estudo das inclusões fluidas utilizam-se dois tipos distintos de métodos para determinar a composição da inclusão: métodos não destrutivos e métodos destrutivos (Weisbrod *et al.* 1976; Roedder 1984).

Os métodos não destrutivos, como o nome indica, consistem em analisar recorrendo a um microscópio as características intrínsecas de cada inclusão e as possíveis variações de fases que nelas podem ocorrer, sem que haja destruição da amostra, permitindo que esta possa ser novamente utilizada.

Os métodos destrutivos usados para a determinação da composição de inclusões fluidas têm logo à partida a limitação de apenas ser possível utilizar cada amostra analisada uma única vez.

Entre as várias técnicas de estudo utilizadas na caracterização dos fluidos foram utilizadas no decorrer deste trabalho, técnicas não destrutivas: a microtermometria, a espectoscopia Raman, e a microscopia de fluorescência.

3.2.2.1 Microtermometria

A análise microtermométrica é indiscutivelmente uma das técnicas não destrutivas mais utilizadas no estudo dos fluidos.

O estudo microtermométrico consiste na observação e reconhecimento das mudanças de fase dos fluidos ocorridas nas inclusões, quando sujeitas a ensaios de criometria (arrefecimento) e termometria (aquecimento). A caracterização microtermométrica dos fluidos foi efectuada em lâminas espessas (espessura de cerca de 200 μm) polidas de ambos os lados utilizando para o efeito, o microscópio de luz transmitida ao qual se adapta uma platina para arrefecimento e aquecimento. O arrefecimento é efectuado através da circulação de azoto líquido, permitindo arrefecer até -180ºC. O aquecimento é obtido através de resistências eléctricas, podendo-se atingir temperaturas de +600ºC.

Uma vez que a execução das operações de criometria e termometria numa mesma platina pode acentuar as diferenças entre a temperatura da amostra e a temperatura registada no sensor, foram utilizadas duas platinas, uma para o arrefecimento, a platina "Chaixmeca", que permite atingir temperaturas compreendidas entre -180ºC e +600ºC, e outra para o aquecimento, a platina "Linkam 600", que permitem uma variação de temperaturas entre -180ºC e +600ºC.

Para uma boa repetibilidade das leituras torna-se necessário proceder à calibração das platinas com uma certa regularidade.

Para a calibração da platina a baixas temperaturas utilizaram-se como padrões, inclusões naturais contendo CO_2 puro ($TfCO_2$= -56,6ºC) e inclusões sintéticas (H_2O-NaCl) de salinidade conhecida cuja fusão do gelo ocorre à temperatura de TfG= -0,4ºC. A precisão das medidas para o CO_2 é de 0,9ºC e para a fusão do gelo varia entre 0,2ºC e 0,4ºC (Fig. I-1a).

Na calibração a temperaturas superiores a 30ºC foram utilizados como padrões produtos sólidos manufacturados pela *Merck Co. Schemlzkorper* com pontos de fusão conhecidos e que demonstraram boa repetibilidade, nomeadamente 70ºC, 100ºC e 374,1ºC. A diferença entre a temperatura de fusão dos padrões e da temperatura de fusão observado é de 0ºC, 2ºC e 10ºC, respectivamente (Fig. I-1b).

Durante trabalhos de criometria as temperaturas medidas são temperaturas de fusão (Tf) de uma determinada fase ou temperaturas de homogeneização (Th).

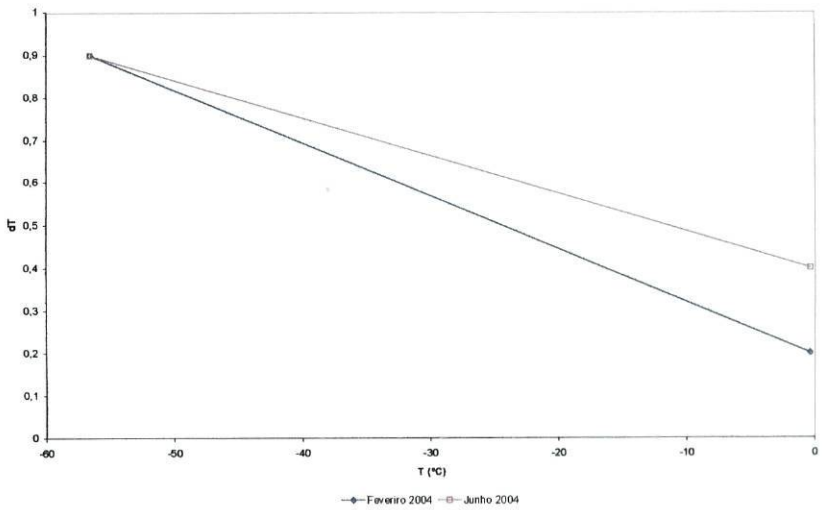


Fig. I-1a - Calibração da Platina Chaixmeca em Fevereiro e Junho de 2004

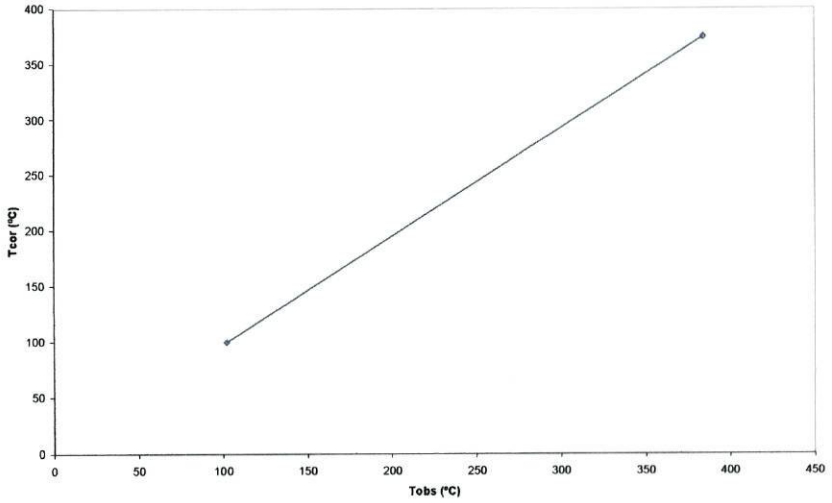


Fig. I-1b - Calibração da Platina Linkam em Junho de 2004

A recolha das temperaturas de mudança de fase são efectuadas durante o aquecimento global da inclusão até à temperatura ambiente, após estas terem sido submetidas a um congelamento das fases líquidas. O aquecimento deve ser feito a uma velocidade suficientemente lenta para que os equilíbrios sejam atingidos.

As principais mudanças de fase a observar durante a criometria (-180°C a +30°C) são as seguintes:

ThCH$_4$ (≤ -82,1°C) – Temperatura de homogeneização do CH$_4$ (= -82,1°C, no caso do CH$_4$ puro). A homogeneização pode ocorrer em líquido, vapor ou crítico;

TfCO$_2$ (≤ -56,6°C) – Temperatura de fusão do CO$_2$. Temperaturas inferiores ao ponto triplo (-56,6°C) indicam a presença de outras espécies voláteis (CH$_4$, N$_2$, H$_2$S,...);

Tfi – Temperatura de fusão inicial do gelo ("*first melting*"). Representa o ponto eutético da solução aquosa, permitindo determinar a natureza dos sais

dissolvidos na fase aquosa (Crawford 1981; Roedder 1984). Valores da temperatura de fusão inicial em torno de -20,8ºC, -10,6ºC, -49,8ºC, -33,6ºC, -22,9ºC, -52,0ºC, -35,0ºC, são diagnósticos da presença de NaCl, KCl, $CaCl_2$, $MgCl_2$, NaCl-KCl, NaCl-$CaCl_2$, e NaCl-$MgCl_2$, respectivamente.

TfG (≤ 0,0ºC) – Temperatura de fusão (final) do gelo. É utilizada na estimativa da salinidade que, se exprime convencionalmente em % equivalente em peso de NaCl (p.%eq. NaCl) da fase aquosa, para o sistema H_2O-NaCl (Bodnar 1993). O cálculo é sobrestimado na presença de clatratos de CO_2 e/ou CH_4.

TfCl – Temperatura de fusão de clatratos (hidratos de CO_2, CH_4,...). Permite calcular a salinidade da fase aquosa, salientando o facto que, para este método se tornar válido é necessário que a fusão dos clatratos se efectue na presença de CO_2 líquido e CO_2 vapor. Trabalhos recentes de Dubessy *et al.* (1992), Bakker e Thiéry (1994) e Bakker *et al.* (1996) utilizam a TfCl para o cálculo da salinidade e composição global.

TfHy – Temperatura de fusão de hidratos de sal (e.g. antarcticite, hidrohalite,...).

$ThCO_2$ (≤ +31,1ºC) – Temperatura de homogeneização do CO_2 que poderá ocorrer, em fase líquida (L), vapor (V) ou crítica (C), esta última caracterizada pelo esbatimento do menisco que separa a fase líquida da fase vapor. É um parâmetro importante para o cálculo da densidade da fase carbónica, assim como para a determinação do volume molar da fase gasosa.

A identificação dos sais dissolvidos na solução aquosa é muito importante para a determinação do sistema químico das IF. Embora existam fluidos em que a H_2O é o único composto presente, na maioria dos casos, os fluidos são bastante mais complexos, contendo um ou mais tipos de sais (eg. antarcticite, hidrohalite, halite,...).

Na presença de catiões bivalentes, como o Ca^{2+} ou o Mg^{2+}, a inclusão, quando congelada, apresenta uma cor acastanhada e um aspecto tipo "casca de laranja" ("*speackle appearance*"). Exceptuando nos casos de composições extremamente ricas em $CaCl_2$, a antarcticite ($CaCl_2.6H_2O$) desaparece no eutéctico, deixando uma mistura finamente granulada de gelo e hidrohalite ($NaCl.2H_2O$).

É importante fazer a distinção entre a fusão do gelo e a fusão da hidrohalite, uma vez que daí resultam duas salinidades que diferem marcadamente para idênticos pontos de fusão. Uma fusão final a -0,1°C pode corresponder a uma salinidade aproximada de 0% ou 26% (em equivalente em peso de NaCl), dependendo de qual a última fase (gelo ou hidrohalite) a desaparecer. Se for a hidrohalite, isso significa que a salinidade do fluido está compreendida entre 23,3 e 26,3% em equivalente em peso de NaCl (Fig. I-2).

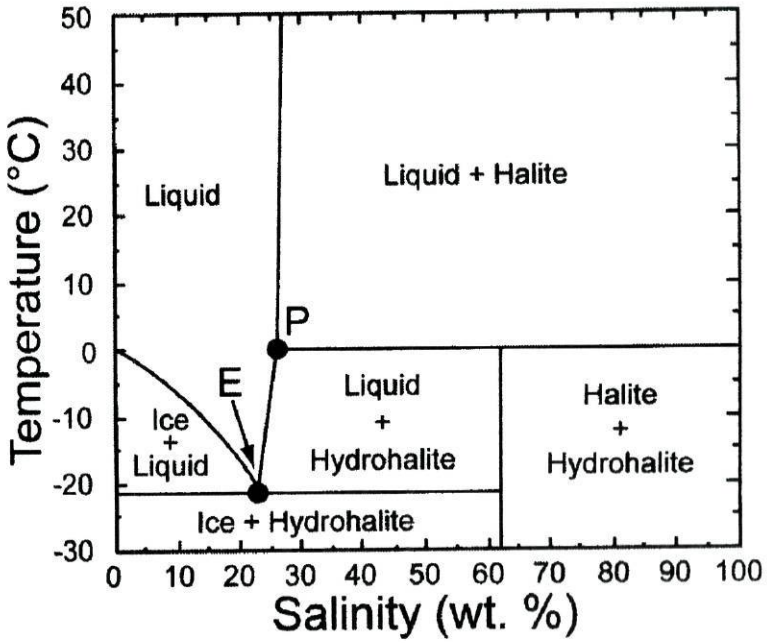


Fig. I-2 – Diagrama de fase do sistema $NaCl-H_2O$ a baixas temperaturas segundo dados apresentados por Hall *et al.* (1988), Sterner *et al.* (1988) e Bodnar *et al.* (1989) P = Peritéctico (0,1°C, 26,3 wt% NaCl); E = Eutéctico (-21,2°C, 23,2 wt% NaCl) (Bodnar 2003c)

A hidrohalite pode ser identificada segundo os critérios definidos por Crawford (1981) e Shepherd *et al.* (1985).

No que respeita ao aquecimento, determina-se a temperatura de homogeneização global (Th) da IF. Essa temperatura é considerada a temperatura mínima a que se pode ter dado o aprisionamento, isto se se admitir que, aquando do aprisionamento, o fluido era homogéneo.

No caso de existir mais do que uma população de IF na mesma amostra deve estudar-se primeiro a população de IF que homogeniza a temperaturas mais baixas, evitando assim a sua decrepitação antes de terem sido estudadas. Por vezes, as IF decrepitam antes da homogeneização completa, nestes casos a temperatura a anotar é a temperatura de decrepitação (Td). No caso de se pretender efectuar análise à microssonda Raman nas IF estudadas, o aquecimento deve ser efectuado após esta análise pois há sempre o risco de a IF decrepitar durante o aquecimento.

Os registos efectuados durante a termometria (> +30°C) são os seguintes:

Th – Temperatura de homogeneização global da inclusão cujo processo poderá ocorrer em fase líquida (L), vapor (V) ou crítica (C), neste último caso por esbatimento do menisco que separa a fase líquida da fase vapor. Corresponde à temperatura mínima de aprisionamento de captura do fluido ou à temperatura real de aprisionamento quando esta tenha decorrido em presença de ebulição ou caso haja fenómenos de imiscibilidade como por exemplo entre H_2O e CO_2 (Shepherd 1985).

TfS – Temperatura de fusão de fases sólidas. O conhecimento da TfS das fases sólidas contidas nas inclusões fluidas, juntamente com a avaliação das suas proporções relativas, permitirá não só a sua identificação, como também contribuirá para o conhecimento da composição química do fluido aprisionado.

No caso de soluções saturadas em sais (e.g. inclusões fluidas contendo cubos de halite), o cálculo da salinidade poderá ser obtido a partir da TfS.

Td – Temperatura de decrepitação (fracturação do mineral hospedeiro). É um parâmetro dependente da densidade, forma e tamanho das inclusões (Leroy 1979, Hollister *et al.* 1981).

Usualmente as medidas de arrefecimento precedem as de aquecimento devido ao facto de, muitas vezes, as inclusões decrepitarem antes da sua homogeneização. No entanto, quando se estudam minerais frágeis, com clivagens associadas, como é o caso da fluorite e da barite, esta regra não é tão linear, uma vez que durante o arrefecimento pode ocorrer a dilatação da IF ("*freeze streching*" - Lawler e Crawford 1983). IF de baixa temperatura (T≤ 150ºC) podem reequilibrar durante o ciclo de arrefecimento. Neste caso, a formação do gelo durante o arrefecimento, que ocupa aproximadamente mais 9% de volume que a água líquida da qual se formou, pode gerar altas pressões e causar a dilatação da IF. Nestes casos, por vezes, é aconselhável proceder primeiro ao aquecimento e depois ao arrefecimento. No entanto durante cada estudo deve-se analisar qual o procedimento pelo qual se deve começar.

Inclusões Fluidas com Petróleo

Uma vez que o petróleo é uma mistura complexa de componentes (Burruss 1981; Munz 2001; Burruss 2003a) a interpretação microtermométrica deste tipo de inclusões é bastante difícil. As mudanças de fase, sólido-líquido-vapor, ocorridas a baixa temperatura durante a criometria são geralmente difíceis de observar e se vistas, difíceis de interpretar quantitativamente (Burruss 2003a).

Normalmente, as inclusões com petróleo apresentam uma cor amarela ou castanha que permite a sua identificação. No entanto, a cor pode variar de

incolor para negra como função da composição da mistura de hidrocarbonetos. A intensidade da cor é uma função da composição e do comprimento da inclusão, portanto mesmo um óleo colorido tem pouca intensidade quando aprisionado em inclusões de 5 a 15μm. Até mesmo a cor do próprio mineral hospedeiro, como por exemplo carbonatos, fluorite, entre outros, pode mascarar a cor deste tipo de inclusões. É, então, por vezes, difícil a distinção destas inclusões das inclusões aquosas apenas pela observação ao microscópio de luz transmitida. Para contornar esta dificulade Kvenvolden e Roedder (1971) *in* Burruss (1981) notaram que a microscopia de fluorescência é uma técnica conveniente para a distinção das inclusões com petróleo e as inclusões aquosas ou para a separação de fases líquidas na mesma inclusão. A microscopia de fluorescência para além de facilitar a distinção das inclusões de petróleo e o seu modo de ocorrência, permite, igualmente, classificar qualitativamente o tipo de hidrocarbonetos atendendo à sua cor de fluorescência e quantificar as intensidades que estes induzem.

Também, o comportamento das IF a baixa temperatura pode permitir distinguir inclusões aquosas de inclusões com petróleo.

Embora o congelamento possa ocorrer em inclusões com petróleo a baixas temperaturas dependendo da composição, normalmente não é possível congelar a totalidade do líquido como acontece nas inclusões aquosas. Torna-se, por este motivo, muito difícil o seu estudo durante a criometria, uma vez que não é possível quantificar e/ ou observar as mudanças de fase que ocorrem na inclusão.

Pode, também, ser observado a deformação e expansão da fase vapor. Esta deformação é provavelmente devida ao congelamento de uma massa polifásica e policristalina, embora possa não se observar uma fusão distinta durante o aquecimento.

Uma outra mudança de fase que pode ocorrer em inclusões com petróleo é a fusão de clatratos. Esta fase poderá ser observável se existir uma fase aquosa na inclusão e pode, também, ocasionalmente ser observada em inclusões sem uma fase aquosa visível.

A mudança de fase mais vantajosa que pode ser determinada quantitativamente nas IF com petróleo é a homogeneização. As homogeneizações em líquido (L) e vapor (V) são comuns podendo também ocorrer a homogeneização crítica (C). A homogneização em V representa um máximo absoluto para o ponto crítico. Da mesma forma a homogeneização em L representa um mínimo absoluto para o ponto crítico.

Utilizam-se, portanto, outras técnicas para o estudo destas inclusões. Uma das técnicas a que normalmente se recorre é a microssonda Raman, que permite quantificar os compostos presentes na inclusão a ser estudada (C_2H_6, C_3H_8, N_2, H_2S e CO_2 em adição ao CH_4). No entanto, no caso específico deste estudo este método não se revelou de grande ajuda, uma vez que o filtro disponível não era suficiente para anular o efeito de fluorescência induzido pelos hidrocarbonetos.

No decurso deste trabalho a identificação destas inclusões foi efectuada através da cor (a maioria apresentava cor amarela a castanha) e através da microscopia de fluorescência, que permitiu distinguir inclusões incolores e de pequenas dimensões das inclusões aquosas. Esta técnica permitiu igualmente classificar qualitativamente as inclusões com base nas suas cores de fluorescência e quantificar as suas intensidades.

3.2.2.2 Micro-Espectroscopia Raman

O efeito Raman é um fenómeno de variação de frequência de onda que acompanha a difusão da luz efectuada através de um meio material.

Quando se ilumina um meio material com uma luz monocromática (radiação excitante), uma fracção dos fotões que constituem essa radiação é reflectida, outra é absorvida e uma pequena fracção é difundida em todas as direcções do espaço. O fenómeno de difusão para a maior parte dos fotões produz-se sem variação da frequência relativamente à radiação excitante (difusão *Rayleigh*) (Dhamelincourt *et al.* 1979). Para uma pequena parte dos fotões difundidos observa-se uma mudança de frequência (Efeito Raman) característica das ligações moleculares que constituem o meio de difusão não dependendo da radiação excitante (ν_o).

$$\nu_{\text{difundida}} = \nu_o - \nu_i;\ \nu_i - \text{variações de frequência}$$

Estes desvios são iguais às frequências dos movimentos de vibração das estruturas poliatómicas que constituem o meio iluminado.

Os picos devidos ao efeito Raman são observáveis graças a filtros ópticos de alta eficiência (espectrómeros, espectrógrafos) e os diagramas obtidos constituem o espectro Raman (Dhamelincourt *et al.* 1979).

A micro-espectrometria Raman é utilizada na identificação e na análise quantitativa de moléculas no sistema C-O-H-N-S (CO_2, CH_4, N_2, H_2S, CO, SO_2, C_2H_6, C_3H_8 e H_2O) contidos nas inclusões fluidas.

Este método de análise das moléculas foi desenvolvido com o aparecimento de fontes laser e os espectros obtidos permitem a identificação das espécies

químicas qualquer que seja o estado da matéria. Os principais constituintes são identificados pela posição das bandas Raman e a sua quantificação é feita a partir da integração de áreas dos picos dos diversos constituintes identificados.

Dhamelincourt *et al.* (1979) descreve a utilização deste método.

3.2.2.3 Composição da Fase Volátil

A análise quantitativa das espécies voláteis foi realizada pela micro-espectroscopia Raman (Delhaye e Dhamelincourt 1975), tendo sido utilizada uma microssonda Labram Dilor-Jobin Yvon-Spex, com uma potência de laser He-Ne de 20 mW ("laser vermelho"), cuja radiação excitante é de 633 nm.

Este equipamento, com larga gama espectral apresenta uma resolução em profundidade superior a 2,5µm com a objectiva 100x.

Estas análises foram efectuadas no Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto.

Foi analisada por este método a fase volátil de inclusões fluidas previamente estudadas pela microtermometria.

As fracções molares dos principais constituintes voláteis foram identificadas pelas posições dos picos Raman e estimadas medindo as áreas respectivas desses picos (Dhamelincourt *et al.* 1979; Dubessy *et al.* 1989a-b).

3.2.2.4 Cálculo da Composição e Densidade Globais

A determinação da composição e densidade globais requer o conhecimento prévio das fracções volumétricas das fases aquosas e não aquosas, das fracções molares dos diferentes gases obtidas através da análise Raman, da salinidade e do volume molar.

A fracção volumétrica ocupada pela componente aquosa à temperatura ambiente (Flw) é um dos parâmetros de difícil estimativa conduzindo a incertezas nos resultados que poderão atingir os 10%. A sua determinação é bastante importante, já que este parâmetro tem influência no cálculo da composição do fluido, interferindo posteriormente no cálculo da isócora. Para a estimativa visual de Flw recorreu-se aos quadros de referência de Roedder (1972) e Shepherd *et al.* (1985) concebidos para inclusões fluidas em que é visível a fase aquosa.

A salinidade foi determinada a partir dos dados microtermométricos.

As fracções molares foram determinadas a partir da análise da fase volátil obtida pela micro-espectroscopia Raman, mais propriamente pelas posições dos picos Raman e suas áreas respectivas.

O volume molar foi determinado a partir do programa informático BULK do conjunto de Software FLUIDS de Bakker (2003), utilizando os dados microtermométricos e da análise da fase volátil obtidos pela micro-espectroscopia Raman.

O cálculo da composição global e da densidade das IF carbónicas e aquocarbónicas foi efectuado através do programa BULK do conjunto de Software FLUIDS de Bakker (2003), combinando os dados microtermométricos com os da micro-espectroscopia Raman, utilizando as equações de estado de

Thiéry *et al.* (1994a, b) e Soave (1972) para o sistema CO_2-CH_4-(N2) e de Duschek *et al.* (1990) para o sistema CO_2. No caso das IF exclusivamente aquosas, o cálculo da composição global e da densidade foi efectuado recorrendo ao mesmo software com base nos dados obtidos pela microtermometria, utlizando a equação de estado de Oakes *et al.* (1990).

Para o sistema H_2O-NaCl-$CaCl_2$, a salinidade da inclusão foi obtida através do programa informático AqSo2e do conjunto de Software FLUIDS de Bakker (2003) utilizando os dados de Oakes *et al.* (1990), que relaciona os valores da fusão de gelo (em °C) com a salinidade a partir da razão em peso NaCl/(NaCl+$CaCl_2$). Nos casos em que a fusão da hidrohalite não foi observada recorreu-se à equação de Bodnar (1993), que relaciona os valores da fusão do gelo (em °C) com a salinidade (em % equivalente em peso de NaCl). A conversão das salinidades em molalidade, e/ ou em % moles, foram efectuadas no programa BULK do conjunto de Software FLUIDS de Bakker (2003) utilizando a equação de Oakes *et al.* (1990).

3.2.2.5 Determinação das Condições P-T-V-X de Aprisionamento dos Fluidos

As propriedades P-T-V-X de cada inclusão determinam uma isócora no plano P-T. A reconstituição das condições P-T de aprisionamento dos fluidos é deduzida com base no traçado das isócoras representativas das diferentes tipologias. Deste modo, um conjunto de isócoras das inclusões que caracterizam um determinado episódio de fluidos, delimitam um domínio de pressão de aprisionamento dessas inclusões, sendo a pressão mínima de aprisionamento fixada pela temperatura de homogeneização global (Th) das IF.

A delimitação dos domínios de variação das condições P-T reais de aprisionamento dos fluidos pode ser obtida pelo método da intersecção de isócoras de inclusões supostamente sincrónicas ou, pelo emprego de geotermómetros e/ ou geobarómetros independentes.

No presente estudo esta delimitação foi efectuada pelo método de intersecção de isócoras, uma vez que não existem geotermómetros e/ ou geobarómetros conhecidos para as áreas em questão.

As isócoras relativas às IF carbónicas e aquocarbónicas foram traçadas recondo-se ao programa informático ISOC do conjunto de Software FLUIDS de Bakker (2003) com base nos dados da composição e volume molar (X-V), obtidos por espectroscopia Raman e microtermometria, com as equações de estado indicadas por Holloway (1977) e Flowers (1979) para o sistema "*any gas-mixture*" e Span e Wagner (1996) para o sistema CO_2.

A determinação das isócoras dos fluidos aquosos (sistema H_2O-NaCl-$CaCl_2$) foi efectuada através do programa ISOC recorrendo às equações de Zhang e Frantz (1987). Foi efectuada uma comparação entre este programa e o programa McFlincor desenvolvido por Brown e Hagemann (1994) e concluíu-se que não existem diferenças significativas nos resultados, tendo-se optado pelo programa de Bakker (2003) por ser mais recente (Fig. I-3).

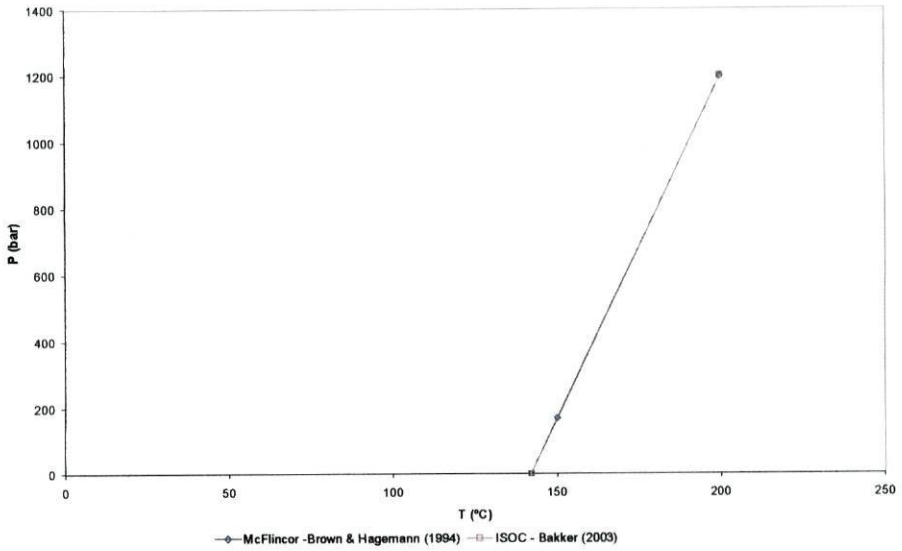


Fig. I-3 – Comparação do Programa McFlincor de Brown e Hagemann (1994) e do programa ISOC do conjunto de Software FLUIDS de Bakker (2003) na projecção de isócoras (nesta projecção foi utlizada a mesma IF).

3.2.2.6 *Microscopia de Fluorescência*

A fluorescência sob excitação UV de inclusões foi comentada por Murray (1957), Gigashivili e Kalyuzhnyi (1973) e Kvenvolden e Roedder (1971) (*in* Burruss 1981). No entanto, nesta altura a microscopia de fluorescência UV não estava à disposição destes autores. O avanço da tecnologia permitiu que esta técnica se desenvolvesse rapidamente, existindo hoje em dia vários equipamentos disponíveis. Inicialmente utilizada no estudo de fluorescência de carvões e esporos nos sedimentos, a microscopia de fluorescência pode também ser aplicada ao estudo de IF.

A microscopia de fluorescência é já amplamente utilizada e impriscindível no estudo de carvões e da matéria orgânica dispersa nos sedimentos. Esta técnica permite: i) a identificação dos constituintes com composição química mais hidrogenada (Teichmüller e Durand 1983) e estrutura química particular (Lin e Davis 1988), como é o caso de todos os macerais do grupo da huminite e os hidrocarbonetos; ii) a avaliação qualitativa da intensidade de

fluorescência; e, iii) a determinação de parâmetros quantitativos que permitem uma avaliação do grau de evolução da matéria orgânica, uma vez que as propriedades fluorescentes variam com o seu grau de evolução. No caso da determinação destes últimos parâmetros em hidrocarbonetos, é possível avaliar a composição química aproximada dos mesmos, em termos da relação compostos alifáticos/ compostos aromáticos/ compostos pesados, uma vez que as propriedades fluorescentes variam consoante a concentração relativa destes compostos (Alpern *et al.* 1992, 1993, Hagemann e Hollerbach 1986).

Em microscopia de fluorescência, é possível obter um espectro de fluorescência e determinar medidas pontuais de intensidade de fluorescência. No entanto, o uso desta técnica analítica é limitado, uma vez que os parâmetros obtidos por medida da intensidade de fluorescência apresentam problemas relacionados com a falta de padrões de calibração adequados. Os parâmetros espectrais utilizados e propostos por van Gijzel (1967) são o λmáx e o Q [quociente vermelho (650nm)/ verde (500nm)]. Não sendo possível obter os espectros de fluorescência pode-se determinar as medidas pontuais de intensidade nos comprimentos de onda referidos para o cálculo do quociente Q. Uma vez que se trata de uma razão, os problemas de calibração ficam assim minimizados. Pode-se, igualmente determinar o valor da Intensidade (I) para um determinado comprimento de onda (546 nm).

A microscopia de fluorescência pode também ser utilizada no estudo de IF, particularmente nas inclusões com petróleo, uma vez que permite a identificação dos hidrocarbonetos. O parâmetro Q permite uma avaliação aproximada da relação compostos alifáticos/ compostos aromáticos/ compostos pesados.

O equipamento utilizado na análise em fluorescência foi um Microscópio binocular de reflexão, ao qual está acoplado um fotómero LEITZ MPV Combi, munido de iluminador Pol-Opak, objectiva 50x de imersão em óleo (n_e=

1,5180), oculares 10x e equipado com duas fontes de iluminação e respectivos estabilizadores: uma para luz branca e, outra, de mercúrio HBO 100W a alta pressão para fluorecência.

As observações e determinação do parâmetro espectral Q foram efectuadas usando luz ultra-violeta (usada na fluorescência espectral) obtida com um filtro de excitação referência SCHOOT UG 1/2mm associado a um filtro SCHOOT BG 38/4mm para eliminação do vermelho. O filtro de paragem referência LEITZ K430 e um espelho dicróico LEITZ TK 400 foram, igualmente, usados neste caso. A determinação do parâmetro I546 foi efectuada de acordo com o International Handbook of Coal Petrology (1993), utilizando luz azul. O padrão usado para a calibração foi um vidro parcialmente metalizado, com intensidade de fluorescência de 0,74% em luz azul, calibrado por H. Jacob.

O MPV é um sistema instrumental controlado por computador e equipado com uma interface em série RS 232 (V24). O MPV-SP tem uma amplitude de medição de 400nm a 800nm em óptica normal, ou de 200nm a 800nm em óptica de quartzo para medições em luz transmitida.

Nas medições da fluorescência foi utilizado o programa de computador MPVGEOF segundo o método de 2-lambda para a determinação do parâmetro Q e segundo o método de 1-lambda para a determinação do parâmetro I546.

Foram utilizados como referência os óleos estudados por Alpern *et al.* (1993) Determinou-se, novamente, os valores de Q650/500 e de I546 para cada um dos óleos presentes nesse estudo de forma a testar a fiabilidade dos resultados obtidos para as IF. Verificou-se que a diferença entre os resultados de Alpern *et al.* (1993) e os agora obtidos é, no máximo, de 0,2. Esta diferença de resultados é considerada mínima, uma vez que foram utilizados equipamentos diferentes. Foi possível, então, determinar os valores dos parâmetros Q650/500 e I546 para as IF de Hammam Zriba e Bou Jaber.

Este equipamento está disponível no Departamento de Geologia da Faculdade de Ciências da Universidade do Porto e foi utilizado para o estudo agora apresentado.

Para medição foram escolhidos os pontos mais representativos das inclusões com petróleo, com o objectivo de determinar o parâmetro fluorimétrico Q650/500 e o parâmetro I546.

Como já foi anteriormente referido, o quociente Q650/500 tanto pode ser determinado retirando do espectro de fluorescência as intensidades nos comprimentos de onda referidos, como a partir de medidas pontuais de intensidade de fluorecência nos respectivos comprimentos de onda. Foi este último método que se utilizou usando comprimentos de onda 500nm e 650nm. A calibração foi efectuada em luz ultra-violeta usada, como já foi referido, na fluorescência espectral. Em cada ponto foram efectuadas duas medidas, uma a 500nm e, outra, a 650nm e calculado o quociente. Os resultados que serão apresentados mais à frente neste trabalho correspondem à média dos quocientes parciais de cada ponto médio.

A fluorescência dos hidrocarbonetos está relacionada com a distribuição de π electrões nos anéis aromáticos e ligações duplas conjugadas (C=C). Durante a excitação UV, π electrões são excitados de uma órbita para outra e após voltarem à sua posição inicial emitem fotões (radiação) no espectro visível (Lin e Davis 1988).

IF com petróleo que contenham uma fase líquida rica em hidrocarbonetos (à medida que a fracção líquida rica em hidrocarbonetos aumenta, a intensidade de fluorescência também aumenta) podem fluorescer em toda a gama de cores do espectro visível, embora as cores possam ser alteradas de alguma forma pelo desenho interno do microscópio (Burruss 2003a). Embora se saiba que a cor de fluorescência é devida à concentração e composição dos

hidrocarbonetos aromáticos no óleo aprisionado, o conhecimento do que controla a emissão de fluorescência continua desconhecida (Stasiuk e Snowdon 1997). Existe uma correlação entre a cor de emissão e a densidade da fase líquida rica em petróleo. Fluidos de baixas densidades (alta gravidade API) fluorescem em curtos comprimentos de onda (azul) e à medida que a densidade aumenta, a emissão de fluorescência muda para longos comprimentos de onda (laranja e vermelho) (e.g. Burruss 2003a).

A densidade do petróleo, comummente descrita em termos de gravidade API, em que a unidade é o grau (°), é definida pela seguinte equação (Franklin e Barbrow 1987):

$$°API = 141{,}5 / \rho - 131{,}5$$

onde ρ é a densidade em $g.cm^{-3}$ a 15,5°C e à pressão atmosférica. Nesta escala, fluidos com baixas densidades possuem altas gravidades API e fluidos com altas densidades possuem baixas gravidades API. O intervalo de valores de típicos reservatórios de petróleo é de 10 a 60 °API.

A cor de fluorescência que é usada para caracterizar o petróleo, é representada pela posição do pico de fluorescência λmáx. A fluorescência em baixos comprimentos de onda tem sido atribuída a pequenas quantidades de compostos aromáticos diluídos numa matriz alifática (Bertre *et al.* 1986 *in* Benchilla *et al.* 2003; Khorashani 1987 *in* Benchilla *et al.* 2003; Guilhaumou *et al.* 1990). Riecker (1962) *in* Moser *et al.* (1992) e Khorashani (1987) *in* Benchilla *et al.* (2003) consideram que isto representa óleos que sofreram migração, durante a qual os compostos de fluorescência são selectivamente removidos. A mudança da máxima intensidade de fluorescência de longos (~600 nm) para curtos comprimentos de onda (~450 nm) pode ser vista como um aumento de maturidade do petróleo (Hagemann e Hollerbach 1986).

3.2.3 Classificação e Nomenclatura das Inclusões Fluidas

A classificação e nomenclatura adoptada no presente trabalho foi baseada quer na análise microtermométrica quer na análise de micro-espectroscopia Raman [detecção e/ ou confirmação da presença de espécies voláteis, C-H-O-(N-S)].

As letras **L** e **V** significam que a homogeneização global da IF ocorreu em fase líquida ou em fase vapor, respectivamente.

No caso de a espécie dominante na fase volátil ser o CO_2 utiliza-se o índice **c**; se a espécie dominante for o CH_4 o índice utilizado é o **m**. O índice **w** indica a presença de uma fase fluida aquosa e o índice **S** indica a presença de uma fase sólida.

Para as inclusões com petróleo irá ser usado o índice **p**. A análise microtermométrica deste tipo de inclusões é, como já foi referido, extremamente limitada estando confinada quase somente aos dados fornecidos pela termometria. No entanto, durante a criometria pode-se observar em algumas inclusões com petróleo a presença de CO_2 na fase volátil.

Definiram-se, assim, os seguintes tipos de IF:

i) Inclusões aquosas

Lw – inclusões bifásicas à temperatura ambiente, em que a fase aquosa é composta por H_2O ± sais.

ii) Inclusões com petróleo

Lp-(c) – inclusões monofásicas, bifásicas ou, mais raramente trifásicas, à temperatura ambiente, sem água visível. Por vezes foi detectada a presença de CO_2 ($TfCO_2$ e/ ou $ThCO_2$);

Lp-w-(c) – inclusões bifásicas e, geralmente trifásicas à temperatura ambiente, em que a fase contendo petróleo é a dominante. Embora não se tenha observado a $TfCO_2$ e/ ou $ThCO_2$, a fase de petróleo destas inclusões parece ser igual às outras IF com petróleo presentes.

Lw-p-(c) – inclusões bifásicas e, geralmente trifásicas à temperatura ambiente, em que a fase aquosa é a dominante. Por vezes foi detectada a presença de CO_2 ($TfCO_2$).

iii) Inclusões com CO_2 dominante na fase volátil

Lc – inclusões monofásicas e bifásicas à temperatura ambiente, sem H_2O visível;

Lc-w – inclusões aquocarbónicas bifásicas ou trifásicas à temperatura ambiente, em que são observáveis as $TfCO_2$ e/ ou $ThCO_2$;

Lw-c – inclusões aquocarbónicas bifásicas à temperatura ambiente, cuja fase aquosa é dominante e a presença de CO_2 é detectada, devido à sua baixa densidade, somente pela fusão de clatratos ou por espectroscopia Raman.

II parte

Os Jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber

II Parte – Enquadramento Geográfico, Trabalhos Precedentes, Os Jazigos do Tipo Mississipy Valley (MVT), Hammam Zriba e Bou Jaber (Tectónica, Enquadramento Geológico e Estratigrafia, Estudo Petrográfico e Mineralógico, Estudo dos Fluidos, Determinação das Condições P-T-V-X de Aprisionamento dos Fluidos, Discussão e Conclusões) e Síntese Comparativa entre os Jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber

1. Localização Geográfica

As áreas a estudar situam-se no norte da Tunísia, correspondendo ao jazigo de Hammam Zriba a cerca de 68 km a sul de Tunis e a 8 km da vila de Zaghouan e ao jazigo de Bou Jaber a cerca de 200 Km a SW da capital tunisina e a 6 km a sul da pequena aldeia de Kalaat-es-Sunam junto à fronteira com a Argélia (Fig. II-1).



Fig. II-1 – Localização geográfica dos jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber (modificado de http://www.lib.utexas.edu/tunisia.html)

2. *Trabalhos Precedentes*

Os trabalhos especificamente relacionados com as áreas em estudo, são trabalhos de caracterização geológica, mineralógica, geológica-estrutural e de caracterização dos fluidos.

Existem diversas publicações relativas ao jazigo de Hammam Zriba, sendo que a publicação mais antiga encontrada pertence a Rolland (1885). Este autor descreve a montanha e a falha de Zaghouan.

Tixeron (1966) e Valera (1966) abordam o jazigo de Hammam Zriba, tendo em conta a sua mineralização. Touray e Yajima (1967) referem-se a hidrocarbonetos líquidos inclusos nas fluorites tunisinas e Touray (1971) aborda a origem profunda do CO_2 aprisionado em fracturas seladas nas fluorites epigenéticas tunisinas.

Bonnefous (1972) contribui para o estudo estratigráfico do Jurássico da Tunísia.

Djellouli (1973) aborda a geoquímica de algumas fontes termominerais da Tunísia e Floridia (1973) e Touhaumi (1979) desenvolvem algumas considerações sobre a geologia e a metalogenia da província fluoretada tunisina.

Thibieroz (1974), na sua tese do 3º Ciclo da Universidade de Paris, identificou, para o jazigo de Hammam Zriba, três tipos principais de fácies onde a fluorite está sempre presente e propôs que este jazigo seria contemporâneo da carsificação subaérea desenvolvida durante o *uplift* cretácico dos calcários. O mesmo autor (1976) faz uma reconstituição cronológica do papel das superfícies de emersão na história do jazigo de fluorite de Hammam Zriba, interpretando a sobreposição do Campaniano sobre o Titoniano como uma lacuna de emersão. Bouhlel e Magne (1982) sugerem o mesmo tipo de

interpretação. Já Truillet (1981) considera esta sobreposição como uma substituição tectónica de cobertura.

Turki (1980) faz uma descrição da falha de Zaghouan. O mesmo autor (1985), na tese de doutoramento, pela Universidade de Tunis, aborda a policinemática e o controlo sedimentar associado à cicatriz de Zaghouan – Nebhane.

Bouhlel (1982), na tese do 3º Ciclo, da Universidade de Toulouse, aborda a distribuição do bário e do estrôncio na província fluoreada tunisina e define, para além dos três tipos de deposição descritos por Thibieroz (1974), um minério precoce do tipo M_0 onde a fluorite está ausente (inédito).

Bouhlel (1985) refere a composição química, a frequência e a distribuição dos minerais da série da barite-celestite nos jazigos de fluorite de Hammam Jedidi e Hammam Zriba – Jebel Guebli.

Bouhlel, Fortuné, Guilhaumou e Touray (1988) desenvolveram um estudo de inclusões fluidas nas mineralizações *stratabound* de Hammam Zriba – Jebel Guebli de modo a caracterizar geneticamente o jazigo. Estes autores propõem um modelo em que a fluorite cristalizou epigeneticamente a partir de soluções semelhantes a águas de formação de salmouras e atribuem o último preenchimento geódico à circulação hidrotermal do Miocénico.

Souissi, Deurand e Fortuné (1997) abordam a metalogénese de quatro jazigos da Tunísia, entre eles Hammam Zriba.

Por último, Benchilla, Guilhaumou, Mougin, Jaswal e Roure (2003) com o seu modelo termo-barométrico, propõem uma idade Cenozóica para a carsificação hidrotermal de Hammam Zriba.

Existem poucas publicações relativas ao jazigo de Bou Jaber. No entanto encontram-se vários relatórios internos e estudos inéditos.

Os primeiros relatórios (Leable 1931; Mille e Audibert 1935; Le Rumeur e Lavigne 1941) foram mencionados por Jurkovic (1963). Sainfeld (1949) foi o primeiro a desenvolver um estudo geológico detalhado, acompanhado de uma carta geológica 1/5000. O mesmo autor (1952) dedica algumas páginas à mina de Bou Jaber nas suas monografias.

A geologia, a tectónica, as mineralizações e as reservas encontradas na mina foram retratadas em relatórios de fim de missão pela *Elektrosond* (1963) e a "*Bulgaregéomines*" (1973) forneceu vários relatórios pluridisciplinares (*in* Amouri 1986).

O modelo genético proposto por estas sociedades foi elaborado à luz da teoria hidrotermal.

Ben Saïd (1974) desenvolveu um estudo para a obtenção do D.E.A. (Diplome D'études Approfundies), preparado em Nancy, em que aborda a geologia, a tectónica, a paleogeografia e as mineralizações do jazigo de Bou Jaber.

As mineralizações de Bou Jaber foram novamente tema de estudo por Gharbi, Ben Ayed e Ben Saïd (1981). Estes autores interpretaram-nas como sendo filonianas, tendo os filões resultado do preenchimento de acidentes e de fracturas alargadas por dissolução cársica. Para estes autores, a fracturação e a mineralização são de idade neogénica.

Amouri (1986), no seu estudo, descreve a génese do jazigo de Bou Jaber, concluindo que, neste jazigo, o modelo cársico é polifásico, existindo três fases principais de formação: i) a primeira, no Apciano superior, em que se desenvolveram as fácies edificadas sobre uma estrutura positiva ("*haut-fond*") acompanhadas pela captura de elementos metálicos na micrite original; ii) a segunda, onde ocorreram emersões intra e pós-apcianas das fácies edificadas com dolomitização, silicificação e carsificação; e iii) a terceira, que decorreu durante o paroxismo orogénico do ciclo alpino, onde as deformações se

acentuaram, ocorreu a verticalização das camadas e efectuaram-se remobilizações no interior das bolsadas cársicas.

Por último Bouhlel (1993), na sua tese para a obtenção do grau de Doutor em Ciências Geológicas, pela Universidade de Tunis, descreve, num dos capítulos, a geologia, a morfologia, a mineralogia e os tipos de mineralização presentes em Bou Jaber.

Para este autor a "falha de Bou Jaber" descrita por alguns autores é antes uma superfície de discordância fazendo repousar as margas do Vraconiano (Albiano superior) sobre uma superfície erodida composta pelo Gargasiano (Apciano superior), pelo Clansayésiano (Apciano tardio) e pelo Albiano inferior. É ao nível desta superfície de discordância que estão depositadas as mineralizações do jazigo "Est".

Os "filões de Bou Jaber" referidos em trabalhos anteriores são antes bolsadas cársicas que se situam: i) imediatamente sobre a discordância do Vraconiano (Albiano superior), com prolongamentos nos calcários recifais do Gargasiano inferior; e ii) no contacto dos calcários recifais do Gargasiano inferior e dos calcários em bancadas estratificadas do Gargasiano inferior.

Este autor considera que as mineralizações mostram uma sucessão no tempo de três tipos de deposição, em que o mais precoce corresponde à cristalização dos sulfuretos, da ankerite e de pequenos cristais de barite e fluorite, o segundo, ligeiramente mais tardio, corresponde à deposição da barite e da fluorite por substituição da ankerite e o terceiro corresponde à deposição da barite em cristais decimétricos.

Neste trabalho Bouhlel elabora, ainda, um estudo físico-químico, recorrendo a análises de isótopos $^{34}S/^{32}S$ nos sulfuretos e sulfatos, concluindo que os sulfatos poderão ter a sua origem nas águas marinhas albianas ou terem sido lexiviados a partir de formações triásicas. Desenvolveu, igualmente, um estudo

de inclusões fluidas. Os resultados obtidos revelaram soluções mineralizantes quentes e salinas, ricas em catiões bivalentes e contendo emulsões de petróleo.

3. *Os Jazigos do Tipo Mississipy Valley (MVT)*

Os jazigos do tipo Mississipy Valley (MVT) são jazigos epigenéticos de Pb-Zn que ocorrem em contexto carbonatado. Estes jazigos estão distribuídos ao longo do globo (Fig. II-2), no entanto os maiores e mais intensamente estudados encontram-se na América do Norte onde este tipo de jazigo foi primeiramente reconhecido há cerca de 60 anos (Bastin 1939 *in* Leach *et al.* 2001).



Fig. II-2 – Distribuição dos depósitos do tipo Mississipy Valley e distritos: 1 Polaris; 2 Eclipse; 3 Nanisivik; 4 Gayna; 5 Bear-Twit; 6 Godlin; 7 Pine Point; 8 Esker; 9 Sardinia; 10 Washington Land; 11 Robb Lake; 12 Monarch-Kicking Horse; 13 Giant; 14 Irankuh district; 15 Gays River; 16 Newfoundland; 17 Mealine; 18 Upper Mississipy Valley; 19 Southest Missouri (Old Lead Belt, Viburnum Trend, Indian Creek); 20 Central Missouri; 21 Tri-State; 22 Northen Arkansas; 23 Austinville; 24 Friedensville; 25 Central Tennessee; 26 East Tennessee; 27 San Vicente; 28 Vazante; 29 Ireland (e.g. Navan, Lisheen, Galmoy); 30 Carcow-Silesia; 31 Apline district; 32 Pering-Bushy Park; 33 Sorby Hills; 24 Coxco; 35-37 Lennard Shelf (e.g. Cadjebut, Blendvale, Twelve-Mile Bore); 38 El-Abad-Mekta district; 39 Reocin; 40 Cévennes; 41 Bou Grine (Sangster 1990)

A mineralogia deste tipo de jazigos é relativamente simples, predominando a galena e a blenda e, a barite e a fluorite como minérios. A ganga inclui apenas dolomite, calcite e pouca sílica. A barite e a fluorite podem, também, ocorrer como minerais de ganga e não como minério (Guilbert *et al.* 1997).

A maioria dos jazigos do tipo MVT ocupa espaços resultantes da dissolução e substituição da rocha carbonatada hospedeira, existindo casos em que essa substituição é quase total. Assim, este tipo de depósitos é geralmente do tipo *stratabound* (Guilbert *et al.* 1997).

A mineralização pode ser controlda do ponto de vista tectónico apresentando nestes casos uma estrutura planar (Bradley e Leach 2003).

Algumas mineralizações são inquestionavelmente originadas por substituição, assumindo a forma mais ou menos disseminada, outras ocorrem como preenchimento de espaços abertos, em zonas de fractura ou em brechas, assumindo a forma de cristais que podem ocorrer com grandes dimensões, apresentando uma estrutura granular ou ainda apresentando-se sob a forma de grandes agregados lamelares ou coliformes.

O facto de as rochas hospedeiras se formarem em águas muito pouco profundas, de tal modo que o mais pequeno levantamento conduz à exposição das mesmas acima do nível do mar, resulta no comum desenvolvimento de desconformidades, inconformidades e efeito de águas superficiais que produzem as soluções que geram o colapso das brechas que alojam vários corpos mineralizados (Evans 1993).

Devido à elevada permeabilidade das rochas carbonatadas a água forma canais através da rocha, tornando possível a circulação de fluidos mineralizadores essenciais à génese dos depósitos do tipo MVT. A dissolução das rochas encaixantes é evidente.

Admite-se que a solução inicial que provoca a dissolução do carbonato seja ácida, mas à medida que a rocha se vai dissolvendo a solução vai ficando neutra, provocando uma competição para manter a solução ácida o suficiente para continuar a dissolução.

Estas reacções ocorrem segundo o processo químico de carbonatação que consiste em:

$$CaCO_3 + H_2O \longrightarrow H_2CO_3$$
$$CaCO_3 + H_2CO_3 \longrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3^-$$

A precipitação dos sulfatos nos depósitos do tipo MVT ocorre devido à presença de fluidos mineralizadores, que preenchem os orifícios e cavernas, formados às custas da dissolução do carbonato, ou veios na rocha.

Alguns autores defendem que os fluidos mineralizadores dissolvem a rocha carbonatada dando origem às cavidades, outros autores são de opinião que tais cavidades se formaram antes de os fluidos mineralizadores fluirem através da rocha.

As situações geológicas em que ocorrem estes depósitos podem ser descritas e agrupadas da seguintes forma (Fig. II-3):

- Acima de inconformidades podem-se encontrar depósitos em: *reefs* permeáveis e mudança de *fácies* (A-1); dobras ténues (A-2); acima de *pinch-outs* de canais permeáveis horizontais (A-3); acima ou em complexo de bancos de lama (A-4);

- Abaixo de inconformidades em espaços abertos (e.g. cavidades) relacionados com a topografia de *karst* anterior à inconformidade (B-1); ou em estruturas de colapso formadas por dissolução de camadas subjacentes por drenagem subterrânea (B-2 e B-3);

– Em *fácies* que mudem uma formação, ou entre bacias de deposição (C-1);

– Em sistemas regionais de falhas (D-1).

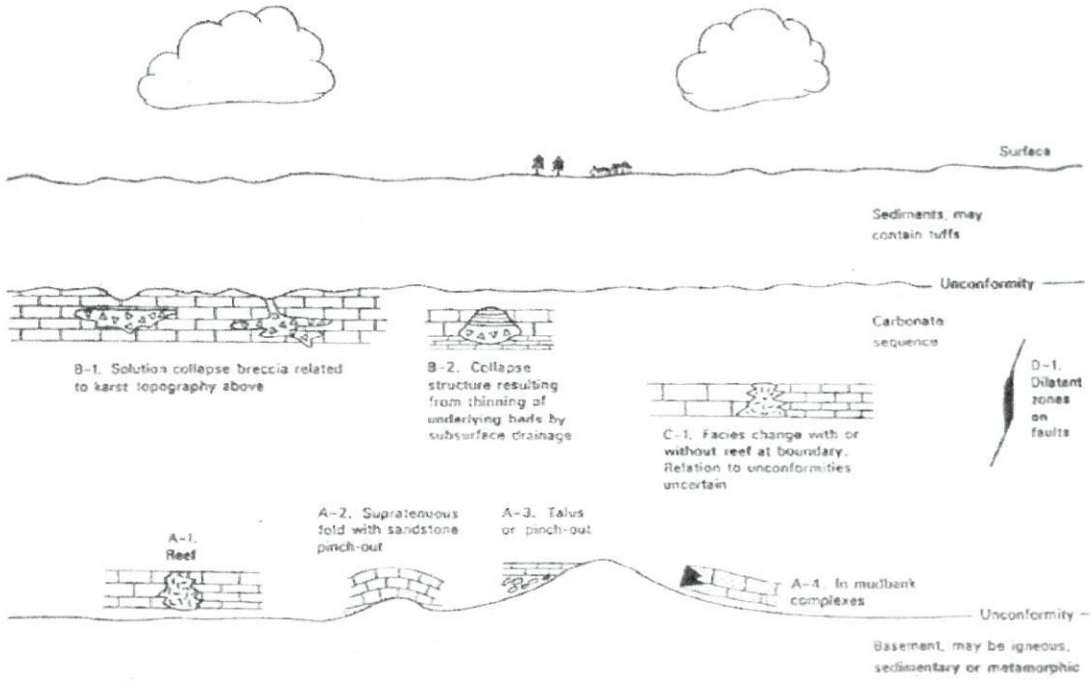


Fig. II-3 – Situações geológicas em que ocorrem os jazigos do tipo MVT, segundo Evans (1993)

A maioria dos depósitos deste tipo formaram-se a partir de soluções hidrotermais. A fonte destas soluções e o seu conteúdo metálico são muito problemáticos. Geralmente não há uma associação espacial óbvia com intrusões ígneas que possam ser consideradas como fontes dos fluidos mineralizantes.

A fonte dos sulfuretos nos jazigos deste tipo pode ser parcialmente de origem profunda, de evaporitos marinhos, ou da água do mar.

Hoje pode-se considerar quatro modelos gerais para a génese deste tipo de depósitos (Evans 1993):

– Transporte dos metais como complexos bissulfuretados, um fluido carregando metais e sulfuretos com precipitação por ebulição, aquecimento por contacto com água subterrânea, etc.;

– Transporte de metais como complexos cloretados (hipótese mais favorável) e precipitação quando esta solução encontra uma concentração de H_2S – modelo de mistura;

– Transporte de metais como complexos cloretados, sulfuretados e sulfatados na mesma solução, precipitando quando os sulfatos são reduzidos por encontro com material orgânico;

– Complexos metalo-orgânicos transportam o metal, H_2S na mesma solução com precipitação por aquecimento.

A sequência paragenética dos diversos depósitos do tipo MVT indica que estas mineralizações se formaram em diversas etapas, o que impica a circulação de fluidos mineralizadores durante um período de tempo mais ou menos alargado.

Diversos métodos de estudo, tais como o estudo de IF, alteração termal de biomarcadores, métodos de datação paleomagnética, entre outros permitiram inferir que a duração da mineralização neste tipo de jazigos é relativamente curta (quando comparada com outros fenómenos geológicos), tendo a duração de várias centenas ou milhares de anos. Contudo, apesar do período de mineralização ser curto, o sistema de circulação dos fluidos mineralizadores pode persistir por várias dezenas de milhares de anos.

Estudos geocronológicos permitiram uma nova oportunidade para perceber como e onde se formaram estes depósitos na crusta terrestre (Leach *et al.* 2001). As datações, que correlacionam dados paleoclimáticos, paleomagnéticos, paleogeográficos, de tectónica global e circulação de fluidos, confirmaram uma ligação directa entre a génese deste tipo de jazigos e

eventos tectónicos de grande escala. Contrariamente ao que se pensava até aos anos 80, estes jazigos formaram-se maioritariamente durante grandes eventos tectónicos de contracção em tempo restrito na história da Terra (Leach *et al.* 2001; Bradley e Leach 2003). O período mais importante para a génese dos jazigos do tipo MVT situa-se entre o Devónico e o Pérmico, correspondendo a uma série de intensos eventos tectónicos durante a assimilação da Pangea. O segundo período mais importante situa-se entre o Creácico e o Terciário, quando a assimilação de microplacas afectou a margem oeste da América do Norte e a África-Eurásia. Estes períodos de elevada actividade tectónica a nível global poderão estar na origem da circulação de fluidos a grande escala e provavelmente terão condicionado a evolução dos jazigos do tipo MVT a nível mundial.

Leach e Sangster (1993) definiram os depósitos do tipo MVT como uma família variada de mineralizações epigenéticas precipitadas de densas salmouras basinais a temperaturas que variam entre 75 e 200ºC, tipicamente localizadas em sequências de plataformas carbonatadas e sem afinidades com actividade ígnea.

A grande maioria dos jazigos do tipo MVT ocorre em placas orogénicas ou alojados em rochas que já estiveram localizadas em zonas de placas. No entanto, existem alguns depósitos que parecem estar relacionados com extensão e outros formados em cinturões compressivos (Thrust belts). O tipo de placa orogénica onde ocorrem este tipo de jazigos pode ser do tipo colisional, tipo Andino ou tipo inversão (Bradley e Leach 2003). O primeiro tipo resulta da colisão entre uma margem passiva e um arco crustal (Figs. II-4 e II-5), o segundo forma-se em zonas de subducção de margem continental em que o levantamento da placa é devido à compressão, manifestado por espessamento crustal ao longo do arco e por desenvolvimento de uma cadeia e bacias de placa em *back-arc* (Fig. II-4); contudo, alguns modelos mais recentes sugerem que arcos do tipo Andino se formam por uma ou mais colisões, envolvendo primeiro uma margem passiva e um arco e apenas depois

subducção. O terceiro e, último tipo, não se forma sobre o encerramento de uma bacia oceânica por subducção, mas sim, em crusta continental; assim será incorrecto classificar estes orógenos como colisionais, uma vez que os dois objectos convergentes já estão justapostos desde início (Fig. II-4).

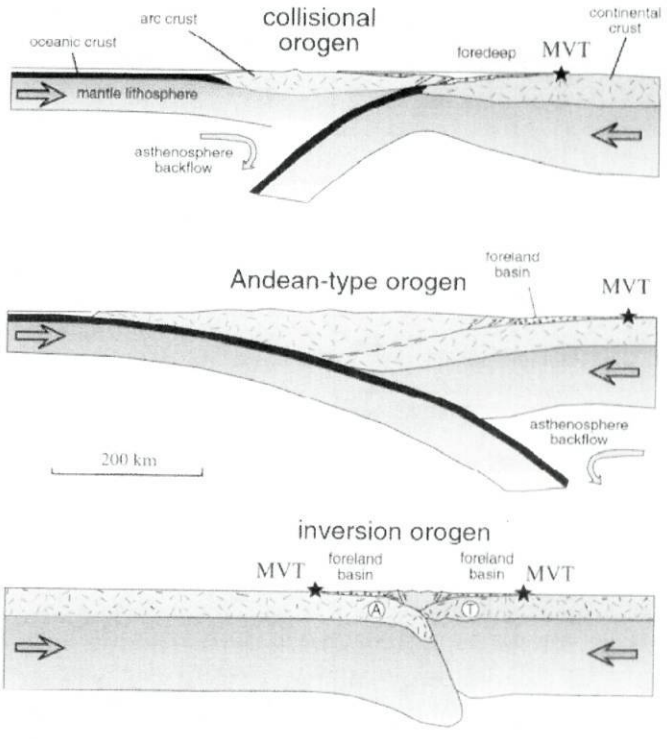


Fig. II-4 – Comparação entre orógenos do tipo colisional, tipo Andino e tipo inversão. O orógeno do tipo colisional (em cima) resulta da colisão entre uma margem passiva e um arco, baseado em exemplos do Neogeno de Timor, Nova Guiné e Taiwan e vários exemplos antigos que incluem a orogenia Tacónica e a orogenia Ouachita (América do Norte). O orógeno do tipo Andino (meio) é baseado nos modernos Andes e nos sistemas Laramide do Creácico – Paleocénico tardio na zona oeste da América do Norte. A astenosfera em convecção contribui para a subsidência da *foreland* numa escala regional ampla (Mitrovica *et al.* 1989 *in* Bradley e Leach 2003), colocando este tipo de sistema de *foreland* à parte de outros. O orógeno do tipo inversão (em baixo) é flanqueado em ambos os lados por bacias do tipo *foreland* originadas por compressão, baseado nos Pirinéus (Muñoz 1992 *in* Bradley e Leach 2003) (Bradley e Leach 2003)

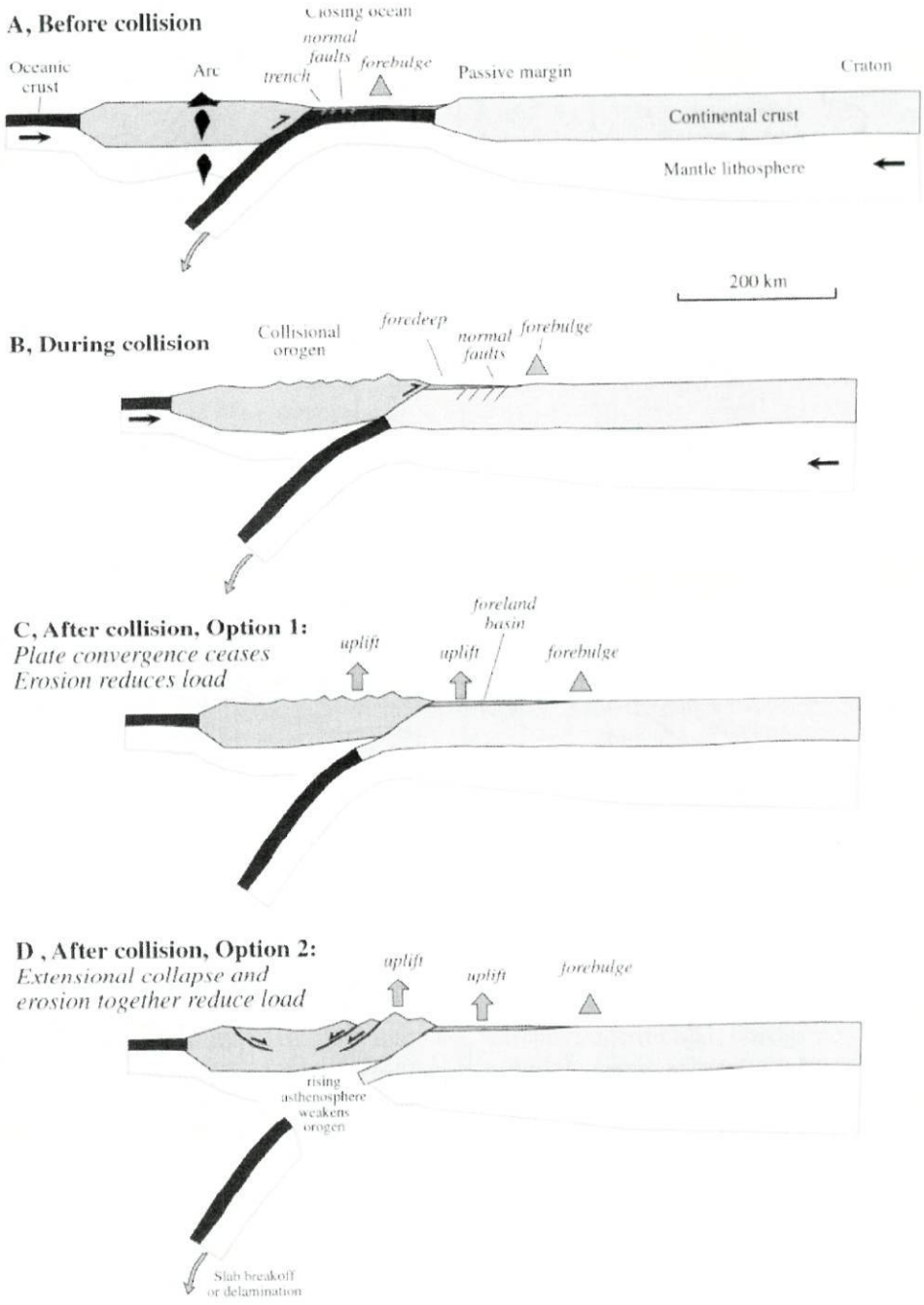


Fig. II-5 – Modelo sequencial da colisão entre uma margem passiva e um arco.

A – Período ante-colisional

B – Período colisional

C – Período pós-colisional com *uplift* devido à descarga por erosão

D – Período pós-colisional com *uplift* devido ao colapso da placa oceânica subductada

(Bradley e Leach 2003)

Embora o enquadramento tectónico não seja o factor mais importante de controlo nos processos de formação de jazigos do tipo MVT, este factor pode interferir no tamanho do depósito ou no controlo estrutural local. O valor da carga orogénica, a subducção da placa oceânica, a estrutura termal da placa dobrada e a convecção padrão na astenosfera subjacente são factores que têm impacto na arquitectura da placa e desta forma influenciam a génese dos depósitos do tipo MVT.

As estruturas tectónicas controlam a localização das mineralizações do tipo MVT em vários *forelands* orogénicos. Estas estruturas podem ser agrupadas em duas categorias principais: i) sin-orogénica; e ii) outras. As falhas do tipo *foreland* sin-orogénicas são importantes em alguns sistemas do tipo MVT. O dobramento da litosfera em subducção através de ângulos superiores a 1,5º resulta normalmente no falhamento normal da superfície exterior convexa da placa dobrada (Jacobson *et al.* 1979 *in* Bradley e Leach 2003). Este processo, designado por "extensão flexural" por Bradley e Kidd (1991) ocorre quer na litosfera oceânica quer na litosfera continental.

As propriedades das falhas normais induzidas flexuralmente (Bradley e Kidd 1991) são relevantes para a exploração deste tipo de depósitos. As falhas normais formadas por extensão flexural orientam-se, de uma forma geral, paralelamente à frente orogénica.

Num dado momento da sua evolução, uma bacia do tipo *foreland* pode ser catalogada como subpreenchida *versus* sobrepreenchida. Tipicamente, as bacias do tipo *foreland* estão subpreenchidas no início da orogenia e, eventualmente, preenchem-se com sedimentos à medida que a convergência de placas cessa e o balanço muda entre taxas de subsidência conduzidas tectonicamente e a sedimentação (Fig. II-6). A moderna bacia de Timor e a bacia do tipo *foreland* da Nova Guiné são exemplos de bacias subpreenchida e sobrepreenchida, respectivamente (Bradley e Leach 2003). Quando a convergência de placas pára, quer a cadeia de montanhas, quer a sua bacia do

tipo *foreland* elevam-se como consequência da erosão (Fig. II-5C) ou, alternativamente, devido ao colapso orogénico extensional (Fig. II-5D). Independentemente do mecanismo, a descarga orogénica parece ser um forma ideal de criar uma área de recarga elevada que poderia conectar, essencialmente, com aquiferos sedimentares não deformados nas profundidades das bacias do tipo *foreland* e daí descarregar em locais a centenas de quilómeros do cratão.

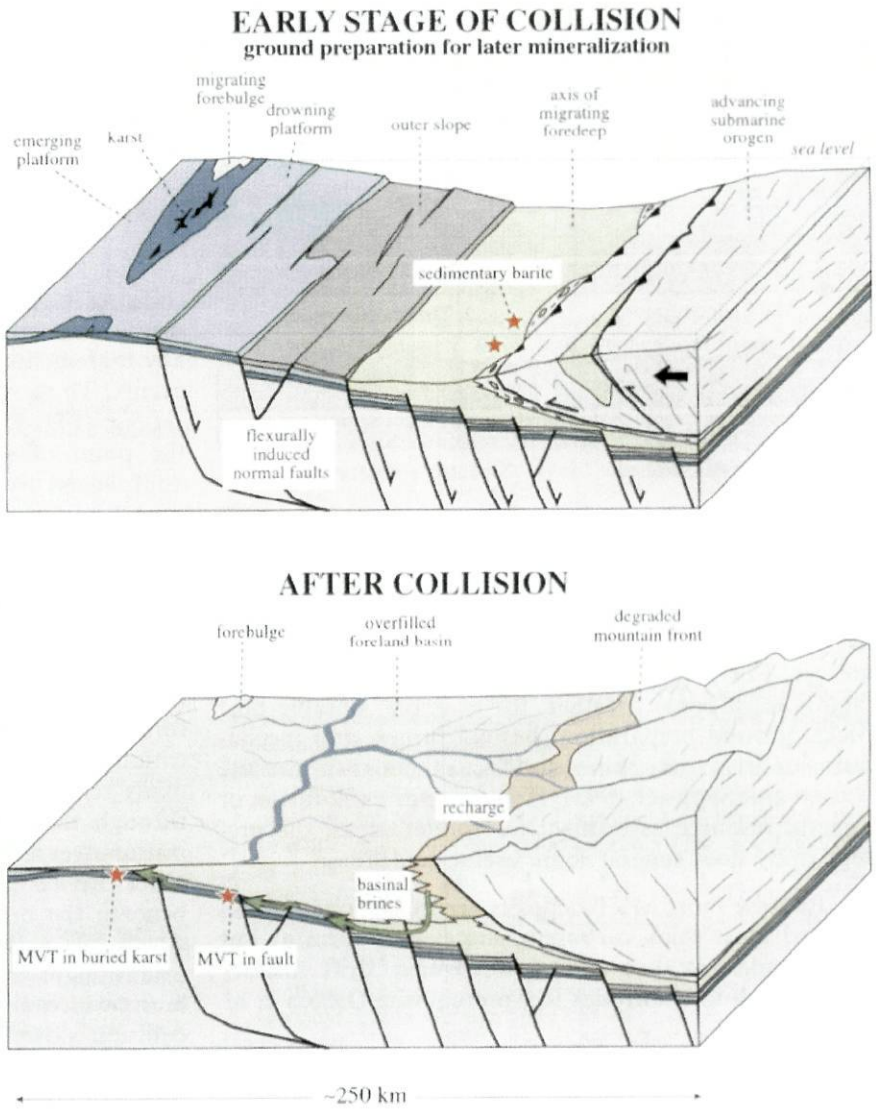


Fig. II-6 – Blocos diagramas mostrando a evolução de uma *foreland*. O diagrama superior mostra que, durante a convergência de placas, um cinturão de compressão submarino carrega a margem passiva, formando a bacia do tipo *foreland*, o domínio extensional e o *forebulge*. A convergência de placas causa continuamente que estas migrem através da placa *foreland*. A

bacia *foreland* continua subpreenchida devido à migração do centro de deposição. A mineralização de barite ao longo do eixo do *foredeep* é baseada em exemplos de Ouachitas (Maynard e Okita 1991). No diagrama inferior, a convergência de placas cessou e a bacia do tipo *foreland* está preenchida com sedimentos, criando condições hidrológicas favoráveis à mineralização do tipo MVT. Esta situação é correspondente à mineralização na região de Ozark (Bradley e Leach 2003)

Alguns depósitos do tipo MVT estão em estratos planos enquanto que outros se encontram em rochas hospedeiras deformadas dentro de cadeias orogénicas. Neste último grupo é possível encontrar depósitos que se formaram antes da deformação e depósitos que se formaram em rochas hospedeiras já deformadas (Fig. II-7).

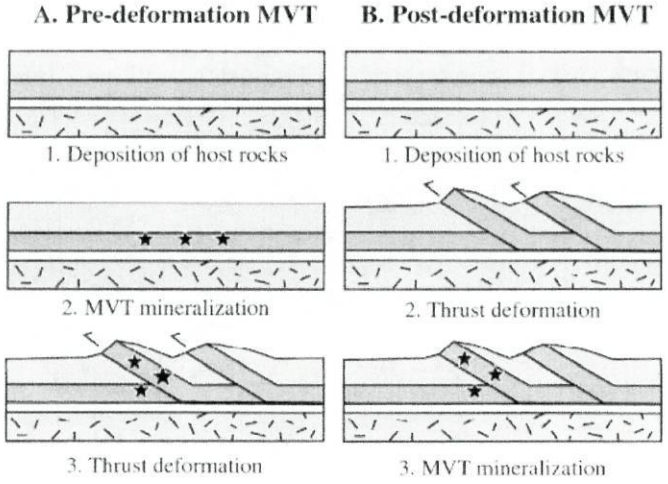


Fig. II-7 – Duas sequências alternativas para a génese de depósitos do tipo MVT em cinturões de compressão. Em A, os depósitos formam-se em estratos planos e são posteriormente deformados. Em B, a deformação do estrato hospedeiro precede o período mineralizante (Bradley e Leach 2003)

Para um depósito se formar, um número de diferentes factores estão associados, como por exemplo, rochas hospedeiras apropriadas, salmouras basinais e mecanismos que conduzam estas salmouras e que as localizam no local de deposição dos minérios (Leach e Sangster 1993).

4. Hammam Zriba

4.1 Tectónica, Enquadramento Geológico e Estratigrafia

4.1.1 Tectónica

A região de Hammam Zriba está situada a SW da falha de Bouficha, a cerca de 8 km da vila de Zaghouan e a 68 km a S de Tunis (Fig. II-1).

Este jazigo de F-Ba-Pb-Zn (Foto II-1) constitui o jazigo mais importante da "província fluoretada tunisina" encontrando-se localizado no Atlas Pré-Sahariano ou Atlas tunisinos (Fig. II-8).

A sua estrutura é a de um *horst* simples, alongado segundo NNW-SSE ao longo de 3 km, atenuando nas suas duas extremidades. Esta região apresenta-se intensamente fracturada estando a mineralização intercalada entre os calcários do Portlandiano e os calcários do Campaniano médio–superior (Foto II-2 e Fig. II-9)

O *horst* de Hammam Zriba apresenta várias categorias de estruturas fracturadas frequentemente pelas falhas cartográficas e até fracturas menores. Nota-se, sobretudo, a abundância de diaclases mineralizadas no Portlandiano (Melki 1990).

As fracturas constituiam e constituem meios de acesso para os fluidos de origem mais ou menos remota. Elas constituem também armadilhas de deposição desses fluidos.



Foto II-1 – Jazigo de Hammam Zriba

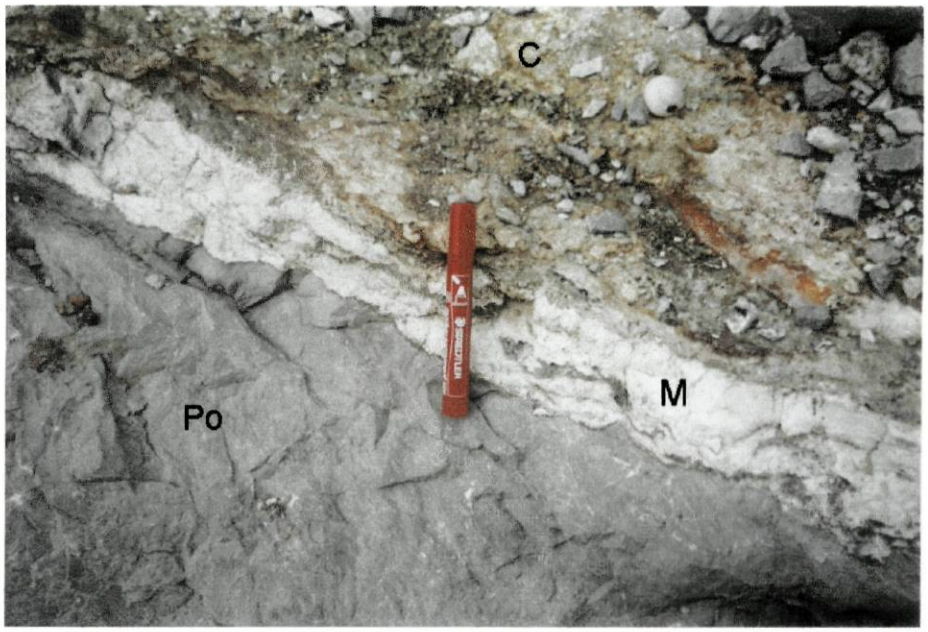


Foto II-2 – Mineralização (M) intercalada entre os calcários do Portlandiano (Po) e os calcários do Campaniano médio-superior (C)

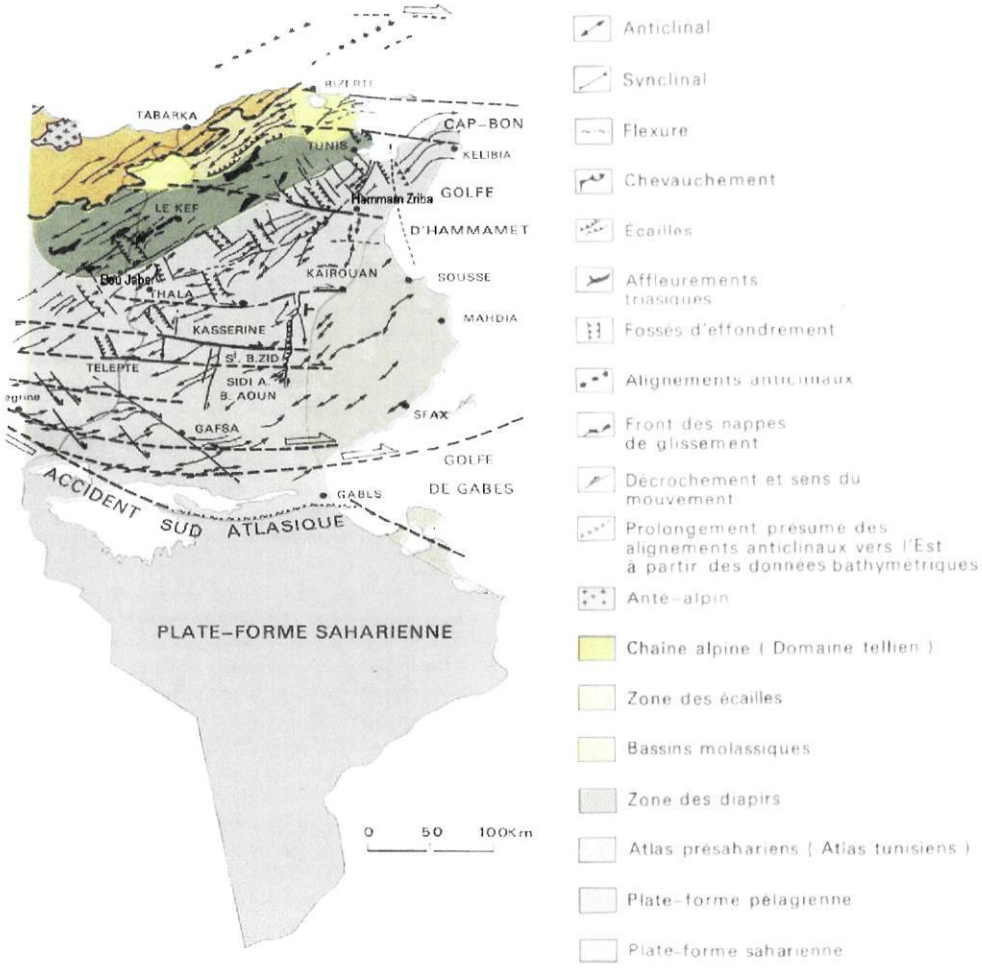


Fig. II-8 – Carta tectónica simplificada da Tunísia com a localização dos jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber (adaptado de Ben Ayed e Viguier 1981 *in* Ben Ayed e Zargouni 1990)

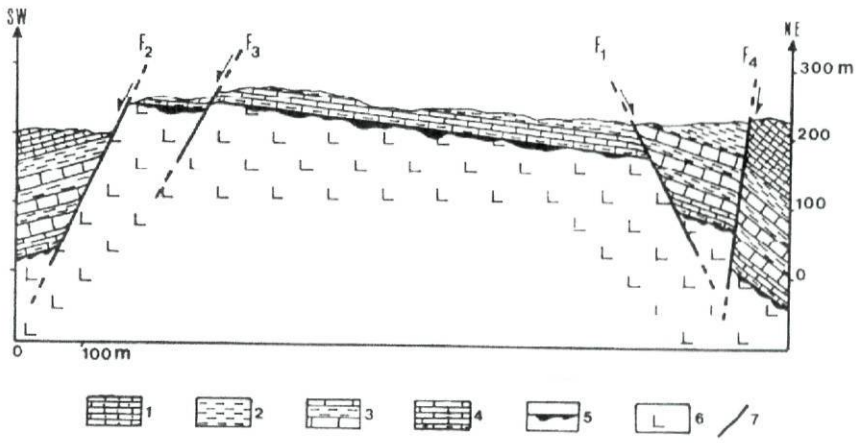


Fig. II-9 – Corte transversal do *horst* de Hammam Zriba

1: calcários do Eocénico inferior; 2: margas paleocénicas; 3: alternâncias margo-calcárias do Maestrichiano; 4: calcário do Campaniano médio-superior; 5: mineralizações; 6: calcário do Portlandiano; 7: falhas (adaptado de Melki 1990)

O jazigo de Hammam Zriba está afectado por uma tectónica essencialmente frágil. A rede NW-SE a submeridiana é a mais preponderante. Ela afecta, essencialmente, o Portlandiano e o Campaniano. A maioria destas fracturas está mineralizada e apresenta aberturas colmatadas pela barite-celestite, fluorite cristalizada e, raramente, calcite.

A fracturação de Hammam Zriba teve um duplo papel na mineralização: um papel indirecto, na medida em que facilitou a circulação de águas agressivas e favoreceu a formação de *karsts*, e um papel directo, uma vez que se comportou como uma armadilha tectónica para a mineralização.

O termo *Karst* designa um conjunto de formas de superfície e de estruturas subterrâneas devidas à eliminação por dissolução de minerais constituintes de rochas ou de sedimentos carbonatados.

O *horst* de Hammam Zriba apresenta afloramentos que marcaram bem as deformações tectónicas. Melki (1990) assinalou uma fracturação a todas as escalas de observação como, por exemplo, falhas (normais, inversas,...), deslizamentos esquerdos e direitos, fendas de tensão, suturas estilolíticas, etc.

Este *horst* foi edificado no fim do Jurássico. As duas falhas limítrofes tiveram a sua origem depois deste período e foram reactivadas em diferentes fases tectónicas.

Segundo Melki (1990) a direcção submeridiana da fracturação é predominante.

Esta mesma direcção encontra-se também nas acumulações lenticulares, o que leva a pensar que existam relações estreitas entre a fracturação, carsificação e mineralização.

Segundo Melki (1990) tiveram lugar as seguintes sucessões de deformação:

- distensão ENE-WSW no pós-Portlandiano, ante-Campaniano;
- distensão N-S pós-Campaniano;
- compressão NW-SE pós-Campaniano, ante-Burdigaliano;
- compressão NW-SE pós-Miocénio;
- distensão NE-SW pós-Tortoniano superior.

Os vários corpos mineralizados (acumulações estratificadas, enchimentos de bolsas, fracturas ou vazios geódicos) aparecem nos maciços calcários Jurássicos ou na sua proximidade, geralmente no contacto tectónico com as séries carbonatadas argilosas ou gresosas de idade variada (Triásico, Cretácico, Eocénico, Oligocénico). Estes "pedaços" jurássicos de algumas centenas de metros a uma dezena de quilómetros de extensão marcam o importante acidente de Zaghouan [Rolland 1885, Jauzein 1967, Turki 1980 e 1985 (*in* Bouhlel *et al.* 1988)].

Este sector, à imagem do que acontece na Tunísia tem sido objecto, desde o Jurássico, de movimentos epirogénicos relacionados com a evolução do Téthys (Turki 1985 *in* Bouhlel *et al.* 1988).

Segundo Bonnefous (1972) e Biely *et al.* (1973) *in* Bouhlel *et al.* (1988) os movimentos tectónicos materializados em *horsts*, *grabens* e blocos basculados provocaram importantes variações paleogeográficas responsáveis pelas variações laterais de fácies, de condensações da sedimentação ou de emersões e de discordâncias.

Na região há a assinalar a existência de uma fonte termomineral cuja emergência está situada junto da falha NE que limita o *horst*. O débito dessa fonte varia de 6 a 25 l/s com uma temperatura de 46°C (Bouhlel *et al.* 1988). A água cuja composição química se encontra no campo das águas clorossulfatadas e sódico-cálcicas estará em relação com a litologia do Triásico salino subjacente (Bouhlel *et al.* 1988 e Djelleuli 1973 *in* Bouhlel *et al.* 1988).

4.1.2 Enquadramento Geológico

A série estratigráfica do sector de Hammam Zriba é constituída de baixo para cima por depósitos do Titoniano, Campaniano, Maestrichiano e por fim pelos depósitos do Terciário. Esta sucessão faz aparecer uma sobreposição do Campaniano sobre o Titoniano tendo sido interpretada de duas formas diferentes. Thibieroz (1976) interpretou-a como sendo uma lacuna de emersão, ao passo que Truillet (1981) interpretou-a como uma substituição tectónica de cobertura.

As mineralizações em Hammam Zriba localizam-se nas depressões do muro e formam, assim, lentículas que representam as direcções de alongamento N45°, N90° e N135° (Touhaumi 1978 *in* Melki 1990). Certas diaclases portlandianas ou fracturas de tracção facilitaram e orientaram a dissolução. Formaram-se, assim, *Karsts* que se tornaram mais importantes em função dos tempos de dissolução.

A mineralização do tipo *stratabound* está localizada a tecto de calcários maciços do Titoniano e a muro de calcários margosos do Campaniano superior. O jazigo é formado por um conjunto de acumulações do tipo *stratabound* mais ou menos lenticulares. Cada lentícula apresenta uma possança que varia de 0 a 10 m e um comprimento de 50 a 200 m (Bouhlel *et al.* 1988). Localmente em Hammam Zriba as bolsas de dissolução métricas e decimétricas estão preenchidas pela mineralização cársica observando-se o extenso contacto Titoniano - Campaniano superior que se prolonga a cerca de uma dezena de metros sobre os calcários do muro e a cerca de 2 a 4 m sobre os calcários do tecto.

4.1.3 Estratigrafia

Para a descrição estratigráfica (Fig. II-10) adoptaram-se os resultados dos trabalhos dos seguintes autores: Bonnefous (1972), Johan e Krivy (1969) *in* Melki (1990) e Thibieroz (1974).

Portlandiano

O Portlandiano aflora nas paredes da garganta do Oued El Hammam. É constituído por um calcário pararecifal maciço por vezes com bancadas métricas espessas e com fracturas esquiroladas de cor cinzenta clara. A espessura é geralmente fina.

Campaniano médio-superior

Após a camada mineralizada que repousa sobre o Portlandiano erodido aparece em descontinuidade uma série de margas verdes com pequenas bancadas lenticulares de calcários atribuídos ao Campaniano médio; esta série passa progressivamente a calcários sobrejacentes. A sua espessura varia de 0 a alguns metros.

Uma barra calcária, de idade atribuída ao Campaniano superior, de 5 a 10 m acompanha a fácies calcária branco-rosa, em bancadas regulares de 40 a 80 cm separadas por intercalações margosas. A espessura desse conjunto é da ordem dos 26 m.

Maestrichiano

Johan e Krivy (1969) *in* Melki (1990) assinalaram sucessivamente de baixo para cima:

- alternâncias de calcários beges esverdeados e margas cinzento-esverdeadas;

- margas com algumas passagens de calcários margosos;
- barra de calcários cinzentos claros a beges;
- margas com camadas finas de calcários esverdeados;
- níveis de calcários margosos beges com intercalações de margas;
- margas com algumas camadas de calcários argilosos.

A espessura desta série chega aos 80 metros.

Paleocénico

Encontram-se aqui "margas de transição". O Paleocénico está representado por 30 m de margas verde azeitona a pretas.



Fig. II-10 – Mapa gelógico de Hammam Zriba

Q: Quaternário: aluviões; ES: Eocénico superior: Margas; EI: Eocénico inferior: calcários; Ma-Pa: Maestrichiano - Paleocénico indiferenciado; Pa: Paleocénico: margas; Ma: Maestrichiano: alternâncias de calcários e de margas; C: Campaniano médio-superior: calcários e margas; Po: Portlandiano: calcários maciços; / fracturas (Melki 1990)

Eocénico inferior

O Eocénico Inferior desenvolve-se desde o topo de margas paleocénicas até à falésia de Jebel Bou Khrouf onde constitui o cume (Fig. II-10). É constituído por um calcário cinzento de aspecto gresoso, fosfatado, em bancadas nodulosas onde a sílex permanece em relevo. Tem 120 m de possança

Eocénico superior

As margas do Eocénico superior afloram a Este do domo de Hammam Zriba. Johan e Krivy (1969) *in* Melki (1990) mencionam a presença de dois níveis de calcários gresosos esverdeados, cinzento escuro de 15 a 30 cm de espessura. A possança total deste conjunto é da ordem de 480 m.

4.2 História Mineira

O jazigo de Hammam Zriba integra-se numa vasta província de F-Ba-Zn-Pb constituída por uma dezena de jazigos. Inicialmente explorada pelos romanos, esta mina teve o seu auge de produção durante o século XX. A maior parte da exploração era de fluorite e destacava-se como uma das mais importantes do Maghreb. As suas reservas estavam estimadas em 5 milhões de toneladas de um minério com cerca de 15-30% de CaF_2 e a produção oscilava entre 35.000 e 40.000 toneladas anuais de fluorite (Bouhlel *et al.* 1988).

4.3 Estudo Petrográfico e Mineralógico

A mineralogia de Hammam Zriba é constituída, por ordem de abundância, pelos seguintes minerais: minerais da série da barite-celestite (40 a 45%), fluorite (15 a 35%), quartzo (10 a 40%), blenda, galena e pirite (5 a 15%) e calcite (2 a 10%) (Bouhlel 1985 *in* Bouhlel *et al.* 1988).

A mineralização consiste em corpos estratificados entre o Titoniano-Berriasiano (muro) e o Campaniano superior (tecto) (Bouhlel *et al.* 1988).

Thibieroz (1974) e Bouhlel (1982) *in* Bouhlel *et al.* (1988) definiram três tipos deposicionais de mineralização onde a fluorite está sempre presente:

1 – Minério rubané constituído por fluorite associada a barite maciça, branca, fibrosa;

2 – Minério intracársico constituído por fluorite associada a barite branca, maciça e galena e, por vezes, a grandes cristais de calcite;

3 – Estruturas geódicas ou fracturas e veios tardios preenchidos por fluorite.

Bouhlel (1982) *in* Bouhlel *et al.* (1988) definiu ainda um período mais precoce (M_0) cuja litificação foi anterior à deposição do minério rubané. Este minério não contém fluorite e é constituído por quartzo ou barite e sulfuretos em menores proporções associados às argilas negras do Campaniano inferior.

No presente estudo, a análise petrográfica e mineralógica incidiu sobre os primeiros três tipos deposicionais da mineralização.

1 – Minério rubané

O minério rubané é um minério bandado constituído por depósitos parietais de barite e fluorite desenvolvidos durante a primeira actividade hidrotermal em associação com fracturas hidraúlicas sub-horizontais (Bouhlel 1982 *in* Bouhlel *et al.* 1988). É constituído por barite branca, maciça, fibrosa (BII) caracterizada por uma cristalização antipolar e por grandes cristais de fluorite (FI) (Foto II-3a). Ao microscópio de transmissão a barite apresenta-se de uma maneira geral turva e de aspecto fibroso, dificultando o estudo de IF. A fluorite apresenta-se em grandes cristais transparentes (Foto II-3b).

2 – Minério intracársico

Este minério é constituído por minerais de enchimento cársico. Aquando dos movimentos tectónicos, acompanhados de fracturação e escorregamentos bancada a bancada, que afectaram quer as rochas encaixantes (muro e tecto), quer as mineralizações rubané, desenvolveu-se uma intensa actividade de dissolução e sedimentação intracársica num período desconhecido posterior ao Campaniano (Truillet 1981). O enchimento das bolsadas apresentam diversas fácies:

i) brechas com cimento argilo-carbonatado e minerais centimétricos a métricos provenientes do desmantelamento da série encaixante (blocos de calcário do Titoniano e do Campaniano) e dos minérios rubané e precoce;

ii) níveis sedimentares internos, formados pela alternância de camadas milimétricas a centimétricas, argilas e areias carbonatadas, com galena, blenda, barite e fluorite.

Nestes depósitos intracársicos as aberturas são colmatadas pela barite branca, maciça (BIII) e grandes cristais de fluorite (FII), por vezes associados a grandes cristais de calcite (Foto II-4a, II-4b). Ao microscópio de transmissão a barite apresenta cristais translúcidos. A fluorite apresenta-se em grandes cristais transparentes (Fotos II-4c e II-4d)

3 – Estruturas geódicas e fracturas ou veios tardios

Estas estruturas são caracterizadas por cristalização geódica ou preenchimento das fracturas e veios tardios por fluorite (FIII) quer no minério rubané, quer nas bolsadas cársicas. A fluorite apresenta, por vezes, hábito cúbico e parece, no essencial, posterior às fluorites FI e FII (Fotos II-5a, II-5b).

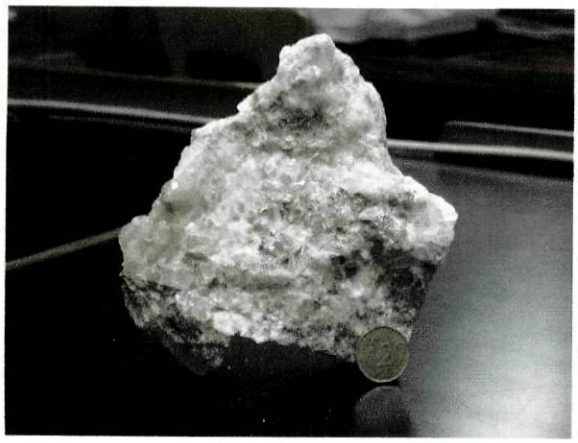


Foto II-3a – Amostra de mão do minério rubané

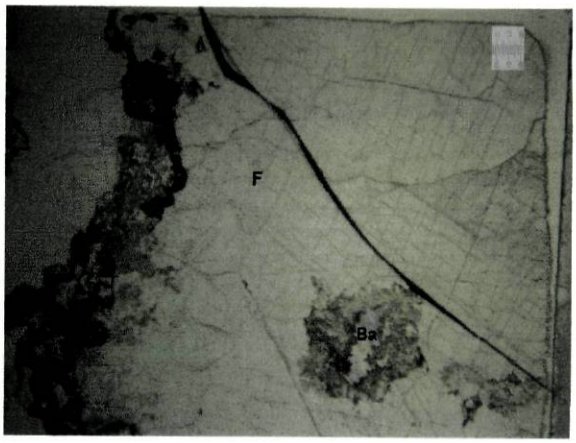


Foto II-3b – Lâmina delgada vista do minério rubané (microsc. Transmissão; N//): F- fluorite, Ba- barite



Foto II-4a – Amostra de mão do minério intracársico



Foto II-4b – Amostras de mãos do minério intracársico (brecha)

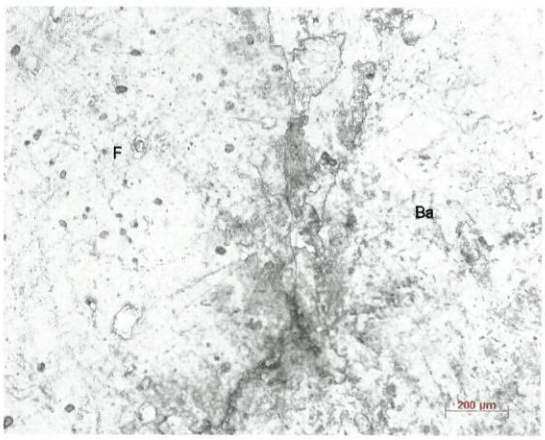


Foto II-4c – Lâmina delgada do minério intracársico (microsc. Transmissão; N//): F- fluorite, Ba- barite

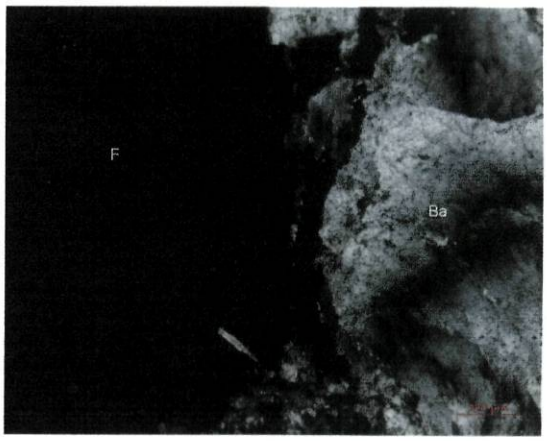


Foto II-4d – Lâmina delgada do minério intracársico (microsc. Transmissão; NX): F- fluorite, Ba- barite

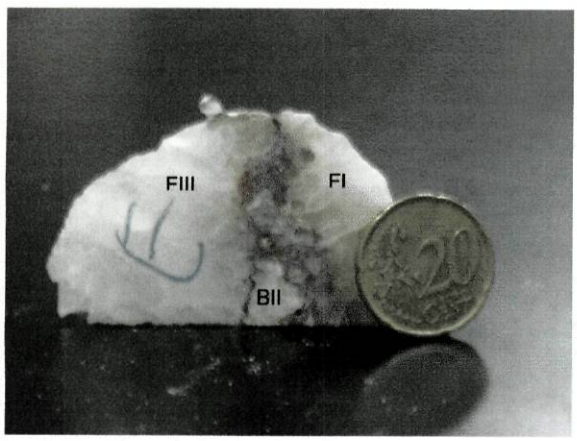


Foto II-5a – Amostra de mão contendo o minério rubané e a fluorite geódica tardia

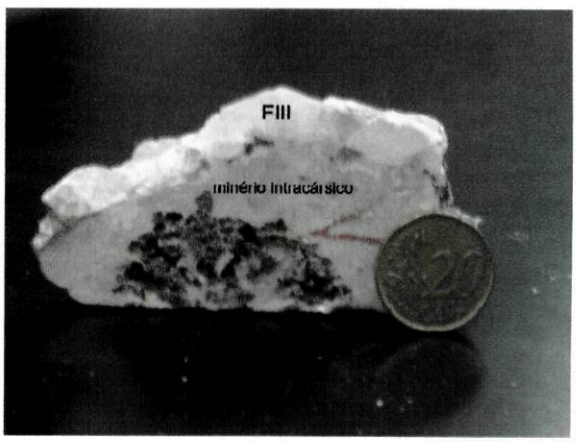


Foto II-5b – Amostra de mão contendo o minério intracársico e a fluorite geódica tardia

4.4 Estudo dos Fluidos

Foram estudadas IF em fluorites dos três diferentes tipos deposicionais de mineralização.

As IF presentes nas barites (BII e BIII) encontravam-se, na sua maioria, decrepitadas. As que mantinham as condições iniciais de aprisionamento possuiam dimensões inferiores a 5 μm inviabilizando dessa forma o seu estudo.

A observação dos conjuntos de IF permitiu evidenciar a existência de várias fazes de aprisionamento de fluidos e em muitos casos a distinção genética entre os tipos de inclusões não foi determinada facilmente. Quando possível, as IF foram classificadas como primárias (P), pseudosecundárias (PS) e secundárias (S) de acordo com a classificação de Roedder (1981, 1984).

Nas análises microtermométricas foram rejeitadas todas as IF que mostraram sinais óbvios de "*leakage*" ou "*necking-down*". Em algumas IF foi observado o fenómeno de "*stretching*" após os ciclos criométricos e/ ou termométricos. Muito provavelmente, algumas inclusões que, antes das análises de microtermometria, apresentavam um maior volume da fase volátil em comparação com a maior parte das inclusões do mesmo conjunto seriam inclusões que sofreram "*stretching*".

Algumas inclusões já se encontravam cheias de ar ("rebentadas") antes do início das análises de microtermometria. Este facto pode ser devido à preparação das amostras em laboratório, uma vez que quer a fluorite, quer a barite, são minerais de pouca dureza. No entanto, esta preparação foi efectuada com o máximo de cuidado, nomeadamente evitanto utilizações de temperaturas superiores a 70ºC para a colagem. Foram observadas, igualmente, inclusões que decrepitaram após os ciclos microtermométricos (quer no arrefecimento, quer no aquecimento).

4.4.1 Tipologia e Cronologia Relativa dos Fluidos

Nas fluorites dos três tipos de mineralização foram observados, fundamentalmente, os seguintes tipos de fluidos:

- Fluidos aquosos (Foto II-6a): as IF representativas destes fluidos são bifásicas, do tipo Lw, encontram-se em cavidades P, PS e S (Foto II-6b), apresentam uma morfologia variável e as suas dimensões podem variar desde inferiores a 5 até 90 μm. A fase aquosa ocupa 90 a 95% do volume da inclusão.

A baixas temperaturas (<-50ºC), o gelo nestas inclusões apresenta uma cor acastanhada e um aspecto tipo "casca de laranja" ("*speackle appearence*") indicativos da presença de catiões bivalentes. O intervalo representativo da temperatura de fusão inicial do gelo indica a presença provável de Ca^{2+} nestas inclusões (Roedder 1963; Crawford 1981) (Tabela II-1, em anexo).

- Fluidos com petróleo (Fotos II-7a, II-7b, II-7c e II-7d.): são representados por IF bifásicas (petróleo+vapor) e IF bifásicas e trifásicas, com dois líquidos imiscíveis (petróleo+solução aquosa e petróleo+vapor+solução aquosa, respectivamente). Estas inclusões são do tipo Lp-(c), Lp-w-(c) e Lw-p-(c). De uma maneira geral estas inclusões exibem uma cor amarela ou castanha e a fase de petróleo é imiscível com a fase aquosa, características que facilitam a sua distinção. Foram observadas, no entanto, inclusões com petróleo incolores que foram identificadas através da microscopia de fluorescência. Estas inclusões apresentam, por vezes, corpos betuminosos em forma de barril, de consistência mais ou menos espessa, de cor castanha escura e birrefringentes. Poder-se-á tratar de produtos de evolução *in situ* de matéria orgânica (Roedder 1965 *in* Bouhlel et al. 1988). Por vezes, durante a criometria, verificou-se a existência de CO_2, quer pela fusão ou homogeneização desta espécie volátil.



Foto II-6a – Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lw na fluorite

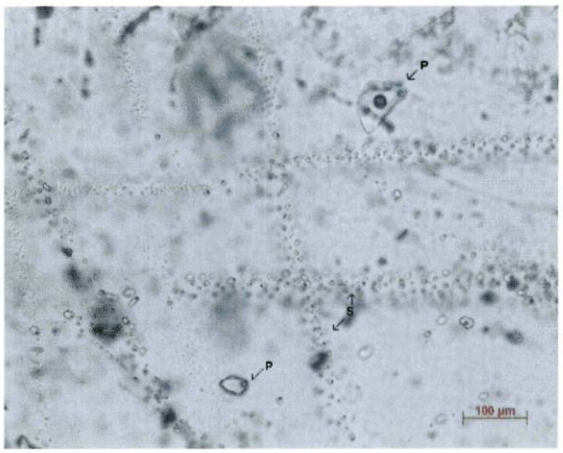


Foto II-6b – Inclusões fluidas bifásicas P e S,do tipo Lw na fluorite

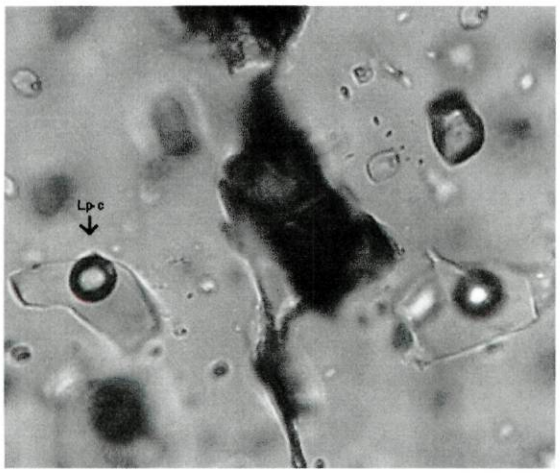


Foto II-7a – Inclusão fluida bifásica P incolor do tipo Lp-(c) na fluorite

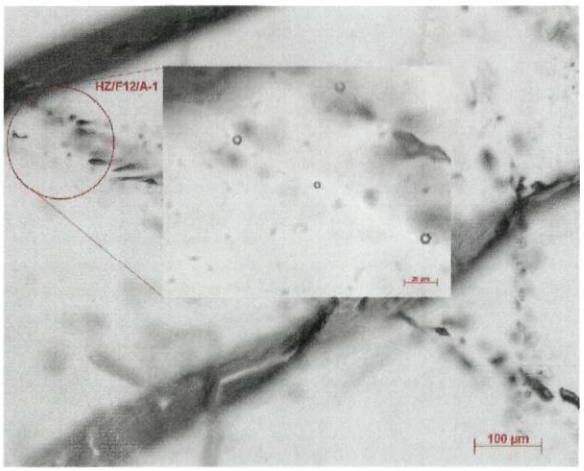


Foto II-7b – Inclusões fluidas bifásicas S de cor amarela do tipo Lp-(c) na fluorite

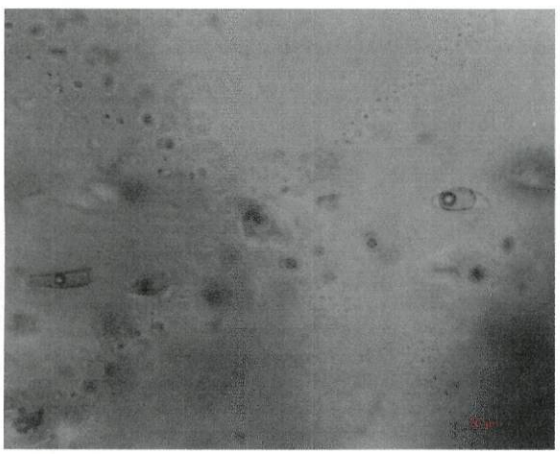


Foto II-7c – Inclusões fluidas trifásicas (petrólep+vapor+solução aquosa) P do tipo Lp-w-(c) na fluorite



Foto II-7d – Inclusões fluidas trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) P do tipo Lw-p-(c) na fluorite

Estas inclusões encontram-se em cavidades P, PS e S (Fotos II-7a , II-7b, II-7c e II-7d), apresentam formas variáveis e as suas dimensões podem variar entre inferiores a 5 até 57,5 μm. Quando presente, a fase aquosa ocupa entre 10 a 60% do volume da inclusão.

4.4.2 Caracterização Microtermométrica

Foram efectuadas análises microtermométricas nos diferentes tipos de inclusões dos três tipos deposicionais de fluorite. Os resultados microtermométricos encontram-se na Tabela II-1, em anexo, referente às fluorites do minério rubané (FI), do minério cársico (FII) e das estruturas geódicas e fracturas ou veios tardios (FIII).

4.4.2.1 Minério Rubané

i) Fluidos aquosos

Na FI as IF aquosas são bifásicas, do tipo Lw e apresentam-se como cavidades P, PS e S, estas últimas sendo as mais abundantes. A fase aquosa representa cerca de 90 a 95% do volume da inclusão. A sua forma é variável e o seu tamanho varia desde inferior a 5 até cerca de 70 μm. De uma forma geral as IF S têm dimensões superiores às IF P.

Inclusões primárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -60,0 e -46,8ºC e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -16,6 e -5,5ºC. O intervalo de salinidades está compreendido entre 8,6 e 21,8 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 112 e 170ºC (Fig. II-11a).

Inclusões pseudosecundárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -55,5 e -51,4°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -13,4 e -8,2°C. O intervalo de salinidade está compreendido entre 11,9 e 17,3 p. % eq. NaCl. As temperaturas de homogeneização estão compreendidas entre 128 e 153°C ocorrendo a homogeneização em líquido (Fig. II-11a).

Inclusões secundárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -59,7 e -46,4°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -18,1 e -5,6°C. O intervalo de salinidade está compreendido entre 8,7 e 21 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 111 e 154°C (Fig. II-11a).

ii) Fluidos com petróleo

Estes fluidos ocorrem em diferentes tipos de inclusões:

Inclusões do tipo Lp-(c): estas inclusões são bifásicas (petróleo+vapor) e ocorrem como cavidades P, PS ou S. A fase vapor ocupa cerca de 5 a 50% do volume da inclusão, sendo que o Flw é considerado nulo, uma vez que não existe fase aquosa visível. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 9,5 e 57,5 µm.

Como já foi referido, o estudo deste tipo de inclusões é bastante complexo, distinguindo-se quase exclusivamente a expansão e deformação da fase vapor e a solidificação de parte do líquido não aquoso. Por vezes, é detectada a presença de CO_2 na fase vapor sendo que a sua temperatura de fusão está compreendida entre -62,5 e -58,9°C (Fig. II-11d). A temperatura de homogeneização global ocorre em líquido a temperaturas compreendidas entre 99 e 142°C para as P, aos 125°C para as PS e entre 92 e 154°C para as S (Fig. II-11a).

Inclusões do tipo Lw-p-(c): estas inclusões são trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) e encontram-se em cavidades P e S. A fase aquosa ocupa cerca de 50 a 60% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho é de cerca de 10 µm. Nestas inclusões não foi observada a temperatura de fusão de gelo nem a temperatura de fusão de clatratos. A homogeneização parcial ocorre em líquido, por desaparecimento da fase vapor aos 107°C para as P e aos 143°C para as S. Não foi observada a homogeneização global destas inclusões. No entanto, verifica-se que as temperaturas de homogeneização parcial ocorrem no mesmo intervalo do das temperaturas de homogeneização total das inclusões aquosas do tipo Lw e das inclusões com petróleo bifásicas do tipo Lp-(c) (Fig. II-11a).

Inclusões do tipo Lp-w-(c): estas inclusões são trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) e encontram-se em cavidades PS e S. A fase aquosa ocupa cerca de 10% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 10 e 30 µm. Nestas inclusões não foi observada a temperatura de fusão de gelo nem a temperatura de fusão de clatratos. A homogeneização parcial ocorre em líquido, por desaparecimento da fase vapor aos 130°C para as PS e aos 143°C para as S. Não foi observada a homogeneização global destas inclusões. No entanto, verifica-se que as temperaturas de homogeneização parcial ocorrem no mesmo intervalo do das temperaturas de homogeneização total das inclusões aquosas do tipo Lw e das inclusões com petróleo bifásicas do tipo Lp-(c) e são assim idênticas à das inclusões do tipo Lw-p-(c) (Fig. II-11a).

A projecção dos resultados microtermométricos nos diagramas binários, temperatura de fusão do gelo (TfG) *versus* temperatura de homogeneização (Th) e salinidade (p. % eq. NaCl) *versus* Th (Figs. II-11b e II-11c) permite evidenciar, uma grande dispersão a nível da salinidade nas inclusões P que variam desde salinas a muito salinas (8,6 a 21,8 p. % eq. NaCl). As IF PS observadas têm uma salinidade média (11,9 a 17,3 p. % eq. NaCl). As IF S embora apresentem alguns termos mais salinos, têm a sua maior

expressividade entre 8,7 e 16,7 p. % eq. NaCl, indicando uma salinidade intermédia. Não foi observada a fusão do gelo para as inclusões fluidas do tipo Lw-p-(c) e Lp-w-(c).

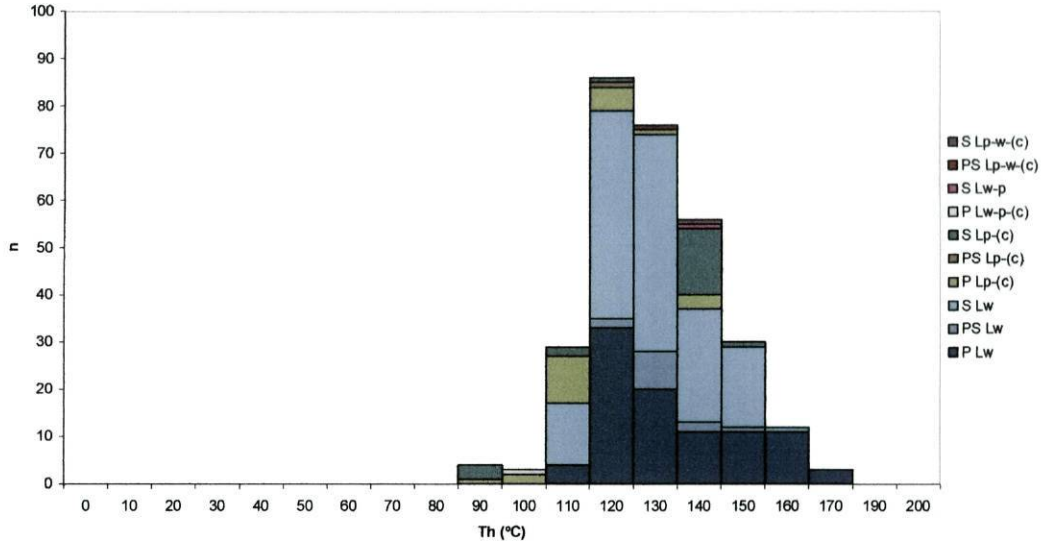


Fig. II-11a – Histograma representativo da Th das IF da FI

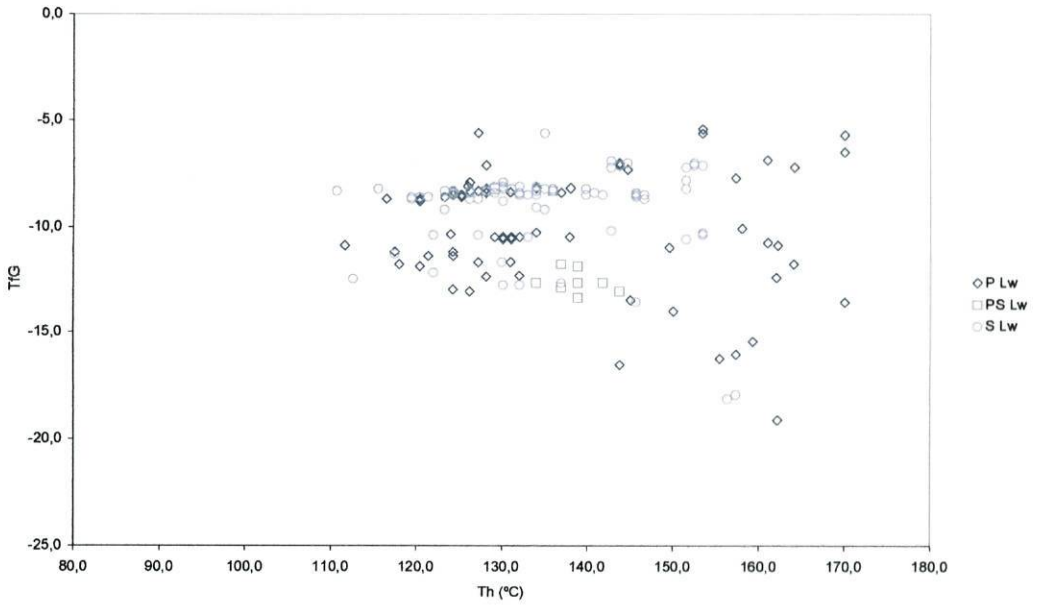


Fig. II-11b - Diagrama de correlação de TfG *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da FI

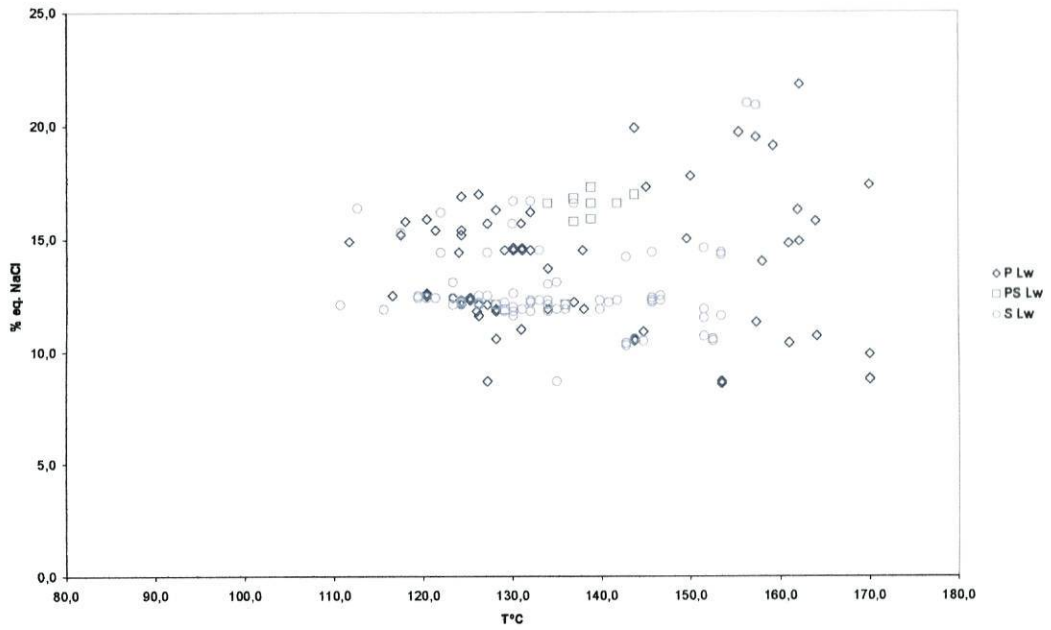


Fig. II-11c – Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da FI

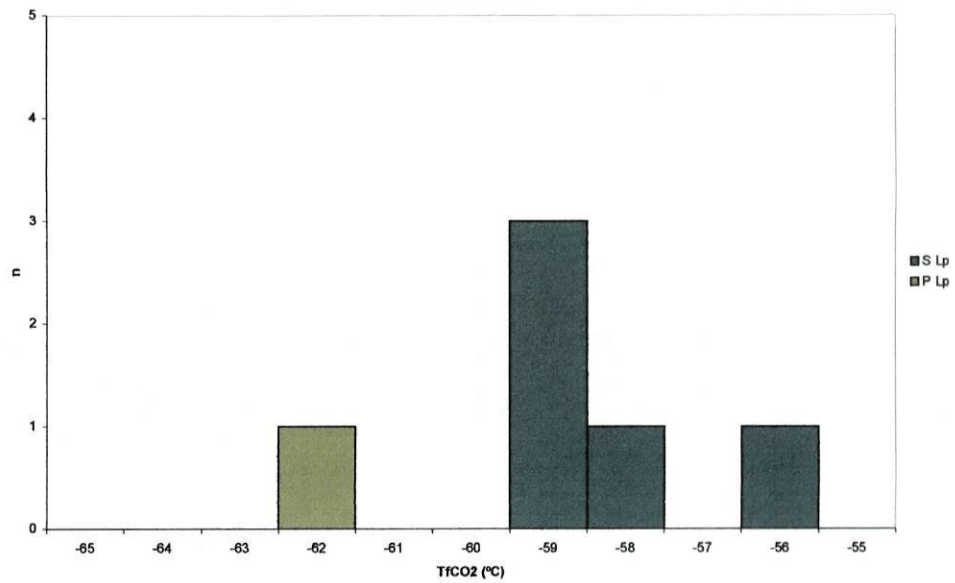


Fig. II-11d – Histograma representativo da $TfCO_2$ das IF com petróleo [Lp-(c)] da FI

4.4.2.2 Minério Intracársico

i) Fluidos aquosos

Na FII as inclusões fluidas aquosas são bifásicas, do tipo Lw e maioritariamente primárias, observando-se, igualmente, inclusões PS e S. A fase aquosa respresenta cerca de 90 a 95% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia de inferiores a 5 a 90 µm.

Inclusões primárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -76,9 e -44,2°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -22,3 e -1,8°C. O intervalo de salinidades está compreendido entre 3,1 e 24,1 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 133 e 162°C (Fig. II-12a).

Inclusões secundárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -58,5 e -48,3°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -20,6 e -10,1°C. O intervalo de salinidade está compreendido entre 14,0 e 22,8 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 132 e 151°C (Fig. II-12a).

ii) Fluidos com petróleo

Estes fluidos ocorrem em diferentes tipos de inclusões:

Inclusões do tipo Lp-(c): estas inclusões são bifásicas (petróleo+vapor) e ocorrem como cavidades P, PS e S. A fase vapor ocupa cerca de 5 a 50% do volume da inclusão, sendo que o Flw é considerado nulo, uma vez que não existe fase aquosa visível. A sua forma é variável e o seu tamanho varia entre 6,7 e 35,6 µm. A temperatura de homogeneização global ocorre em líquido a

temperaturas compreendidas entre 109 e 134ºC para as P e entre 130 e 134ºC para as S (Fig. II-12a).

Inclusões do tipo Lw-p-(c): estas inclusões são trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) e encontram-se em cavidades P e S. A fase aquosa ocupa cerca de 50 a 90% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 11,1 e 20,0 µm. A temperatura de primeira fusão de gelo ocorre a temperaturas compreendidas entre -58,5 e -48,8ºC para as inclusões P e entre -57,7 e -55,4ºC para as inclusões S. A temperatura de fusão de gelo ocorre entre -22,1 e -1,1ºC, para as P e aos -10,8ºC para as S. Não foi observada a fusão de clatratos. A homogeneização parcial ocorre em líquido, por desaparecimento da fase vapor a temperaturas compreendidas entre 104 e 143ºC para as P e entre 132 e 137ºC para as S (Fig. II-12a). Não foi observada a homogeneização global destas inclusões. No entanto, verifica-se que as temperaturas de homogeneização parcial coincidem com o intervalo das temperaturas de homogeneização total das inclusões com petróleo bifásicas do tipo Lp-(c) (Fig. II-12a).

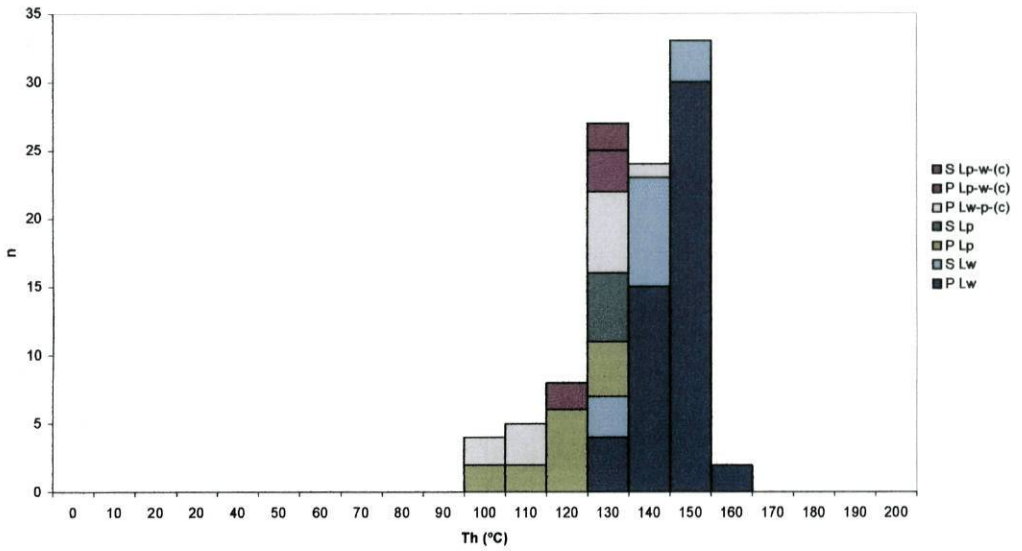


Fig. II-12a – Histograma representativo da Th das IF da Fluorite do minério intracársico (FII)

A projecção nos diagramas bivariantes dos dados microtermométricos, TfG *versus* Th e salinidade (p. % eq. NaCl) *versus* Th (Figs. II-12b e II-12c), permite evidenciar uma grande dispersão da salinidade para o caso das IF P aquosas, desde inclusões de baixa salinidade a inclusões com elevada salinidade (3,1 a 24,1 p. % eq. NaCl). No caso das IF S aquosas verifica-se que a maioria se encontra no campo das IF muito salinas (20,8 a 22,8 p. % eq. NaCl), havendo, no entanto, duas IF que se apresentam com uma salinidade intermédia (14,0 e 16,6 p. % eq. NaCl). Relativamente aos fluidos com petróleo verifica-se que se mantém a grande dispersão da salinidade. As IF fluidas P do tipo Lw-p-(c) variam desde pouco a muito salinas (1,9 a 24,0 p. % eq. NaCl) e as do tipo Lp-w-(c) evidenciam uma salinidade intermédia (15,2 a 20,5 p. % eq. NaCl). Estas IF com petróleo P exibem uma variação de salinidade idêntica às aquosas P, o que sugere um mesmo tipo de solução. Apenas foi observada a TfG de uma inclusão S do tipo Lp-w-(c), a que corresponde uma salinidade de 14,8 p. % eq. NaCl. Esta salinidade está dentro do intervalo de salinidade das inclusões S do tipo Lw.

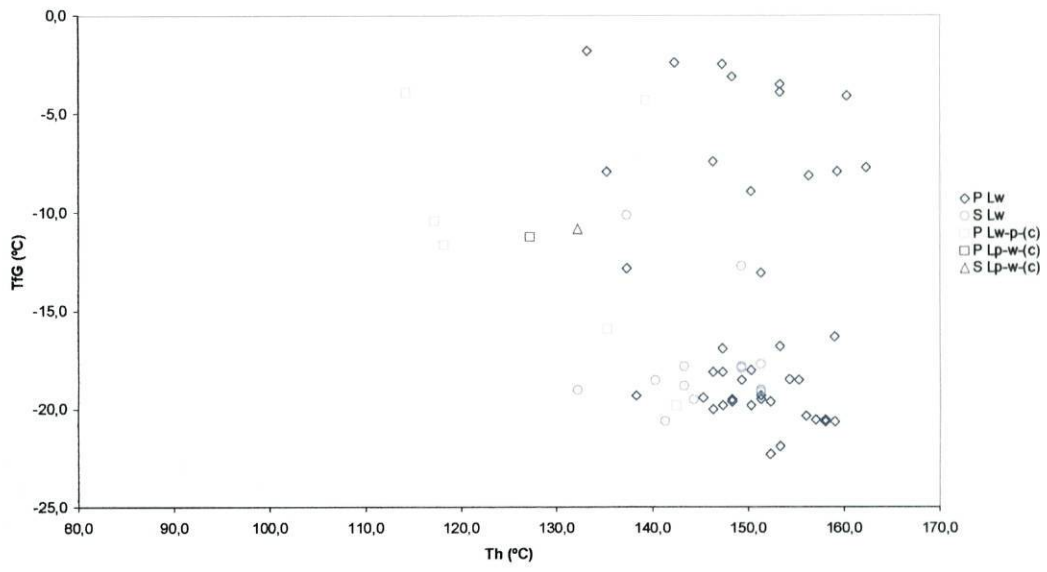


Fig. II-12b - Diagrama de correlação de TfG *versus* Th referente IF aquosas (Lw) da FII

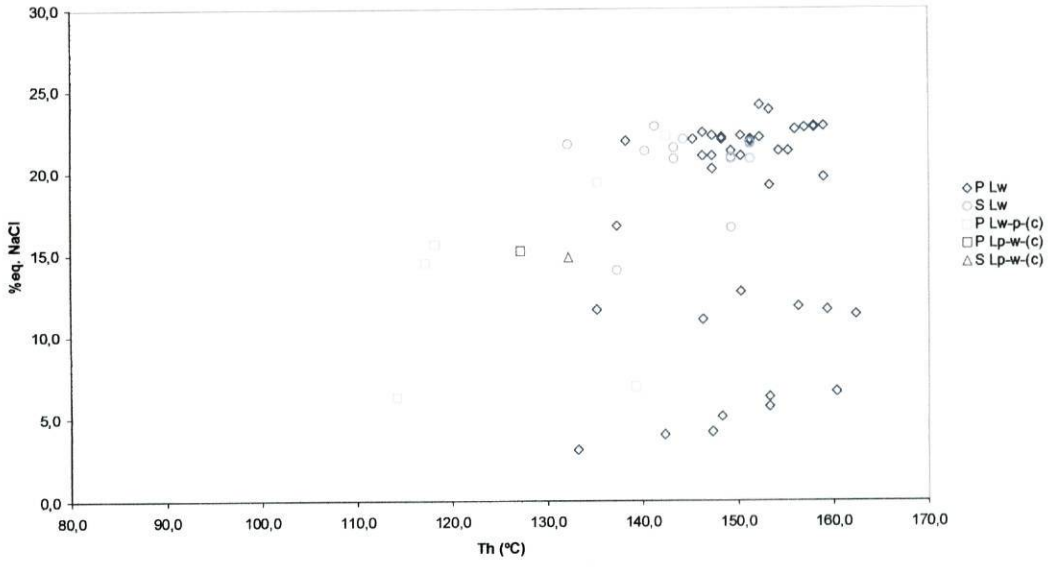


Fig. II-12c - Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da FII

4.4.2.3 Estruturas Geódicas e Fracturas ou Veios Tardios

i) Fluidos aquosos

Na FIII as inclusões aquosas são bifásicas, do tipo Lw e de origem P e S. A fase aquosa respresenta cerca de 90 a 95% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre inferior a 5 e 50 µm.

Inclusões primárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -65,6 e -47,8°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -23,8 e -8,1°C. O intervalo de salinidades está compreendido entre 11,8 e 25,2 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 99 e 156°C (Fig. II-13a).

Inclusões secundárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -55,2 e -47,5°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -13,2 e -5,9°C. O intervalo de salinidade está compreendido entre

9,1 e 17,1 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 115 e 158ºC (Fig. II-13a).

ii) Fluidos com petróleo

Estes fluidos ocorrem em diferentes tipos de inclusões:

Inclusões do tipo Lp-(c): estas inclusões são bifásicas (petróleo+vapor) e ocorrem como cavidades maioritariamente P. A fase vapor ocupa cerca de 5 a 50% do volume da inclusão, sendo que o Flw é considerado nulo, uma vez que não existe fase aquosa visível. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 8,8 e 25,5 µm. A temperatura de homogeneização global ocorre em líquido a temperaturas compreendidas entre 107 e 124ºC (Fig. II-13a).

Inclusões do tipo Lp-w-(c): estas inclusões são trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) e encontram-se em cavidades P. A fase aquosa ocupa cerca de 10 a 50% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 8,9 e 38,9 µm. A temperatura de primeira fusão ocorre entre -54,4 e -53,3ºC e a temperatura de fusão do gelo entre -15,2 e 12,9ºC, o que corresponde a uma salinidade compreendida entre 16,8 e 18,8 p. % eq. NaCl. Não foi observada a fusão de clatratos. A homogeneização parcial ocorre em líquido, por desaparecimento da fase vapor a temperaturas compreendidas entre 97 e 134ºC (Fig. II-13a). Não foi observada a homogeneização global destas inclusões. No entanto, verifica-se que as temperaturas de homogeneização parcial coincidem com o intervalo das temperaturas de homogeneização total das inclusões com petróleo bifásicas do tipo Lp-(c) (Fig. II-13a).

Inclusões do tipo Lw-p-(c): estas inclusões são trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) e encontram-se em cavidades P. A fase aquosa ocupa cerca de 70% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o

seu tamanho varia entre 8,3 e 32,2 µm. A temperatura de primeira fusão ocorre entre -54,9 e -54,2°C e a temperatura de fusão do gelo entre -14,9 a -12,8°C, o que corresponde a uma salinidade entre 16,7 e 18,6 p. % eq. NaCl. Não foi observada a fusão de clatratos. A homogeneização parcial ocorre em líquido, por desaparecimento da fase vapor a temperaturas compreendidas entre 108 e 112°C (Fig. II-13a). Não foi observada a homogeneização global destas inclusões. No entanto, verifica-se que as temperaturas de homogeneização parcial coincidem com o intervalo das temperaturas de homogeneização total das inclusões exclusivamente aquosas do tipo Lw e com as inclusões com petróleo bifásicas do tipo Lp-(c) (Fig. II-13a).

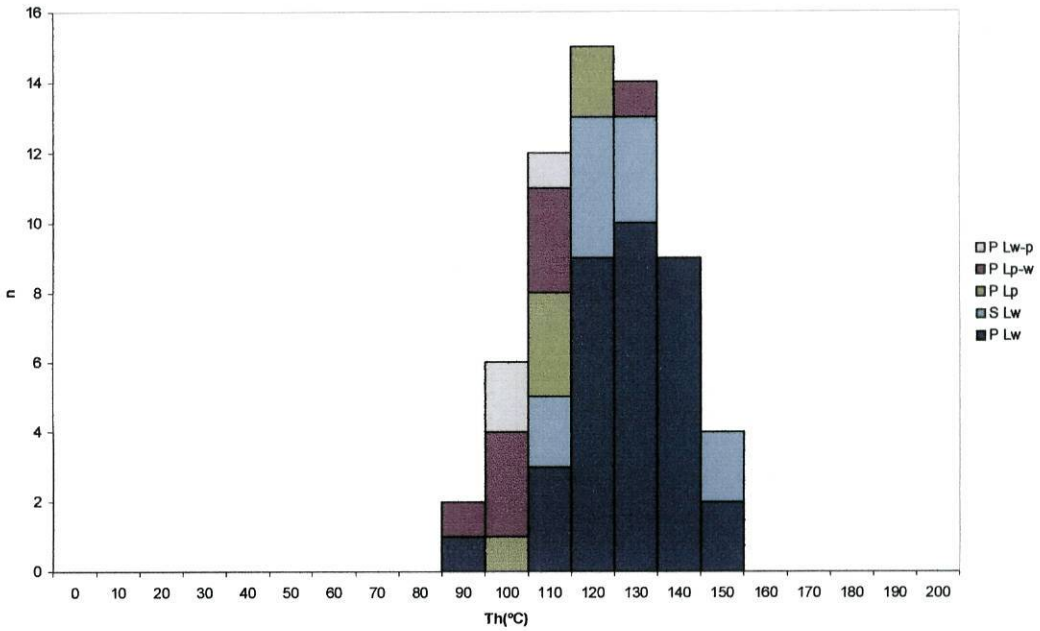


Fig. II-13a – Histograma representativo da Th das IF da FIII

A projecção dos resultados microtermométricos nos diagramas bivariantes, TfG *versus* Th e salinidade (p. % eq. NaCl) *versus* Th (Figs. II-13b, II-13c), permitem evidenciar a existência, maioritariamente, de fluidos P com salinidade intermédia (11,8 a 16,6 p. % eq. NaCl). No entanto, observam-se duas IF que apresentam salinidades mais elevadas (21,4 e 25,2 p. % eq. NaCl). As IF de origem S apresentam salinidades intermédias (9,1 a 17,1 p. % eq. NaCl). No que diz respeito aos fluidos com petróleo, verifica-se que quer os fluidos P do

tipo Lw-p-(c), quer os do tipo Lp-w-(c) apresentam salinidades intermédias (16,7 a 18,6 p. % eq. NaCl e 16,8 a 18,8 p. % eq. NaCl, respectivamente). Estes fluidos apresentam salinidades idênticas ao fluidos P do tipo Lw.

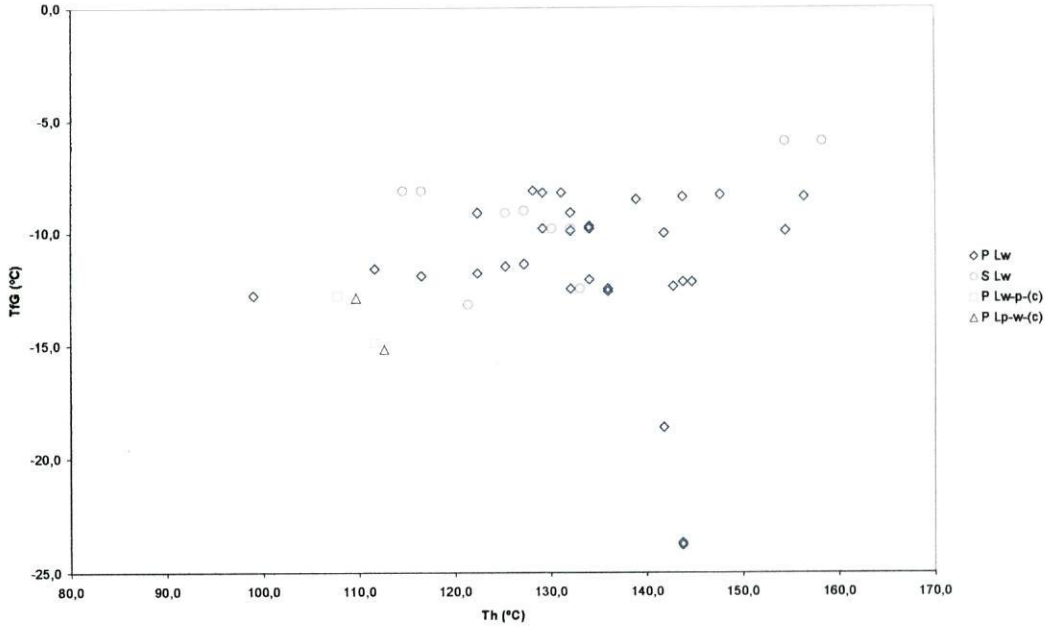


Fig. II-13b – Digrama de correlação de TfG *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) FIII

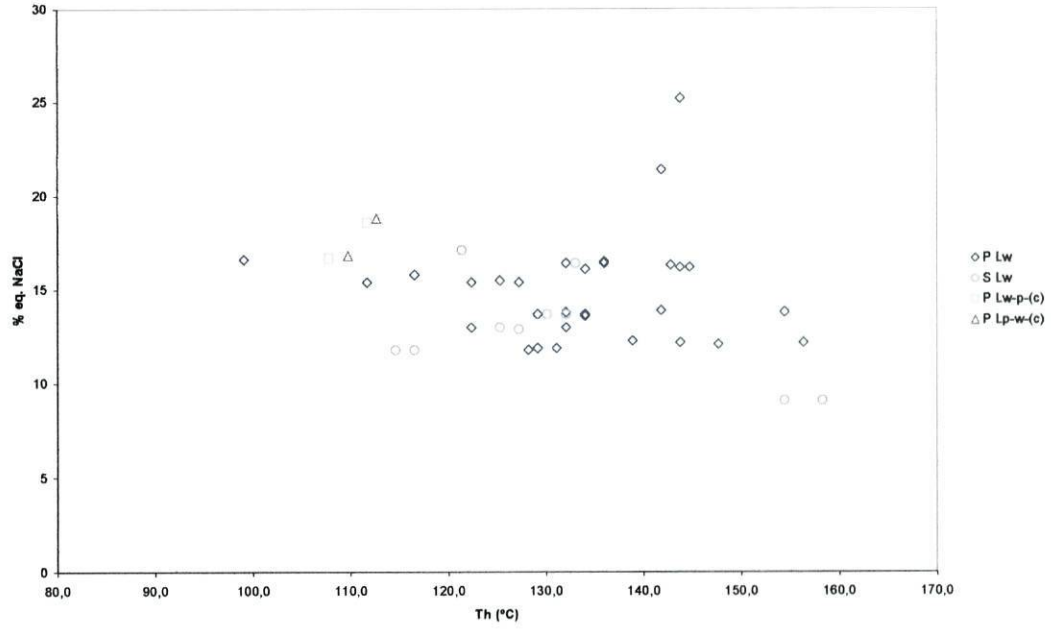


Fig. II-13c – Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da FIII

4.4.3 Composição da Fase Volátil

Foram efectuadas análises de micro-espectroscopia Raman nas IF com petróleo do jazigo de Hammam Zriba. No entanto, como já foi referido anteriormente, não foi possível obter resultados uma vez que os hidrocarbonetos presentes nas inclusões induziram um efeito de fluorescência que não foi possível minorar devido à inexistência de um filtro adequado.

4.4.4 Cálculo da Composição e Densidade Globais

Para as IF dos três tipos deposicionais de fluorite foram calculadas a composição e densidade globais cujos resultados são apresentados na Tabela II-2, em anexo. Apenas são apresentados os resultados referentes às inclusões exclusivamente aquosas, uma vez que no caso das inclusões que contêm petróleo não foi possível quantificar os hidrocarbonetos e/ ou espécies voláteis existentes e, por conseguinte, calcular a sua composição e densidade globais.

Os fluidos P aquosos do minério rubané apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 85,4 e 94, 5 moles% e entre 2,7 e 7,3 moles% de NaCl e densidade entre 0,96 e 1,06. Os fluidos PS apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 88,6 e 92,3 moles%, entre 3,9 e 5,7 moles% de NaCl e densidade entre 1,01 e 1,04. Os fluidos S possuem um conteúdo em H_2O que varia entre 85,9 e 94,5 moles%, entre 2,8 e 9,2 moles% de NaCl e densidade entre 0,98 e 1,06.

Os fluidos P aquosos do minério intracársico apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 83,8 e 98,1 moles%, entre 0,95 e 8,1 moles% de NaCl e densidade entre 0,95 e 1,09. Os fluidos S possuem um conteúdo em H_2O que varia entre 84,6 e 90,8 moles%, entre 4,6 e 7,7 moles% de NaCl e densidade entre 1,02 e 1,09.

Os fluidos P aquosos das estruturas geódicas e fracturas ou veios tardios apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 83,1 e 92,4 moles%, entre

3,8 e 8,4 moles% de NaCl e densidade entre 0,99 e 1,12. Os fluidos S possuem um conteúdo em H_2O que varia entre 88,7 e 94,2 moles%, entre 2,9 e 5,6 moles% de NaCl e densidade entre 0,97 e 1,05.

Da comparação dos resultados da composição global das IF das fluorites dos três tipos deposicionais conclui-se que os fluidos (ou mistura de fluidos) que deram origem ao minério hospedeiro destas inclusões apresentam sensivelmente as mesmas composições indicando que não sofreram mudanças significativas ao longo do tempo de cristalização dos diferentes tipos de fluorite.

4.4.5 Microscopia de Fluorescência

As inclusões com petróleo presentes nas fluorites FI, FII e FIII exibem cores de fluorescência azul e azul-branco (Fotos II-8a, II-8b e II-8c) indicando componentes aromáticos diluídos (Khorashani 1986 *in* Benchilla *et al.* 2003).

O valor de I546 varia entre 2,308 e 10,304 para as IF P e para as IF S é de 18,775. O parâmetro Q650/500 para as IF P varia entre 0,158 e 0,498 e para a IF S é de 0,514, indicativo de uma grande concentração de hidrocarbonetos alifáticos, uma vez que o valor de Q diminui em função de uma maior concentração destes compostos. Hidrocarbonetos com alta intensidade de fluorescência em comprimentos de onda de 650 nm possuem valores de Q elevados (superiores a 1). Pela análise dos valores de Q apresentados e pela projecção dos valores de λmáx dos comprimentos de onda utilizados para o cálculo do quociente Q (500 e 650nm) (Figs. II-14a, II-14b, II-14c e II-14d) verifica-se que a maior intensidade de fluorescência se situa em comprimentos de onda curtos (500 nm). Tendo em conta estes resultados é de esperar que estes hidrocarbonetos possuam uma baixa densidade (elevado ºAPI) e, consequentemente, uma maturidade elevada. Uma vez que não foi efectuada a fluorescência espectral, os diagramas apresentados nas Figs. II-14a, II-14b, II-

14c e II-14d apenas representam a projecção dos valores de λmáx para 500 e 650 nm, não sendo possível apresentar a curva de variação espectral.

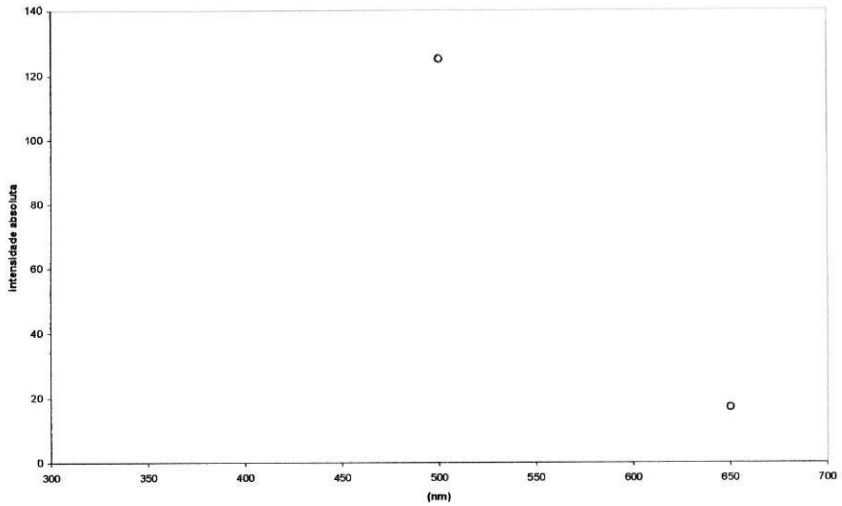


Fig. II-14a – Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da FI; Q= 0,158

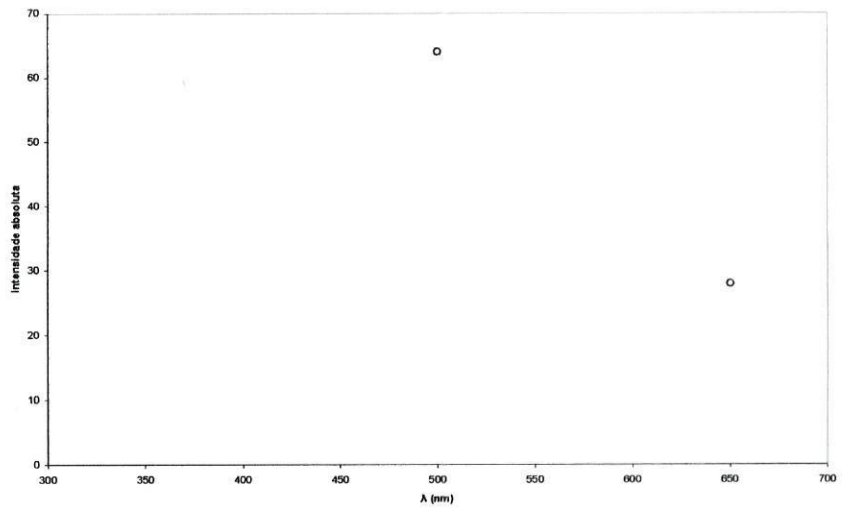


Fig. II-14b – Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF S da FI; Q= 0,514

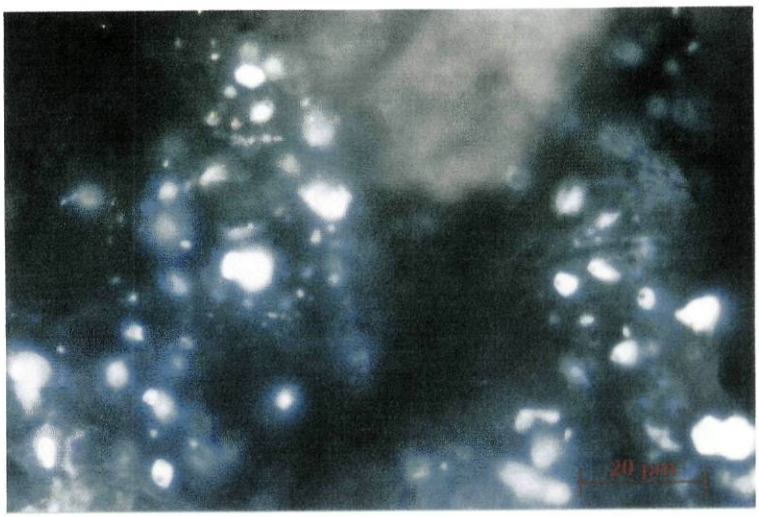


Foto II-8a – Inclusões fluidas P do tipo Lp-(c) com fluorescência azul e azul-branco

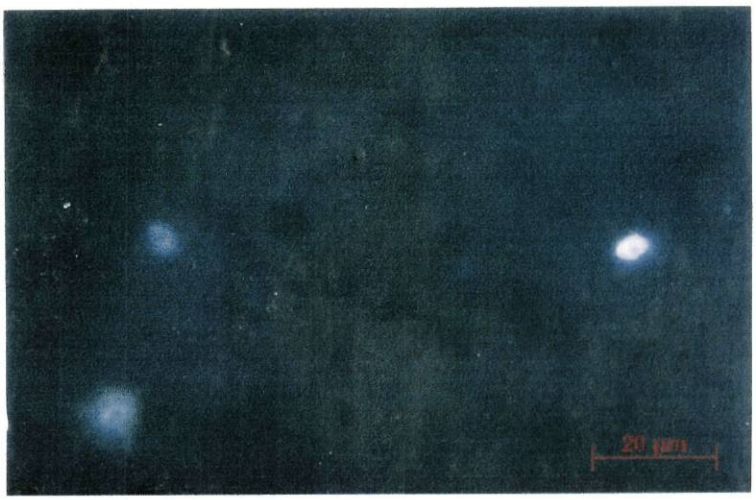


Foto II-8b – Inclusões fluidas P do tipo Lp-(c) com fluorescência azul

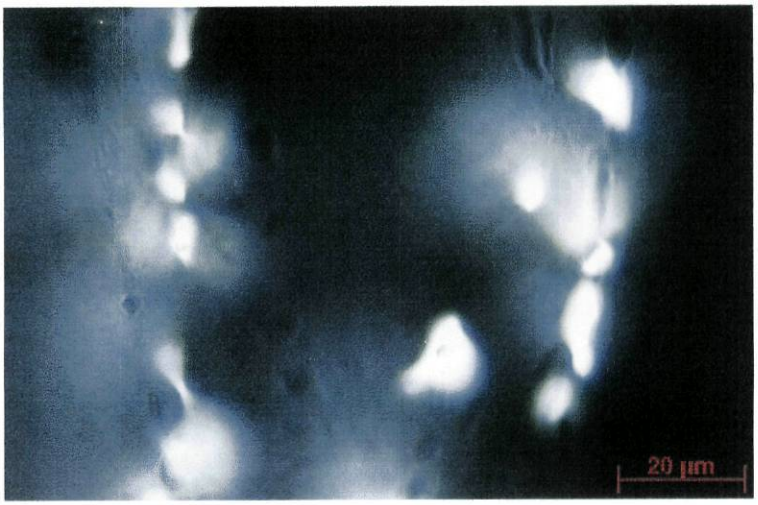


Foto II-18c – Inclusões fluidas S do tipo Lp-(c) com fluorescência azul-branco

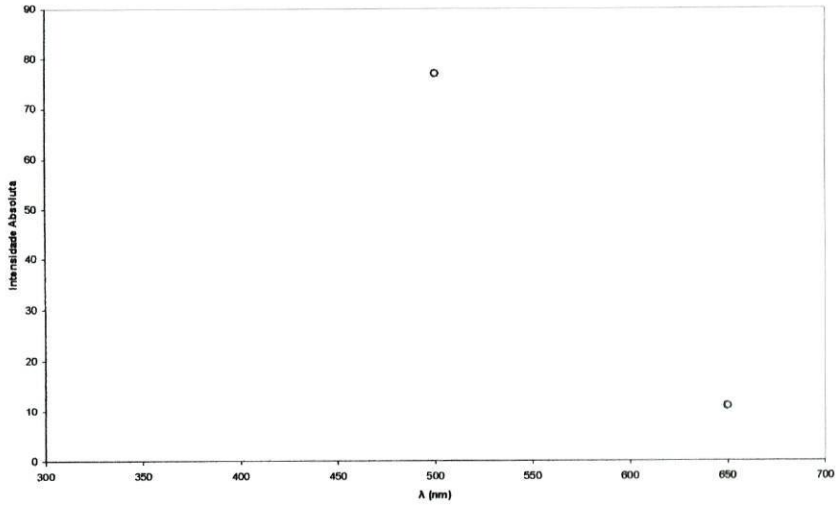


Fig. II-14c – Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da FII; Q= 0,166

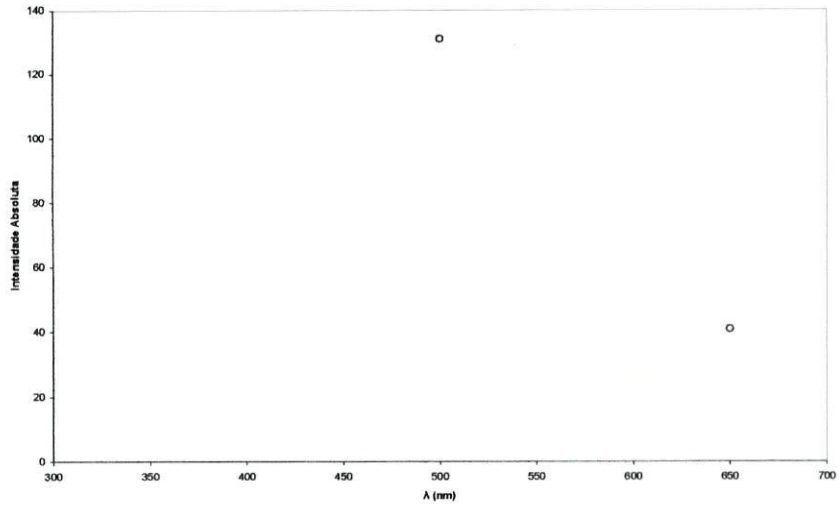


Fig. II-14d – Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da FIII; Q= 0,498

Guilhaumou *et al.* (1990a, b) observaram as mesmas cores de fluorescência observadas neste trabalho e procederam a análises FT-IR (*Infra-Red Fourier Transformation*) nas IF ricas em petróleo de Hammam Zriba. Estas análises mostraram a presença de componentes alifáticos associados a CO_2 e H_2O nas fases líquida e vapor. Guilhaumou (1989) in Benchilla *et al.* (2003) e Guilhaumou *et al.* (1990a, b, 2000) confirmaram a presença de CH_4 na fase vapor e CO_2 associado maioritariamente a hidrocarbonetos alifáticos. A percentagem de aromáticos é pequena. A água está por vezes associada em

quantidades variáveis, embora algumas IF não apresentem qualquer conteúdo em H_2O.

4.5 Determinação das Condições P-T-V-X de Aprisionamento dos Fluidos

As condições P-T-V-X de aprisionamento dos fluidos são determinadas através das isócoras e das temperaturas de homogeneização global (limite inferior das isócoras). O ponto de intersecção das isócoras dos dois tipos de fluidos é indicativo da temperatura de pressão de aprisionamento.

Quando uma inclusão fluida aprisiona uma fase de um fluido imiscível, a Th (se observada) representa a verdadeira temperatura de aprisionamento (Tt). No entanto, a Th não será igual à Tt se mais do que uma fase de fluidos imiscíveis forem aprisionados na inclusão quando esta se formou. Apenas IF com um fluido singular homogéneo aprisionado no momento da sua selagem podem respresentar Th significativas (Goldstein e Reynolds 1994).

Devido ao facto de não ter sido possível determinar a composição e a densidade globais das IF com petróleo, o cálculo das isócoras correspondentes a estas inclusões não foi efectuado, sendo apenas apresentadas as isócoras relativas às IF aquosas (Figs. II-15a, II-15b e II-15c). Uma vez que as rochas encaixantes se formaram em ambiente diagenético consideraram-se P máximas de 1000 bar. Os programas disponíveis para este efeito obrigam a um prévio conhecimento da composição do petróleo. Existe um novo programa (PIT – *Petroleum Inclusions Thermodynamic*), desenvolvido no *Institut Français du Pétrole*, que permite reconstruir o trajecto P-T da isócora utilizando os rácios volumétricos de vapor e os dados da fracção molar dos componentes do petróleo contidos em inclusões com petróleo da fluorite. Infelizmente, este *software* não está ainda comercialmente disponível.

Através das análises FT-IR, Guilhaumou (1989) in Benchilla *et al.* (2003) e Guilhaumou *et al.* (1990a, b, 2000) conseguiram determinar a composição das inclusões fluidas de petróleo. Como referido anteriormente, os hidrocarbonetos presentes são compostos maioritariamente alifáticos contendo também compostos aromáticos que lhes dá a propriedade de fluorescência. Foi também determinado por este método a presença de CO_2. A presença desta espécie volátil foi também observada nas IF com petróleo no decorrer do presente trabalho.

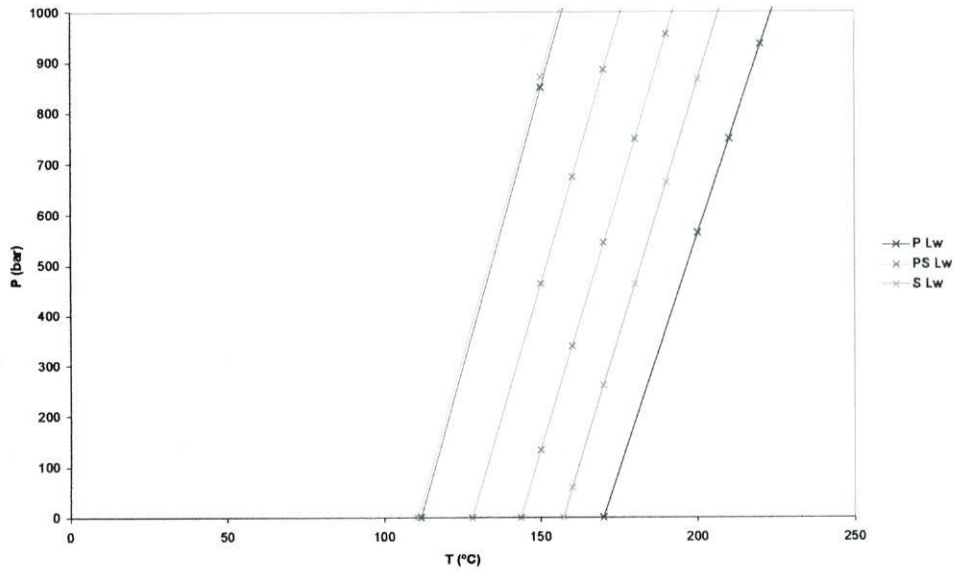


Fig. II-15a – Isócoras representativas das IF P, PS e S da FI

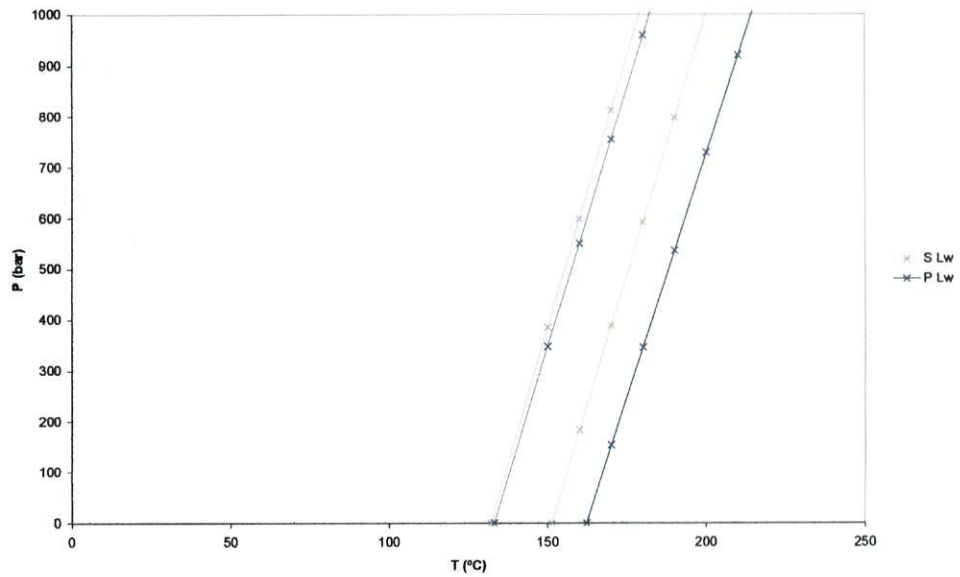


Fig. II-15b – Isócoras representativas das IF P e S da FII

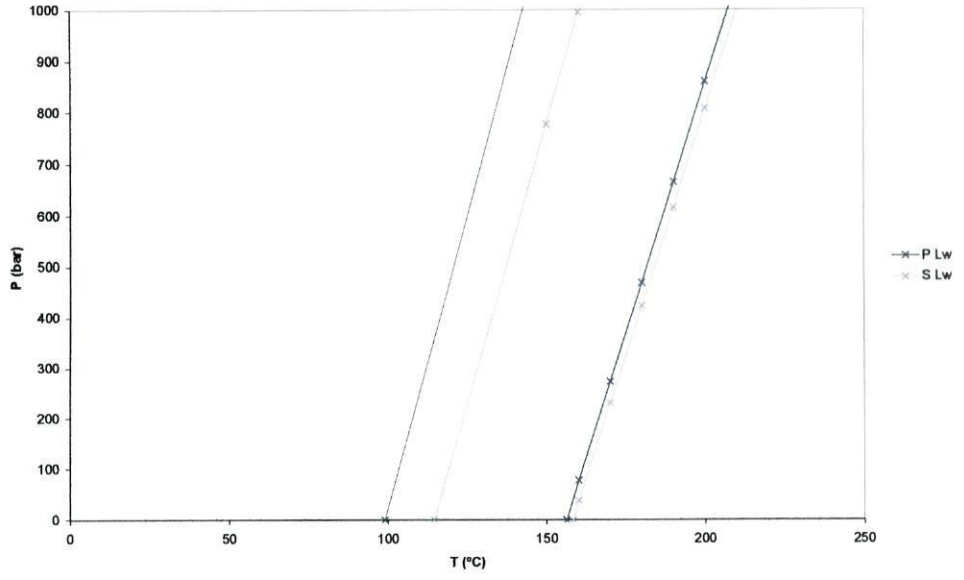


Fig. II-15c – Isócoras representativas das IF P e S da FIII

Trabalhos anteriores relativos a pressões de saturação, para os outros jazigos da província de Zaghouan, estimadas pela intersecção de isócoras correspondentes aos fluidos aquosos com isócoras dos fluidos com petróleo, revelaram valores de paleopressões durante a mineralização entre 100 a 150 bar (Souissi 1987 e Souissi *et al.* 1998 *in* Benchilla *et al.* 2003). Pressões similares foram sugeridas por Touray (1971) com base no sistema H_2O-CO_2.

Através do modelo P-T-V-X, considerando dados relativos à FI, estimou-se uma pressão de aprisionamento de 116 ± 5 bar correspondendo a uma profundidade máxima de 1155 ± 50 m (Fig. II-16). Este modelo foi calculado a partir do programa PIT. Este valor foi calculado usando um gradiente de pressão hidrostática de 100 bar.km^{-1} (Benchilla *et al.* 2003).

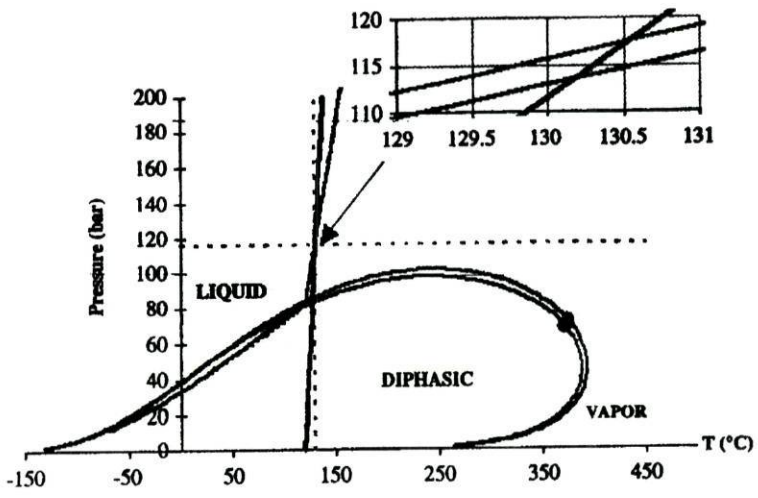


Fig. II-16 – Modelo P-V-T-X da área de Hammam Zriba, considerando dados relativos à FI (adaptado de Benchilla *et al.* 2003)

A pressão de aprisionamento estimada por Benchilla *et al.* (2003) pode ser intersectada com a isócora da Th máxima correspondente às IF aquosas P da FI. A temperatura resultante é de 176ºC (Fig. II-17). Esta intersecção é apenas uma estimativa e deverá ser confirmada com os dados relativos a IF com petróleo destas amostras.

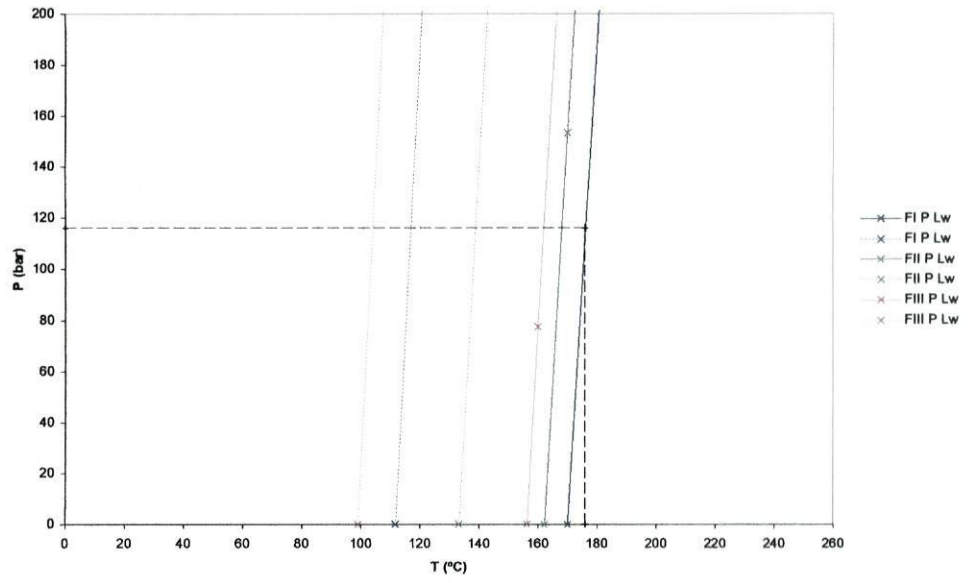


Fig. II-17 – Isócoras representativas das IF aquosas das FI, FII e FIII com a representação da intersecção da pressão de aprisionamento determinada por Benchilla et al. (2003)

4.6 Discussão e Conclusão

Nos três tipos deposicionais de fluorite de Hammam Zriba foram observadas IF aquosas, IF com petróleo e IF com os dois tipos de líquido (Lw+Lp).

A grande amplitude da salinidade (Fig. II-18) nas IF aquosas P das FI-FIII, variando entre inclusões pouco salinas até inclusões com salinidade elevada, indica uma provável mistura de dois fluidos com salinidades diferentes, facto que não está de acordo com o defendido por Benchilla *et al.* (2003). Estes autores definem que a salinidade varia entre 15 a 20 p. % eq. NaCl, sugerindo que a mineralização derivou apenas de um tipo de fluido basinal.

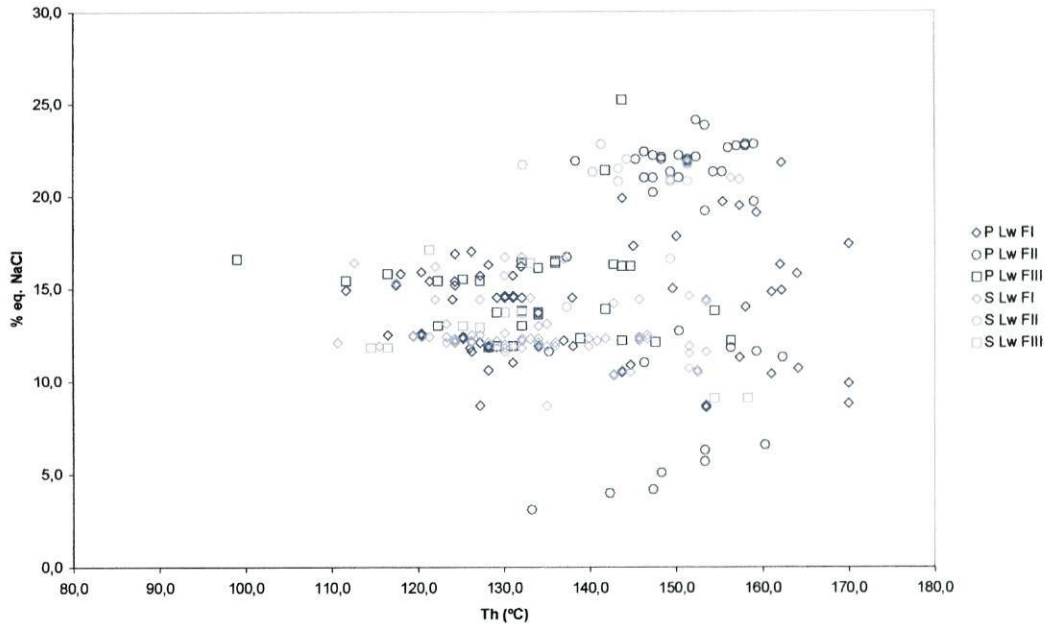


Fig. II-18 – Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) nas Fluorites FI, FII e FIII

Verifica-se, igualmente, que os fluidos aquosos P (11,8 a 25,2 p. % eq. NaCl; 99 a 156ºC) e S (9,1 a 17,1 p. % eq. NaCl; 115 a 158ºC) observados na fluorite mais tardia possam ter sido aprisionados em cavidades S nas fluorites precedentes (8,7 a 21,0 p. % eq. NaCl; 111 a 154ºC para a FI e 14,0 a 24,1 p.

% eq. NaCl; 132 a 151ºC para a FII), uma vez que as salinidades e as Th observadas variam dentro de limites idênticos.

A composição da fase aquosa das inclusões com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp) é semelhante à composição da fase aquosa das IF do tipo Lw (P e S). Esta evidência e a existência dos três tipos de inclusão (Lw, Lp e Lw+Lp) na mesma amostra sugere um aprisionamento contemporâneo das fases aquosa e de petróleo sugerindo, também, que o petróleo observado, nestas inclusões, foi transportado pelo fluido aquoso seu contemporâneo.

As cores de fluorescência das IF com petróleo dos três tipos deposicionais de fluorite variam entre azul e azul-branca, os valores de I546 variam entre 2,308 e 10, 304 para as P e é de 18,775 para as S, os valores de Q650/500 variam entre 0,158 e 0,498 para as P e é de 0,514 para as S, sugerindo uma composição dominada por compostos alifáticos. A presença de uma maior percentagem deste tipo de compostos foi determinada por Guilhaumou (1989) in Benchilla *et al.* (2003) e Guilhaumou et al. (1990a, b 2000) com recurso a análises FT-IR. Os valores de I546 variam entre 2,308 e 6,978 para as P e é de 18,775 para as S.

No decurso deste trabalho não foi possível determinar a composição e densidade globais das IF com petróleo, não podendo ser calculadas as isócoras correspondentes a este tipo de fluidos.

O modelo P-T-V-X apresentado por Benchilla *et al.* (2003) (Fig. II-16) foi efectuado recorrendo ao programa PIT. Este modelo, considerando dados relativos às IF da FI, estimou uma pressão de aprisionamento de 116 ± 5 bar, correspondendo a uma profundidade máxima de 1155 ± 50 m. Este valor foi calculado usando um gradiente de pressão hidrostática de 100 $bar.km^{-1}$.

5. Bou Jaber

5.1 Tectónica, Enquadramento Geológico e Estratigrafia

5.1.1 Tectónica

A região de Jebel Bou Jaber está localizada a cerca de 250 km a WSW de Tunis e a 6 km a sul da pequena aldeia de Kalaat-es-Sunam junto à fronteira com a Argélia (Fig. II-1). Os vários jazigos que pertencem ao sector de Bou Jaber (Foto II-9) encontram-se localizados no Atlas Pré-Sahariano (Fig. II-8).

O anticlinal de Bou Jaber, localizado maioritariamente na Argélia, emerge do planalto de Ouled Bou Rhanem estendendo-se em cerca de 5 a 6 km. É limitado a N e a E por esta depressão e a S pela planície de Ouled Moussa.

O Jebel Bou Jaber (Monte Bou Jaber) está dividido em dois por uma portela principal onde passa a fronteira argelo-tunisina. A sua extensão na Tunísia é de cerca de 2,5 km.

A cadeia de montanhas é formada por uma série de cristas calcárias, bastante escarpadas, em que o ponto culminante é a cerca de 1000 m de altitude, a 300 m acima da planície.

Os jazigos desta região estão dispersos e repartidos sobre os dois flancos do anticlinal e ao longo das suas diversas cristas.

O Jebel Bou Jaber faz parte dos montes de Mellegue que correspondem aos anticlinais e aos sinclinais orientados segundo as linhas diretrizes da Orogenia Maghrebiana (SW-NE). Tipicamente não constituem cadeias contínuas, mas relevos isolados e muitas vezes escarpados (Foto II-10). Os afloramentos de antigos recifes de coral, as acumulações enormes de sedimentos argilosos e as escavações recentes, implicaram uma fisionomia particular a esta região.

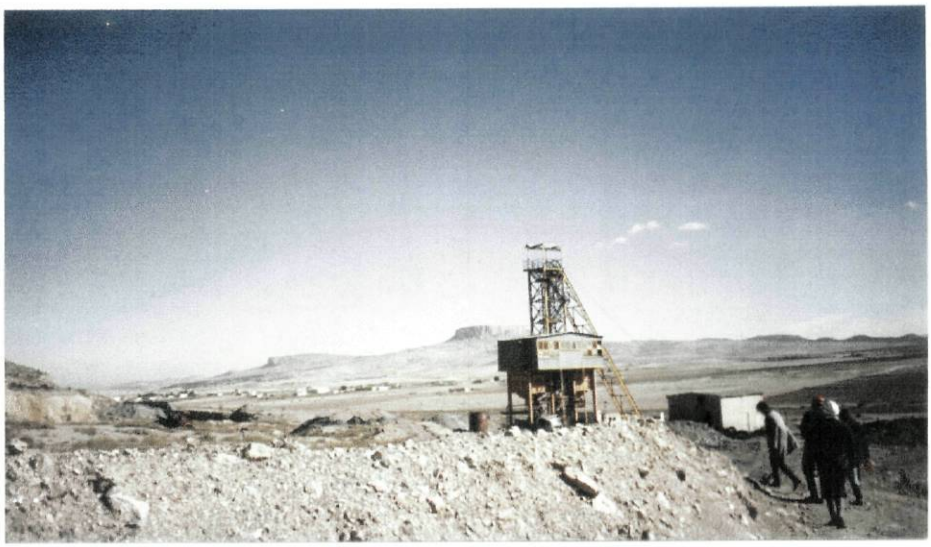


Foto II-9 – Jazigo "Est", Bou Jaber



Foto II-10 – Relevo isolado e escarpado da região de Bou Jaber edificado durante a Orogenia Maghrebiana

O anticlinal de Bou Jaber está truncado na parte norte-oriental pelo desmembramento do complexo de idade triásica.

Segundo Bouhlel (1993) a "falha de Bou Jaber" descrita por diversos autores (e.g. Gharbi *et al.* 1981) é uma superfície de discordância fazendo repousar as margas do Vraconiano (Albiano tardio) sobre a superfície erodida composta pelo Gargasiano inferior (Apciano superior), o Clansayesiano (Apciano tardio) e o Albiano inferior.

É ao nível desta superfície de discordância que estão depositadas as mineralizações do jazigo "Est".

Os "filões de Bou Jaber" referidos em trabalhos anteriores são antes bolsadas cársicas que se situam: i) imediatamente sobre a discordância do Vraconiano (Albiano superior), com prolongamentos nos calcários recifais do Gargasiano inferior; e ii) no contacto dos calcários recifais do Gargasiano inferior e dos calcários em bancadas estratificadas do Gargasiano inferior (Bouhlel 1993).

Segundo Dubourdieu (1956) *in* Amouri (1986) e Gharbi *et al.* (1981) o centro do anticlinal de Jebel Bou Jaber pertence ao Triásico e vai desaparecendo para SW por uma terminação periclinal muito regular que se encontra na Argélia.

Na parte tunisina de Jebel Bou Jaber a série monoclinal apciana tem direcção N75° sendo fortemente inclinada (70°-80°) para sul. Ela é ocupada obliquamente por dois importantes acidentes subparalelos. O primeiro, a Norte, põe em contacto a base da série com o Triásico. Este acidente afecta os termos mais antigos em direcção a Este. O segundo, a Sul, põe o tecto em contacto com o Cenomaniano. Este contacto, marcado por estrias tem um rejeito de 800 m (Dubordieu 1956 *in* Amouri 1986) sendo mineralizado em fluorite, galena, blenda e barite.

O Jebel Bou Jaber é limitado a Este pela falha transversal do jazigo "Est". Esta falha permitiu a ascenção da água quente sulfato-cloretada (Fig. II-19). A emergência termomineral existente em Bou Jaber é uma evidência desta ascenção. A água desta fonte possui uma temperatura de 38°C, um débito de 12 l/s e um ph≈ 7,0.

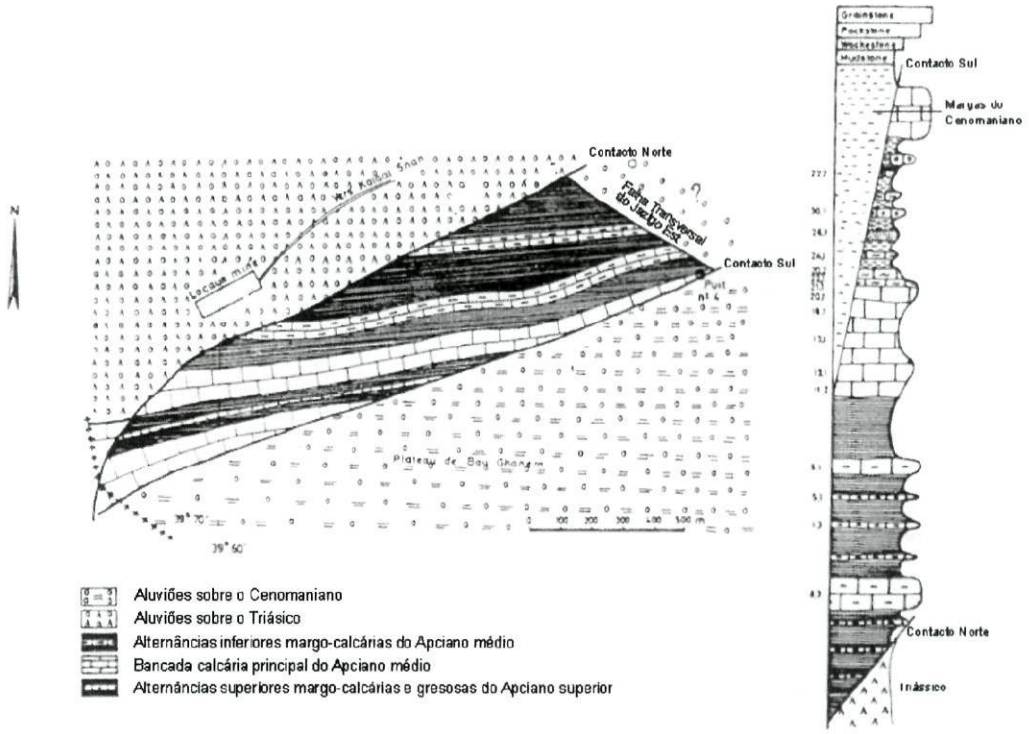


Fig. II-19 – Mapa geoestrutural de Jebel Bou Jaber (modificado de Amouri 1986)

5.1.2 Enquadramento Geológico

A parte ocidental do Atlas Tunisinos e a parte norte do Atlas Sahariano, na Argélia, são caracterizadas por uma cobertura ceno-mesozóica repousando sobre o Triásico germânico por intermédio de uma superfície de descolamento. Esta série apresenta várias lacunas relacionadas às emersões. A mais importante é, certamente, aquela que teve lugar no final do Apciano, reconhecida regionalmente em Slata, Sidi Amor Bou Salem, Jerissa, Lajred, El Hamra, Chaambi, Semmana, Sellaum, Mrihla, entre outras.

O distrito de Bou Jaber, localizado na parte oeste do Atlas Tunisinos, é formado por pequenos jazigos dispersos sobre os dois flancos do anticlinal ligados a um ambiente carbonatado. Estes jazigos situam-se nas bancadas calcárias mais meridionais formando as principais cristas. O sector de Bou Jaber, propriamente dito, compreende os jazigos seguintes: jazigo "Est", correspondente ao jazigo principal, uma vez que é aqui que são conhecidas as maiores reservas; o grupo de jazigos de Centro, Sul e Col, e os jazigos "Esperánce" e "Saint Antoine".

O Jebel Bou Jaber é caracterizado por uma estrutura anticlinal apciana, constituída pela fácies carbonatada da formação "Serj" (Burollet 1956 *in* Amouri 1986) e por mineralizações de F-Ba-Zn-Pb que ocorrem nos calcários recifais (Dubourdieu 1956 e Mahjoubi 1978 *in* Amouri 1986) ou subrecifais (Funchs 1973 e Jurleovic 1965 *in* Amouri 1986).

A formação Serj é, geralmente, truncada na base pelo Triásico e expõe no seu cume diferentes fases de emersão (M' Rabat 1981 *in* Amouri 1986).

A fácies carbonatada apresenta alternância de margas e de calcário em que se encontram também dolomitos e grés na parte das alternâncias inferiores.

As margas ocupam os locais escavados e os calcários formam as principais cristas do Jebel.

Os jazigos do Jebel Bou Jaber estão localizados sobre os dois flancos das bancadas calcárias mais meridionais formando as principais cristas.

5.1.3 Estratigrafia

A série sedimentar estende-se do Triásico ao Quaternário (Fig. II-19):

Triásico

O Triásico aparece em pequenas extremidades, a Norte, em contacto com os sedimentos apcianos. Este contacto diapírico, nem sempre visível à superfície, é recoberto por escombros das encostas e terrenos quaternários da depressão do Ouled Bou Rhanem. Esta unidade é visível a Oeste dos edifícios mineiros e as camadas triásicas são postas a nu, sobretudo na parte onde foram efectuados trabalhos mineiros.

É constituído por sedimentos plásticos desgastados e desordenados formados por dolomitos argilosos, calcários oolíticos e argila, de um verde-claro abundante, impregnados de gesso, grés argilosos de cor vermelho-acastanhada. Nestes sedimentos sulfo-carbonatados existe a presença de quartzo. O movimento diapírico torna difícil a determinação da sucessão.

A maior parte da intrusão diapírica de Bou Jaber é formada por massas brechóides, gesso-argilosas e gesso-dolomíticas.

Cretácico

O Cretácico é representado pelo Apciano, Albiano (?), Cenomaniano e Turoniano

Apciano

Esta unidade forma a maior parte do maciço que é também aquela onde a mineralização tem mais expressão.

A camada mais antiga é constituída por:

– alternâncias inferiores (alternâncias de margas, calcários, ortoquartzitos e dolomitos);

– bancadas de calcários intermédios, de cor cinzenta subcristalinos que formam as cristas principais de Bou Jaber, separadas por alternâncias inferiores (cerca de 100 m). Estes calcários são o principal encaixante da mineralização;

– alternâncias superiores constituídas por margas com Orbitolinas, margo-calcários, calcários e calcários dolomíticos (cerca de 40 m).

Albiano

O Albiano é inseparável do Apciano nesta região. Nas alternâncias superiores existe fauna pertencente ao Apciano e ao Albiano.

O Apciano e o Albiano terminam pela falha sul contra as margas cenomanianas que estão rubificadas ao nível do contacto. Estas margas são esverdeadas pertencendo ao Cenomaniano e em parte ao Albiano (?) (Dubordieux 1956 *in* Ben Said E. 1974). A possança de toda esta série é de cerca de 500 m.

Cenomaniano

O Cenomaniano contacta directamente sobre o Apciano seja por transgressão ou por sobrepressão do Albiano pelas falhas longitudinais (Sainfeld 1952 *in* Ben Said E. 1974).

É constituído por margas esverdeadas a cinzentas dispostas ao longo da parte sul do maciço apciano.

Esta série é rica em microfauna do Cenomaniano médio e superior: *Globigerinella*, *Globotruncana apennica* Renz e *Rotalipora Globotruncanoides* Sigal.

Turoniano

O Turoniano aflora a Sul do maciço de Bou Jaber onde é formado por margas e bancadas de calcário.

Quaternário

O Quaternário encontra-se a Norte e a Sul do maciço sendo formado pelas incrustações calcárias, pelos escombros das encostas e limo.

5.2 História Mineira

Os primeiros indícios de exploração do jazigo de Bou Jaber remontam à época romana (séc. II a V d.c), sendo o minério explorado a prata. Posteriormente, durante os séculos VI a XV foram exploradas cerca de 200 000 toneladas com 10% de Pb (Amouri 1986).

Já no período moderno (séc. XX), as reservas económicas da parte oriental do jazigo "Est" de Bou Jaber foram avaliadas em 6 MT com 33,80% de barite, 9,34% de fluorite, 3,62% de Zn e 1,53% de Pb (M'Barek e Ben Ali 1986 *in* Bouhlel 1993). A mina produzia quatro tipos de concentrados: um concentrado de barite com 95-96% de $BaSO_4$, 1-2% de $SrSO_4$ e 2-3% de uma mistura de calcite, fluorite, PbS e ZnS; um concentrado de blenda com 55% de Zn; um concentrado de galena com 55-60% de Pb com um teor em prata da ordem de 400-500 g/t; um pré-concentrado de fluorite com 30-35% de CaF_2.

5.3 Estudo Petrográfico e Mineralógico

Ben Said E. (1974), Gharbi *et al.* (1981), Amouri (1986) e Bouhlel (1993) definiram que a mineralização de Bou Jaber é essencialmente constituída por blenda, galena, pirite, barite, fluorite e calcite.

Os variados corpos mineralizados ocorrem nos carbonatos do Apciano sobre os dois flancos do anticlinal e a sua localização é condicionada pela superfície da inconformidade ante-Albiana superior.

Gharbi *el al.* (1981) e Amouri (1986) descreveram três tipos de mineralização ocorrentes em Bou Jaber: corpos filonianos ou mineralização no contacto cenomaniano-apciano, corpos lenticulares ou mineralização fissural e difusa nos calcários do muro e corpos *stratabound* ou mineralização em maciço e colunas.

No entanto, segundo Bouhlel (1993), o jazigo pode ser decomposto em três maciços mineralizados, que apresentam direcções de alongamento sensivelmente E-W e inclinações subverticais: um maciço "A1" imediatamente sobre a margas do tecto do Vraconiano (Albiano tardio) e dois maciços intercalares "A2" e "A3" ("maciço intermédio" e "maciço do muro", respectivamente) que evoluem profundamente no interior dos calcários recifais do Gargasiano inferior (Apciano inferior) (Figs. II-20a e II-20b). Para este autor a análise das mineralizações (maciços A1, A2 e A3) de Bou Jaber mostra a sucessão ao longo do tempo de três tipos de deposição:

i) o primeiro, precoce, correspondendo à cristalização da blenda, da galena, da ankerite e de pequenos cristais de barite e fluorite, nos sedimentos negros, com grãos detríticos e englobando elementos milimétricos arrancados aos calcários do Gargasiano (Apciano inferior);

ii) o segundo, ligeiramente mais tardio, correspondendo à deposição de barite e de fluorite por substituição da matriz carbonatada do sedimento cársico e por enchimento dos vazios centimétricos a decimétricos. Localmente, os resíduos negros do sedimento intracársico conferem ao mineral fluo-barítico a sua fácies rubané;

iii) o terceiro, correspondendo ao depósito de barite, em cristais decimétricos, nas partes centrais dos corpos mineralizados ou no contacto dos corpos mineralizados com o calcário do muro previamente dissolvido (?). Esta estapa de cristalização da barite teve lugar num meio onde as condições hidrodinâmicas foram favoráveis à criação de um volume livre bastante importante. Os cristais de barite são tapados frequentemente por romboedros de ankerite, aos quais sucedem localmente cristais geódicos de barite, fluorite e localmente escalenoedros de calcite.

Os maciços mineralizados de Bou Jaber são compostos por (Bouhlel 1993):

1 – Sedimento intracársico portador de sulfuretos (blenda e galena), ankerite, barite e fluorite;

2 – Minério rubané rico em barite e fluorite;

3 – Zonas com grandes cristais de barite;

4 – Mineralização nos calcários do muro constituída por ankesparite, sulfuretos disseminados e preenchimento de micro-cavidades de dissolução cársica por ankerite, quartzo bipiramidado, argilas-matéria orgânica, pirite-marcassite, blenda, galena, lamelas de barite e cristais xenomórficos e cúbicos de fluorite;

5 – Mineralização nas fracturas constituída por blenda, galena, barite, fluorite e calcite.

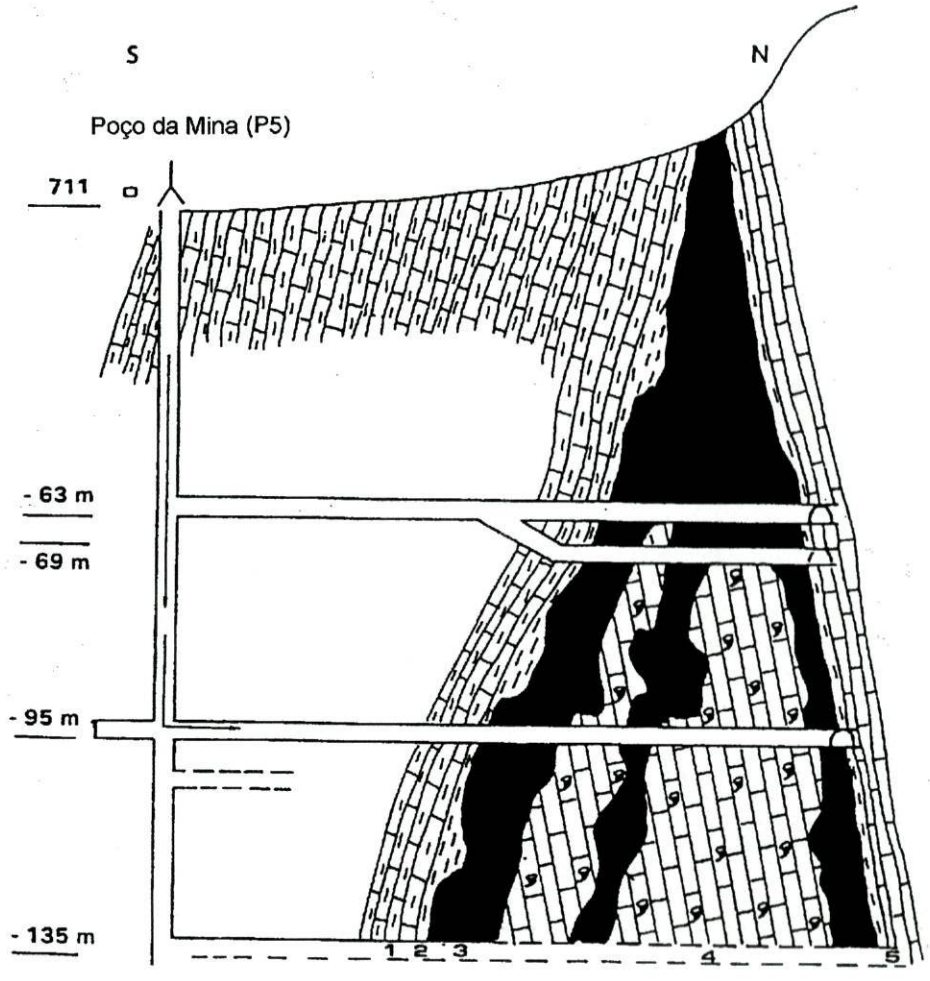


Fig. II-20a – Corte esquemático do jazigo principal de Bou Jaber (modificado de Bouhlel 1987 *in* Bouhlel 1993):

1 – Margas verdes e calcários margosos (Vraconiano)

2 – Calcários laminados e argilas negras (Albiano superior s.s.)

3 – Corpos mineralizados (A1, A2 e A3)

4 – Calcários recifais do Gargasiano inferior

5 – Calcários em bancadas estratificadas do Gargasiano inferior

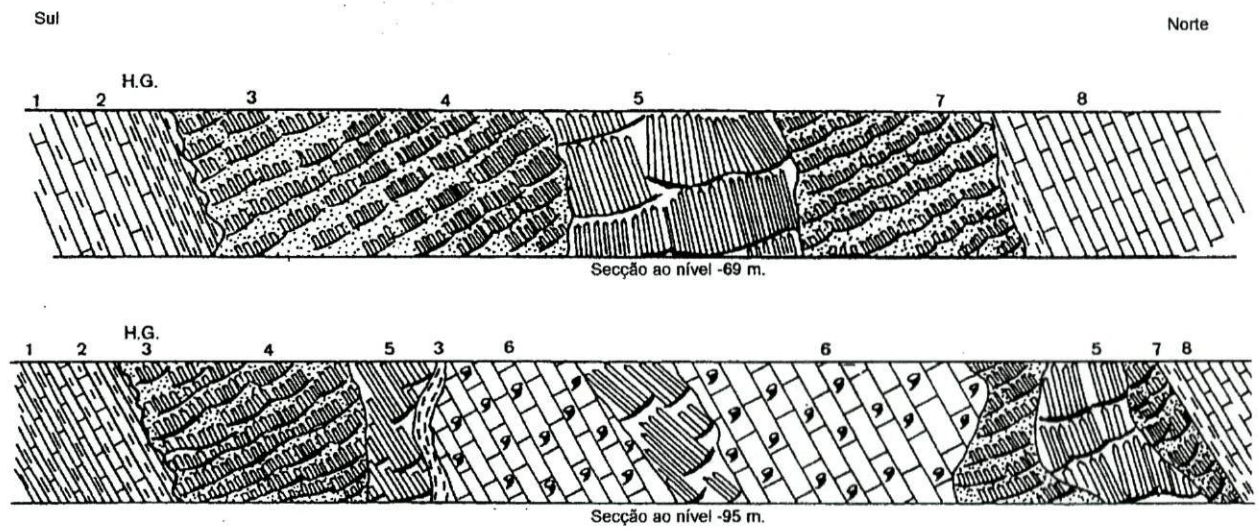


Fig. II-20b – Cortes esquemáticos ilustrando a zonalidade da estrutura e da mineralogia, da parte externa até ao centro, dos diferentes corpos mineralizados do jazigo principal de Bou Jaber (modificado de Bouhlel 1987 *in* Bouhlel 1993)

1 – Margas verdes e calcários margosos (Vraconiano)

2 – Calcários laminados e argilas negras (Albiano superior s.s.)

H.G. – Superfície endurecida

3 – Brechas de *karst* ricas em Pb-Zn

4 – Minério rubané rico em barite e fluorite

5 – Bolsadas, maciços e geódes com grandes cristais de barite

6 – Calcários recifais do Gargasiano inferior

7 – Argilas negras ricas em blenda e pirite

8 – Calcários em bancadas estratificadas do Gargasiano inferior

No presente estudo a análise petrográfica e mineralógica incidiu nos três primeiros tipos de mineralização.

1 – Sedimento intracársico

O sedimento intracársico é o portador de sulfuretos (blenda e galena). Possui um cor negra e é composto essencialmente por argilas mais ou menos carregadas de elementos provenientes dos calcários recifais (detritos de Echinodermes, grãos de fosfato, quartzo de neoformação em prismas com terminação piramidal mais ou menos desenvolvida distribuídos paralelamente à litificação e matéria orgânica).

As argilas negras ocupam muitas vezes as partes inferiores e repousam sobre as irregularidades das paredes das cavidades cársicas desenvolvidas às custas da dissolução dos calcários recifais do Gargasiano inferior. A sua posição, a sua cor e a sua composição permitiram uma união com as argilas residuais e favoráveis à formação de sulfuretos, habitualmente encontrados nas zonas de imbibição dos sistemas cársicos em meio carbonatado (Bouhlel 1993).

Nas argilas negras, o minério é composto por: pirite-marcassite (rara), blenda (abundante), galena (frequente), barite, fluorite, calcite e ankerite (Foto II-11a).

Ao microscópio de transmissão a blenda aparece em cristais automórficos. A pirite-marcassite apresentam-se respectivamente sob a forma de cubos e prismas lamelares. Estes sulfuretos de ferro formam por vezes inclusões na blenda. Estão igualmente presentes nas uniões argilosas das lamelas de barite. A blenda pode ocorrer como inclusão na galena, na barite e na fluorite. A galena apresenta-se em placas subautomórficas preenchendo os vazios e/ ou cimentando os cristais de blenda. A ankerite aparece sob a forma de cristais romboédricos sendo o cimento do minério intracársico. Uma grande parte da ankerite é substituida pela fluorite. A barite (BI) aparece em cristais de 0,5 a 10 mm de comprimento na matriz carbonatada. Este mineral aparece igualmente sob a forma de cristais antipolares dispostos em camadas intraestratificadas com níveis muito ricos em blenda. A fluorite (FI) forma o cimento de todos os minerais anteriores. Ela apresenta-se em placas pluri-milimétricas, constituídas por agregados policristalinos. Os cristais têm 150 a 2000 µm de comprimento. A fluorite desenvolve-se geralmente por substituição da ankerite. Localmente, os cristais de fluorite aparecem em cubos perfeitos de 1 a 3 cm cristalizando entre os prismas de barite ou nos vazios geódicos (Fotos II-11b e II-11c).



Foto II-11a – Amostra de mão do sedimento intracársico

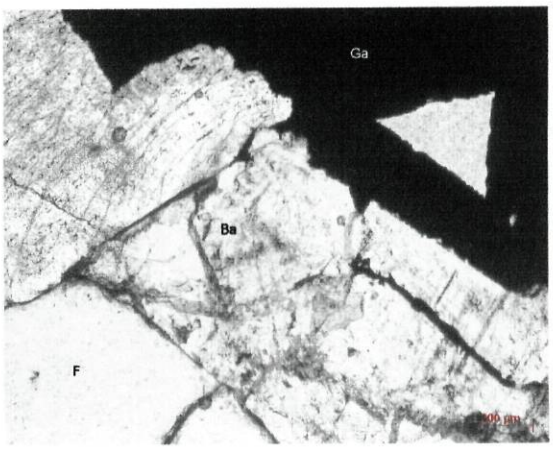


Foto II-11b – Lâmina delgada do sedimento intracársico (microsc. Transmissão; N//): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena

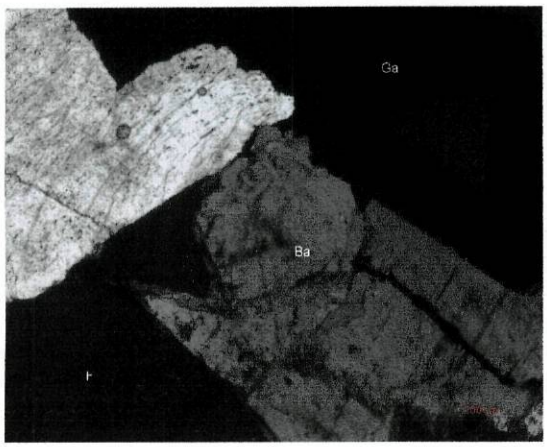


Foto II-11c – Lâmina delgada do sedimento intracársico (microsc. Transmissão; NX): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena



Foto II-12a – Amostra de mão do minério rubané

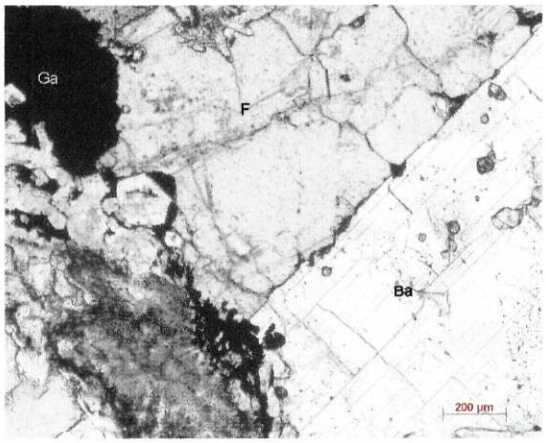


Foto II-12b – Lâmina delgada do minério rubané (microsc. Transmissão; N//): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena)

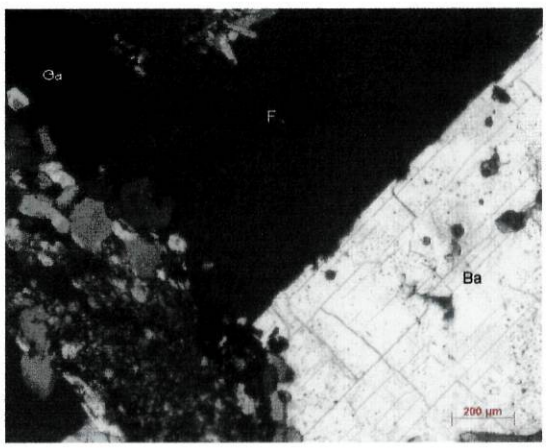


Foto II-12c – Lâmina delgada do minério rubané (microsc. Transmissão; NX): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena

2 – Minério Rubané rico em barite e fluorite

O minério rubané é constituído por prismas tabulares de barite de cor branca com espassamentos de 0,5 a 3 cm e comprimentos de 5 a 20 cm. Os limites interlamelares são geralmente ocupados por plaquetas do sedimento cársico, conferindo a este minério uma estrutura "rubané" (Fotos II-12a, II-12b e II-12c).

3 – Zonas com grandes cristais de barite

A estrutura "rubané" do minério precedente tende a desaparecer com a aparição de zonas ricas em barite. Estas zonas são formadas por barite sob a forma de prismas tabulares decimétricos entrecruzados ou empilhados uns sobre os outros e cimentados pela ankerite e pela fluorite. Este preenchimento passa progressivamente para um outro constituído quase exclusivamente por barite, em que os grandes cristais tabulares são espassados de 5 a 15 cm, com larguras entre 20 a 80 cm e comprimentos entre 50 e 180 cm (Fotos II-13a, II-13b e II-13c). Este episódio de cristalização ocorreu num meio onde as condições hidrodinâmicas foram favoráveis à criação de volumes livres bastante importantes, resultantes da dissolução dos calcários do muro do Gargasiano inferior (Apciano superior).

Em muitos casos, o preenchimento das bolsadas não é total sendo possível observar vazios sem qualquer mineral. Alguns desses vazios constituem grutas ou cavernas em que o volume pode ultrapassar uma centena de metros cúbicos. As paredes das cavidades podem ser cobertas pela barite em cristais transparentes centimétricos (5 a 20 cm), de fluorite transparente em cristais cúbicos de 0,5 a 2 cm de lado e de calcite em grandes romboédros (Fig. II-13d, II-13e).

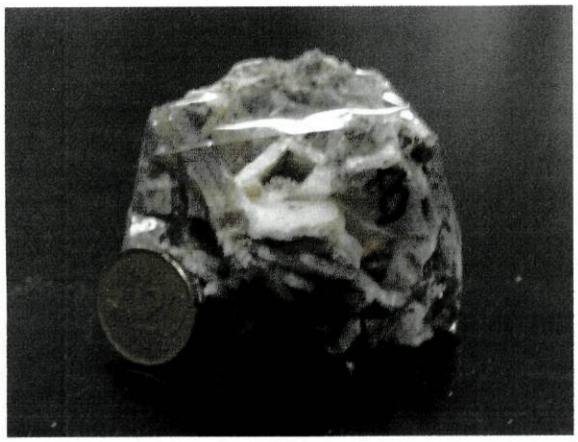


Foto II-13a – Amostra de mão da BIII

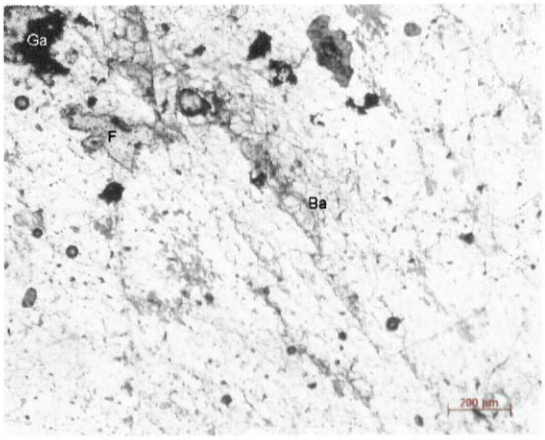


Foto II-13b - Lâmina delgada da BIII (microsc. Transmissão; N//): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena

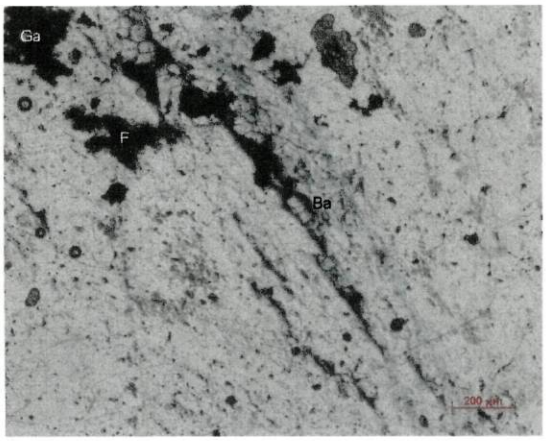


Foto II-13c - Lâmina delgada da BIII (microsc. Transmissão; NX): F- fluorite; Ba- barite; Ga- galena



Foto II-13d – Amostra de mão da BIII com preenchimento de vazio por barite transparente, fluorite cúbica transparente e romboedros de calcite



Foto II-13e – Ampliação da zona de preenchimento do vazio da amostra da BIII da foto II-13d

5.4 Estudo dos Fluidos

Foram estudadas IF na fluorite do sedimento intracársico (FI), na barite prismática do minério rubané (BII) e na barite das zonas de grandes cristais de barite (BIII).

A observação dos conjuntos de IF permitiu evidenciar a existência de várias fazes de aprisionamento de fluidos e em muitos casos a distinção genética entre os tipos de inclusões não foi determinada facilmente. Quando possível, as IF foram classificadas como P, PS e S de acordo com a classificação de Roedder (1981, 1984).

Nas análises microtermométricas foram rejeitadas todas as IF que mostraram sinais óbvios de "*leakage*" ou "*necking-down*". Em algumas IF foi observado o fenómeno de "*stretching*" após os ciclos criométricos e/ ou termométricos. Muito provavelmente, algumas inclusões que, antes das análises de microtermometria, apresentavam um maior volume da fase volátil em comparação com a maior parte das inclusões do mesmo conjunto seriam inclusões que sofreram "*stretching*".

Algumas inclusões já se encontravam cheias de ar ("rebentadas") antes do início das análises de microtermometria. Este facto pode ser devido à preparação das amostras em laboratório, uma vez que quer a fluorite, quer a barite, são minerais de pouca dureza. No entanto, esta preparação foi efectuada com o máximo de cuidado, nomeadamente evitanto utilizações de temperaturas superiores a 70ºC para a colagem. Foram observadas, igualmente, inclusões que decrepitaram após os ciclos microtermométricos (quer no arrefecimento, quer no aquecimento).

5.4.1 Tipologia e Cronologia Relativa dos Fluidos

Na FI foram observados, fundamentalmente, os seguintes tipos de fluidos:

– Fluidos aquosos (Foto II-14a): as IF representativas destes fluidos são bifásicas, do tipo Lw, encontram-se em cavidades P e S (Fotos II-14b, II-14c), apresentam uma morfologia variável e as suas dimensões podem variar desde inferiores a 5 µm até 111 µm. A fase aquosa ocupa 90 a 95% do volume da inclusão;

A baixas temperaturas (<-50ºC) o gelo destas inclusões apresenta uma cor acastanhada e um aspecto tipo "casca de laranja" ("*speackle appearence*") indicativos da presença de catiões bivalentes. O intervalo representativo da temperatura de fusão inicial do gelo indica a presença provável de Ca^{2+} nestas inclusões (Roedder 1963; Crawford 1981) (Tabela II-3, em anexo).

– Fluidos com petróleo (Foto II-15a): são representados por IF bifásicas (petróleo+vapor) e IF bifásicas e trifásicas, com dois líquidos imiscíveis, (petróleo+solução aquosa e petróleo+vapor+solução aquosa, respectivamente). Estas IF são do tipo Lp-(c) e Lw-p-(c). De uma maneira geral estas inclusões exibem uma cor amarela ou castanha e a sua solução é imiscível com a solução aquosa, características que facilitam a sua distinção. Estas inclusões apresentam, por vezes, corpos betuminosos em forma de barril, de consistência mais ou menos espessa, de cor castanha escura e birrefringentes. Poder-se-á tratar de produtos de evolução *in situ* de matéria orgânica (Roedder 1965 *in* Bouhlel *et al.* 1988). Por vezes, durante a criometria, verificou-se a existência de CO_2 na fase vapor, quer pela fusão ou homogeneização do CO_2. Estas inclusões encontram-se em cavidades P e S (Fotos II-15b, II-15c), apresentam formas regulares e as suas dimensões variam entre inferiores a 5 e 33,3 µm. Quando existente, a fase aquosa ocupa 50 a 90% do volume da inlclusão. A fase volátil ocupa cerca de 5 a 50% do volume da inclusão;

– Fluidos carbónicos e aquocarbónicos (Foto II-16): são representados por IF monofásicas e bifásicas, com CO_2 dominante na fase vapor, que se encontram em cavidades maioritariamente S, existindo, no entanto, algumas IF de origem P. Estas inclusões são do tipo Lc e Lw-c, apresentam uma morfologia regular e as suas dimensões variam entre 5,6 e 15,7 μm. A fase aquosa, quando existente, ocupa 50% do volume da inclusão. No caso das IF carbónicas, em que não existe fase aquosa visível, a fase volátil ocupa cerca de 0 a 50% do volume da inclusão. Nas amostras estudadas apenas foi observada uma inclusão do tipo Lw-c.

Nas barites dos dois tipos deposicionais de Bou Jaber (BII e BIII) foram observados, fundamentalmemente, os seguintes tipos de fluidos:

- Fluidos aquosos (Fotos II-17a e II-17b): as IF representativas destes fluidos são bifásicas, do tipo Lw, encontram-se em cavidades P e PS/S (Fotos II-17a e II-17b), apresentam uma morfologia variável e as suas dimensões podem variar desde inferiores a 5 a 42,9 μm. A fase aquosa ocupa 90 a 95% do volume da inclusão.

A baixas temperaturas (<-50ºC), o gelo destas inclusões apresenta uma cor acastanhada e um aspecto tipo "casca de laranja" ("*speackle appearence*") indicativos da presença de catiões bivalentes. O intervalo representativo da temperatura de fusão inicial do gelo indica a presença provável de Ca^{2+} nestas inclusões (Roedder 1963; Crawford 1981) (Tabela II-3, em anexo).

– Fluidos com petróleo (Fotos II-18a e II-18b): são representados por IF bifásicas (petróleo+vapor) e bifásicas e trifásicas, com dois líquidos imiscíveis (petróleo+solução aquosa e petróleo+vapor+solução aquosa, respectivamente). Estas inclusões são do tipo Lp-(c) e Lw-p-(c). De uma maneira geral estas IF exibem uma cor amarela ou castanha e a sua solução é imiscível com a solução aquosa, características que facilitam a sua distinção. Estas inclusões apresentam, por vezes, corpos betuminosos em forma de

barril, de consistência mais ou menos espessa de cor castanha escura e birrefringentes. Poder-se-á tratar de produtos de evolução *in situ* de matéria orgânica (Roedder 1965 *in* Bouhlel *et al.* 1988). Por vezes, durante a criometria, verificou-se a existência de CO_2 na fase vapor, quer pela fusão ou homogeneização do CO_2. Estas inclusões encontram-se em cavidades P (Fotos II-18a e II-18b), apresentam formas regulares e as suas dimensões variam entre inferiores a 5 e 61,4 µm. Quando existente, a fase aquosa ocupa 50 a 70% do volume da inlclusão. A fase volátil ocupa cerca de 5 a 50% do volume da inclusão;

– Fluidos carbónicos e aquocarbónicos do tipo Lc e Lw-c (Foto II-19): as IF representativas destes fluidos são monofásicas e bifásicas, apresentam CO_2 dominante na fase volátil, encontram-se em cavidades P (Fig. II-29), apresentam uma morfologia regular e as suas dimensões variam entre 8,6 e 11,4 µm. A fase aquosa quando existente ocupa 50 a 70% do volume da inclusão. No caso das IF carbónicas, em que não existe fase aquosa visível, a fase volátil ocupa cerca de 0 a 50% do volume da inclusão.

5.4.2 Caracterização Microtermométrica

Foram efectuadas análises microtermométricas nos diferentes tipos de inclusões da fluorite do sedimento intracársico (FI), da barite prismática do minério rubané (BII) e da barite das zonas com grandes cristais de barite (BIII). Os resultados microtermométricos encontram-se na Tabela II-3, em anexo.



Foto II-14a – Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lw na fluorite

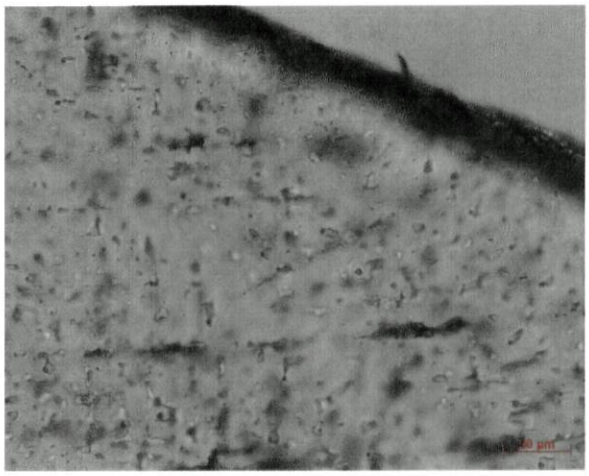


Foto II-14b – Inclusões fluidas bifásicas P do tipo Lw na fluorite

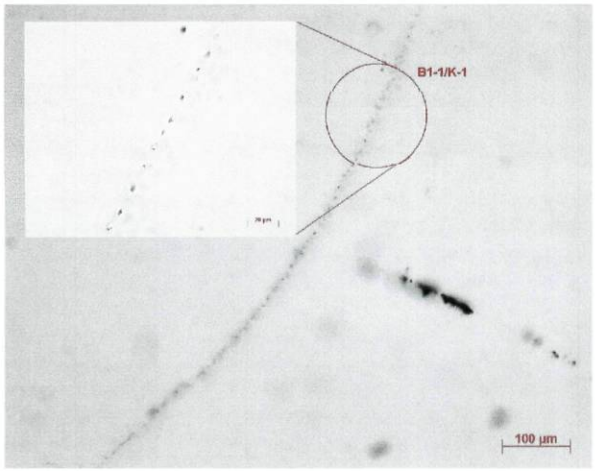


Foto II-14c – Inclusões fluidas bifásicas S do tipo Lw na fluorite

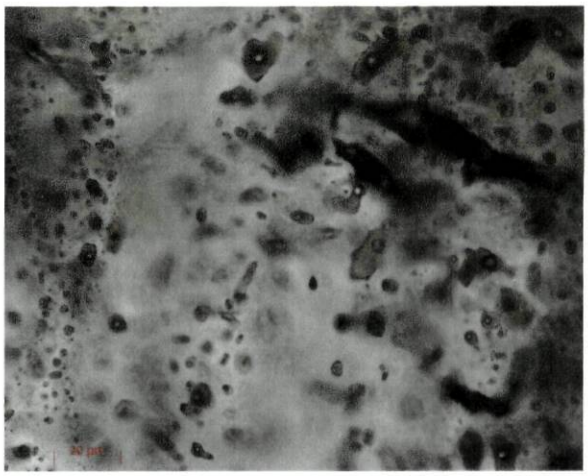


Foto II-15a – Inclusões fluidas bifásicas do tipo Lp-(c) na fluorite

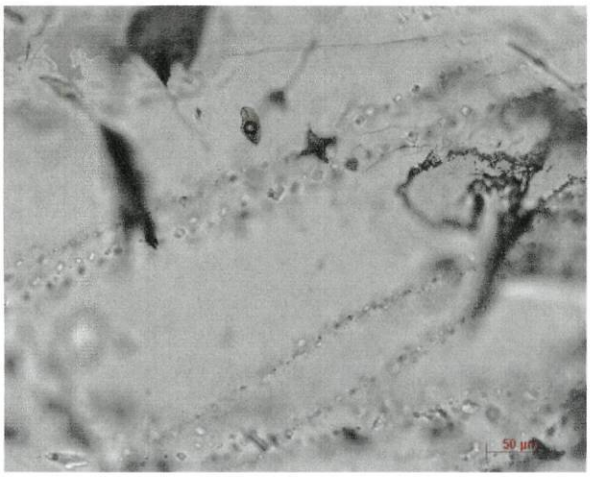


Foto II-15b – Inclusão fluida bifásica P do tipo Lp-(c) na fluorite

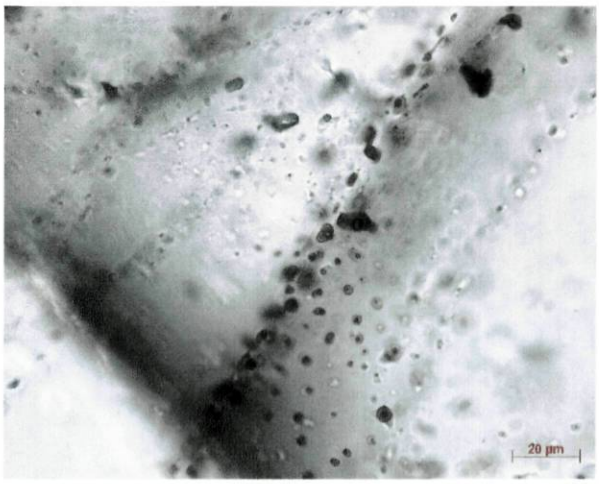


Foto II-15c – Inclusões fluidas bifásicas e trifásicas S do tipo Lp-(c) na fluorite

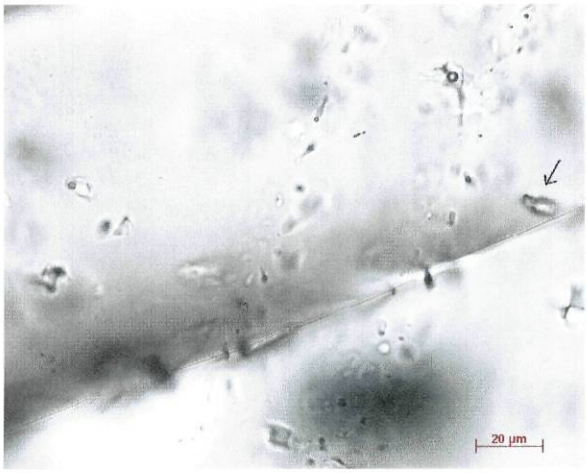


Foto II-16 – Inclusão fluida monofásica P do tipo Lc na fluorite



Foto II-17a – Inclusões fluidas bifásicas P do tipo Lw na barite

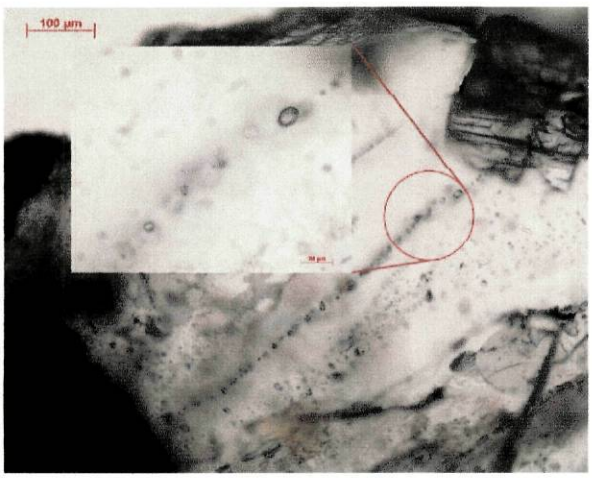


Foto II-17b – Inclusões fluidas bifásicas PS/S do tipo Lw na barite



Foto II-18a – Inclusão fluida bifásica P do tipo Lp-(c) na barite



Foto II-18b – Inclusão fluida trifásica do tipo P Lw-p-(c) na barite

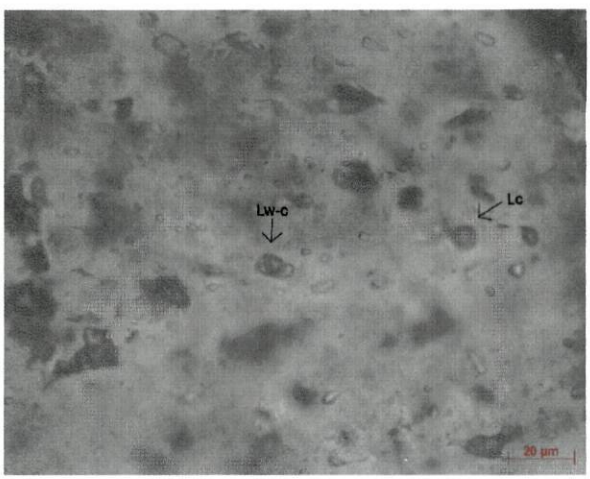


Foto II-19 – Inclusão fluida monofásica P do tipo Lc e inclusão fluida bifásica P do tipo Lw-c na barite

5.4.2.1 Sedimento Intracársico

i) Fluidos aquosos

Na FI as IF representativas destes fluidos são bifásicas, do tipo Lw, encontram-se em cavidades P e S, apresentam uma morfologia variável e as suas dimensões podem variar desde inferiores a 5 a 111 μm. A fase aquosa ocupa 90 a 95% do volume da inclusão.

Inclusões primárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -67,3 e -51,1°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -21,8 e -8,1°C. O intervalo de salinidades está compreendido entre 12,0 e 25,1 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 101 e 129°C (Fig. II-21a).

Inclusões secundárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -67,5 e -48,2°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -26,7 e -14,5°C. O intervalo de salinidades está compreendido entre 18,1 e 26,8 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 87 e 131°C (Fig. II-21a).

ii) Fluidos com petróleo

Estes fluidos ocorrem em diferentes tipos de inclusão:

Inclusões do tipo Lp-(c): estas inclusões são bifásicas (petróleo+vapor) e ocorrem como cavidades P e S. A fase vapor ocupa cerca de 5 a 50% do volume da inclusão, sendo que o Flw é considerado nulo, uma vez que não existe fase aquosa visível. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre inferior a 5 e 33,3 μm. Foi observada a presença de CO_2 nas IF S, variando a

temperatura de fusão entre -61,7 e -55,1°C e a temperatura de homogeneização entre -4,4 e +14,°C. A homogeneização do CO_2 ocorre em líquido por desaparecimento da fase volátil. A temperatura de homogeneização global ocorre em líquido a temperaturas compreendidas entre 102 e 110°C para as P e entre 69 e 130°C para as S (Fig. II-21a).

Inclusões do tipo Lw-p-(c): estas inclusões são trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) e encontram-se em cavidades S. A fase aquosa ocupa cerca de 50 a 90% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 9,3 e 18,6 µm. A temperatura de fusão inicial ocorre entre -68,2 e -50,3°C e a temperatura de fusão de gelo ocorre entre -26,1°C e -9,1°C. Não foi observada a fusão de clatratos. O intervalo de salinidades está compreendido entre 13,0 e 25,5 p. % eq. NaCl. Foi observada a presença de CO_2 em algumas inclusões, sendo que a temperatura de fusão ocorre aos -81,8°C, indicando a presença de outras espécies voláteis, nomeadamente o CH_4. A temperatura de homogeneização do CO_2 não foi observada. Não foi observada nem a homogeneização parcial, nem a homogeneização total deste tipo de inclusão (Fig. II-21a).

iii) Fluidos carbónicos e aquocarbónicos

Inclusões do tipo Lc: estas inclusões são monofásicas ou bifásicas e encontram-se em cavidades P e S. A fase volátil ocupa cerca 0 a 50% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre inferior a 5 e 10,7 µm. A temperatura de fusão do CO_2 ocorre aos -59,9°C para as P e varia entre -66,3 e -57,7°C para as S, indicando que em algumas inclusões, para além do CO_2, estarão presentes outras espécies voláteis, nomeadamente o CH_4. A temperatura de homogeneização do CO_2 ocorre por desaparecimento da fase vapor, aos +28,9°C para as inclusões P e entre -5,53 e +28,2°C para as inclusões S (Fig. II-21f).

Inclusões do tipo Lw-c: apenas foi observada uma inclusão deste tipo. Esta inclusão é bifásica e de origem P. A fase aquosa ocupa cerca de 50% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho é de 15,7 µm. A temperatura de fusão inicial ocorre aos -55,8ºC, não tendo sido observada a fusão do gelo. A temperatura de fusão do CO_2 ocorre aos -60,5ºC, não tendo sido observada a sua homogeneização. A homogeneização global desta inclusão também não foi observada.

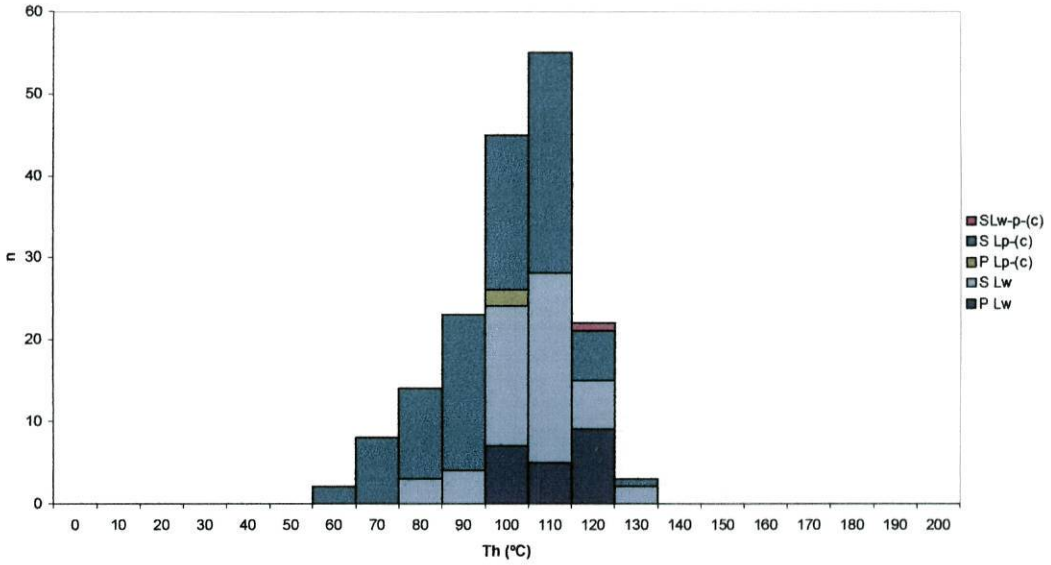


Fig. II-21a – Histograma representativo da Th das IF da FI

A projecção dos resultados microtermométricos nos diagramas binários, TfG *versus* Th e salinidade (p. % eq. NaCl) *versus* Th (Figs. II-21b e II-21c) permite evidenciar que os fluidos aquosos P variam de salinos a muito salinos (12,0 a 25,1 p. % eq. NaCl. Por sua vez os fluidos aquosos S têm uma composição muito salina (18,1 a 28,8 p. % eq. NaCl). Os fluidos S do tipo Lw-p são salinos a muito salinos (13,0 a 25,5 p. % eq. NaCl) (Figs. II-21d e II-21e).

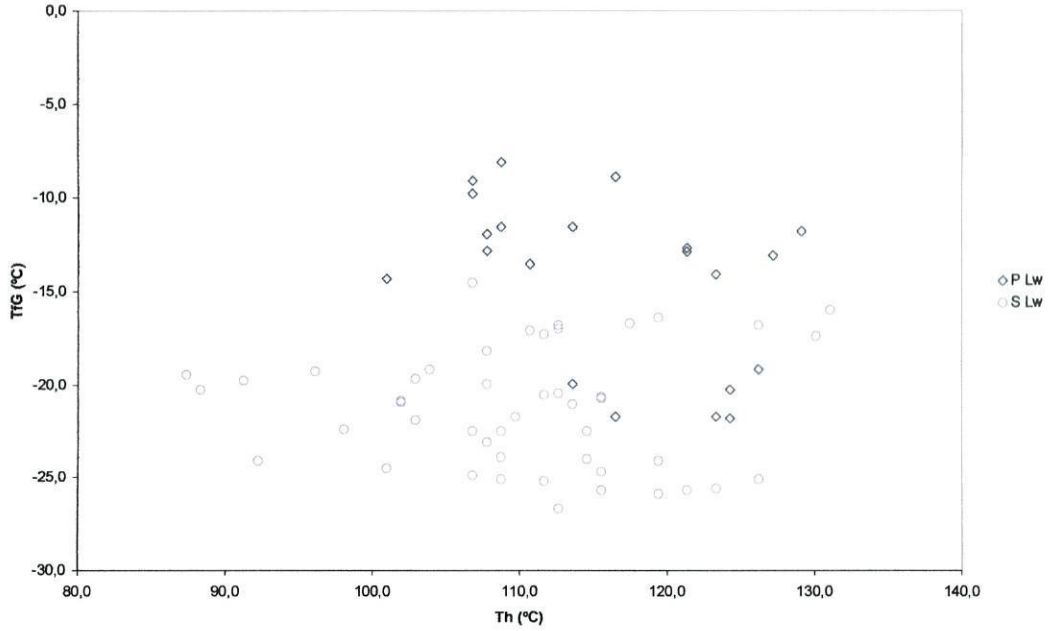


Fig. II-21b – Diagrama de correlação de TfG *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da FI

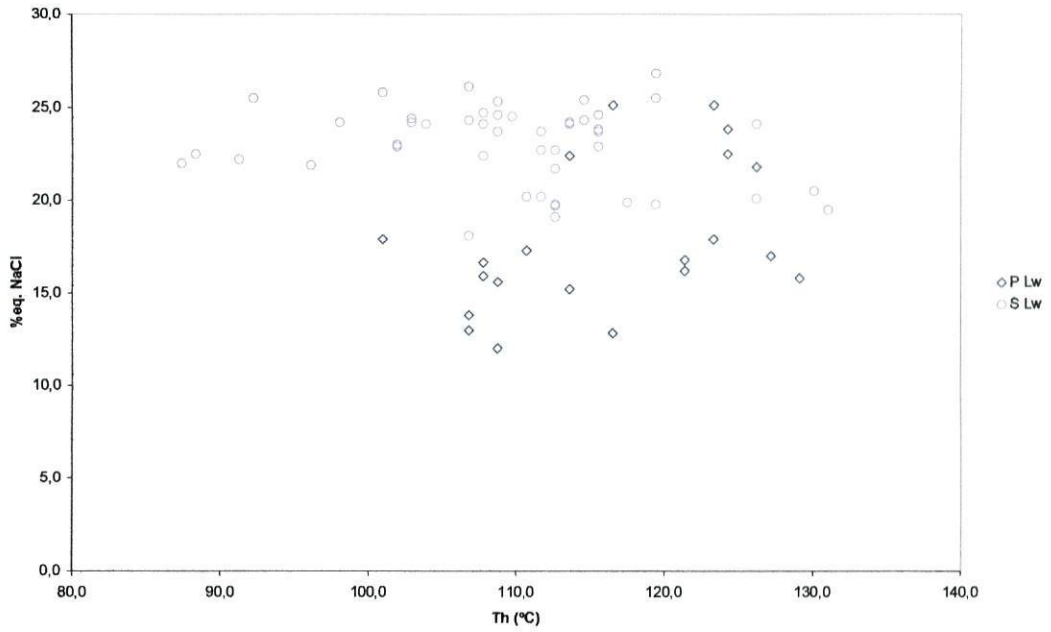


Fig. II-21c – Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da FI

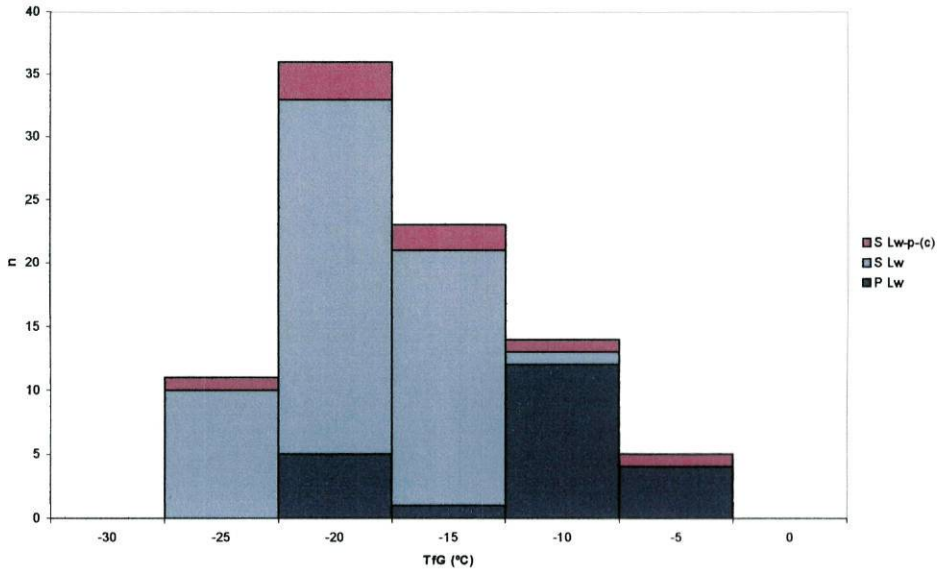


Fig. II-21d – Histograma representativo da TfG das IF da FI

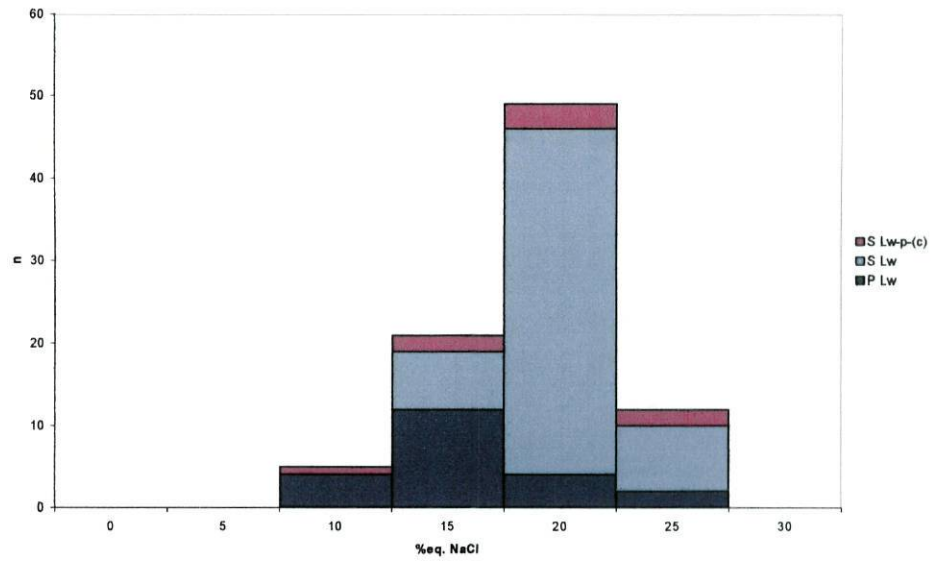


Fig. II-21e – Histograma representativo da salinidade (p. % eq. NaCl) das IF da FI

No diagrama $TfCO_2$ *versus* $ThCO_2$ (Fig. II-21g) verifica-se que, os fluidos carbónicos e os fluidos com petróleo associados à FI de Bou Jaber se distinguem, fundamentalmente, pela temperatura de homogeneização do CO_2, embora, existam também diferenças no que respeita à $TfCO_2$. Efectivamente, este diagrama mostra que o CO_2 presente nas IF com petróleo é menos denso que o existente nas IF carbónicas. A existência de uma IF carbónica com uma $TfCO_2$ e uma $ThCO_2$ marcadamente menor que a maioria pode significar que

esta inclusão não é representativa do fluido respectivo, muito embora tivesse que ser comprovado com um maior número de dados a existência ou não de outro fluido. Em todas as inclusões a homogeneização do CO_2 ocorre em líquido.

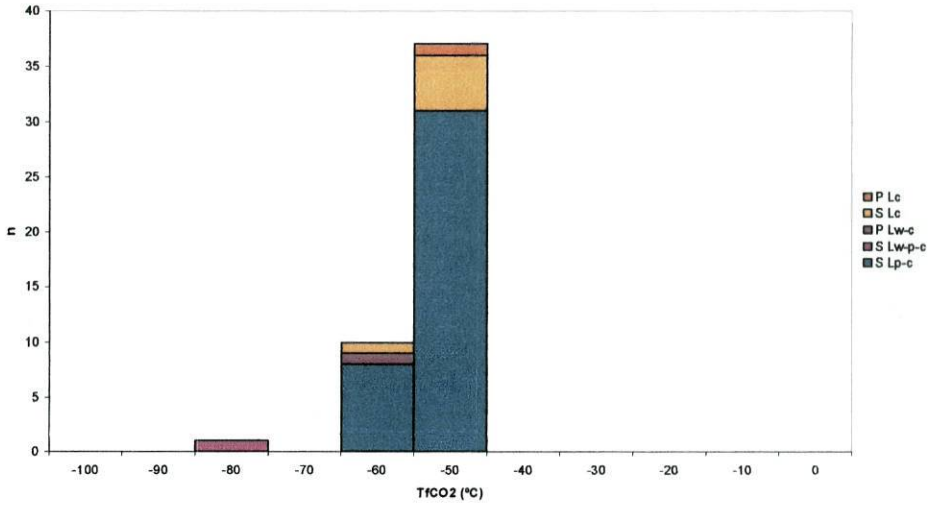


Fig. II-21f – Histograma representativo da $TfCO_2$ das IF carbónicas da FI

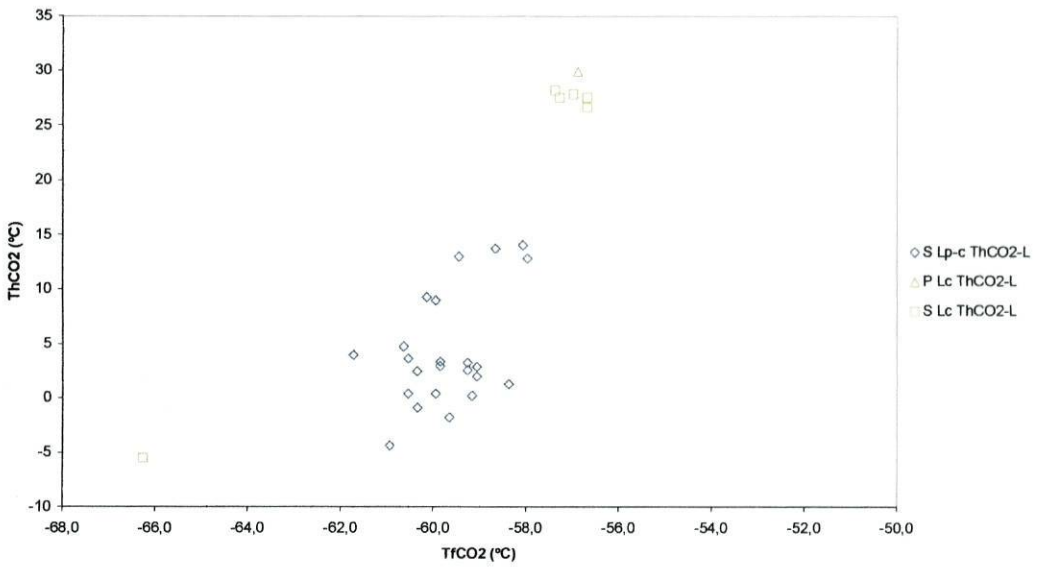


Fig. II-21g – Diagrama de correlação de $TfCO_2$ *versus* $ThCO_2$ referente a IF carbónicas (Lc) da FI

5.4.2.2 Minério Rubané rico em Barite e Fluorite

Na BII foram observados fluidos aquosos e fluidos com petróleo. No entanto, os resultados obtidos da microtermometria referem-se apenas a IF aquosas do tipo Lw.

i) Fluidos aquosos

Na BII as IF representativas destes fluidos são bifásicas, do tipo Lw, encontram-se em cavidades P e PS, apresentam uma morfologia variável e as suas dimensões podem variar desde inferiores a 5 µm até 30 µm. A fase aquosa ocupa 90 a 95% do volume da inclusão.

Inclusões primárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -74,5 e -33,6°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -22,4 e 0,0°C. O intervalo de salinidades está compreendido entre 0,0 e 24,5 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 92 e 198°C (Fig. II-22a).

Inclusões pseudosecundárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -45,8 e -39,8°C e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -5,6 e -1,0°C. O intervalo de salinidades está compreendido entre 1,7 e 8,7 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas à volta de 146°C (Fig. II-22a).

A projecção dos resultados microtermométricos nos diagramas binários, TfG *versus* Th, salinidade (p. % eq. NaCl) *versus* Th e nos histogramas representativos da TfG e da salinidade (Figs. II-22b, II-22c, II-22d e II-22e) permite evidenciar que os fluidos aquosos P variam de pouco salinos a muito salinos (0,0 a 25,1 p. % eq. NaCl) e os fluidos PS aquosos apresentam um composição pouco salina (1,7 a 8,7 p. % eq. NaCl).

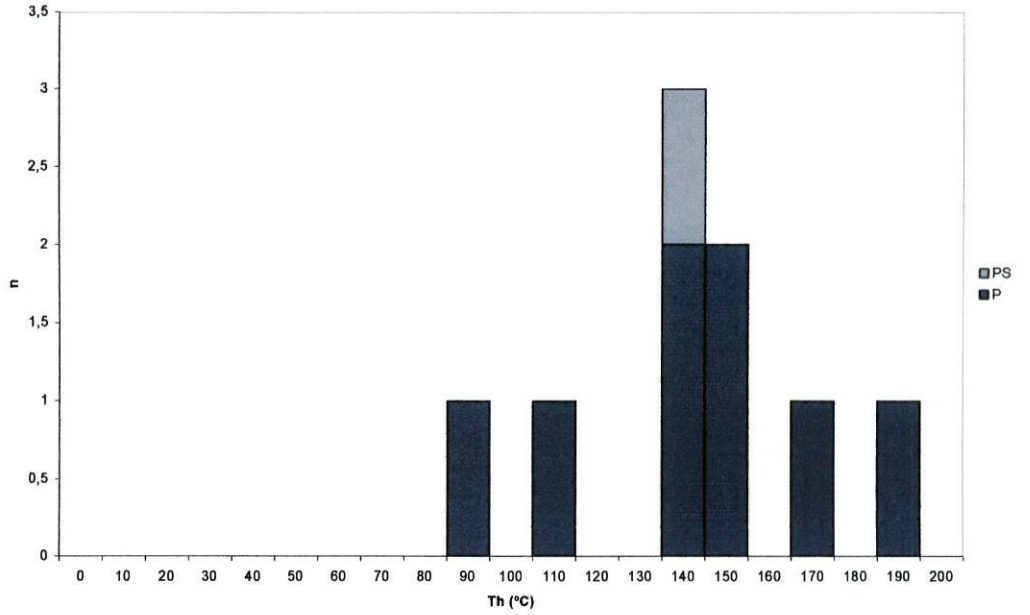


Fig. II-22a – Histograma representativo da Th das IF da Barite da BII

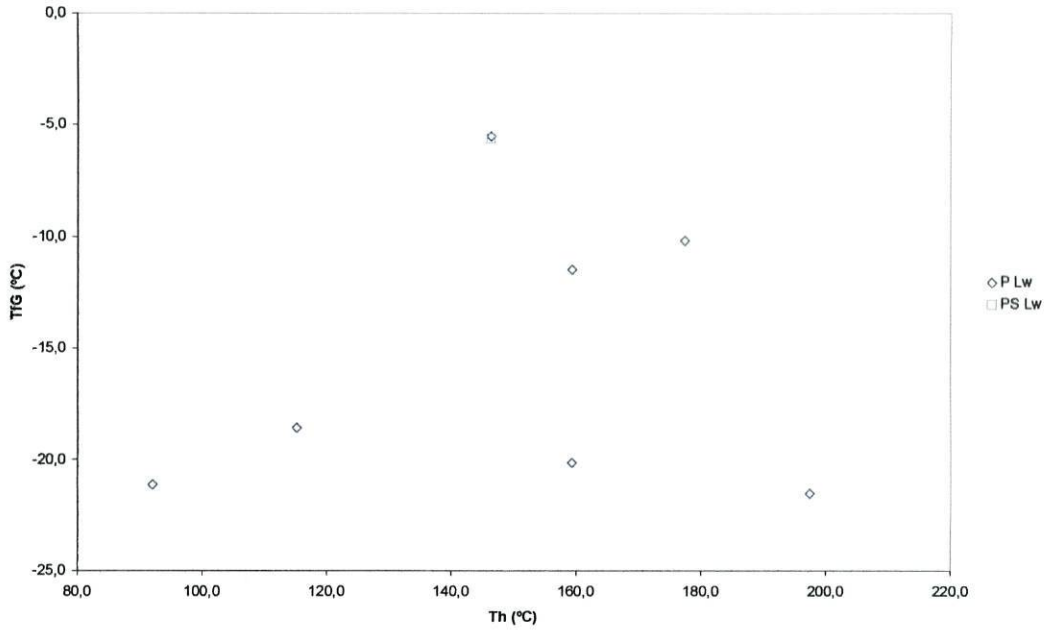


Fig. II-22b – Diagrama de correlação de TfG *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da BII

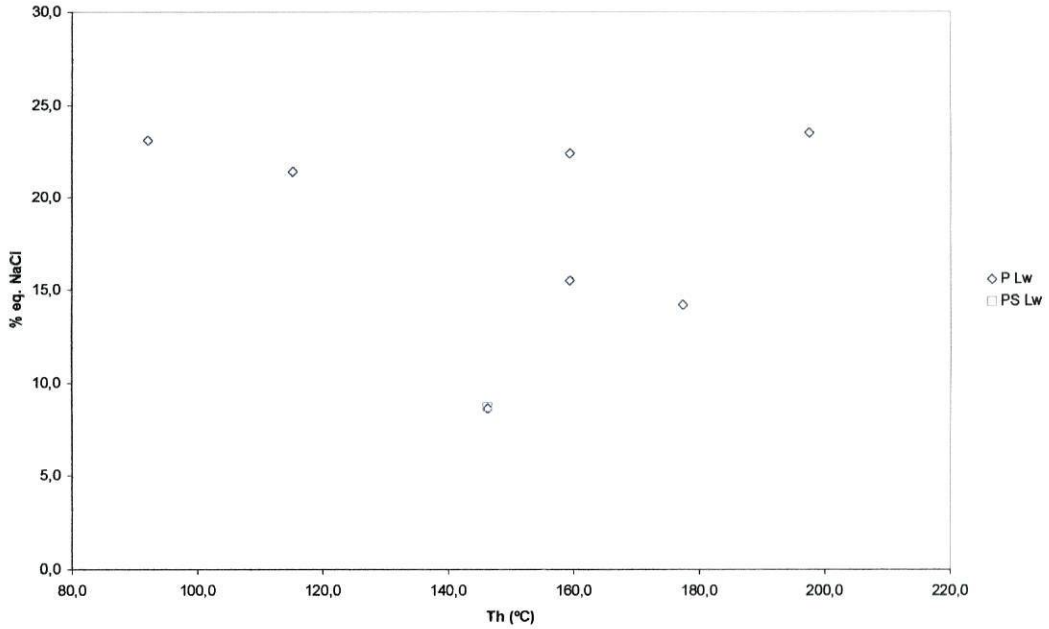


Fig. II-22c – Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) BII

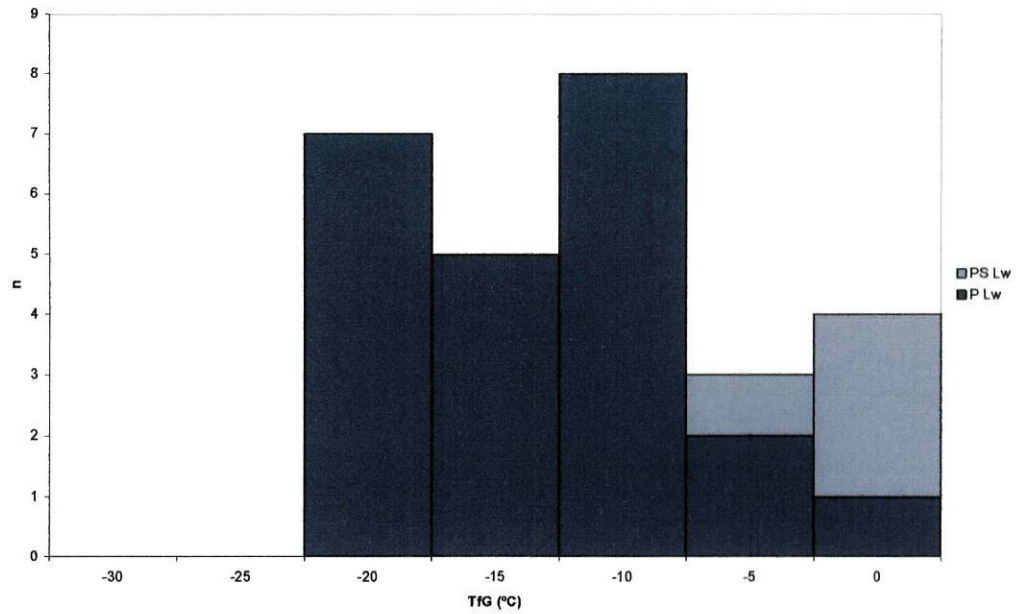


Fig. II-22d – Histograma representativo da TfG das IF da BII

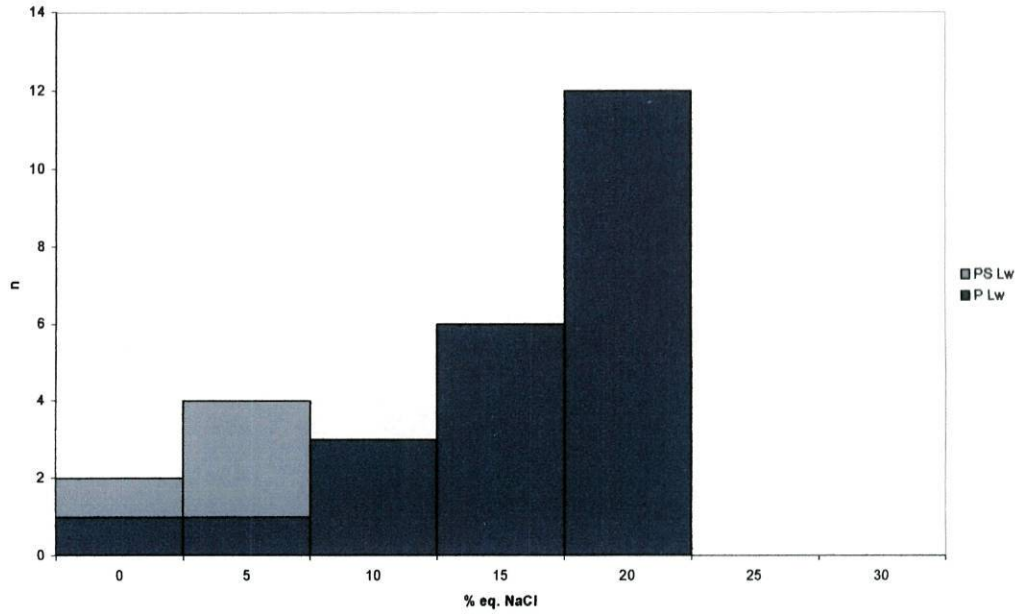


Fig. II-22g – Histograma representativo da salinidade (p. % eq. NaCl) das IF da BII

5.4.2.3 Zonas com Grandes Cristais de Barite

i) Fluidos aquosos

Na BIII as IF representativas destes fluidos são bifásicas, do tipo Lw, encontram-se em cavidades P e PS/S, apresentam uma morfologia variável e as suas dimensões podem variar desde inferiores a 5 µm até 42,9 µm. A fase aquosa ocupa 90 a 95% do volume da inclusão.

Inclusões primárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -68,3 e -33,3ºC e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -25,5 e -6,7ºC. O intervalo de salinidades está compreendido entre 10,1 e 26,2 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões ocorre por desaparecimento da fase gasosa a temperaturas compreendidas entre 105 e 355ºC (Fig. II-23a).

Inclusões pseudosecundárias/ secundárias: as temperaturas iniciais de fusão do gelo estão compreendidas entre -57,6 e -50,3ºC e as temperaturas finais de fusão do gelo variam entre -20,8 e -1,8ºC. O intervalo de salinidades está compreendido entre 3,1 e 22,9 p. % eq. NaCl. A homogeneização global destas inclusões não foi observada.

ii) Fluidos com petróleo

Estes fluidos ocorrem em diferentes tipos de inclusão:

Inclusões do tipo Lp-(c): estas inclusões são bifásicas (petróleo+vapor) e ocorrem como cavidades P. A fase vapor ocupa cerca de 5 a 50% do volume da inclusão, sendo que o Flw é considerado nulo, uma vez que não existe fase aquosa visível. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre inferiores a 5 e 61,4 µm. Foi observada a presença de CO_2, variando a temperatura de fusão entre -60,8 e -58,2ºC. A temperatura de homogeneização do CO_2 ocorre em líquido por desaparecimento da fase volátil aos +14,5ºC e em vapor por aumento da fase volátil entre +5,8 e +14,8ºC. A temperatura de homogeneização global ocorre em líquido a temperaturas compreendidas entre 149 e 295ºC (Fig. II-23a).

Inclusões do tipo Lw-p-(c): estas inclusões são bifásicas e trifásicas (petróleo+vapor+solução aquosa) e encontram-se em cavidades P. A fase aquosa ocupa cerca de 50 a 70% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 7,7 e 9,3 µm. A temperatura de fusão inicial ocorre entre -55,8 e -52,1ºC e a temperatura de fusão de gelo ocorre entre -16,2ºC e -10,7ºC. Não foi observada a fusão de clatratos. O intervalo de salinidades está compreendido entre 15,2 e 19,6 p. % eq. NaCl. Nas IF estudadas não foi observada a presença de CO_2. Não foi possível determinar, nem a homogeneização parcial, nem a homogeneização total deste tipo de inclusão.

iii) Fluidos carbónicos e aquocarbónicos

Estes fluidos ocorrem em diferentes tipos de inclusão:

Inclusões do tipo Lc: estas inclusões são monofásicas ou bifásicas e encontram-se em cavidades P. A fase volátil ocupa cerca 0 a 50% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre inferior a 5 e 10,0 μm. A temperatura de fusão do CO_2 ocorre entre -66,1 e -58,3ºC, indicando que em algumas inclusões, para além do CO_2, estarão presentes outras espécies voláteis, nomeadamente o CH_4. A temperatura de homogeneização do CO_2 ocorre por desaparecimento da fase volátil, aos +21,4ºC.

Inclusões do tipo Lw-c: estas inclusões são bifásicas e encontram-se em cavidades P. A fase aquosa ocupa 50 a 70% do volume da inclusão. A sua forma é regular e o seu tamanho varia entre 8,6 e 11,4 μm. A temperatura de fusão inicial ocorre entre -52,5 e -27,7ºC. Apenas foi observada a fusão do gelo de uma inclusão que ocorre aos -2,4ºC. A temperatura de fusão do CO_2 ocorre entre -59,7 e -57,5ºC e a sua homogeneização entre -7,2 e +5,9ºC. A homogeneização global deste tipo de inclusões não foi observada.

A projecção dos resultados microtermométricos nos diagramas binários, TfG *versus* Th, salinidade (p. % eq. NaCl) *versus* Th e nos histogramas representativos da TfG e da salinidade (Figs. II-23b, II-23c, II-23d e II-23d) permite evidenciar que os fluidos aquosos P variam de salinos a muito salinos (10,1 a 26,2 p. % eq. NaCl) e os fluidos PS/S aquosos apresentam um composição que varia entre pouco salina a muito salina (3,1 a 22,9 p. % eq. NaCl). As IF do tipo Lw-p-(c) apresentam uma salinidade média (15,2 a 19,6 p. % eq. NaCl). Apenas foi observada a TfG de uma IF aquocarbónica na BIII, apresentando esta uma composição pouco salina (4,0 p. % eq. NaCl).

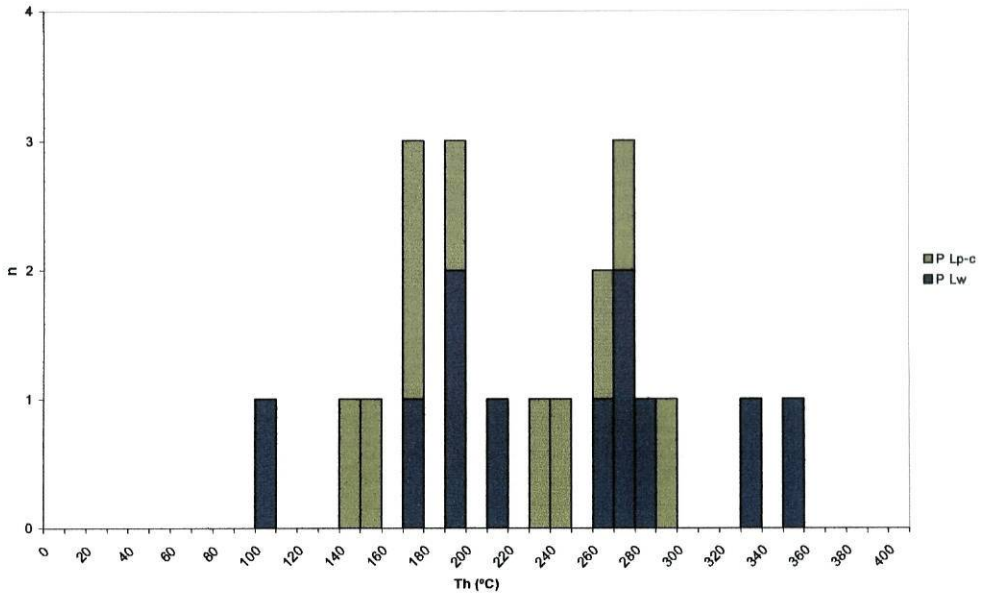


Fig. II-23a – Histograma representativo da Th das IF da BIII

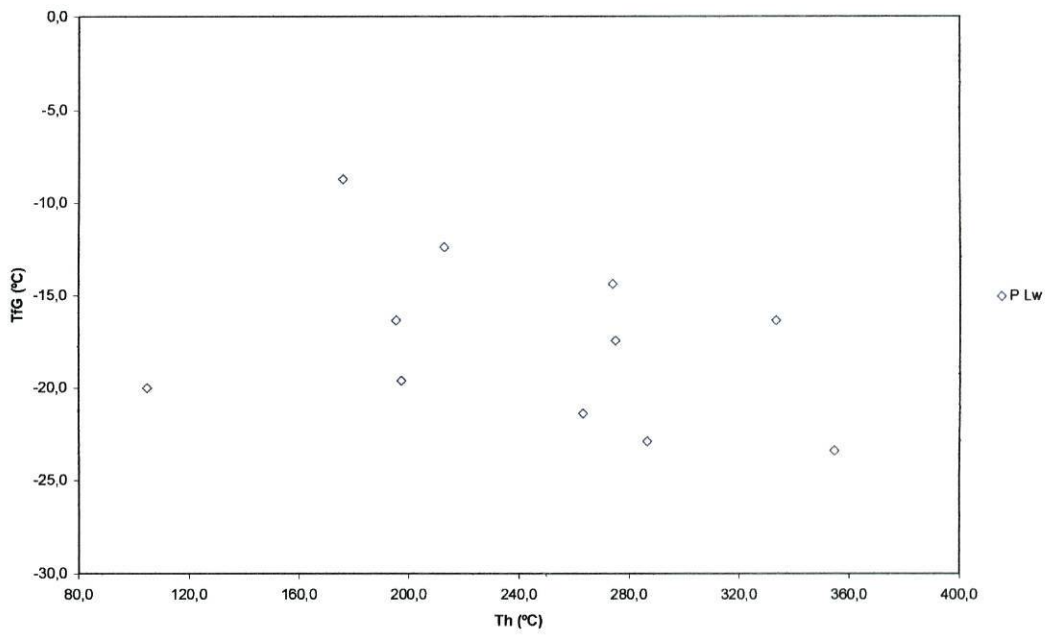


Fig. II-23b – Diagrama de correlação de TfG *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da BIII

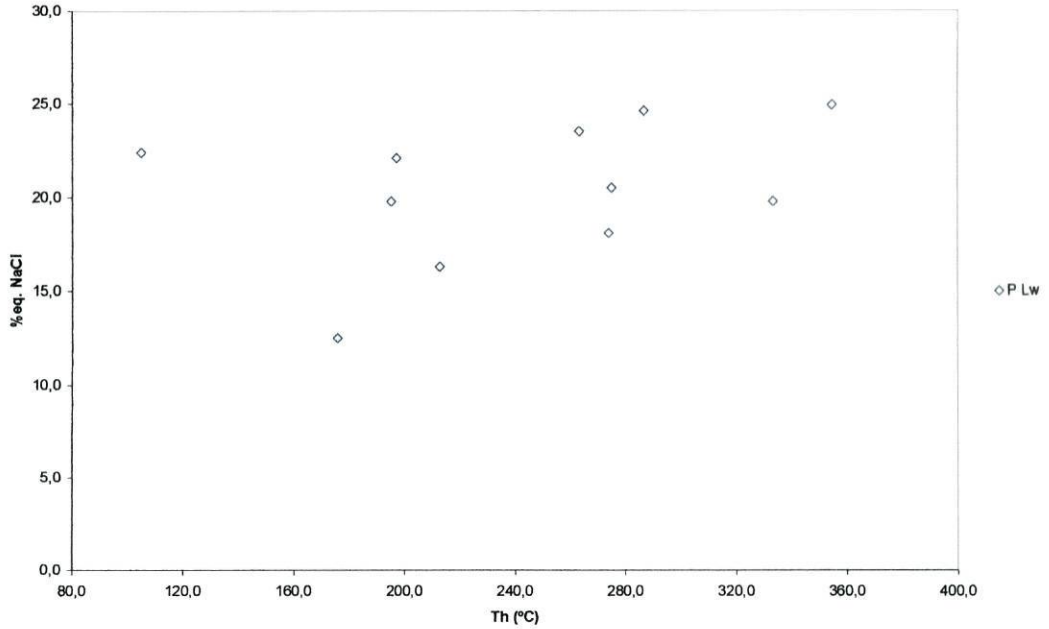


Fig. II-23c – Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) da BIII

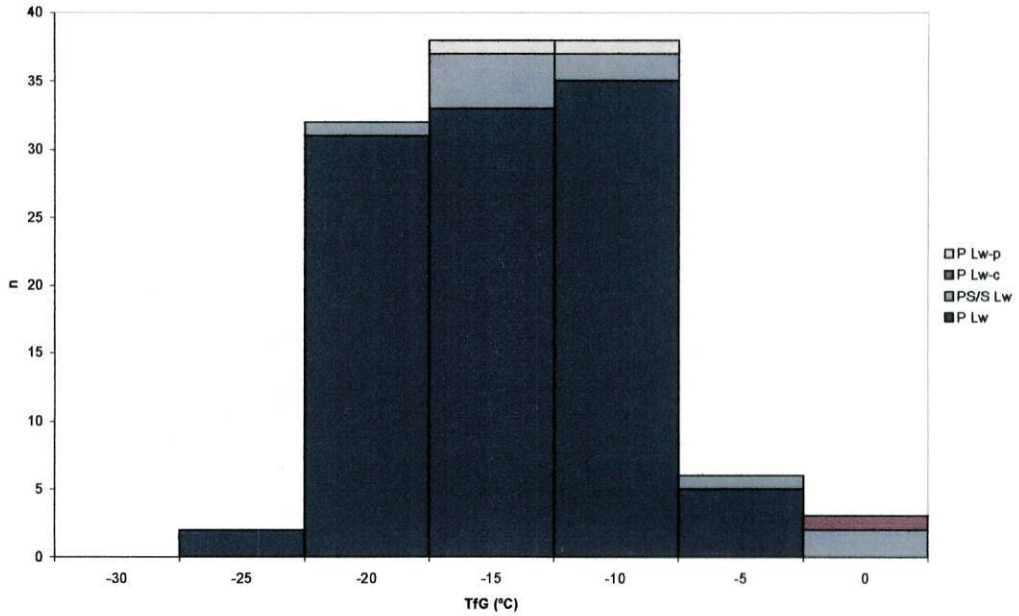


Fig. II-23d – Histograma representativo da TfG das IF da BIII

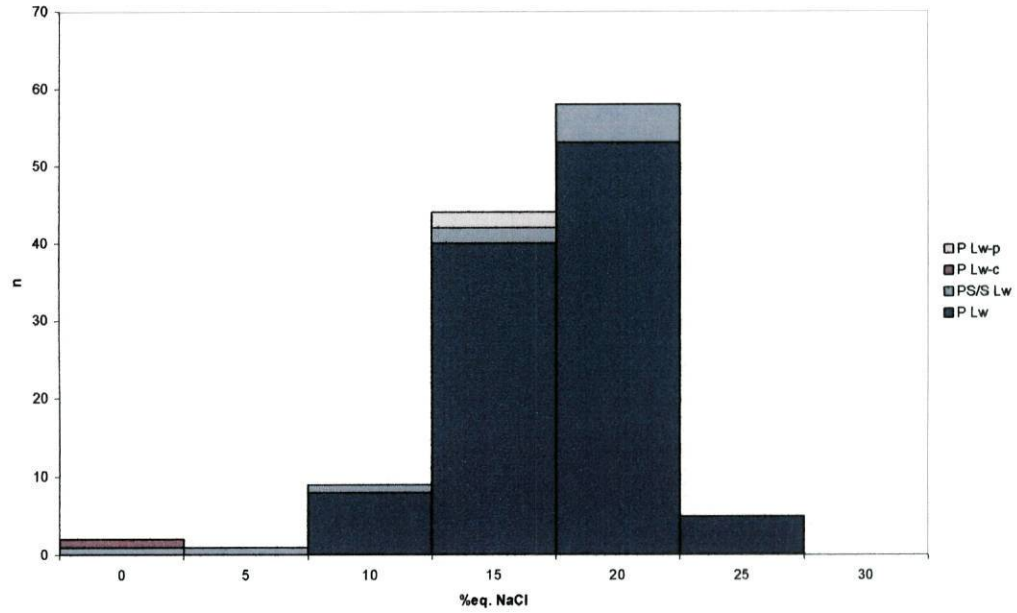


Fig. II-23e – Histograma representativo da salinidade (p. % eq. NaCl) das IF da BIII

O diagrama binário Th *versus* % fase vapor (Fig. II-24) permite evidenciar que as IF cuja Th é superior a 213ºC podem ter sofrido alterações pós-genéticas ("*stretching*"), não tendo sido, por isso, consideradas no cálculo das condições P-T-V-X.

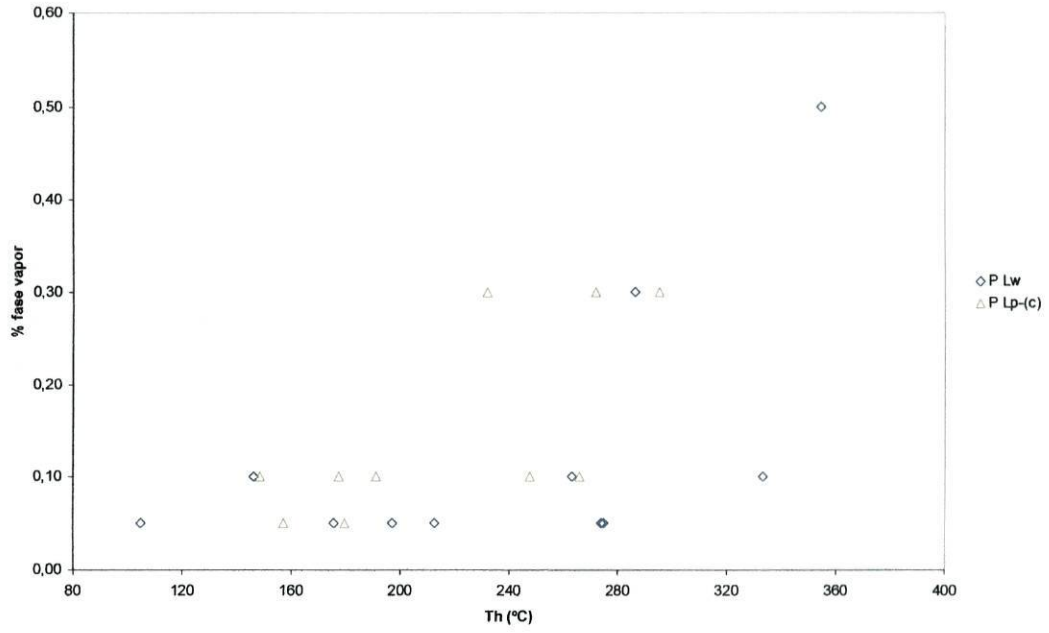


Fig. II-24 – Diagrama de correlação de Th *versus* % fase vapor nas IF da BIII

5.4.3 Composição da Fase Volátil

Das análises de micro-espectroscopia Raman efectuadas nas IF carbónicas e aquocarbónicas da fluorite do sedimento intracársico e da barite das zonas de grandes cristais de barite do jazigo de Bou Jaber, resultaram alguns dados da composição da fase volátil, da composição global e da densidade das IF. Os resultados são apresentados na tabela II-4, em anexo.

Apenas foi possível determinar a composição da fase volátil das inclusões do tipo Lw-c. Como já foi referido para o caso de Hammam Zriba, não foi possível determinar o conteúdo da fase volátil das inclusões com petróleo, devido ao efeito de fluorescência induzido pelos hidrocarbonetos.

Os fluidos do tipo Lw-c da barite BIII apresentam, na fase volátil, um conteúdo em CO_2 que varia entre 73,3 e 100 moles% e um conteúdo em CH_4 que varia entre 0,0 e 26,8 moles%. A densidade da fase volátil varia entre 0,89 e 1,0.

5.4.4 Cálculo da Composição e Densidade Globais

Para as IF da FI, da BII e da BIII foram calculadas a composição e densidade globais, cujos resultados se encontram na tabela II-4, em anexo.

i) Fluidos aquosos

Os fluidos P aquosos da FI apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 84,0 e 92,4 moles% e entre 7,7 e 16,0 moles% em NaCl. A densidade varia entre 1,02 e 1,13. Os fluidos S apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 82,4 e 87,1 moles% e entre 12,9 e 17,6 moles% em NaCl. A densidade varia entre 1,07 e 1,19.

Os fluidos P aquosos da BII apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 84,2 e 94,6 moles% e entre 15,5 e 5,8 moles% em NaCl. A densidade varia entre 0,98 e 1,16. Os fluidos PS possuem um conteúdo em H_2O de 94,5 moles% e de 5,5 moles% em NaCl. A densidade é de 0,98.

Os fluidos P aquosos da BIII apresentam um conteúdo em H_2O que varia entre 83,3 e 91,9 moles% e entre 8,1 e 8,3 moles% em NaCl. A densidade varia entre 0,89 e 1,13.

iii) Fluidos carbónicos e aquocarbónicos

Os fluidos P carbónicos da FI apresentam um conteúdo em CO_2 de 100 moles%. A densidade é de 0,60. Os fluidos S apresentam um conteúdo em CO_2 que varia entre 84,4 a 100 moles%. A densidade varia entre 0,65 e 0,78.

Os fluidos P carbónicos da BIII apresentam um conteúdo de CO_2 que varia entre 59,8 e 100 moles% e entre 0,0 a 40,2 moles% de CH4. A densidade conhecida é de 0,76.

Os fluidos P aquocarbónicos da BIII apresentam um conteúdo em CO_2 que varia entre 7,0 e 17,5 moles% e entre 82,5 e 93,0 moles% em H_20. A densidade varia entre 0,98 e 1,0.

5.4.5 Microscopia de Fluorescência

As inclusões com petróleo presentes na fluorite FI exibem cores de fluorescência azul-branco (Foto II-20a) indicando componentes aromáticos diluidos (Khorasani 1986 *in* Benchilla *et al.* 2003) e amarelo (Foto II-20b) indicando um aumento no conteúdo de aromáticos nestas inclusões .

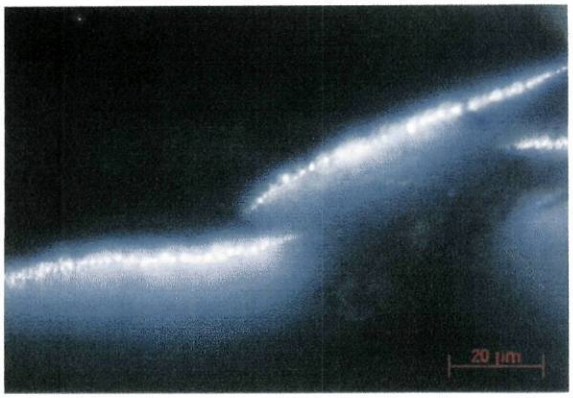


Foto II-20a – Inclusões fluidas P do tipo Lp-(c) com fluorescência azul-branco na FI

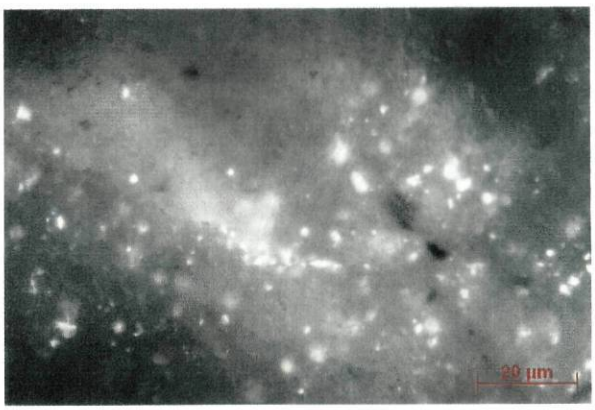


Foto II-20b – Inclusões fluidas P do tipo Lp-(c) com fluorescência amarelo na FI



Foto II-20c – Inclusões fluidas P do tipo Lp-(c) com fluorescência azul e amarelo na BIII



Foto II-20d – Inclusões fluidas bifásicas P do tipo Lp-(c) e trifásica P do tipo Lw-p-(c) com fluorescência azul-branco na BIII

As inclusões com petróleo presentes na barite BII exibem cores de fluorescência amarelo e amarelo esverdeado e as presentes na BIII exibem cores de fluorescência azul-branco, azul e amarelo (Fotos II-20c e II-20d).

O parâmetro Q650/500 e o valor da I546 foi calculado em IF P da barite BII e da barite BIII. O valor de Q para a BII é de 0,276 e para a BIII é de 0,405. Os valores de I546 são de 8,782 para a BII e 21,03 para a BIII. Estes valores de Q são indicativos de uma grande concentração de hidrocarbonetos alifáticos, uma vez que o valor de Q diminui em função de uma maior concentração destes compostos. Hidrocarbonetos com alta intensidade de fluorescência em comprimentos de onda de 650 nm possuem valores de Q elevados (superiores a 1). Pela análise dos valores de Q apresentados e pela projecção dos valores de λmáx dos comprimentos de onda utilizados para o cálculo do quociente Q (500 e 650nm) (Figs. II-24a e II-24b) verifica-se que a maior intensidade de fluorescência é em comprimentos de onda curtos (450 nm), podendo concluir-se que estes hidrocarbonetos possuem uma baixa densidade (alto ºAPI) e, consequentemente, elevada maturidade. Os diagramas apresentados nas Figs. II-25a e II-25b apenas representam a projecção dos valores de λmáx para 500 e 650 nm.

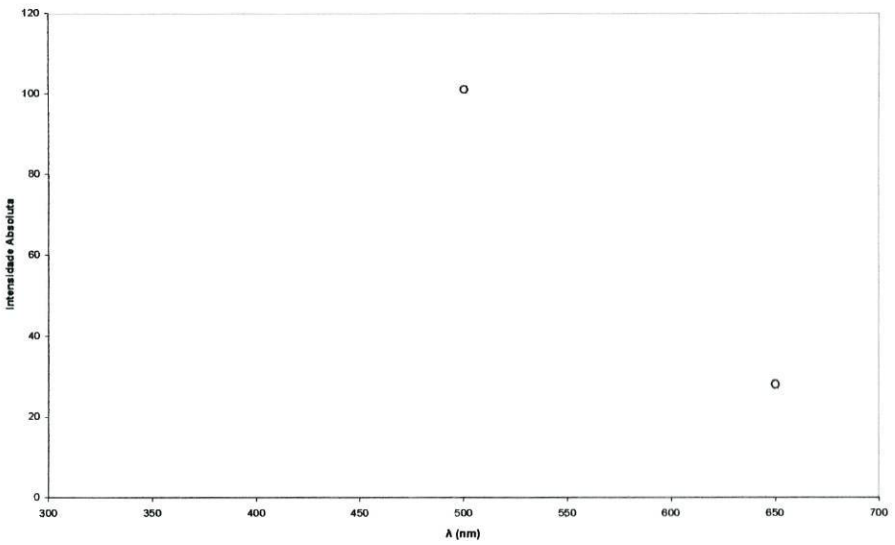


Fig. II-25a – Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da BII; Q= 0,276

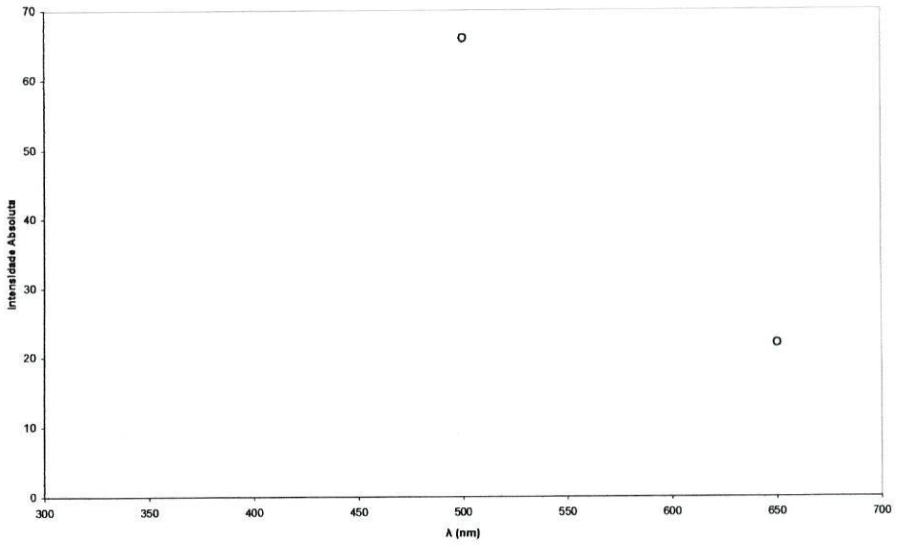


Fig. II-25b – Projecção dos valores de λmáx para comprimentos de onda de 500 e 650 nm de IF P da BIII; Q= 0,405

5.5 Determinação das Condições P-T-V-X de Aprisionamento dos Fluidos

As condições P-T-V-X de aprisionamento dos fluidos são determinadas através das isócoras e das temperaturas de homogeneização global (limite inferior das isócoras). O ponto de intersecção das isócoras dos dois tipos de fluidos é indicativo da temperatura de pressão de aprisionamento.

Quando uma inclusão fluida aprisiona uma fase de um fluido imiscível, a Th (se observada) representa a verdadeita temperatura de aprisionamento (Tt). No entanto, a Th não será igual à Tt se mais do que uma fase de fluidos imiscíveis forem aprisionados na inclusão quando esta se formou. Apenas IF com um fluido singular homogéneo aprisionado no momento da sua selagem podem respresentar Th significativas (Goldstein e Reynolds 1994).

Uma vez que existem evidências de imiscibilidade pela observação de inclusões fluidas contendo dois líquidos (Lw+Lp) pode-se considerar, segundo Goldstein and Reynolds (1994), que as Th observadas nas IF presentes nas

inclusões da fluorite e barites de Bou Jaber representam as verdadeiras temperaturas de aprisionamento.

Devido ao facto de não ter sido possível determinar a composição e a densidade globais das IF com petróleo, o cálculo das isócoras correspondentes a estas inclusões não foi efectuado, sendo apenas apresentadas as isócoras relativas às IF aquosas e inclusões carbónicas. Poder-se-á considerar que o CO_2 presente nas inclusões carbónicas e aquocarbónicas foi também transportado pelo fluido mineralizante ficando aprisionado quer no tipo de inclusões já referido, quer nas inclusões com petróleo. Uma vez que as rochas encaixantes se formaram em ambiente diagenético consideraram-se P máximas de 1000 bar.

Uma vez que não são conhecidos outros geotermómetros e/ ou geobarómetros para a área de Bou Jaber, a delimitação dos domínios de variação P-T reais de aprisionamento dos fluidos foi obtida pelo método da intersecção de isócoras de inclusões, supostamente sincrónicas (Figs. II-26a, II-26b).

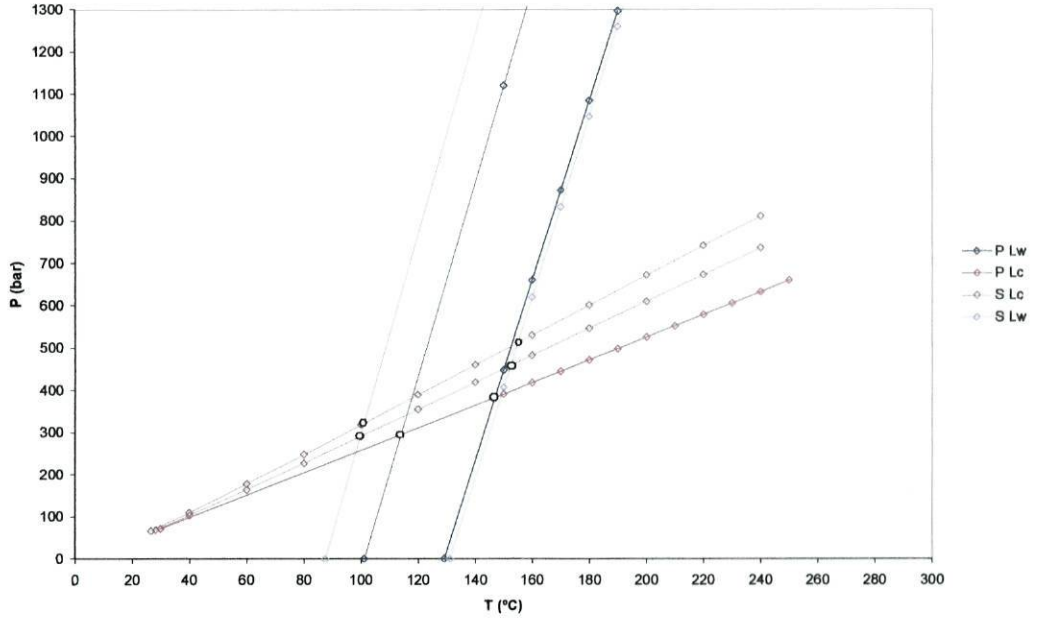


Fig. II-26a – Isócoras respresentativas dos fluidos aquosos e carbónicos da FI

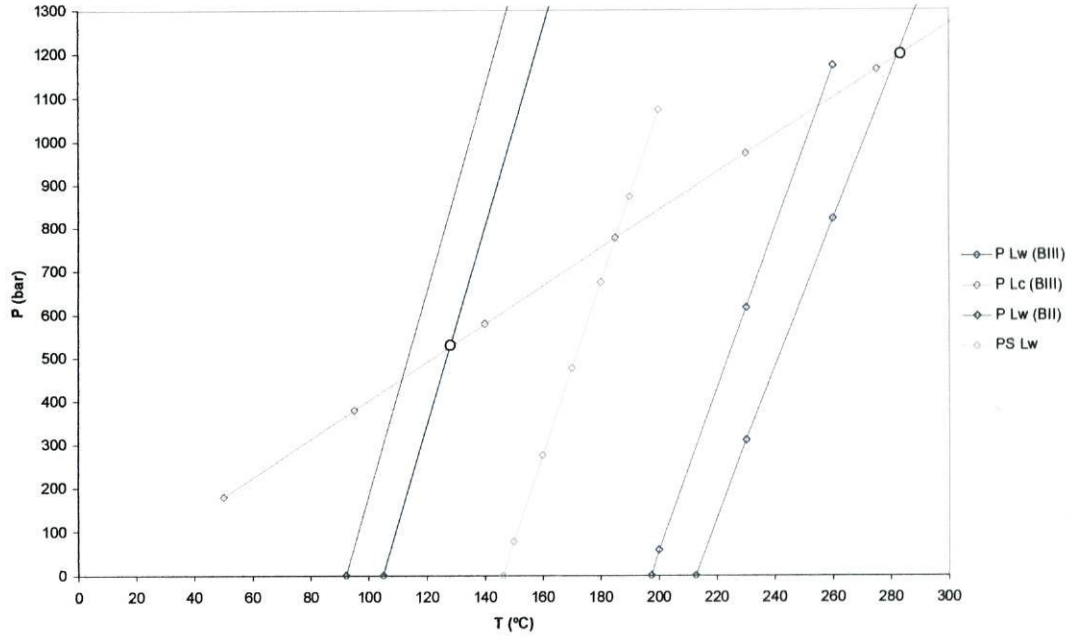


Fig. II-26b – Isócoras respresentativas dos fluidos aquosos e carbónicos da BII e da BIII

No caso da FI a intersecção das isócoras dos fluidos P aquosos e carbónicos permite delimitar o domínio P-T de aprisionamento. Desta forma as temperaturas de aprisionamento prováveis destes fluidos estarão compreendidas entre 110 e 145ºC, correspondendo a pressões que variam entre 300 e 450 bar. As temperaturas de aprisionamento prováveis dos fluidos S aquosos e carbónicos estarão compreendidas entre 95 e 150ºC, correspondendo a pressões que variam entre 295 e 450 bar.

No caso da barite apenas se dispõe de intersecção de isócoras para a BIII, correspondendo a temperaturas que variam entre 125 a 275ºC e pressões que variam entre 525 e entre 1200 bar.

Para os fluidos aquosos da BII não se dispõe de dados suplementares que permitam delimitar o domínio P-T de aprisionamento. Em todo o caso e uma vez que parece existir uma subida de temperatura e pressão da FI para a BIII, poder-se-á considerar um intervalo de temperaturas e pressões de aprisionamento intermédias em relação às anteriores.

5.6 Discussão e Conclusão

Na FI e na BIII de Bou Jaber foram observadas IF aquosas, IF com petróleo, IF com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp), IF carbónicas e IF aquocarbónicas. Na BII foram observadas IF aquosas, IF com petróleo e IF com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp).

As composições das IF aquosas P das FI, BII e BIII variam desde salinas a muito salinas (Fig. II-27) indicando uma provável mistura de dois fluidos com salinidades diferentes.

É provável que os fluidos aquosos aprisionados em IF P na barite mais tardia (BIII) (10,1 a 26,2 p. % eq. NaCl; 105 a 213ºC) e em IF PS/S (3,1 a 22,9 p. % eq. NaCl) possam ter sido aprisionados em cavidades S na FI (18,1 a 26,8 p. % eq. NaCl; 87 a 131ºC). É de supor que estes fluidos também possam ter ficado aprisionados em cavidades S na BII. No entanto, não se dispõe de dados que possam confirmar esta suposição.

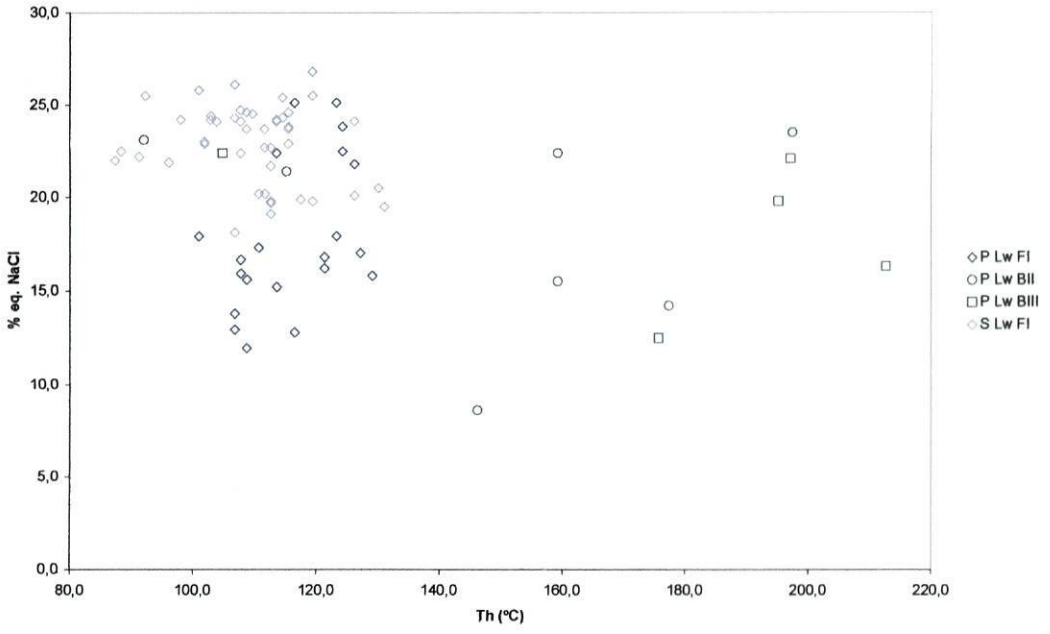


Fig. II-27 – Diagrama de correlação de salinidade *versus* Th referente a IF aquosas (Lw) na FI, na BII e na BIII

A composição da fase aquosa das IF com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp) é semelhante à composição da fase aquosa das IF do tipo Lw (P, S e/ ou PS/S). Esta evidência e a existência dos três tipos de inclusão (Lw, Lp e Lw+Lp) na mesma amostra sugere um aprisionamento contemporâneo das fases aquosa e de petróleo. Conclui-se, também, que o petróleo observado nestas inclusões foi transportado pelo fluido aquoso seu contemporâneo.

Apenas foi observada a TfG de uma IF aquocarbónica (BIII) indicando uma salinidade baixa (4,0 p. % eq. NaCl).

As cores de fluorescência das IF com petróleo na FI variam entre azul e azul-branco .

As cores de fluorescência das IF com petróleo na BII e na BIII variam entre amarelo, amarelo esverdeado, azul e azul-branco e o valor do quociente Q650/500 é de 0,276 para a BII e de 0,405 para a BIII sugerindo uma composição alifática para os hidrocarbonetos presentes. O valor de I546 é de 8,782 para a BII e é de 21,03 para a BIII.

No decurso deste trabalho não foi possível determinar a composição e densidade globais das IF com petróleo de Bou Jaber, não podendo ser calculadas as isócoras correspondentes a este tipo de fluidos.

No entanto, uma vez que se observaram inclusões carbónicas e aquosas é possível, utilizando o método da intersecção de isócoras, delimitar domínio P-T provável para estes fluidos.

No caso da FI as temperaturas de aprisionamento prováveis para os fluidos P estão compreendidas entre 110 e 145°C, correspondendo a pressões que variam entre 300 e 450 bar. As temperaturas de aprisionamento estimadas para os fluidos S estão compreendidas entre 95 e 150°C, correspondendo a pressões que variam entre 295 e 450 bar.

O domínio P-T para a BIII, é delimitado por temperaturas de aprisionamento que variam entre 125 a 275ºC e pressões que variam entre 525 e entre 1200 bar.

Para os fluidos aquosos da BII não se dispõe de dados suplementares que permitam delimitar o domínio P-T de aprisionamento. Em todo o caso e uma vez que parece existir uma subida de temperatura e pressão da FI para a BIII, poder-se-á considerar um intervalo de temperaturas e pressões de aprisionamento intermédias em relação às anteriores.

6. *Síntese Comparativa entre os Jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber*

Tendo como base os dados microtermométricos e de microscopia de fluorescência pode-se concluir que os fluidos presentes nos jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber são muito semelhantes. Em ambos os jazigos se verifica a existência de grande dispersão na composição dos fluidos aquosos P, variando estes de pouco a muito salinos (Fig. II-28a). É sugerido com base nestes dados que nestes dois jazigos tenha existido a circulação e a mistura de dois fluidos de salinidades diferentes.

Quer em Hammam Zriba, quer em Bou Jaber foram observadas inclusões aquosas, inclusões com petróleo e inclusões com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp). Adicionalmente em Bou Jaber foram observadas IF carbónicas e aquocarbónicas. A coexistência destes tipos de inclusões em outros jazigos, nomeadamente em depósitos do tipo MVT, foi anteriormente reportado por vários autores (e.g. Roedder 1984; Goldstein e Reynolds 1994; Guilhaumou *et al.* 2000; González-Partida *et al.* 2003).

A composição das IF aquosas dos dois jazigos é muito semelhante, verificando-se a existência de mistura de dois fluidos de salinidades diferentes. A composição da fase aquosa das inclusões com petróleo é muito semelhante à composição da fase aquosa das IF do tipo Lw. Esta constatação adicionada à coexistência destes três tipos de inclusões (Lw, Lp e Lw+Lp) na mesma amostra sugere que estes fluidos são contemporâneos. É de supor que esta mistura de fluidos transportou uma fase imiscível de petróleo aprisionada e preservada em inclusões fluidas bifásicas e trifásicas com dois líquidos (Lw+Lp; Fig. II-28a).

As temperaturas de homogeneização das IF P aquosas e com petróleo de Hammam Zriba e Bou Jaber estão confinadas ao mesmo intervalo, verificando-se, apenas, que as IF com petróleo da BIII de Bou Jaber apresentam

temperaturas relativamente mais elevadas que as restantes do mesmo tipo (Figs. II-28a e II-28b).

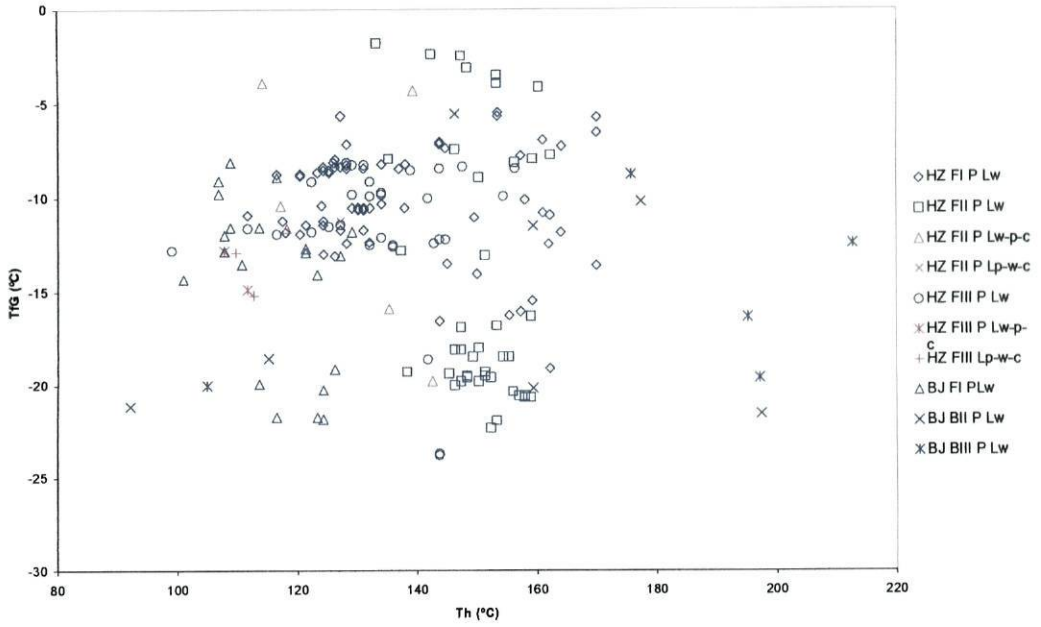


Fig. II-28a – Diagrama de correlação de TfG *versus* Th referente a IF aquosas e IF com dois líquidos imiscíveis (Lw+Lp) das fluorites e barites de Hammam Zriba e Bou Jaber

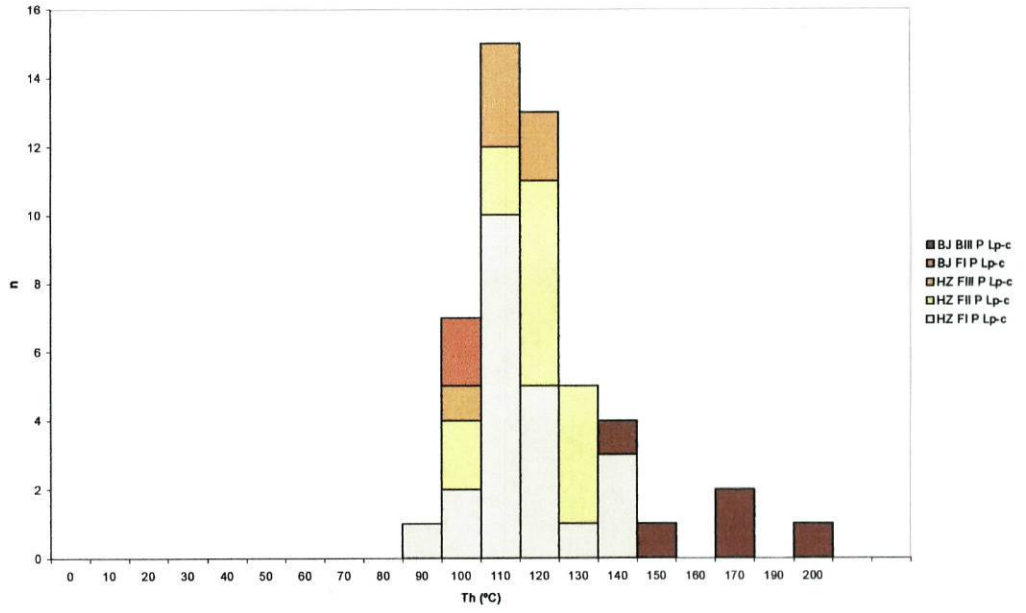


Fig. II-28b – Histograma representativo da Th das IF P com petróleo das fluorites e barites de Hammam Zriba e Bou Jaber

Com base nos resultados microtermométricos das IF de Hammam Zriba e Bou Jaber e nos dados microtermométricos fornecidos por Touray (1989) para os depósitos do tipo MVT (Fig. II-29) pode-se concluir que, a nível dos fluidos, os jazigos estudados são muito semelhantes aos jazigos do tipo MVT.

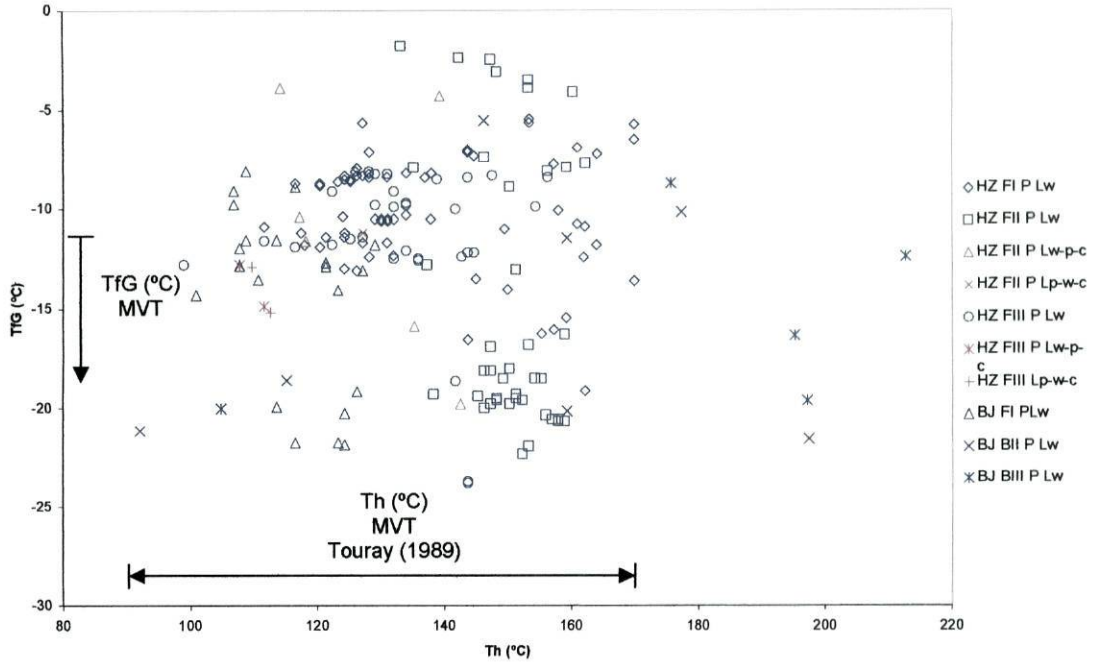


Fig. II-29 – Diagrama de correlação de TfG *versus* Th referente a IF de Hammam Zriba e Bou Jaber, comparado com o intervalo de TfG e Th dos depósitos do tipo MVT, reportados por Touray (1989).

As cores de fluorescência observadas nas IF com petróleo do jazigo de Hammam Zriba variam entre azul e azul-branco, sugerindo uma composição mais alifática (análises FT-IR efectuadas por Guilhaumou (1989) *in* Benchilla *et al.* (2003) e Guilhaumou *et al.* (1990a, b, 2000) tinham já determinado este tipo de composição). As cores de fluorescência observadas nas IF com petróleo do jazigo de Bou Jaber variam entre azul-branco, azul, amarelo e amarelo esverdeado, indicando, à semelhança de Hammam Zriba, uma composição mais alifática, embora com um possível aumento no conteúdo em aromáticos.

A determinação do domínio P-T de aprisionamento de fluidos para Hammam Zriba não pôde ser efectuado com base nos resultados deste trabalho, uma vez

que não se possuiam dados relativos à composição e densidade globais das IF com petróleo. Foi, por este motivo, utilizado o modelo proposto por Benchilla *et al.* (2003) e que estima uma pressão de aprisionamento de 116 ± 5 bar, correspondendo a uma profundidade máxima de 1155 ± 50 m.

As inclusões carbónicas observadas em Bou Jaber permitiram juntamente com as IF aquosas delimitar um primeiro possível domínio P-T de aprisionamento de fluidos neste jazigo. No caso da FI as temperaturas de aprisionamento prováveis para os fluidos P estão compreendidas entre 110 e 145ºC, correspondendo a pressões que variam entre 300 e 450 bar. No caso da BIII, o domínio P-T é delimitado por temperaturas de aprisionamento que variam entre 125 e 275ºC e pressões que variam entre 525 e 1200 bar.

O domínio P-T de aprisionamento dos fluidos no jazigo de Bou Jaber não pode ser comparado com o proposto por Benchilla *et al.* (2003) para Hammam Zriba, uma vez que na determinação das isócoras não foram utilizadas IF com petróleo. Novos estudos serão necessários para a correcta determinação das condições de aprisionamento destes fluidos.

III parte

Considerações Finais

III Parte – Discussão dos Resultados e Conclusões

1. *Discussão dos Resultados*

A partir dos dados microtermométricos e das propriedades de fluorescência UV presentes pode-se concluir que em Hammam Zriba e Bou Jaber existe um tipo de IF com petróleo. A maioria destas inclusões contêm uma fase líquida de petróleo cujas características UV sugerem uma composição dominada por compostos alifáticos. Análises FT-IR efectuadas por Guilhaumou (1989) *in* Benchilla *et al.* (2003) e Guilhaumou *et al.* (1990a, b 2000) em IF com petróleo nas fluorites de Hammam Zriba corroboram a presença maioritária destes compostos saturados. Este tipo de petróleo está presente tanto em inclusões P como S nas fluorites de Hammam Zriba e na fluorite e barites de Bou Jaber. Neste último caso a exitência de IF com petróleo com fluorescência em amarelo poderá indicar um conteúdo relativamente mais aromático, uma vez que a composição se torna mais aromática à medida que se passa de comprimentos de onda curtos (azul) para comprimentos de onda longos (vermelho e laranja). No entanto, a confirmação da composição deste tipo de inclusões só será possível com a realização de análises, nomeadamente, análises FT-IR.

A dispersão da salinidade existente nas inclusões P dos três tipos deposicionais de fluorite no jazigo de Hammam Zriba e da fluorite e das barites do jazigo de Bou Jaber indica uma mistura de dois fluidos de salinidades diferentes: um mais salino e outro menos salino. A origem da elevada salinidade poderá ser devida à passagem do fluido mineralizante pelas litologias triásicas salinas subjacentes. Este facto poderá ser corroborado pela exitência actual de fontes termominerais cuja água possui uma composição clorossulfatada e sódico-cálcica (Bouhlel *et al.* 1988; Djelleuli 1973 *in* Bouhlel *et al.* 1988). O fluido menos salino poderá ter a sua origem em águas meteóricas. Esta mistura de fluidos transportou uma fase imiscível de petróleo, cuja composição consiste maioritariamente em compostos saturados. A fase aquosa

nas inclusões bifásicas e trifásicas com dois líquidos imiscíveis (petróleo+solução aquosa e petróleo+vapor+solução aquosa) tem uma composição semelhante às inclusões exclusivamente aquosas (P). Esta evidência e a justaposição dos três tipos de inclusões como inclusões P e S, na mesma amostra sugere um aprisionamento contemporâneo das fases aquosa e de petróleo. Tanto as inclusões com petróleo P como as S parecem apresentar o mesmo tipo de composição.

Estes resultados têm implicações no que diz respeito à deposição da mineralização e a migração do petróleo na área.

Embora não se possa determinar a origem dos fluidos mineralizantes apenas com base nos presentes dados, é óbvio que os hidrocarbonetos estiveram presentes durante algum estádio de deposição das fluorites e das barites e provavelmente durante a mineralização dos metais base.

À semelhança dos jazigos do tipo MVT estes depósitos associados com petróleo evidenciam que o petróleo e os fluidos mineralizantes têm a mesma origem (e.g. Roedder 1984; Golstein e Reynolds 1994). As IF podem ser consideradas como representativas do fluido contemporâneo com a geração do petróleo e da sua migração na região.

Entre o Cretácico e o Terciário ocorreu o segundo grande evento tectónico de contracção à escala global em que a assimilação de microplacas afectou a margem oeste da América do Norte e a África-Eurásia. À semelhança do que acontece para os depósitos do tipo MVT, esta elevada actividade tectónica poderá estar na origem da circulação de fluidos a grande escala e, provavelmente, terá condicionado a evolução dos jazigos de Hammam Zriba e Bou Jaber.

Este tipo de jazigos estão actualmente localizados ao longo de zonas que sofreram intensa actividade tectónica, tal como acontece, por exemplo, em

Cave in Rock (*Rock Creek Graben*, *Southern Illionois*, Richardson e Pinckney 1984 *in* Guilhaumou *et al.* 2000).

Efectivamente, o jazigo de Hammam Zriba está situado num horst intensamente fracturado apresentando diaclases e fracturas maiores mineralizadas. Estas fracturas constituem meios de acesso para os fluidos e armadilhas de deposição desses fluidos.

A rede de fracturação atingiu, essencialmente, o Portlandiano e o Campaniano estando a maioria das fracturas mineralizadas e apresentando aberturas colmatadas pela barite-celestite, fluorite e, mais raramente, calcite.

A fracturação teve um duplo papel na mineralização. Um papel indirecto, uma vez que facilitou a circulação de águas agressivas e favoreceu a formação de cavidades cársicas, e um papel directo, já que se comportou como uma armadilha tectónica para a mineralização.

Em Hammam Zriba a sucessiva deposição de fluorite FI, FII e FIII é uma prova de mineralização derivada de uma mistura de diferentes tipos de fluidos e não exclusivamente de um único fluido de origem basinal como proposto por Benchilla *et al.* (2003).

O modelo P-T-V-X estimou pressões de aprisionamento da ordem dos 116 ± 5 bar correspondendo a uma profundidade de 1155 ± 50 m. Este valor foi calculado usando um gradiente de pressão hidrostática de 100 $bar.km^{-1}$ (Benchilla *et al.* 2003).

Atendendo a estas observações, as fluorites de Hammam Zriba poderão ter-se formado durante a Tortoniano – Pliocénico (Benchilla *et al.* 2003).

Benchilla *et al.* (2003) concluiram que a formação deste minério poderá estar relacionada com o escape vertical de salmouras hidrotermais derivadas de um

reservatório profundo, localizado possivelmente perto das séries triásicas. A partir do Tortoniano, estes fluidos poderão ter subido ao longo de fracturas induzidas pela formação de *horsts* e *grabens*. Após terem chegado perto do paleorelevo, estes fluidos transportadores de fluorite na forma de CaF^+ e complexos NaF foram aprisionados por baixo de margas em vários níveis das séries do Jurássico. Por último difundiram-se horizontalmente dentro dos reservatórios calcários maçicos porosos.

Assumindo que a circulação de água é controlada por fracturas activas, então a componente vertical da migração do fluido torna-se significativa e a fonte de flúor pode estar não só no preenchimento sedimentar mas também no fundo da bacia sedimentar (Fig. III-1).

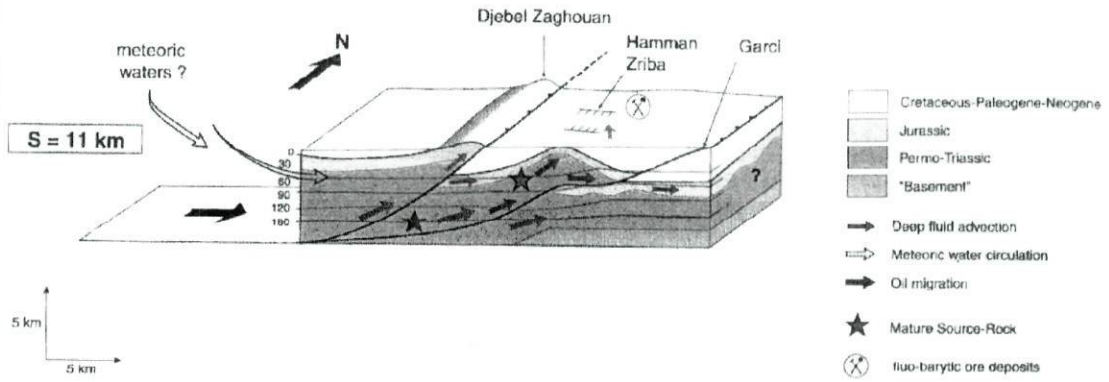


Fig. III-1 – Modelo da migração do fluido mineralizante e localização do depósito de Hammam Zriba e possíveis rochas fonte (S= encurtamento possível; Benchilla *et al.* 2003)

O jazigo de Bou Jaber está situado num dos lados do anticlinal emerso durante a Orogenia Maghrebiana (SW-NE).

Na parte tunisina o monoclinal é cortado, a norte e a sul por dois acidentes subparelelos afectando o Triásico e o Cenomaniano. A este é limitado por uma falha transversal.

A mineralização, constituída por fluorite, galena, blenda e barite, está depositada na superfície de discordância entre o Vraconiano (Albiano tardio) e

a superfície erodida composta pelo Gargasiano inferior (Apciano superior), o Clansayesiano (Apciano tardio) e o Albiano inferior.

À semelhança do que acontece em Hammam Zriba estes acidentes permitiram a circulação de águas agressivas favorecendo a formação de cavidades cársicas e comportaram-se como armadilhas tectónicas para a mineralização.

A falta de mais alguns dados relevantes para o estudo deste jazigo não permite tecer muitas mais considerações acerca da sua formação e da origem dos fluidos mineralizantes. No entanto, é evidente que este depósito foi formado durante intensa actividade tectónica e que a fracturação terá condicionado a circulação dos fluidos mineralizantes.

2. *Conclusões*

Inclusões fuidas aquosas e de petróleo de Hamamm Zriba e Bou Jaber foram examinadas usando técnicas analíticas. Dos resultados obtidos é evidente que durante a deposição dos três tipos de fluorite em Hammam Zriba e da fluorite e barites de Bou Jaber, dois tipos de fluidos de salinidades diferentes estiveram activos, dando origem a uma mistura de fluidos evidenciado pela grande amplitude do intervalo de salinidades obtido (inclusões P). É evidente que esta mistura de fluidos transportou uma fase imiscível de petróleo aprisionada e preservada em inclusões fluidas bifásicas e trifásicas com dois líquidos (petróleo+solução aquosa e petróleo+vapor+solução aquosa). Embora não tenha sido possível determinar a composição das inclusões com petróleo através da micro-espectroscopia Raman, estes foram analisados rescorrendo à microscopia de fluorescência que revelou uma possível composição alifática (cores de fluorescência azul e azul-branco) para as IF com petróleo de Hammam Zriba e uma composição alifática com um maior conteúdo em aromáticos (cores de fluorescência azul e azul-branco, amarelo e amarelo-esverdeado) nas IF com petróleo de Bou Jaber.

Análises de FT-IR efectuadas por Guilhaumou (1989) in Benchilla *et al.* (2003) e Guilhaumou *et al.* (1990a, b, 2000) indicam que em Hammam Zriba o petróleo é constituído por componentes saturados (alifáticos). No caso do jazigo de Bou Jaber não se conhece nenhum trabalho que refira a composição das inclusões com petróleo.

Durante a análise microtermométrica foi detectada a presença de CO_2 nas IF com petróleo. Esta espécie volátil e o CH_4 foram também detectados, quer durante a criometria, quer através de análises de micro-espectroscopia Raman, em inclusões carbónicas e aquocarbónicas P e S, que parecem também ser contemporâneas das outras inclusões presentes (aquosas e de petróleo). É de supor que no aprisionamento do petróleo, alguns dos seus constituintes,

nomeadamente o CO_2 e o CH_4 ficaram aprisionados em inclusões contendo uma fase aquosa.

Quer no jazigo de Hammam Zriba, quer no jazigo de Bou Jaber, a fracturação teve um papel preponderante na circulação dos fluidos e actuando como uma armadilha para a deposição dos mesmos.

O estudo dos fluidos sugere que em ambos os casos a deposição do minério está relacionada com uma mistura de um fluido pouco salino (água meteórica?) e um fluido salino, que poderá estar relacionado com as séries do Triásico (Benchilla *et al.* 2003) e/ ou com fluidos basinais pós-colisionais (Bradley e Leach 2003).

BIBLIOGRAFIA

ALPERN, B. LEMOS DE SOUSA, M. J., PINHEIRO, H. J. & ZHU, X. (1992) Optical Morphology of Hydrocarbons and Oil Progenitors in Sedimentary Rocks – Relations with Geochemical Parameters. *Publ. Mus. Labor. Miner. Geol.* Fac. Ciências Porto, Porto, N. S. 3, pp. 53.

ALPERN, B. LEMOS DE SOUSA, M. J., PINHEIRO, H. J. & ZHU, X. (1993) Detection and evaluation of hydrocarbons in source rocks by fluorescence microscopy. *Org. Geochem.* 20, 6, 789-795.

AMOURI, M. (1986) Le gisement de Bou Jaber (Atlas Tunisien Central). Un example de mineralisation Pb-Zn-F-Ba dans un paleokarst. *Rev. Sc. De la Terre* 4, 87-114.

ANDERSON, T. & BURKE, E. A. J. (1995) Hydrocarbon inclusions in shocked quartz from gradnos impact breccia, Soutes Norway. *Abstracts.* XIII ECROFI 18-1. *Bol. de la Soc. Esp. de Min.*, pp. 7

BAKKER, R. J. (2001) Combined raman spectroscopy and low temperature microthermometry. ECROFI XVI. Abstracts. (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 15-18.

BAKKER, R. J. (2003) Package FLUIDS 1. Computer modelling program for analysis of fluid inclusion data and for modelling bulk fluid properties. *Chem. Geol.* 194, 3-23.

BAKKER, R. J. & BROWN, P. E. (2003) Computer modelling in fluid inclusion research. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Assoc. Can.*, Short Course Series 32, 175-212.

BAKKER, R. J., DUBESSY, J. & CATHELINEAU, M. (1996) Improvements in the clathrate modelling: I. The H_2O-CO_2 system with various salts. *Geoch. et Cosmoch. Acta* 60, 1657-1681.

BAKKER, R.J. & THIÉRY, R. (1994) Application of clathrates to fluid inclusion satudies. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 191-208.

BARNES, H. L. (1967) Sphalerite solubility in ore solutions of the Illinois-Wisconsin District. *Econ. Geol.*, 326-332.

BEN AYED, N. et ZARGOUNI (1990) Carte Sismotectonique de la Tunisie. Edt de la Recherche Scientifique. Fondation Nationale de la Recherche Scientifique. République Tunisienne, Ministère de l'Education de l'Enseignement Supérieur.

BEN SAÏD, E. A. (1974) Le gisement plombo-zincifere de Boujaber. Rapport de stage pour l'obtention du diplome détudes approfondies de Geologie Appliquee. Université de Nancy I, Faculté des Sciences.

BELKIN, H. E. (1994) Microthermometric investigation: Th and Tm. Practical and theoretical aspects. IMA: Short course on fluid inclusions (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti, 7-24.

BENCHILLA, L., GUILHAUMOU, N., MOUGIN, P., JASWAL, T. & ROURE, F. (2001) Paleo-burial and pore pressure reconstruction of reservoir rocks in foothills areas: a sensibility test in the Hammam Zriba (Tunisia) and Koh-i-Mareu (Pakistan) ore deposits. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 37-39.

BENCHILLA, L., GUILHAUMOU, N., MOUGIN, P., JASWAL, T. & ROURE, F. (2003) Reconstruction of paleo-burial history and pore fluid pressure in foothill areas: a sensivity test in the Hammam Zriba (Tunisia) and Koh-i-Maran (Pakistan) ore deposits. *Geofluids* 3, 103-123.

BERNARD, A. & FOGLIERINI, F. (1967) Etude méthodologique sur la genèse des gisements stratiformes du plomb-zinc en environnement carbonate. *Econ. Geol.*, 267-277.

BLANCHET, A., PAGEL, M., WALGENWITZ, F. & LOPEZ, A. (2001) Fluid inclusion deformation in diagenetic context of quartz overgrowth : an ongoing controversy. ECROFI XVI. Abstracts. (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 45-48.

BLANCHET, A., PAGEL, M., WALGENWITZ, F. & LOPEZ, A. (2003) Microspectrofluorimetric and microthermometric evidence for variability in hydrocarbon fluid inclusions in quartz overgrowths : implications for inclusion trapping in the Alwyn North Field, North Sea. *Org. Geoch.* 34, 1477-1490.

BODNAR, R. J. (1993) Revised equation and table for determining the freezing point depression of H_2O-NaCl solutions. *Geoch. Cosmoch.* Acta 57, 683-684.

BODNAR, R. J. (1994) Philosophy of fluid inclusions analysis. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 1-6.

BODNAR, R. J. (2003a) Introduction to fluid inclusions. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Assoc. of Can.*, Short Course Series 32, 1-8.

BODNAR, R. J. (2003b) Reequilibration of fluid inclusions. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Assoc. of Can.*, Short Course Series 32, 213-231.

BODNAR, R. J. (2003c) Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Assoc. of Can.*, Short Course Series 32, 81-100.

BODNAR, R. J. & BETHKE, P. M. (1984) Systematics of stretching of fluid inclusions I: fluorite and sphalerite at 1 atmosphere confining pressure. *Econ. Geol.* 79, 141-161.

BODNAR, R. J., STERNER, S. M. & HALL, D. L. (1989) Salty: a FORTRAN program to calculate composition of fluid inclusions in the system NaCl-KCl-H_2O. *Comp. & Geos.* 15, 19-41.

BODNAR, R. J. & VITYK, M. O. (1994) Interpretation of microthermometric data from H_2O-NaCl fluid inclusions. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 117-130.

BOIRON, M-C & DUBESSY, J. (1994) Determination of fluid inclusions compositions: microanalitical techniques. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 45-72.

BONNEFOUS, J. (1972) Contribuition à l'étude stratigraphique du Jurassique de Tunisie (Tunisie septentrionale et centrale. Sahel et zone des chotts). Thèse univers. Paris VI.

de BOORDER, H. SPAKMAN, W., WHITE, S- H. and WORTEL, M. J. R. (1998) Late Cenozoic mineralization, orogenic collapse and slab detachment in the European Alpine Belt. *Earth Planet. Sci. Lett.* 164, 569-575.

BOUHLEL, S. (1993) Gitologie, mineralogie et essai de modelisation des mineralisation à F-Ba-Sr-Pb-Zn-(S°). Associes aux carbonates (Jurassiques et Cretaces) et aux diapirs Triasiques : gisements de Stah-Kohol, Zriba-Guebli, Bou-Jaber et Fej Lahdoum Tunisie septentrionale). Thèse. L'úniversite de Tunis II. Faculte des Sciences de Tunis.

BOUHLEL, S. FORTUNÉ, J.-P., GUILHAUMOU, N. & TOURAY, J.-C. (1988) Les minéralisations stratiformes à F-Ba de Hammam Zriba, Jebel Guébli (Tunisie nord orientale) : l'apport des études d'inclusions fluides à la modélisation génétique. *Mineral. Dep.* 23, 166-173.

BOUHLEL, S. & MAGNE, J. (1982) Mise en évidence de la transgression campanienne et de l'âge post-campanien de la minéralisation fluo-barytique de Hammam Zriba-J. Guébli. *C. R. Acad. Sc. Paris* 294, série II, 334-338

BOUTALEB, A., PIRONON, J., MARIGNAC, C., AISSA, D. E. & TOUAHI, B. ( ) Hydrocarbon inclusions in fluorite from MVT deposits : the Pb-Zn district of the Hodna Mts. (Algeria). Terra Nostra 99/6. ECROFI XV. *Abstracts*, 55-57.

BRADLEY, D. C. & KIDD, W. S. F. (1991) Flexural extension of the upper continental crust in collisional foredeeps. *Geol. Soc. Am. Bull.* 103, 1416-1438.

BRADLEY D. C. & LEACH D. L. (2003) Tectonic controls of Mississipy Valley-type lead-zinc mineralization in orogenic forelands. *Mineral. Dep* . 38, 652-667.

BROWN, P.E. & HAGEMANN, S.G. (1994) MacFlincor: A computer program for fluid inclusion data reduction and manipulation. In Fluid Inclusions in Minerals: Methods and Applications (de Vivo, B. & Frezzotti, M. L., eds.), Short Course IMA, VPI Press, 231-250.

BURKE, E. A. J. (1994) Raman microspectrometry of fluid inclusions: the daily practice. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 25-44.

BURKE, E. A.-J. (2001) Raman microspectrometry of fluid inclusion. Lithos 55, n^{os}. 1-4, 27-47.

BURRUSS, R. C. (1981) Hydrocarbon fluid inclusions in studies of sedimentary diagenesis. Short course in fluid inclusions: applications to petrology. (ed: L. S. Hollister and M. L. Crawford), 138-156.

BURRUSS, R. C. (2003a) Petroleum fluid inclusions, an introduction. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Ass. Can.*, Short Course Series 32, 159-174.

BURRUSS, R. C. (2003b) Raman Spectroscopy of fluid inclusions. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Ass. Can.*, Short Course Series 32, 279-364.

CATHELINEAU, M. LESPINASSE, M. & BOIRON, M. C. (1994) Fluid inclusions planes: A geochemical and structural tool of the reconstruction of paleofluid migration. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 271-282.

CHAREF, A. & SHEPPARD, S. M. F. (1995) The relationships between diapirism and diapiric ore deposits in Tunisia as deduced from fluid inclusions. *Abstracts.* XIII ECROFI 18-1. *Bol. De la Soc. Esp. de Min*, 290-291.

CHAREF, A., SHEPPARD, S. M. F. & ABBES, A. (1997) Halite, anhydrite and barite from the Triassic saltdomes of North Tunisia: nature of fluid inclusions and genetic implications. *Abstracts.* ECROFI XIV (ed: M.C. Boiron, J. Pironon), 68-69.

CHAREF, A., OTHMAN, S. & MONCEF, G. (2001) The ancient geothermal fluids in north Tunisia: fluid inclusions studies and genetic implications. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 89-91.

CRAWFORD, M. L. (1981) Phase equilibria in aqueous fluid inclusions. Short course in fluid inclusions: applications to petrology. (ed: L. S. Hollister and M. L. Crawford), pp. 75-100.

CRISCENTI, L. J. & SVERJENSKY, D. A. (1999) The role of electrolyte anions (ClO_4^-, NO_3^- and Cl^-) in divalent metal (M^{2+}) adsorption on oxide and hydroxide surfaces in salt solutions. *Am. J. Sci.* 299, 828-899.

DE BOORDER H., SPACKMAN W., WHITE S. H. & WORTEL M. J. R. (1998) Late Cenozoic mineralization, orogenic collapse, and slab detachment in the European Alpine Belt. *Earth Planet. Sci. Lett.* 164, 569-575.

DE MAGNEE, I. (1967) Contribution a l'etude génétique des gisements belges de plomb, zinc et barytine. *Econ. Geol.*, 255-256.

DELHAYE, M. & DHAMELINCOURT, P. (1975) Raman microprobe and microscope with laser excitation. *J. Raman Spectrosc.* 3, 33-43.

DHAMELINCOURT, P. BENY, J.-M, DUBESSY, J. & POTY, B. (1979) Analyse dínclusions fluides à la microsonde MOLE à effet Raman. *Bull. Minéral.* 102, 600-610.

DIAMOND, L.W. (2003) Systematics of H_2O inclusions. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Assoc. Can.*, Short Course Series 32, 55-79.

DIAMOND, L.W. (2003) Introduction to gas-bearing, aqueous fluid inclusions. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Assoc. Can.*, Short Course Series 32, 101-158.

DJELLOULI, A. (1973) Géochimie de quelques sources thermo-minèrales de Tunisie. Livre Jubilaire M. Solignac. *Ann. Min. et Géol.* Tunis 26, 571-579.

DUBESSY, J. (1994) Single component systems: phase diagram and their application to fluid inclusions. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 95-116.

DUBESSY, J., AUDEOUD, D., WILKINS, R. W. T. & KOSZTOLANYI, C. (1989a) The use of the Raman microprobe MOLE in the determination of the electrolytes dissolved in the aqueous phase of fluid inclusions. *Chem. Geol.* 37, 137-150.

DUBESSY, J., BAKKER, R. FRANTZ, J. & ZHANG, Y. (1995) High temperature raman spectroscopie study of H_2O-CO_2-CH_4 mixtures in synthetic fluid inclusions using the Labram Spectometer (Dilor). Some first insights on molecular interactions. *Abstracts.* XIII ECROFI. Vol. 18-1. *Bol. De la Soc. Esp. de Min.*, 66-67.

DUBESSY, J., BOIRON, M.C., MOISSETTE, A., MONIN, C. & SRETENSKAYA, N. (1992) Water, hydrates and pH determinations by micro-Raman spectroscopy in fluid inclusions. *Eur. J. Min.*

DUBESSY, J. DEROME, D. & SAUSSE, J. (2001) Numerical modelling of different types of fluid mixing in the H_20-NaCl system application to a case study. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia.Memória nº 7, pp. 127-130.

DUBESSY, J., POTY, B. & RAMBOZ, C. (1989b) Advances in the C-O-H-N-S fluid geochemistry based on micro-Raman spectroscopic analysis of fluid inclusions. *Eur. J. Mineral.* 1, 517-534.

DUHOVNIK, J. (1967) Facts for and against a syngenetic origin of the stratiform ore deposits of lead and zinc. *Econ. Geol.*, 108-125.

DUSCHEK, W., KLEINRAHM, R. & WAGNER, W. (1990) Measurements and correlation of the (pressure, density, temperature) relation of carbon dioxide II. Saturated-liquid and saturated-vapour densities and the vapour pressure along the entire coexistence curve. *J. Chem. Thermod.* 22, 841-864.

DUTKIEWICZ, A. (2001) Hydrocarbon fluid inclusions and pyrobitumen nodules in the uraniferous matinanda formation : implications for oil migration during the early proterozoic. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia.Memória nº 7, 139-141.

DUTKIEWICZ, A. RIDLEY, J. & BUICK, R. (2003) Oil-bearing CO_2-CH_4-H_2O fluid inclusions: oil survival since the Palaeoproterozoic after high temperature entrapment. *Chem. Geol.* 194, 51-79.

EVANS, A. (1993) Ore Geology and Industrial Minerals, an introduction. Third edition, *Oxford Backwell Scientific Publications*, 233-243

FERNÁNDEZ, A., MORO, M. C., PRIETO, C., VILLAR, P., FADÓN, O & CAMBRANES, M. L. (2001) Fluid inclusions study in the tungsten-tin deposits from Navasfrias District (Salamanca,

Spain). ECROFI XVI. *Abstracts*. (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 153-156.

FLORIDIA, S. (1973) La province fluorée tunisienne. Aperçu géologique et métallogénique. Livre Jubilaire M. Solignac. *Ann. Min. Géol.* Tunis 26, 477-479.

FLOWERS, G. C. (1979) Correction of Holloway's (1977) adaption of the modified Redlich-Kwong equation of state for calculation of the fugacities of molecular species in supercritical fluids of geologic interest. *Contrib. Mineral. Petrol.* 69, 315-319.

FRANKLIN, P. & BARBROW, L.E. (1987) Mathematical tables and units and systems of weights and measures. *In* Petroleum Engineering Handbook (ed. Bradley, H. B.), 1-80.

GEORGE, S. C., LISK, M., SUMMONS, R. E. & QUEZADA, R. A. (1998) Constraining the oil charge history of the South Pepper oilfield from the analysis of oil-bearing fluid inclusions. *Org. Geochem.* 29, nº. 1-3, 631-648.

GHARBI, M., BEN AYED, N & BEN SAÏD E. A. (1981) Essai d'interprétation tectonique du champ filonien de Bou-Jabeur (Atlas tunisien central). *Actes du Premier Congrès National de la Terre* (Tunis). Tome 1, 393-403.

GHEZBEN, F. & MORITZ, R. (2001) Nature of carbonate-hosted F-Ba-Pb deposits in central Alborz, Northern Iran: Genetic relationships. ECROFI XVI. *Abstracts*. (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 175-176.

van GIJZEL P. (1967) Autofluorescence of fossil pollen and spores with special reference to age determination and coalification. Leidse. *Geol. Meded.* 40, 261-317.

GOLDSTEIN, R. H. (2001) Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems. *Lithos* 55, nºs 1-4, 159-193.

GOLDSTEIN, R. H. (2003) Petrographic analysis of fluid inclusions. *In* I. Samson, A. Anderson & D. Marshall, eds. Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation. *Min. Assoc. Can.*, Short Course Series 32, 9-53.

GOLDSTEIN, R. H. & REYNOLDS, T. J. (1994) Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals: Society for sedimentary geology. Short Course 31, 199 pp.

GONZÁLEZ-PARTIDA, E., CARRILLO-CHÁVEZ, A., GRIMMER, J. O.W., PIRONON, J., MUTTERER, J. & LEVRESSE, G. (2003) Fluorite deposits at Encantada–Buenavista, Mexico: products of Mississipy Valley-type processes. *Ore Geol. Rev.* 23, 107-124.

GROGAN, R. M. & BRADBURY, J. C. (1967) Origin of the stratiform fluorite deposits of Southern Illinois. Econ. Geol., 40-51.

GUILBERT, J. & PARK, C. (1997) The Geology of Ore Deposits, 886-909.

GUILHAUMOU, N., BOUHLEL, S. & TOURAY, J. C. (1987) Hydrocarbon fluid inclusions in the stratabound F-Ba deposit of Hammam Zriba-Guebli (North-Eastern Tunisia).ECROFI. IX Symposium on Fluid Inclusions. *Abstracts*. (eds: Museu e Laboratório Mineralógico e Geológico da Faculdade de Ciências do Porto, Centro de Geologia da Universidade do Porto), p. 49.

GUILHAUMOU, N., ELLOUZ, N., JASWALL, T. M. & MOUGIN, P. (2000) Genesis and evolution of hydrocarbon entrapped in the fluorite deposit of Koh-i-Maran, (North Kirthar Range, Pakistan). *Mar. Petrol. Geol.* 17, 1151-1164.

GUILHAUMOU, N., ZYDLOWSKI, N., ENGUEHARD, F. (1990a) Micro FT-IR analysis of hydrocarbon bearing fluid inclusions. Qualitative and quantitative aspects. PACROFI III, *Abstract* 3, 39.

GUILHAUMOU, N., ZYDLOWSKI, N., PRADIER, B. (1990b) Characterization of hydrocarbon bearing fluid inclusions by infra-red and fluorescence microspectrometry. *Min. Mag.* 54, 311-324.

GUILLAUME, D., TEINTURIER, S., PIRONON, J. & DUBESSY, J. (2001) Calibration of the raman analysis of the methane in H_20-NaCl-CH_4 fluid inclusions. Validation using natural hydrocarbon and aqueous fluid inclusions. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 203-206.

HAGEMANN, H.W. & HOLLERBACH, A. (1986) The fluorescence behavior of crude oils with respect to their thermal maturation and degradation. *Org. Geochem.* 10, 473-480.

HALL, D. L., STERNER, S. M. & BODNAR, R.J. (1988) Freezing point depression of NaCl-KCl-H_2O solutions. *Econ. Geol.* 83, 197-202.

HELGESSON, H. C. (1967) Silicate metamorphism in sediments and the genesis of hydrothermal ore solutions. *Econ. Geol.*, 333-342.

HEYL, A. V. (1967) Some aspects of genesis of stratiform zinc-lead-barite-fluorite deposits in the United States. *Econ. Geol.*, 20-32.

HOLLISTER, L. S. (1981a) Information intrinsicaly available from fluid inclusions. Short course in fluid inclusions: applications to petrology. (ed: L. S. Hollister and M. L. Crawford), 1-12.

HOLLISTER, L. S. (1981b) Techniques for analysing fluid inclusions. Short course in fluid inclusions: applications to petrology. (ed: L. S. Hollister and M. L. Crawford), 272-277.

HOLLISTER, L. S., CRAWFORD, M. L., ROEDDER, E., BURRUSS, R. C., SPOONER, E. T. C. & TOURET, J. (1981) Practical aspects of microthermometry. Short course in fluid inclusions: applications to petrology. (ed: L. S. Hollister and M. L. Crawford), 278-304.

HOLLOWAY, J. R. (1977) Fugacity and activity of molecular species in supercritical fluids. In: Fraser, D. G. (ed) *Thermod. Geol.*, 161-182.

International Handbook of Coal Petrology (1993)

KARTSEN, D. A., NEDKVITNE, T., LARTER, S. R. & BJØRLYKKE, K. (1993) Hydrocarbon composition of authigenic inclusions: application to elucidation of petroleum reservoir filling history. *Geoch. Cosmoch. Acta* 57, 3641-3659.

KORETSKY, C. M., SVERJENSKY, D. A. & SAHAI, N. (1998) A model of surface site types on oxide and silicate minerals based on crystal chemistry: implications for site types and densities,

multi-site adsorption, surface infrared spectroscopy and dissolution kinetics. *Am. J. Sci.* 298, 349-438.

LAFFITTE, P. (1967) Cartographie metalogenique et gites stratiformes: un métallotecte épicontinental. *Econ. Geol.*, 227-233.

LATTANEI, P. (1994) Fluids in ore deposits: evidence from and application of fluid inclusions. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 283-298.

LAWLER, J. P. & CRAWFORD, M. L. (1983) Stretching of fluid inclusions resulting from a low temperature microthermometric technique. *Econ. Geol*, 78, 527-529.

LEACH, D. L., BRADLEY D. & LEWCHUK, M.T. (2001) Mississipy Valley-type lead-zinc deposits through geological time: implications from recent age-dating research. *Mineral. Dep.* 36, 711-740.

LEACH, D. L & SANGSTER, D. F. (1993) Mississipy Valley-type lead-zinc deposits. In: Kirkham R.V., Sinclair W.D., Thorpe R. I., Duke J. M. (eds) *Min. dep. model.* Geol. Assoc. can. Spec. Pap. 40, 289-314.

LEE, M. J., WILKINSON, J. J. & BOYCE, A. J. (2001) Regional fluid inclusion evidence for the evolution of hydrothermal systems in the southern Irish Midlands: a comparison of Zn-Pb deposits and prospects. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 253-255.

LEROY, J. (1979) Contribution to the evaluation of internal pressure in fluid inclusion when they decrepitate. *Bull. Minér.* 102, 584-593.

LI, C-Q., CHEN, H.-H. & LI, S.-T. (2004) Hydrocarbon charging histories of the Ordovician reservoir in the Tahe oil field, Tarim Basin, China. *Journal of Zhejiang* University Science 5 (8), 976-978.

LIN, R. & DAVIS, A. (1988) The chemistry of coal maceral fluorescence: with special reference to the huminite/vitrinite group. *Special Research Report*, SR, 122, 278.

LOVE, L. G. (1967) Diagenesis and the origin of the ores. *Econ. Geol.*, 343-348.

MAYNARD, J. B. & OKITA, P. M. (1991) Bedded barite deposits in the United States, Canada, Germany, and China: two major types based on tectonic setting. *Econ. Geol.* 86, 364-376.

MELKI (1990) MSc. Tunis II, Univ. 107 pp.

MIDDLETON, D., PARNELL, P., CAREY, P. & XU, G. (2000) Reconstruction of fluid migration history in Northwest Ireland using fluid inclusions studies. *J. Geoch. Explor.* 69-70, 673-677.

MORITZ, R., BENCHET, S., STUCKY, P. CHIARADIN, M. SALLIER, B. & LISBOA, H. (2001) Zn-Pb mantos and veins at Domo de yauli, Central Peru: products of the same hydrothermal system with contrasting fluid inclusion characteristics. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 315-318.

MOSER, M. R., RANKIN, A. H. & MILLEDGE, H. J. (1992) Hydrocarbon-bearing fluid inclusions in fluorite associated with the Windy Knoll bitumen deposit, UK. *Geoch. Cosmoch. Acta* 56, 155-168.

MUNZ, I. A. (2001) Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits. *Lithos* 55, nos. 1-4, 229-272.

MUNZ, I. A., ANDRESEN, B. & KIHLE, J. (1997) PVT calculation of hydrocarbon fluid inclusions. *Abstracts.* ECROFI XVI. (ed: M.C. Boiron, J. Pironon), 230-231.

MUNZ, I. A., YARDLEY, B. W. D., BANKS, D. A. & WAYNE, D. (1995) Deep penetration of sedimentary fluids in basement rocks from southern Norway: Evidence from hydrocarbon and brine inclusions in quartz veins. *Geoch. Cosmoch. Acta* 59, 239-254.

NICOLI, P. (1967) Les gisements stratiformes de plomb-zinc-barytine-fluorine de Tunisie. *Econ. Geol.*, 322-325.

NICOLI, P. (1970) Gîtologie des concentrations minérales stratiformes.

NORONHA, F. (1983) Estudo metalogénico da área tungstífera da Borralha. 413 pp. Universidade do Porto, Porto. Tese de Doutoramento.

NORONHA, F., CHAREF, A., SOUSA, M. & GUEDES, A. (2002) "The Stratiform Carbonate-Hosted F-Ba Deposit of Hammam Zriba (Tunisia): Some Genetic Considerations", Workshop on Geodynamic setting of major basin-hosted lead-zinc mineral provinces, Universistat Autònoma de Barcelona.

OAKES, C. S., BODNAR, R. J. & SIMONSON, J. D. (1990) The system NaCl-$CaCl_2$-H_2O: I. The ice liquidus at 1 atm total pressure. *Geoch. Cosmoch. Acta* 54, 603-610.

PAGEL, M., WALGENWITZ, F. & DUBESSY, J. ( ) Fluid inclusions in oil and gas-bearing sedimentary formations. Reprint: "Thermal modelling in sedimentary basins" (edited: J. Burrus. Edition Technip), 565-583.

PARNELL, J., MIDDLETON, D. HONGHAN, C. & HALL, D. (2001) The use of integrated fluid inclusion studies in constraining oil charge history and reservoir compartmentation: examples from the Jeanne d'Arc Basin, offshore Newfoundland. *Mar. Petrol. Geol.* 18, 535-549.

PIRONON, J., CANALS, M., DUBESSY, J., WALGENWITZ, F. & LAPLACE-BUILHE, C. (1997) Volumetric analysis of hydrocarbon inclusions: new data for P-T-X reconstruction of petroleum reservois. *Abstracts.* ECROFI XVI (ed: M.C. Boiron, J. Pironon), 270-271.

PIRONON, J., THIÈRY, R. TEINTERIER, S. & GRIMMER, J. O. W. (2001) Coexisting aqueous and hydrocarbon fluid systems examples and P-V-T-X implications. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 365-368.

PIRONON, J. WALGENWITZ, F. & MARTEL, F. (2001) PIT (Petroleum inclusion thermodynamic): a new modelling tool for the characterisation of the hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 473-476.

PIZNYUR, A. V., PAULUM, M. M. & ZINCHUK, N. N. (2001) Evolution of the endogenous ore-bearing fluids (according as mineral inclusion). ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº ,. 369-372.

POWELL, R. (1985) Geothermometry and geobarometry: a discussion. *J. Geol. Soc. London* 142, 29-38.

ROEDDER, E. (1963) Studies on fluid inclusions: freezing data and their interpretation. *Econ. Geol.* 58, 167-211.

ROEDDER, E. (1967) Environment of deposition of stratiform (Mississipy Valley type) ore deposits, from studies of fluid inclusions. *Econ. Geol.*, 349-362.

ROEDDER, E. (1972) Composition os fluid inclusions. *U.S. Geol. Surv.*, Prof. Paper, 440JJ, 164p.

ROEDDER, E. (1981) Origin of fluid inclusions and changes that occur after trapping. Short course in fluid inclusions: applications to petrology. (ed: L. S. Hollister and M. L. Crawford), 101-137.

ROEDDER, E. (1984) Fluid inclusions. Mineralogical Society of America (Series Editor: Paul H. Ribbe). *In Rev. Mineral.* 12, 644 p.

ROLLAND, G. (1885) Sur la montagne et la grande faille du Zaghouan (Tunisie). *C. R. Acad. Sci. Paris* 101, 1187-1190.

ROUTHIER, P. (1967) Priliminaires methodologiques en vue d'une discussion sur le genese. *Econ. Geol.*, 253-254.

RUSSELL, R. D. & SLAWSEN, W. F. (1967) Constrains imposed by lead isotope abundance on the origin of ores. *Econ. Geol.*, 383-391.

RYDER, A.G., GLYNN, T. J. & FEELY, M. ( ) Influence of chemical composition on the fluorescence lifetimes of crude petroleum oils.
http://www.physics.nuigalway.ie/People/ARyder/index.html

SAMI, L. & KOLLI, O. (2003) Ba, F, Pb, Zn mineralization in the neighbourhood of Dj. Mesloula (northeastern Algeria). Mineral Exploration and Sustainable Development, (ed: Eliopoulus *et al.*), 713-716.

SANGSTER, D. F. (1990) Mississipy Valley-type and SEDEX lead-zinc deposits: a comparative examination. *Trans. Inst. Mining Metall.* B: B21-B42.

SHEPHERD, T. J., RANKIN, A. H. & ALDERTEN, D. H. M. (1985) A practical guide to fluid inclusion studies (ed: Blackie & Son, Ltd.), 239 p.

SHUBERT, F., DIAMOND, L.W. & TÓTH, T. M. (2001) Hydricarbon-bearing fluid inclusions in fracture-filling quartz from the crystalline basement of the Pannomian basin (SE Hungary). ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 395-398.

SOAVE, G. (1972) Equilibrium constants from a modified Redlich-Kwong equation of state. *Chem. Eng. Sci.* 27, 1197-1203.

SOUISSI, F., DANDURAND, J. L. & FORTUNÉ, J. P. (1997) Thermal and chemical evolution of fluids during fluorite deposition in the Zaghouan province, north-eastern Tunisia. *Mineral. Dep.* 32, 257-270.

SOUSA, M. (2002) Estudo de Mineralizações de F, Ba, Zn e Pb – Metalografia e Estudo de Inclusões Fluidas. O exemplo de Hammam Zriba (Tunísia). Estágio Profissionalizante, Faculdade de Ciências, Universidade do Porto.

SOUSA, M., NORONHA, F., CHAREF, A., GUEDES, A. (2003) "Fluids Associated With F-Ba Mineralizations of The Stratiform Carbonate-Hosted Deposit of Hammam Zriba (Tunísia)", XVII ECROFI, University of Szeged, Budapest

SPAN, R. & WAGNER, W. (1996) A new equation of state for carbon dioxide covering the fluid region from the triple-point temperature to 1100 K at pressure up to 800 MPa. *J. Phys. Chem. Ref. Data* 25, 1509-1596.

SPIRAKIS, C. S. (2004) "Fluorite deposits at Encantada–Buenavista, Mexico: products of Mississipy Valley-type processes" [Ore Geol. Rev. 23 (2003), 107-124] – a discussion. *Ore Geol. Rev.* 25, 327-328.

STASIUK, L.D. & SNOWDON, L.R. (1997) Fluorescence micro-spectroscopy of synthetic and natural hydrocarbon fluid inclusions: crude oil chemistry, density and application to petroleum migration. *Appl. Geoch.* 12, 229-241.

STERNER, S. M., HALL, D. L. & BODNAR, R.J. (1988) Synthetic fluid inclusions. V. Solubility relations in the system NaCl-KCl-H_2O under vapor-saturated conditions. *Geoch. Cosmoch. Acta* 52, 989-1005.

TAUPITZ, K-C. (1967) Textures in some stratiform lead-zinc deposits. Econ. Geol., 90-107.

TEICHMÜLLER, M. & DURAND, B. (1983) Fluorescence microscopical rank studies on liptinites and vitrinites in peats and coals, and comparison with results of the Rock-Eval pyrolysis. Internat. *J. Coal Geol.* 2, 197-230.

TENTURIER, S. & PIRONON, J. (2001) Quartz cementation and hydrocarbon emplacement examples from the Garn formation, Haltenbanken, Mid-Norway. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F. Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 431-433.

THIBIEROZ, J. (1974) Hammam Jedidi et Hammam Zriba: Etude géologique et miniére de deux gisements stratifirms dans le cadre de la province fluorée tunisienne ; l'association des concentrations fluorées aux surfaces d'émmersion. Thèse de 3^e cycle Univ. Paris VI, 432 p.

THIBIEROZ, J. (1976) Reconstitution chronologique du rôle des surfaces d'émersion dans l'histoire du gisement de fluorine de Hammam Zriba (région de Zaghouan – Tunisie). *Mém. H. Série Soc. Géol. France* 7, 33-37.

THIÉRY, R., Van den KERKHOFF, A. M. & DUBESSY, J. (1994a) VX properties of CH_4-CO_2 and CO_2-N_2 fluid inclusions: modelling for T< 31ºC and P< 400 bars. *European J. Miner.* 6, 753-771.

THIÉRY, R., VIDAL, P. & DUBESSY, J. (1994b) Phase equilibria modelling applied to fluid inclusions: Liquid-vapor equilibria and calculation of the molar volume in the CO_2-CH_4-N_2 system. *Geoch. Cosmoch. Acta* 58, 1073-1082.

THIÉRY, R., PIRONON, J., WALGENWITZ, F. & MONTEL, F. (2000) PIT (Petroleum Inclusion Thermodynamic): a new modelling tool for the characterization of hydrocarbon fluid inclusions from volumetric and microthermometric measurements. *J. Geochem. Expl.* 69-70, 701-704.

TIXERON, M. (1966) Hammam Zriba: fluorire et barytine. *Ass. Serv. Geol. Afr. Réunion de Tunis*, livret-guide exc. B.

TOUHAMI, A. (1979) Contribuition à l'étude géologique et métalogénique de la province fluorée tunisienne ; rôle de l'altération superficielle dans la formation des concentrations fluorées. Thèse de 3^{e} cycle Univers. Tunis, 321 p.

TOURAY, J. C. (1971) Deep origin CO2 trapped by healed cracks in epigenetic tunisian fluorites. *Soc. Min. Géol. Japon. Spec. Issue* 3, 351-354 (Proc. I.M.A.-I.A.G.O.D Meetings 70, I.A.G.O.D Vol.)

TOURAY, J. C. (1989) Etudes des inclusions fluids et modélisation de la genèse des gîtes du type Mississipy Valley. Chron. Rech. Min. 495, 21-30.

TOURAY, J. C. & YAJIMA, J. (1967) Hydrocarbons liquids inclus dans des fluorines tunisiennes. *Mineral. Deposita* 2, 286-290.

TOURET, J. L. R. (1994) Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic environments. IMA: Short course on fluid inclusions. (ed: Benedetto De Vivo & Maria Luce Frezzotti), 251-270.

TRITLLA, J., GONZÁLEZ-PARTIDA, E., LEVRESSE, G., BANKS, D. and PIRONON J. (2004) "Fluorite deposits ate Encantada–Buenavista, Mexico: products of Mississipy Valley-type processes" [Ore Geol. Rev. 23 (2003), 107-124] – a reply. *Ore Geol. Rev.* 25, 329-332.

TRUILLET, R. (1981) La substituition tectonique de couverture de Hammam Zriba (Tunisie orientale). *C. R. Acad. Sc. Paris* 292, 1319-1381

TURKI, M. M. (1980) La « faille de Zaghouan » est la résultant de structures superposées (Atlas tunisien central). *Bull. Soc. Geol. Fr.*, XXII, 3, 321-325.

TURKI, M. M. (1985) Polycinématique et contrôle sédimentaire associé sur la cicatrice Zaghouan-Nebhana. Thése Doct. Univers. Tunis

WEISBROD, A. (1981) Fluid inclusions in shallow intrusives. Short course in fluid inclusions: applications to petrology (ed: L. S. Hollister and M. L. Crawford), 241-271.

WEISBROD, A. POTTY, B. & TOURAY, J. (1976) Les inclusion en géochimie-petrologie: tendences actuelles. *Bull. Soc. Franç. Minér. Cristallogr.* 99, 140-152.

WILLIAM-JONES, A.E. & SAMSON, I. M. (1990) Theoretical estimation of halite solubility in the system NaCl-$CaCl_2$-H_2O: Applications to fluid inclusions. *Canadian Mineralogist* 28, 299-304.

VALERA, R. (1966) Il giacimento di Hammam Zriba (Tunisia). *Resoc. Ass. Mineraria Sarda. Cagliari, Anno* LXXI, 7, 3-42.

VAN der KERKHOF, A., M. & HEIN, U. F. (2001) Fluid inclusion petrography. *Lithos* 55, nos. 1-4, 27-47.

VITYK, M., POTTORF, R. J., GRAY, G.G., LERESE, D. and HALL, D. (2001) Application on synthetic fluid inclusions to hydrocarbon system analysis. ECROFI XVI. *Abstracts.* (ed : F.

Noronha, A. Dória and A. Guedes). Fac. Ciências do Porto. Dep. de Geologia. Memória nº 7, 455-456.

ZHANG, Y. G. & FRANTZ, J. D. (1987) Determination of the homogenization temperatures and densities of supercritical fluids in the system NaCl-KCl-$CaCl_2$-H_2O using synthetic fluid inclusions. *Chem. Geol.* 64, 335-350.

ZWART, E. W. & TOURET, L. R. (1994) Melting behaviour and composition of aqueous fluid inclusions in fluorite and calcite: applications within the system H_2O-$CaCl_2$-NaCl. *Eur. J. Mineral.* 6, 773-786.

http://www.lib.utexas.edu/tunisia.html

Anexo

Tabela II-1 – Síntese dos resultados microtermométricos dos três tipos deposicionais de fluorite em Hammam Zriba

Petrografia				Microtermometria									
Tipo Deposicional	Tipo de Fluido	Génese IF	Flw	TfCO2	Tfl	TfG	% eq. NaCl	ThCO2	Modo	Thp	Modo	Th	Modo
FI	Lw	P	0,90 a 0,95		-75,2 a -46,8	-16,6 a -5,5	8,6 a 21,8					112 a 170	L
		PS	0,90 a 0,95		-55,5 a -51,4	-13,4 a -8,2	11,9 a 17,3					128 a 153	L
		S	0,90 a 0,95		-59,7 a -46,4	-18,1 a -5,6	8,7 a 21,0					111 a 154	L
	Lp-(c)	P	0,0	-62,5				n.d.				99 a 142	L
		PS	0,0	n.d.				n.d.				125	L
		S	0,0	-59,3 a -58,9				n.d.				92 a 154	L
	Lw-p-(c)	P	0,60	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		107	L		
		S	0,50	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		143	L		
	Lp-w-(c)	PS	0,10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.		130	L		
		S	0,10							143	L		
FII	Lw	P	0,90 a 0,95		-76,9 a -44,2	-22,3 a -1,8	3,1 a 24,1					133 a 162	L
		S	0,90		-58,5 a -48,3	-20,6 a -10,1	14,0 a 22,8					132 a 151	L
	Lp-(c)	P	0,0	n.d.				n.d.				109 a 134	L
		S	0,0	n.d.				n.d.				130 a 134	L
	Lw-p-(c)	P	0,50 a 0,90	n.d.	-58,5 a -48,8	-22,1 a -1,1	1,9 a 24,0	n.d.		104 a 143	L		
	Lp-w-(c)	P	0,10 a 0,40	n.d.	-57,7 a -54,6	-17,3 a -11,2	15,2 a 20,5	n.d.		124 a 137	L		
		S	0,10 a 0,40	n.d.	-57,7 a -55,4	-10,8	14,8	n.d.		132 a 137	L		
FIII	Lw	P	0,90 a 0,95		-65,6 a -47,8	-23,8 a -8,1	11,8 a 25,2					99 a 156	L
		S	0,90 a 0,95		-55,2 a -47,5	-13,2 a -5,9	9,1 a 17,1					115 a 158	L
	Lp-(c)	P	0,0	n.d.				n.d				107 a 124	L
	Lw-p-(c)	P	0,70	n.d.	-54,9 a -54,2	-14,9 a -12,8	16,7 a 18,6	n.d.		108 a 112	L		
	Lp-w-(c)	P	0,10 a 0,50	n.d.	-54,4 a -53,3	-15,2 a -12,9	16,8 a 18,8	n.d.		97 a 134	L		

Tabela II-2 – Síntese dos resultados da composição e densidade globais obtidos nas IF dos três tipos deposicionais de fluorite de Hammam Zriba (composições expressas em moles% e densidade em $g.cm^{-1}$)

			Composição Global			
Tipo Deposicional	Tipo de FLuido	Génese IF	H20	NaCl	CaCl2	d
FI	Lw	P	85,4 a 94,5	5,5 a 14,6	0,08 a 0,088	0,96 a 1,06
		PS	88,6 a 92,3	7,7 a 11,4		1,01 a 1,04
		S	85,9 a 94,5	5,5 a 14,1	0,09	0,98 a 1,06
FII	Lw	P	83,8 a 98,1	1,9 a 16,2	0,1	0,95 a 1,09
		S	84,6 a 90,8	9,2 a 15,4		1,02 a 1,09
FIII	Lw	P	83,1 a 92,4	7,7 a 16,9	0,01 a 0,06	0,99 a 1,12
		S	88,7 a 94,2	5,8 a 11,3		0,97 a 1,05

Tabela II-3 – Síntese dos resultados microtermométricos da fluorite e das barites de Bou Jaber

Petrografia				Microtermometria									
Tipo Deposicional	Tipo de Fluido	Génese IF	Flw	TfCO2	Tfl	TfG	% eq. NaCl	ThCO2	Modo	Thp	Modo	Th	Modo
FI	Lw	P	0,95		-67,3 a -51,1	-21,8 a -8,1	12,0 a 25,1					101 a 129	L
		S	0,90 a 0,95		-67,5/-48,2	-26,7 a -14,5	18,1 a 26,8					87 a 131	L
	Lp-(c)	P	0,0									102 a 110	L
		S	0,0	-61,7 a -55,1				-4,4 a 14,0	L			69 a 130	L
	Lw-p-(c)	S	0,50 a 0,90	-81,8	-68,2 a -50,3	-26,1 a -9,1	13,0 a 25,5						
	Lw-c	P	0,50	-60,5	-55,8	n.d.	n.d.	n.d.				n.d.	
	Lc	P	0,0	-59,9				28,9	L				
		S	0,0	-66,3 a -57,7				-5,53 a 28,2	L				
BII	Lw	P	0,90 a 0,95		-74,5 a -33,6	-22,4 a 0,0	0,0 a 24,5					92 a 198	L
		PS	0,90 a 0,95		-45,8 a -39,8	-5,6 a -1,0	1,7 a 8,7					146	L
BIII	Lw	P	0,50 a 0,95		-68,3 a -33,3	-25,6 a -6,7	10,1 a 26,2					105 a 355	L
		PS/S	0,50 a 0,95		-57,6 a -50,3	-20,8 a -1,8	3,1 a 22,9					n.d.	
	Lp-(c)	P	0,0	-60,8 a -58,2				14,5	L			149 a 295	L
								5,8 a 14,8	V				
	Lc	P	0,0	-66,1 a -58,3				21,4	L			n.d.	
	Lw-p-(c)	P	0,50 a 0,70	n.d.	-55,8 a -52,1	-16,2 a -10,7	15,2 a 19,6	n.d.		n.d.			
	Lw-c	P	0,50 a 0,70	-59,7 a -57,5	-52,5 a -27,7	-2,4	4,0	-7,2 a +5,9	L			n.d.	

Tabela II-4 – Síntese dos resultados da composição da fase volátil e da composição e densidade globais obtidos nas IF da fluorite e das barites de Bou Jaber (composições expressas em moles% e densidade em $g.cm^{-1}$)

			Composição da fase volátil			Composição Global					
Tipo Deposicional	Tipo de FLuido	Génese IF	CO2	CH4	dv	CO2	CH4	H2O	NaCl	CaCl2	d
FI	Lw	P						84,0-92,4	7,7-16,0	0,03-0,05	1,02-1,13
		S						82,4-87,1	12,9-17,6	0,03-0,4	1,07-1,19
	Lp-(c)	P	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d				
		S	n.d.	n.d	n.d	n.d	n.d				
	Lw-p-(c)	S	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
	Lw-c	P	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d	n.d
	Lc	P				100	0,0				0,60
		S				84,4-100	0,0-15,7				0,65-0,78
BII	Lw	P						84,2-94,6	15,5-5,8		0,98-1,16
		PS						94,5	5,5		0,98
BIII	Lw	P						83,3-91,9	8,1-8,3		0,89-1,13
	Lc	P				59,8-100	0,0-40,2				?-0,76
	Lw-c	P	73,3-100	0,0-26,8	0,89-1,0	7,0-17,5		82,5-93,0			0,98-1,0