

**ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS EM HEMATITAS E  
EM QUARTZO ASSOCIADO DAS FORMAÇÕES  
FERRÍFERAS DA SERRA DO SAPO,  
CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO, MG**

**Tatiana Aparecida Fernandes de Lima**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre

**2009**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Comissão Nacional de Energia Nuclear  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO DA TECNOLOGIA NUCLEAR  
**Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações,  
Minerais e Materiais**

**ESTUDO DE INCLUSÕES FLUIDAS EM HEMATITAS E EM QUARTZO  
ASSOCIADO DAS FORMAÇÕES FERRÍFERAS DA SERRA DO SAPO,  
CONCEIÇÃO DO MATO DENTRO, MG**

**Tatiana Aparecida Fernandes de Lima**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciência e  
Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, como requisito  
parcial à obtenção do Grau de Mestre

Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Minerais e Meio  
Ambiente

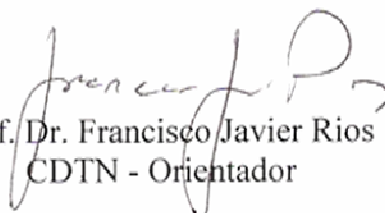
Orientador: Dr. Francisco Javier Rios

Co-Orientador: Dr. Carlos Alberto Rosière

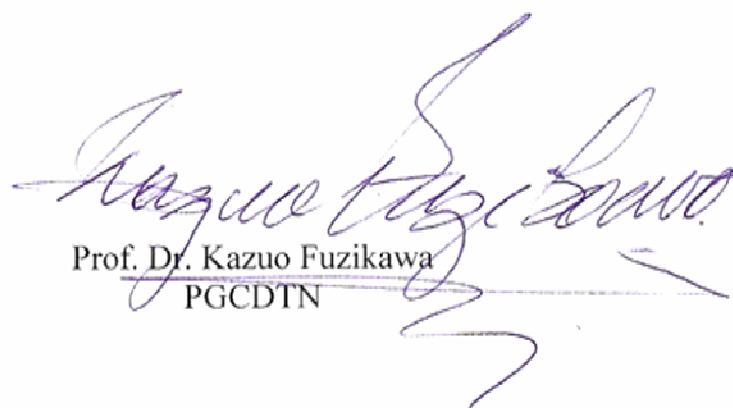
Belo Horizonte  
2009


A presente dissertação de mestrado, intitulada “Estudo de inclusões fluidas em hematitas e em quartzo associado às formações ferríferas da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, MG”, de autoria de **Tatiana Aparecida Fernandes de Lima**, foi defendida e aprovada em 25 de agosto de 2009, pela Banca Examinadora abaixo assinada.

Belo Horizonte, 25 de agosto de 2009.

  
Prof. Dr. Francisco Javier Rios  
CDTN - Orientador

  
Prof. Dr. Carlos Alberto Rosière  
UFMG – Co-Orientador

  
Prof. Dr. Kazuo Fuzikawa  
PGCDTN

  
Prof. Dra. Rosaline Cristina Figueredo e Silva  
UFMG



*Dedico este trabalho a todos meus amigos  
e aqueles que de alguma forma contribuíram  
para meu crescimento acadêmico ou pessoal.  
Em especial, à minha família e a minha “vida”.*

## AGRADECIMENTOS

---

---

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro concedido durante o mestrado e ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN/CNEN) pela infra-estrutura e suporte técnico.

Ao meu orientador Dr. Francisco Javier Rios pela confiança, credibilidade, paciência e incentivo ao meu contínuo aprimoramento profissional, principalmente por acreditar na interdisciplinaridade.

Ao prof. Dr. Carlos Alberto Rosière pela colaboração, discussão, críticas e a oportunidade para prosseguir no âmbito das pesquisas.

A empresa MMX Mineração & Metálicos S.A. pela parceria, em especial aos geólogos Henrile P. Meireles, Polianna Costa e Marcelo Mendes.

Ao Dr. Luis A.R. Garcia pelo durante as análises de microsonda eletrônica. Ao prof. Dr. Bruce W.D. Yardley e sua equipe pela realização das análises de LA-ICP-MS. Ao Vassily K. Rolim pela fornecimento do mapa da Serra do Sapo. Ao Chico Rocha pela confecção das lâminas e ensinamento do árduo trabalho.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação e todos da equipe da secretaria: Roseli, Fulgêncio e Cerisa. Agradeço também à Nívia, Lenira e Virgínia pela revisão das referências bibliográficas.

A “família” do Laboratório de Inclusões Fluidas e Metalogênese (LIFM): James, Kazuo, prof. Correia Neves, Alexandre, Ana Rosa, Aurélio, Lucas pelo apoio e as valiosas discussões. Em especial, agradeço muito, muito as amigas Lucilia, Beth Kerpe e Soninha pelos incondicionais suportes técnico-científico e pessoais, dedico esse trabalho a vocês.

Aos meus colegas do CDTN e da turma de mestrado 2007 e 2008 o meu especial agradecimento. Essa caminhada foi muito melhor e mais divertida com todos vocês.

A toda minha família pelo imenso apoio, força, carinho e compreensão no decorrer dessa trajetória. Aos amigos Fred, Lilian, Gustavo e Giovanni por acreditarem sempre no meu sucesso.

Ao Breno por todo amor, compreensão, apoio, confiança, auxílio e principalmente incentivos; enfim por fazer dos meus dias melhores ao seu lado (apesar da distância BH-RJ).

*“Nossas dúvidas são traidoras  
e nos fazem perder o bem  
que poderíamos conquistar  
se não fosse o medo de errar”*  
(William Shakespeare)

Estudo de Inclusões Fluidas em Hematitas e em Quartzos Associado das Formações Ferríferas da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, MG

Tatiana Aparecida Fernandes de Lima

RESUMO

Neste trabalho foram estudadas as inclusões fluidas associadas ao minério de ferro da Formação Serra do Sapo, Supergrupo Espinhaço, Conceição do Mato Dentro, MG. No setor foram diferenciadas três gerações de hematita, denominadas Hematita I, II e III. A Hematita I (mais antiga), de textura granoblástica, apresenta evidências de processos de recristalização parcial ou total, gerados durante um processo metamórfico, e não está associada ao quartzo. Sob radiação infravermelha mostrou um bom grau de transparência. A Hematita II, ou tabular, apresenta morfologia micro lamelar precipitada no interstício associada aos cristais de quartzo, porém sem formar veios. Não se comporta como transparente sob a luz infravermelha. Por último, a Hematita III (mais nova, especularita) apresenta hábito especular e está associada aos veios de quartzo que cortam as gerações anteriores. Isto fortalece a tese de que essa geração teria crescido condicionada ao fluido do veio, precipitando-se por diminuição da pressão de confinamento do fluido nas fraturas. Os veios de quartzo/especularita envolvem ou estão associados a outros minerais (clorita, moscovita, calcita e granadas) que não aparecem nos corpos de minério.

A microtermometria em inclusões fluidas (IF) indica, que o fluido que originou a Hematita I (granular) pertencia ao sistema aquo-salino  $H_2O-NaCl-FeCl_2$ , com temperaturas mínimas de 220-240°C e com salinidade média de 17% p/p equiv. NaCl. Já a Hematita III (especularita) foi formada por soluções pertencentes ao sistema aquo-salino  $H_2O-NaCl-KCl$  (provavelmente com  $MgCl_2$ ) a temperaturas entre 240-260°C e salinidades de 10-12% p/p equiv. NaCl. Dados de LA-ICP-MS nos fluidos mostram, em termos de elementos traços, maior concentração de K, Ca, Ba, Mg, Mn, Cu, Pb, Sr e As nas soluções da Hematita I, quando comparados com os da especularita. Destaca-se que, esta última geração, apresenta maiores teores de Li e Sb. O cruzamento do geotermômetro clorita (255°C) com as isócoras dos fluidos forneceu pressões de 0,56 Kbar e 0,26 Kbar para a formação das hematitas granulares e especularíticas respectivamente. Isto sugere que o minério de ferro foi originado entre 750m de profundidade (especularita) e 1500m (hematita granular). Interessante destacar que, embora os testes de esmagamento mostrem uma clara liberação de gases, sugerindo a presença de fases carbônicas nos fluidos dos veios de quartzo, não foi

constatada a presença desses compostos moleculares nas soluções primárias através da espectroscopia Raman.

A diferença de salinidade e de cátions entre os fluidos da hematita granular e os de quartzo-especularita indica a participação de diferentes fluidos durante essas fases específicas da mineralização. Os fluidos participantes do minério de ferro da Serra do Sapo, CMD, são diferentes de outros fluidos mineralizadores associados a depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero estudados até agora. Uma comparação com as soluções que geraram hematitas granulares e especularitas da Mina Conceição evidenciam tendências de processos evolutivos inversos (em termos de salinidades e temperaturas de homogeneização), embora haja coincidências sobre a ausência de fases carbônicas na formação do minério ferrífero nas duas áreas.

Fluid Inclusions Studies in Hematites and Associated Quartz to Iron Formations from Serra do Sapó, Conceição do Mato Dentro, MG

Tatiana Aparecida Fernandes de Lima

ABSTRACT

Fluid inclusions associated with the iron ore from Serra do Sapó Formation, Espinhaço Supergroup, Conceição do Mato Dentro, in Minas Gerais, state were studied. Three hematite generations, named hematite I, II and III were found in these ores. The Hematite I (earliest), with granoblastic texture shows. Partial or total recrystallization texture, was generated during the metamorphic process forming the Hematite I which is the oldest and not associated with quartz. Under infrared radiation these hematite showed a good degree of transparency. The Hematite II or tabular with micro lamellar morphology was precipitated in the interstitium associated with quartz, but without forming veins and not being transparent under infrared light and also not behaving as transparent under infrared light. Finally, the Hematite III (latest, specularite) has a totally specular habit and is associated with quartz veins which cut the earlier generations. This supports the argument that this hematite generation would have grown subject to veins fluid, by the precipitation of fluid in fractures for decrease pressure confinement. The quartz/specularite veins involve or are associated with other minerals (chlorite, muscovite, calcite and garnet) that not appear in the ore bodies.

Fluid inclusions (FI) microtermometry indicates that the fluid that has originated the Hematite I (granular) belonged to the aquo-salt system  $H_2O-NaCl-FeCl_2$ , with minimum temperatures of 220-240°C and average salinity of 17 wt% NaCl eq. However, the Hematite III (specularite) was formed by solutions belonging to the aquo-salt  $H_2O-NaCl-KCl$  (probably with  $MgCl_2$ ) at temperatures between 240-260°C and salinities of 10-12 wt% NaCl eq. NaCl. LA-ICP-MS data in fluids, in terms of trace elements, show higher concentration of K, Ca, Ba, Mg, Mn, Cu, Pb, Sr and As in Hematite I solutions when compared to the specularite. This last generation has higher contents of Li and Sb. The geothermometry chlorite (255°C) intersection with the fluid isochoric supplied pressure of 0.56 kbar and 0.26 kbar for the granular and specularitic hematite formation, respectively. This suggests that iron ore was produced from a depth of 750m (specularite) and 1500m (granular hematite). It is interesting to note that, although the crushing tests show an incontestable gases release suggesting the presence of carbon phase in the quartz veins fluid, these molecular compounds was not found in the primary solutions.

The difference in salinity and ions between granular hematite and quartz-specularite fluids suggests the involvement of different fluids during specific mineralization stages. The ore-forming fluids of Serra do Sapo iron formation, CMD, are different from other mineralizing fluids associated with Iron Quadrangle deposits. The comparison with the Mine Conceição solutions, that generate granular hematite and specularite, evidence contrary evolutive trends (regarding salinity values and homogenization temperatures), although there are coincidences on the carbon phases absence in the ore ferriferous formation in both areas.

## LISTA DE FIGURAS

---

- FIGURA 1** - Mapa mostrando a divisão em folhas 1:100.000 do Estado Minas Gerais, com realce (em cinza claro) das principais folhas com ocorrências do Supergrupo Espinhaço. As folhas citadas correspondem m=Monte Azul, r=Rio Pardo de Minas, d=Diamantina, p=Presidente Kubitschek, s=Serro, c=Conceição do Mato Dentro (KNAUER, 2007)..... 27
- FIGURA 2** - Mapa com distribuição do Supergrupo Espinhaço no Cráton do São Francisco e a Faixa Araçuai (A), destacando-se o Setor Meridional e seu detalhamento geológico, enfatizando localização do QF (B) (modificado de KNAUER, 2007)..... 29
- FIGURA 3** - (A) Mapa de localização; (B) imagem de satélite da região; e (C) fotografia da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, MG - Brasil (Fonte DER/MG e Google Earth). . 33
- FIGURA 4** - (A) Mapa geológico da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, MG - Brasil, com localização dos pontos amostrados nesse trabalho (modificado de V. K. ROLIM). (B) Perfil geológico esquemático da Serra do Sapo (informações concedidas por H. P. MEIRELES e desenhado por L. E. D. AMORIM et al., 2009)..... 35
- FIGURA 5** - Imagens da (A) Platina FTIR600 – Linkam; (B) câmera QUICAM fast 1394 da QIMAGING™, (C) platina acoplada ao microscópio de infravermelho; (D) controladores TMS94 - Linkam e o LNP94/2 - Linkam; e (E) o sistema completo agrupado. .... 50
- FIGURA 6** - Imagem da (A) janela do software Linksys 32 – Linkam, (B) com o gráfico gerado e (C) a foto para produção do vídeo. .... 52
- FIGURA 7** - Fotomicrografias da IF à temperatura de 26,7°C externa à platina (A); inserida na platina U.S.G.S. (B); e inserida na platina FTIR600 - Linkam (C). Amostra MMX 2 - Serra do Sapo. .... 53
- FIGURA 8** - Hematita bandada com quartzo (*BIF*). .... 54
- FIGURA 9** - Aspectos texturais das diferentes amostras de formações ferríferas da Serra do Sapo: (A) hematita friável (B) hematita semi-compacta (C) hematita compacta (D) especularita. .... 55
- FIGURA 10** - (A) Fotografia da amostra FSP01-PROF.213,05m e (B) sua respectiva lâmina delgada..... 56
- FIGURA 11** - Fotografia das lâminas das amostras (A) MMX1, (B) MMX2. .... 57
- FIGURA 12** - Fotomicrografia da Hematita I (hematita granular) sob luz transmitida IV. Amostra FSP01-PROF.213,05m. .... 58
- FIGURA 13** - Fotomicrografias da Hematita I granular (A) destaque para os cristais alongados e equigranulares. (B) Ilustração do cristal equigranular com recristalização nas bordas e núcleo preservado com presença de IF. Outro cristal com IF no centro (C) sob LT, (D).sob LR,. Amostra FSP01-PROF.213,05m. .... 59
- FIGURA 14** - Fotomicrografia da Hematita II (hematita tabular/especularítica) com quartzo, sob luz refletida. Amostra FSP01-PROF.213,05m. .... 60
- FIGURA 15** - Fotomicrografia da Hematita III (especularita) no veio de quartzo sob a radiação NIR com luz transmitida. Amostra MMX2..... 61
- FIGURA 16** - Fotomicrografias da Hematita III (especularita) associada à mica e a clorita (A) sob a luz transmitida polarizada; (B) luz refletida. Amostra FSP01-PROF.231,15m..... 61



<b>FIGURA 17</b> - Fotomicrografia da especularita (cor preta) intercalada com o quartzo (cor cinza) (BIF) sob a radiação IV LT (A) e imagem da superfície da lâmina digitalizada (B). Amostra FSP28-PROF.156,00m. ....	62
<b>FIGURA 18</b> - Fotomicrografias mostrando a formação da especularita em relação ao quartzo sob a radiação IV. (A) placa de especularita formando-se sob quartzo entre os cristais – LT (B) imagem “A” com LR (C) filete de especularita ligando os dois - LT (D) especularita contendo cristais de quartzo - LT (E) quartzo envolvendo a hematita - LT. Amostra FSP01-PROF.231,15m. ....	63
<b>FIGURA 19</b> - Fotomicrografias da especularita com linhas de crescimento sob a radiação IV (A) LT (B) LR. Amostra MMX2. ....	64
<b>FIGURA 20</b> - Fotomicrografia do quartzo envolvido pela especularita sob a radiação NIR com luz transmitida. Amostra FSP01-PROF.231,15m. ....	65
<b>FIGURA 21</b> - Fotomicrografias do quartzo límpido e não límpido sob a radiação NIR com (A) luz transmitida e (B) luz refletida. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	66
<b>FIGURA 22</b> - (A) Fotomicrografia dos quartzos não límpidos separados pela hematita sob a radiação IV LT (B) imagem da lâmina digitalizada. Amostra FSP28-PROF.78,00m - Serra do Sapo, CMD. ....	67
<b>FIGURA 23</b> - Fotomicrografia do quartzo em contato irregular com a clorita sob a radiação NIR (LR). Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	67
<b>FIGURA 24</b> - Fotomicrografias da clorita nas amostras estudadas sob a radiação NIR (A) LT e (B) LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	68
<b>FIGURA 25</b> - Fotomicrografias da clorita nas amostras estudadas sob a radiação NIR (A, B) LT; (C) LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	69
<b>FIGURA 26</b> - Fotomicrografias da calcita nas amostras estudadas (A, B, C) LT e (D) LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	70
<b>FIGURA 27</b> - Fotomicrografias das granadas nas amostras estudadas sob a radiação NIR LR (A) granada em contato com a hematita inserida no quartzo (B) granada envolvendo o quartzo (corona) e dentro do veio de calcita. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	71
<b>FIGURA 28</b> - Fotomicrografias do veio de óxido de manganês no quartzo sob a radiação NIR (A) um aglomerado do óxido de manganês com a LT (B) imagem “A” com LR (C) óxido de manganês com hematita - LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	72
<b>FIGURA 29</b> - Fotomicrografia da apatita no veio de carbonato sob a radiação NIR (LR). Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	73
<b>FIGURA 30</b> - Espectrogramas da hematita obtidos na ME em duas amostras diferentes mostrando os seus principais constituintes. Amostras FSP28-PROF.78,00m e FSP28-PROF.156,00m - Serra do Sapo, CMD. ....	75
<b>FIGURA 31</b> - Imagem da hematita I obtida na ME (A) presença de buracos na área analisada; (B) aspecto do setor analisado. Amostras FSP01-PROF.213,05m - Serra do Sapo, CMD. ....	76
<b>FIGURA 32</b> - Sistema hexagonal, classe trigonal romboédrico, forma cristalográfica da hematita (Imagem retirada de BARTHELMY, 2009; MACHADO et al, 2009). ....	77

<b>FIGURA 33</b> - Estrutura do quartzo com os tetraedros em 3D e forma cristalográfica do quartzo, sistema trigonal trapezoédrica (Imagem retirada de BARTHELMY, 2009; MACHADO et al, 2009). .....	78
<b>FIGURA 34</b> - Espectrograma da clorita obtido na ME mostrando os seus principais constituintes. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.....	78
<b>FIGURA 35</b> - Diagrama de classificação das cloritas para as amostras estudadas (gerado com o programa MINPET, versão 2002). .....	80
<b>FIGURA 36</b> - Espectrograma da mica obtido na ME mostrando os seus principais constituintes. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.....	81
<b>FIGURA 37</b> - (A) Imagem obtida na ME da área analisada com granada; (B) a mesma área vista ao microscópio óptico sob LR; e (C) na LT. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	83
<b>FIGURA 38</b> - Distribuição e classificação dos cristais de granada a partir dos resultados tratados por microsonda WDS. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD....	84
<b>FIGURA 39</b> - Imagens obtidas por ME (A) da calcita, apatita, quartzo, granada, hematita e granada; (B) na área analisada com minerais e buracos; (C) região que contém apatita, óxido de manganês entre outros. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD .....	85
<b>FIGURA 40</b> - Espectrogramas obtidos na ME mostrando os principais constituintes (A) da calcita; e (B) apatita. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	86
<b>FIGURA 41</b> - Diagrama tetraédrico de Si-Al-Fe-Mg com interseção de um plano ternário com vértices Al-clorita; Fe-clorita, Mg-clorita usado para representação da Série das Cloritas (modificado de CARITAT et al, 1993). .....	88
<b>FIGURA 42</b> - Gráfico com as temperaturas mínima e máxima do geotermômetro da clorita calculadas com a equação e os procedimentos definidos por de Cathelineau & Nieva (1985). .....	90
<b>FIGURA 43</b> - Gráficos da correlação entre o Al tetraédrico ( $Al_{IV}$ ) em função do $Al_{VI}$ e $Fe_{VI}$ octaédrico.....	91
<b>FIGURA 44</b> - Fotomicrografias das IF primárias na Hematita I sob a radiação IV em LT (A, B, C) monofásicas e (D, E, F, G) bifásicas. (H) corresponde a “G” sob LR. Amostra FSP01-PROF.213,05m - Serra do Sapo. ....	93
<b>FIGURA 45</b> - Fotomicrografias de inclusões fluidas (A) monofásica com estrangulamento (B, C, D, E) bifásicas e (F, G) trifásica (L+G+S) na Hematita III sob a radiação IV na LT. Amostra MMX2 - Serra do Sapo, CMD. ....	95
<b>FIGURA 46</b> - Fotomicrografia de inclusões fluidas primárias, trifásicas com birrefringência na Hematita III sob a radiação IV (A) na LR e (B) na LT. Amostra MMX 2 - Serra do Sapo, CMD. ....	96
<b>FIGURA 47</b> - Fotomicrografias de IF secundárias, bifásicas e trifásicas na Hematita III sob a radiação IV na LT. Amostra MMX 2 - Serra do Sapo, CMD. ....	97
<b>FIGURA 48</b> - Fotomicrografias de IF (A, B) bifásicas e monofásicas em conjunto; (C, D) bifásicas com formato poligonal; (E, F) sofrendo estrangulamento; (G, H) em trilhas nos contatos dos cristais de quartzo sob a LT. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	98

<b>FIGURA 49</b> - Fotomicrografias de IF bifásicas no quartzo sob a LT. (A) conjunto de IF restritas a uma região do quartzo; IF (B) monofásicas e (C) bifásicas dessa região. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	99
<b>FIGURA 50</b> - Fotomicrografias de IF trifásicas no quartzo sob a LT. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	100
<b>FIGURA 51</b> - Histogramas de frequência (A) das temperaturas de fusão do gelo; (B) das temperaturas de homogeneização; e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total para as IF bifásicas na Hematita I da Serra do Sapo, CMD. ....	102
<b>FIGURA 52</b> - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total para as IF bifásicas na especularita da Serra do Sapo, CMD. ....	104
<b>FIGURA 53</b> - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total das inclusões fluidas bifásicas no quartzo da Serra do Sapo, CMD. ....	106
<b>FIGURA 54</b> - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total das IF trifásicas no quartzo da Serra do Sapo, CMD. ....	108
<b>FIGURA 55</b> - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total das inclusões fluidas bifásicas e trifásicas no quartzo da Serra do Sapo, CMD. ....	109
<b>FIGURA 56</b> - Fotomicrografias das IF na especularita sob a radiação IV (A) e marcada na luz refletida (B). Serra do Sapo, CMD. ....	110
<b>FIGURA 57</b> - Gráficos das concentrações de diferentes elementos para as IF analisadas por LA-ICP-MS. (A) Na, Mg, K, Ca e Mn; (B) Cu, Zn, Pb e Ba; (C) Li, As, Sr e Sb na Hematita I e especularita da Serra do Sapo, CMD. ....	114
<b>FIGURA 58</b> - Gráfico do somatório dos valores médios da concentração de todos os cátions analisados por LA-ICP-MS para cada inclusão fluida da especularita e da hematita I da Serra do Sapo, CMD. ....	115
<b>FIGURA 59</b> - Fotografia do equipamento de espectroscopia micro Raman utilizado. ....	116
<b>FIGURA 60</b> - Fotomicrografias das IF no quartzo (A) monofásicas, (B) imagem A ampliada, (B, C) bifásicas analisadas por espectroscopia micro Raman. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. As imagens da letras B e D estão com aumento de 800x obtidas a partir microscópio do Raman. ....	116
<b>FIGURA 61</b> - Espectros de micro Raman para três inclusões fluidas (IF1 e IF3 monofásicas e IF2 bifásica) no quartzo da Serra do Sapo, CMD. ....	117
<b>FIGURA 62</b> - Fotomicrografias da sequência de esmagamento de um cristal de quartzo com inclusões fluidas imerso em glicerina (A) antes de iniciar, (B) fase de maior liberação, e (C) antes do término do experimento. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. ....	119

<b>FIGURA 63</b> - Carta comparativa dos gases liberados para classificação (modificado de FUZIKAWA, 1985). .....	120
<b>FIGURA 64</b> - Fotomicrografia da Hematita II (hematita tabular) com quartzo sob luz refletida. Amostra FSP01-PROF.213,05m, Serra do Sapo, CMD. ....	122
<b>FIGURA 65</b> - Histogramas de frequência das temperaturas (A) eutética com os prováveis sistemas aquo-salinos, (B) de fusão do gelo; (C) de homogeneização total para as inclusões fluidas bifásicas na hematita granular (Hem G) e na especularita (Espec), Serra do Sapo, Espinhaço, M.G. ....	125
<b>FIGURA 66</b> - Diferença entre os fluidos na Hematita I (HemG) e a especularita (Espec) em relação aos elementos traços analisados por LA-ICP-MS, da Serra do Sapo, CMD. ....	128
<b>FIGURA 67</b> - Gráfico das isócoras associadas ao geotermômetro para estimar a pressão mínima de formação da (A) hematita granular, (B) especularita e (C) comparação de ambas as gerações da Serra do Sapo, CMD. ....	131
<b>FIGURA 68</b> - Fotomicrografias dos cristais de Hematita I (A) antes de ser submetida ao aquecimento e (B) após o experimento, usando a platina de infravermelho FTIR600 Linkam, sob a luz IV. Amostra FSP01-PROF.213,05m - Serra do Sapo, CMD. ....	133
<b>FIGURA 69</b> - Gráfico de salinidade versus temperatura de homogeneização total para comparação dos fluidos entre a Serra do Sapo e a Mina de Conceição (ROSIÈRE, RIOS, 2004) - borda leste do QF. ....	134

## LISTA DE TABELAS

---

---

<b>TABELA 1</b> - Reserva e produção mundial do minério de ferro.....	22
<b>TABELA 2</b> - Coluna estratigráfica dos grupos Serro, Guinda e Conselheiro Mata do Supergrupo Espinhaço da SdEM (retirada de ALMEIDA-ABREU, RENGER, 2002).....	31
<b>TABELA 3</b> - Relação das amostras coletadas.....	47
<b>TABELA 4</b> - As quantidades equivalente de Al na posição octaédrica ( $Al_{VI}$ ), tetraédrica ( $Al_{IV}$ ) e recalculado ( $Al_{IV} / 2$ ) com as suas respectivas temperaturas de geotermômetro em diferentes amostras.....	90
<b>TABELA 5</b> - Frequência dos espectros Raman das espécies gasosas mais comuns, encontradas em IF naturais, para um comprimento de onda de 515 (ALVES, 1995).....	118
<b>TABELA 6</b> - Comparação entre os fluidos da Hematita I e III (especularita) e quartzo da Serra do Sapo, CMD.....	124
<b>TABELA 7</b> - Dados de fase selecionados para sistemas aquo-salinos considerados mais relevantes para inclusões fluidas aquosas (extraído de Shepherd et al, 1985). .....	126
<b>TABELA 8</b> - Concentrações médias dos elementos presentes no fluido da Hematita I e III (especularita) segundo análise por LA-ICP-MS e suas respectivas salinidades estimadas a partir da microtermometria.....	127
<b>TABELA 9</b> - Comparação dos dados microtermométricos e concentração de alguns cátions obtidos em inclusões fluidas da <b>especularita</b> provenientes de diferentes depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero.....	135

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

---

<i>BIF</i>	Formação ferrífera bandada ( <i>banded iron formation</i> )
CMD	Conceição do Mato Dentro
EDS	Espectroscopia por dispersão de energia ( <i>Energy Dispersive Spectroscopy</i> )
Hem	Hematita
HemG	Hematita granular
IF	Inclusão fluida
IV	Infravermelho
LA-ICP-MS	Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado por ablação à laser
LR	Luz refletida
LT	Luz transmitida
ME	Microsonda eletrônica
MIV	Microscopia de infravermelho
<i>NIR</i>	Infravermelho próximo ( <i>near infrared</i> )
QF	Quadrilátero Ferrífero
SdEM	Serra do Espinhaço Meridional
Te	Temperatura eutética
Tf <sub>gelo</sub>	Temperatura de fusão do gelo
Th	Temperatura de homogeneização
WDS	Espectroscopia por dispersão de comprimento de onda ( <i>Wavelength Dispersive Spectroscopy</i> ).

## SUMÁRIO

---

---

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1. FERRO .....	25
1.2. OBJETIVOS .....	25
<b>CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA .....</b>	<b>27</b>
2.1. GEOLOGIA REGIONAL .....	27
2.2. GEOLOGIA LOCAL .....	32
<b>CAPÍTULO 3 - METODOLOGIAS .....</b>	<b>37</b>
3.1. PETROGRAFIA .....	37
3.2. MICROSSONDA ELETRÔNICA .....	37
3.3. ESTUDOS DE INCLUSÕES FLUIDAS .....	39
3.3.1. Microscopia Óptica das IF .....	39
3.3.2. Microtermometria .....	40
3.3.3. Ablação à Laser - Espectrometria de Massa por Plasma Indutivamente Acoplado .....	41
3.3.4. Espectroscopia Micro-Raman .....	42
3.3.5. Platina de Esmagamento .....	43
<b>CAPÍTULO 4 - PARTE EXPERIMENTAL .....</b>	<b>45</b>
4.1. EQUIPAMENTOS .....	45
4.2. AMOSTRAGEM .....	46
4.3. LAMINAÇÃO .....	47
4.4. PLATINA DE INFRAVERMELHO FTIR600 - LINKAM .....	48
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS .....</b>	<b>54</b>
5.1. PETROGRAFIA .....	54
5.1.1. Hematita .....	55
<u>5.1.1.a. Hematita I</u> .....	57
<u>5.1.1.b. Hematita II</u> .....	59
<u>5.1.1.c. Hematita III</u> .....	61
5.1.2. Quartzo .....	65
5.1.3. Outros Minerais .....	68
<u>5.1.3.a. Cloritas</u> .....	68
<u>5.1.3.b. Micas</u> .....	69
<u>5.1.3.c. Calcita</u> .....	70
<u>5.1.3.d. Granada</u> .....	71

5.1.3.e. Óxido de manganês.....	72
5.1.3.f. Apatita .....	73
5.2. MICROSSONDA ELETRÔNICA .....	73
5.2.1. Hematita .....	74
5.2.2. Quartzo .....	77
5.2.3. Cloritas .....	78
5.2.4. Micas .....	80
5.2.5. Granadas .....	82
5.2.6. Outros Minerais .....	85
5.3. GEOTERMÔMETRO DA CLORITA.....	87
5.4. INCLUSÕES FLUIDAS .....	91
5.4.1. Microscopia das Inclusões Fluidas .....	92
5.4.1.a. <u>Inclusões Fluidas Hematita I</u> .....	92
5.4.1.b. <u>Inclusões Fluidas Hematita III</u> .....	94
5.4.1.c. <u>Inclusões Fluidas Quartzo</u> .....	97
5.4.2. Microtermometria.....	100
5.4.2.a. <u>Hematita I</u> .....	100
5.4.2.b. <u>Espeularita (Hematita III)</u> .....	103
5.4.2.c. <u>Quartzo</u> .....	105
5.4.3. Ablação à Laser - Plasma Indutivamente Acoplado - Espectrometria de Massa .....	110
5.4.4. Espectroscopia micro Raman .....	115
5.4.5. Platina de Esmagamento.....	118
<b>CAPÍTULO 6 - DISCUSSÃO .....</b>	<b>121</b>
<b>CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO .....</b>	<b>138</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>140</b>
<b>ANEXO.....</b>	<b>147</b>

## **ANEXO A – ANÁLISES DA MICROSSONDA ELETRÔNICA DOS MINERAIS**

**TABELA 1.** DADOS DA MICROSSONDA ELETRÔNICA EM TRÊS DIFERENTES GERAÇÕES DE HEMATITA.

**TABELA 2.** DADOS DA MICROSSONDA ELETRÔNICA EM CLORITAS.

**TABELA 3.** DADOS DA MICROSSONDA ELETRÔNICA EM MICAS.

**TABELA 4.** DADOS DA MICROSSONDA ELETRÔNICA EM GRANADAS, CALCITA, APATITA E ÓXIDO DE MANGANÊS.



**TABELA 5.** TRATAMENTO DOS DADOS DA GRANADA, COM CÁLCULO BASEADO EM 12 OXIGÊNIOS PARA A CÉLULA UNITÁRIA E SUA CLASSIFICAÇÃO.

#### **ANEXO B – DADOS DO GEOTERMÔMETRO DAS CLORITAS**

**TABELA 6.** COMPOSIÇÕES, EM % DE PESO, DAS CLORITAS ASSOCIADAS AO MINÉRIO DE FERRO DA SERRA DO SAPO (MG).

**TABELA 7.** NÚMERO DE CÁTIONS COM BASE EM 36 (O + OH) DAS CLORITAS DA SERRA DO SAPO (MG).

**TABELA 8.** CÁLCULO DAS FÓRMULAS ESTRUTURAIS E DA QUANTIDADE DE AL EM POSIÇÃO TETRAÉDRICA DAS CLORITAS DA SERRA DO SAPO. FÓRMULA ESTRUTURAL GERAL DAS CLORITAS:  $(\text{Mg,Al,Fe})_{12} [(\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20}] (\text{OH})_{16}$ .

#### **ANEXO C – ANÁLISES POR ABLAÇÃO À LASER - PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO - ESPECTROMETRIA DE MASSA (LA-ICP-MS) DAS INCLUSÕES FLUIDAS EM HEMATITAS**

**TABELA 9.** SENSIBILIDADE RELATIVA DOS PADRÕES UTILIZADOS NAS ANÁLISES DE LA-ICP-MS.

**TABELA 10.** RESUMO DA COMPOSIÇÃO DAS INCLUSÕES FLUIDAS ANALISADAS NO LA-ICP-MS DE ACORDO COM ESTES ELEMENTOS ESTUDADOS.

**TABELA 11.** RESUMO DO LIMITE DE DETECÇÃO DAS AMOSTRAS ANALISADAS NO LA-ICP-MS DE ACORDO COM OS ELEMENTOS ESTUDADOS.

**TABELA 12.** CONCENTRAÇÕES EM PPM DAS INCLUSÕES FLUIDAS ANALISADAS NO LA-ICP-MS NORMALIZADAS DE ACORDO COM A SALINIDADE EQUIVALENTE DE NaCl.

#### **ANEXO D – DADOS DA MICROTERMOMETRIA DAS INCLUSÕES FLUIDAS EM HEMATITA, ESPECULARITA E QUARTZO**

**TABELA 13.** DADOS MICROTERMOMÉTRICOS DA HEMATITA TRATADOS NO PROGRAMA MACFLINCOR PARA O SISTEMA  $\text{H}_2\text{O-NaCl-[KCl]}$  (BODNAR & VITYK).

**TABELA 14.** DADOS MICROTERMOMÉTRICOS DA ESPECULARITA TRATADOS NO PROGRAMA MACFLINCOR PARA O SISTEMA  $\text{H}_2\text{O-NaCl-[KCl]}$  (BODNAR & VITYK).

**TABELA 15.** DADOS MICROTERMOMÉTRICOS DO QUARTZO TRATADOS NO PROGRAMA MACFLINCOR PARA O SISTEMA  $\text{H}_2\text{O-NaCl-[KCl]}$  (BODNAR & VITYK).

**TABELA 16.** DADOS DE PRESSÃO E TEMPERATURA DE FORMAÇÃO DA HEMATITA OBTIDOS NO PROGRAMA MACFLINCOR PARA O SISTEMA  $\text{H}_2\text{O-NaCl-[KCl]}$  (BODNAR & VITYK).

**TABELA 17.** DADOS DE PRESSÃO E TEMPERATURA DE FORMAÇÃO DA ESPECULARITA OBTIDOS NO PROGRAMA MACFLINCOR PARA O SISTEMA H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (BODNAR & VITYK).

**TABELA 18.** DADOS DE PRESSÃO E TEMPERATURA DE FORMAÇÃO DO QUARTZO OBTIDOS NO PROGRAMA MACFLINCOR PARA O SISTEMA H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (BODNAR & VITYK).

**FIGURA 1.** DIAGRAMA DAS ISÓCORAS OBTIDAS PARA A HEMATITA I.

**FIGURA 2.** DIAGRAMA DAS ISÓCORAS OBTIDAS PARA A ESPECULARITA (HEMATITA III).

**FIGURA 3.** DIAGRAMAS DAS ISÓCORAS PARA CADA GRUPO DE INCLUSÕES FLUIDAS BIFÁSICAS (L+V) DO QUARTZO PARA AS AMOSTRAS (A) QP1; (B) QP2; E (C) QC15.

**FIGURA 4.** DIAGRAMAS DAS ISÓCORAS PARA CADA GRUPO DE INCLUSÕES FLUIDAS TRIFÁSICAS (L+V+S) DO QUARTZO PARA AS AMOSTRAS (A) QTP3; E (B) QTP4.

**FIGURA 5.** DIAGRAMA DE COMPARAÇÃO DAS ISÓCORAS ENTRE AS IF BIFÁSICAS E TRIFÁSICAS DO QUARTZO.

## **ANEXO E – ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA E ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER**

**TABELA 19 -** PARÂMETROS MÖSSBAUER REFERENTES À MEDIDA A 298 K PARA A AMOSTRA FSP 01-PROF.213,05M DA SERRA DO SAPO, CMD.

**FIGURA 6.** ESPECTRO MÖSSBAUER À TEMPERATURA AMBIENTE AJUSTADO DA AMOSTRA FSP01-PROF.213,05M.

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As reservas mundiais de minério de ferro estão na ordem de 340 bilhões de toneladas, sendo o Brasil detentor de 9,8% dessas reservas (33,2 bilhões de toneladas e em 5º lugar mundial em volume). As maiores reservas são Ucrânia (20%), Rússia (16,5%), China (13,5%) e Austrália (13,2%) (TABELA 1). No entanto, o alto teor de ferro em seus minérios (60,0 a 67,0% nas hematitas e 50,0 a 60,0% nos itabiritos) atribui ao Brasil posição de destaque no cenário mundial (DNPM, 2009).

**TABELA 1** - Reserva e produção mundial do minério de ferro.

Discriminação	Reservas <sup>(1)</sup> (10 <sup>6</sup> t)		Produção (10 <sup>3</sup> t)		
	2007 <sup>(e)</sup>	%	2006 <sup>(e)</sup>	2007 <sup>(e)</sup>	%
<b>Brasil</b>	33.233	9,8	317.800	354.674	18,6
<b>África do Sul</b>	2.300	0,7	41.000	40.000	2,4
<b>Austrália</b>	45.000	13,2	275.000	320.000	16,0
<b>Canadá</b>	3.900	1,1	34.000	33.000	2,0
<b>China</b>	46.000	13,5	588.000	600.000	30,8
<b>Estados Unidos</b>	15.000	4,4	53.000	52.000	3,2
<b>Índia</b>	9.800	2,9	140.000	160.000	8,9
<b>Rússia</b>	56.000	16,5	102.000	110.000	6,2
<b>Ucrânia</b>	68.000	20,0	74.000	78.000	4,3
<b>Outros Países</b>	60.767	17,8	175.200	154.326	7,6
<b>Total</b>	340.000	100,0	1.800.000	1.900.000	100,0

Fontes: DNPM/DIDEM; USGS (Mineral Commodity Summaries – 2008). Notas: (1) Reservas medidas e indicadas; (e) Dados estimados, exceto Brasil. <http://www.dnpm.gov.br>

As principais reservas brasileiras, com teor médio de 56,1% de ferro, situam-se em maior parte no Quadrilátero Ferrífero - MG (63,1%), na Serra dos Carajás - PA (18%) e em

Urucum - MT (17,2%). Destacam-se os dois primeiros estados como os principais produtores de minério de ferro do Brasil em 2007 (BIONDI, 1999; DNPM, 2009).

Diversas pesquisas direcionadas à gênese desses depósitos minerais têm tido papel decisivo no aproveitamento deste recurso (ROSIÈRE, CHEMALE Jr, 2000a).

O Quadrilátero Ferrífero (QF) abriga aproximadamente 17.500 Mt de Fe com teor superior a 64% p/p, constituído por uma grande reserva de depósitos de hematita e/ou martita de alto teor, com recursos de aproximadamente 10.000 Mt, com médias de 66 - 68% p/p de Fe (CLOUT, SIMONSON, 2005; ROSIÈRE et al, 2008).

O minério de ferro do QF corresponde a formações ferríferas bandadas do tipo Lago Superior e rochas carbonáticas (MARSHAK, ALKMIM, 1989). As formações ferríferas bandadas (BIF) constituem a maior fonte de ferro do planeta e seus maiores depósitos estão delimitados a um específico intervalo de tempo da história da Terra (3,8-1,9 Ga) (LINDENMAYER et al, 2001).

A origem e metalogênese dos depósitos de minério de ferro em rochas finamente bandadas e compostas quase que exclusivamente por Fe, Si e O sempre foram motivo de estudos e controvérsias, e ainda hoje são pouco esclarecidas.

Em meio à complexidade geológica, os estudos metalogenéticos do ferro no QF revestem-se de fundamental importância, tanto para a compreensão da gênese desse minério quanto para futuros trabalhos de pesquisa que visam a prospecção do ferro. É imprescindível pesquisar a geoquímica dos fluidos geradores dos gigantescos depósitos de hematita e especularita das áreas em estudo (PIRES et al, 2005).

Através de estudos petrogenéticos e de inclusões fluidas (IF) é possível contribuir para estabelecer hipóteses quanto à origem do minério, além de propor modelos geológicos de evolução da jazida.

As IF são microcavidades que contêm fluidos que estiveram associados ao mineral em algum tempo da história do mineral (ROEDDER, 1984). A investigação desses fluidos permite determinar as condições físico-químicas reinantes, durante (IF primárias e pseudosecundárias) ou mesmo posteriores à formação do mineral (IF secundária). Dessa forma, de acordo com Fuzikawa (1985), é possível estabelecer as condições limitantes para a formação de um depósito mineral de interesse tanto no seu aspecto econômico (prospecção), quanto no aspecto científico (processos petrogenéticos).

Em trabalhos relacionados à caracterização de fluidos formadores do minério de ferro, principalmente em associações de veios formados por hematita e quartzo, utiliza-se este último mineral para desenvolver estudos de IF. Isso porque acredita-se que o quartzo foi

formado nas mesmas condições ambientais que a hematita, logo ao estudar o quartzo tem-se informações que equivalem ao minério de ferro, além do quartzo ser transparente e conter muitas inclusões fluidas de mais fácil observação.

São poucos e recentes os trabalhos que efetivamente identificam o fluido composicional de IF na própria hematita do minério de ferro (BAILLY et al, 2000; CAMPBELL et al, 1987; LÜDERS, ZIEMANN, 1999; LÜDERS et al, 2005; RICHARDS, KERRICH, 1993; RIOS et al, 2006a, 2006b; ROSIÈRE, RIOS, 2004, 2006). Isso se deve ao fato da hematita ser um mineral opaco sob luz natural transmitida e necessita de um sistema especial de infravermelho que a torne transparente e possibilite o estudo de suas características internas.

Os minerais opacos quando submetidos à incidência da radiação infravermelha (IV), podem se tornarem transparentes, possibilitando observar - através de monitores de alta definição - os zoneamentos, as linhas de crescimento e as inclusões sólidas e fluidas (CAMPBELL et al, 1984). A microscopia de infravermelho (MIV) e a microtermometria nos estudos dos minerais opacos são poucos ou não avaliados na literatura (RIOS et al, 2000; RIOS et al, 2006b).

O desenvolvimento de uma metodologia para o estudo de minerais de ferro utilizando radiação na região do infravermelho próximo está permitindo pesquisar, pela primeira vez no Brasil, os fluidos geradores dos gigantescos depósitos de hematita e especularita do Quadrilátero Ferrífero (MG) e da Serra dos Carajás (PA), considerados de interesse econômico importante para o país (RIOS et al, 2006a).

O Laboratório de Inclusões Fluidas e Metalogênese (LIFM - CDTN/CNEN) possui um sistema alternativo para MIV, adaptado ao microscópio Leica DMRXP, equipado com câmera Sony ExwaveHAD B&W, adaptador CMA-D2 Sony, um monitor de vídeo Sony Triniton e uma impressora gráfica UP-890 MD Sony para registro das imagens das IF. As medidas de microtermometria em minerais opacos são realizadas em uma platina de aquecimento/resfriamento USGS FLUID INC., conectada ao microscópio Leica DMRXP.

Em 2008, o LIFM/CDTN adquiriu um novo microscópio petrográfico OLYMPUS BX51 com luz transmitida e incidente, fonte, polarizador, filtros e objetivas adequadas para se trabalhar na região de infravermelho próximo (*NIR*). Complementando este equipamento também foi adquirida uma platina de infravermelho FTIR600 - Linkam.

## 1.1. FERRO

O Ferro (Fe) é um metal de transição cujos números de oxidação (nox) principais são 2 e 3. O estado de oxidação mais estável do Fe, em meio aquoso ácido, é o  $\text{Fe}^{2+}$  e, em meio básico, o  $\text{Fe}^{3+}$ . Este é o mais estável na presença de oxigênio, em qualquer que seja o meio, pois o oxigênio oxida o  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  espontaneamente (BARROS, 2001).

O Fe encontra-se na crosta terrestre na proporção de 6,2 % (o quarto elemento mais abundante) e dentre seus óxidos mais importantes, destacam-se: hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), goethita ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), limonita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) e ilmenita ( $\text{FeTiO}_2$ ) (TEIXEIRA et al, 2003).

Os óxidos exibem uma grande variação na configuração estrutural, com a coordenação dos cátions variando de 2 a 10 e com os poliedros ligados em várias maneiras. Os óxidos *sensu stricto* (ss) são classificados, primeiramente, de acordo com a razão metal:cátion e arranjados de acordo com a aumento do tamanho do cátion (STRUNZ, NICKEL, 2001).

A razão metal:oxigênio está dividida em três classificações: (i) 2:1 e 1:1, (ii) 3:4 e similares, (iii) 2:3, 3:5 e similares; nessa última, a hematita, pertencente à subdivisão dos cátions de tamanho médio, no Grupo Coríndon, e Série da Hematita (GAINES et al, 1997; STRUNZ, NICKEL, 2001).

A hematita é um óxido de ferro com 70,0% de Fe e 30,0% de O. É um constituinte frequente em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, possuindo cor cinza ou avermelhada. O seu uso é basicamente como fonte de ferro, sendo o principal constituinte do minério na maioria das jazidas (DEER et al, 1974; MACHADO et al, 2009; TEIXEIRA et al, 2003; WINGE et al, 2009).

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho teve por objetivo estudar os fluidos que originaram as mineralizações de ferro da Serra do Sapo, localizada no município de Conceição do Mato Dentro (CMD) no âmbito da Serra do Espinhaço - MG, contribuindo para ampliar o conhecimento da gênese dos depósitos de ferro daquela região.

Para concretizar essas metas, foram utilizadas a microscopia, a microtermometria e a LA-ICP-MS de inclusões fluidas (IF) presentes nas hematitas e nos quartzos associados a ela. Foram obtidos resultados qualitativos e quantitativos sobre a composição e densidade dos fluidos, temperaturas de recristalização, sublimação e eutéticos.

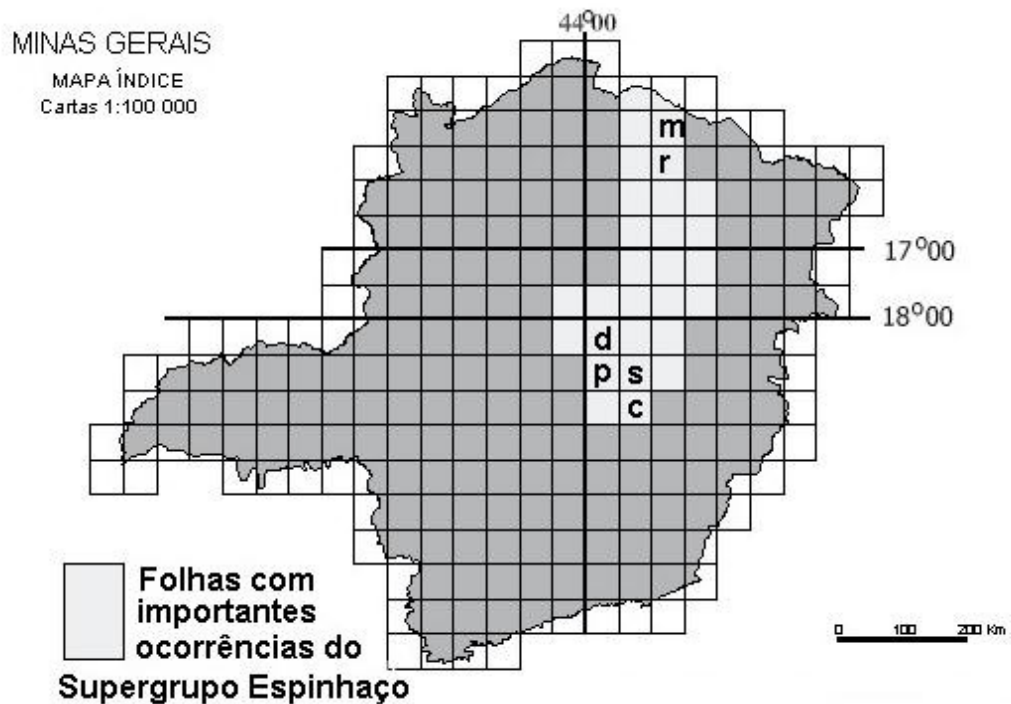
Como parte dos objetivos foi feita a instalação, adequação, calibração, colocação em rotina e a utilização da nova platina de infravermelho FTIR600 - Linkam.

Por fim, foi realizado uma comparação entre os fluidos que participaram das mineralizações de ferro da região da Serra do Sapo (CMD - MG), com os fluidos de algumas mineralizações ferríferas do Quadrilátero Ferrífero.

## CAPÍTULO 2 - GEOLOGIA

### 2.1. GEOLOGIA REGIONAL

A Serra do Espinhaço, que contem o minério de ferro deste estudo, pode ser definida como um acidente geográfico, alongando-se por mais de 1200 km de extensão, com direção aproximadamente norte-sul e que abrange áreas dos estados da Bahia e de Minas Gerais, onde é separada em dois setores nas proximidades do paralelo 17°00'S: Meridional e Setentrional (KNAUER, 2007). Seu setor meridional situa-se totalmente em território mineiro, constituindo-se em um dos principais elementos de relevo deste estado (KNAUER, 1990) (FIG. 1).



**FIGURA 1** - Mapa mostrando a divisão em folhas 1:100.000 do Estado Minas Gerais, com realce (em cinza claro) das principais folhas com ocorrências do Supergrupo Espinhaço. As folhas citadas correspondem m=Monte Azul, r=Rio Pardo de Minas, d=Diamantina, p=Presidente Kubitschek, s=Serro, c=Conceição do Mato Dentro (KNAUER, 2007).

A Serra do Espinhaço representa a faixa orogênica precambriana mais extensa e contínua do território brasileiro. Uma vez que as unidades do Supergrupo são os principais constituintes do edifício do orógeno Espinhaço, sua extensão exhibe contato direto com várias



entidades supracrustais de idade semelhante ou não com o Supergrupo Minas do Quadrilátero Ferrífero, Grupo Macaúbas *s.s.*, Grupo Bambuí, Faixa Araçuaí, Chapada Diamantina, entre outros (ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002).

Além da separação entre Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) e Espinhaço Setentrional, é comum a separação na região central, em borda oeste da serra e borda leste da serra.

A SdEM é formada essencialmente por litologias do Supergrupo Espinhaço (rochas quartzíticas, rochas filíticas, conglomeráticas e vulcânicas de caráter básico e ácido) (ALMEIDA ABREU, 1995; ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002; KNAUER, 2007).

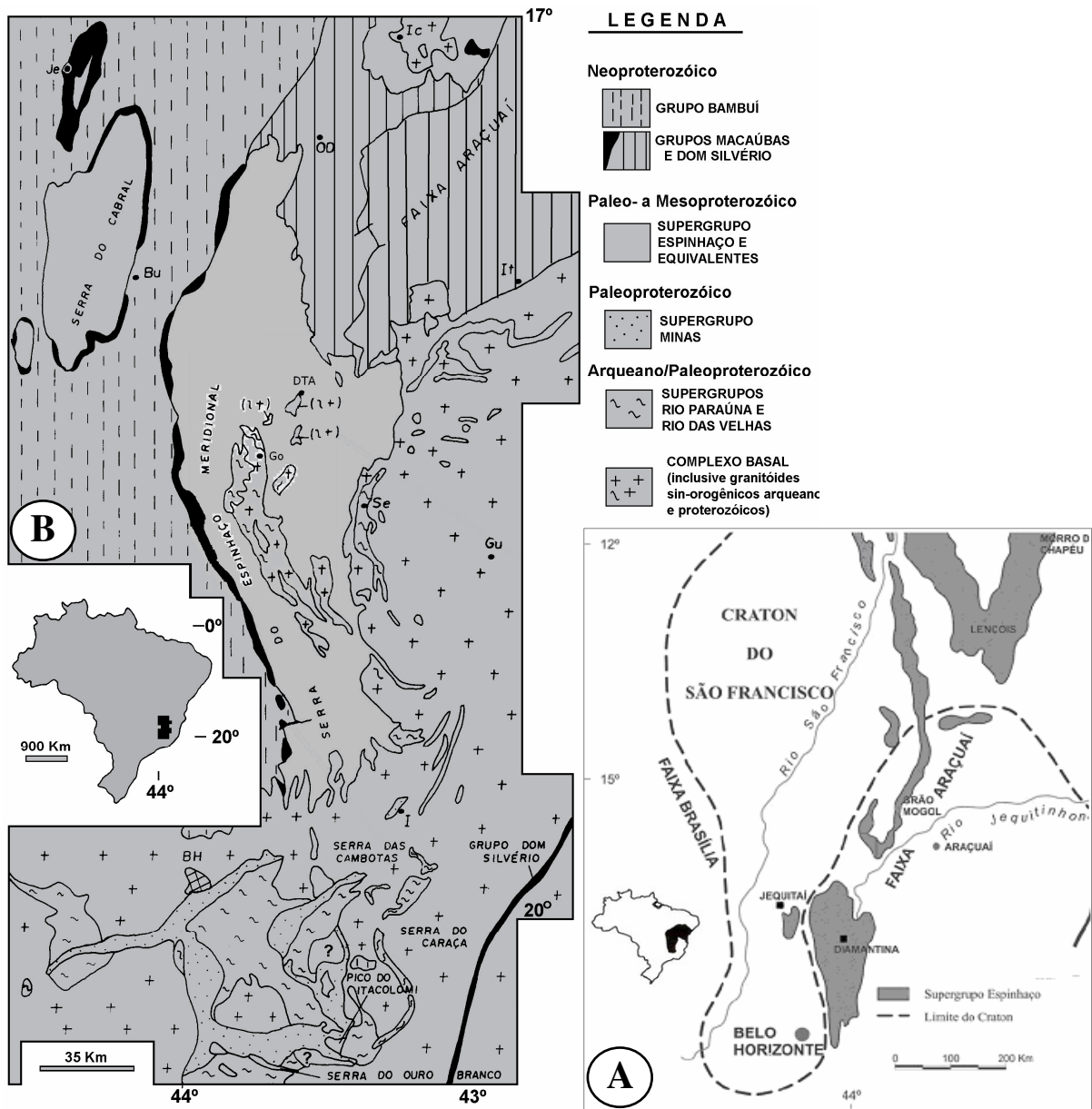
A Serra do Espinhaço Meridional (SdEM) representa uma faixa orogênica que limita o sudeste do Cráton do São Francisco. Amalgama-se, para nordeste, com a Faixa Araçuaí e mostra-se segmentada e deslocada em relação à parte setentrional dessa serra (FIG. 2) (ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002).

A parte meridional da Serra do Espinhaço (SdEM) representa o segmento que estende-se por cerca de 300 km na direção N-S do Quadrilátero Ferrífero até a região de Olhos d'Água, MG.

O Supergrupo Espinhaço de idade paleo/mesoproterozóica, aflora em áreas relativamente pequenas no interior da bacia São Francisco e fica totalmente exposto no Aulacógeno do Paramirim e na Faixa Araçuaí (FIG. 2) (ALKMIM, 2004).

A bacia São Francisco é uma unidade geotectônica de idade Brasiliana cercada por cinturões orogênicos vergentes para seu interior (ROSIÈRE, CHEMALE Jr, 2000b). O seu substrato é constituído por um bloco arqueano que ficou poupado das orogêneses do Proterozóico e partes de um orógeno paleoproterozóico, desenvolvido durante o Evento Transamazônico, por volta de 2,1 Ga (ALKMIM, 2004).

Do ponto de vista geotectônico, o Quadrilátero Ferrífero (QF) está inserido na Província São Francisco, situando-se no extremo sul da área ocupada pelo Cráton de mesmo nome (FIG. 2) (NEVES et al, 2006). O QF está inserido na borda Sul do Cráton do São Francisco nos domínios dos cinturões orogênicos Espinhaço e Minas.



**FIGURA 2** - Mapa com distribuição do Supergrupo Espinhaço no Cráton do São Francisco e a Faixa Araçuaí (A), destacando-se o Setor Meridional e seu detalhamento geológico, enfatizando localização do QF (B) (modificado de KNAUER, 2007).

As colunas estratigráficas utilizadas para os estudos do Supergrupo Espinhaço baseiam-se naquelas propostas por Pflug (1968) e Schöll, Fogaça (1979), que continuam válidas (KNAUER, 2007). No entanto, as relações estratigráficas entre as sequências aflorantes na borda leste do setor meridional da Serra do Espinhaço, inclusive pelo forte tectonismo que as mascaram, constituem-se no verdadeiro eixo das inúmeras controvérsias sobre a região (CORDEIRO, 2008; KNAUER, SCHRANK, 1993).

A estratigrafia da SdEM é sub-dividida nos grupos Conselheiro Mata, Guinda e Serro (TAB. 2), além das diversas unidades que compõem as unidades supracrustais aflorantes por toda a borda oriental da Serra do Espinhaço (ALMEIDA ABREU, 1995; ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002; KNAUER, 2007).

Nos modelos existentes para a evolução do Supergrupo Espinhaço pode-se generalizar a existência de duas grandes linhas: (i) a fase “rift”, no qual o “rift” original é abortado, e toda deformação é de idade brasiliana (~17 Ga); (ii) a fase pós-“rift”, em que o “rift” evolui para uma margem passiva, a qual é fechada nos tempos finais do Uruçuano (DUSSIN, DUSSIN, 1995). Para esta última, existe a necessidade de que as sequências aflorantes na região do Serro, incluindo BIF, quartzitos, filitos e xistos das formações Serra do Sapo e Jacém, e os meta-ultramafitos da Suíte Ultramáfica de Alvorada de Minas (ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002) pertençam ao Supergrupo Espinhaço (KNAUER, 2007).

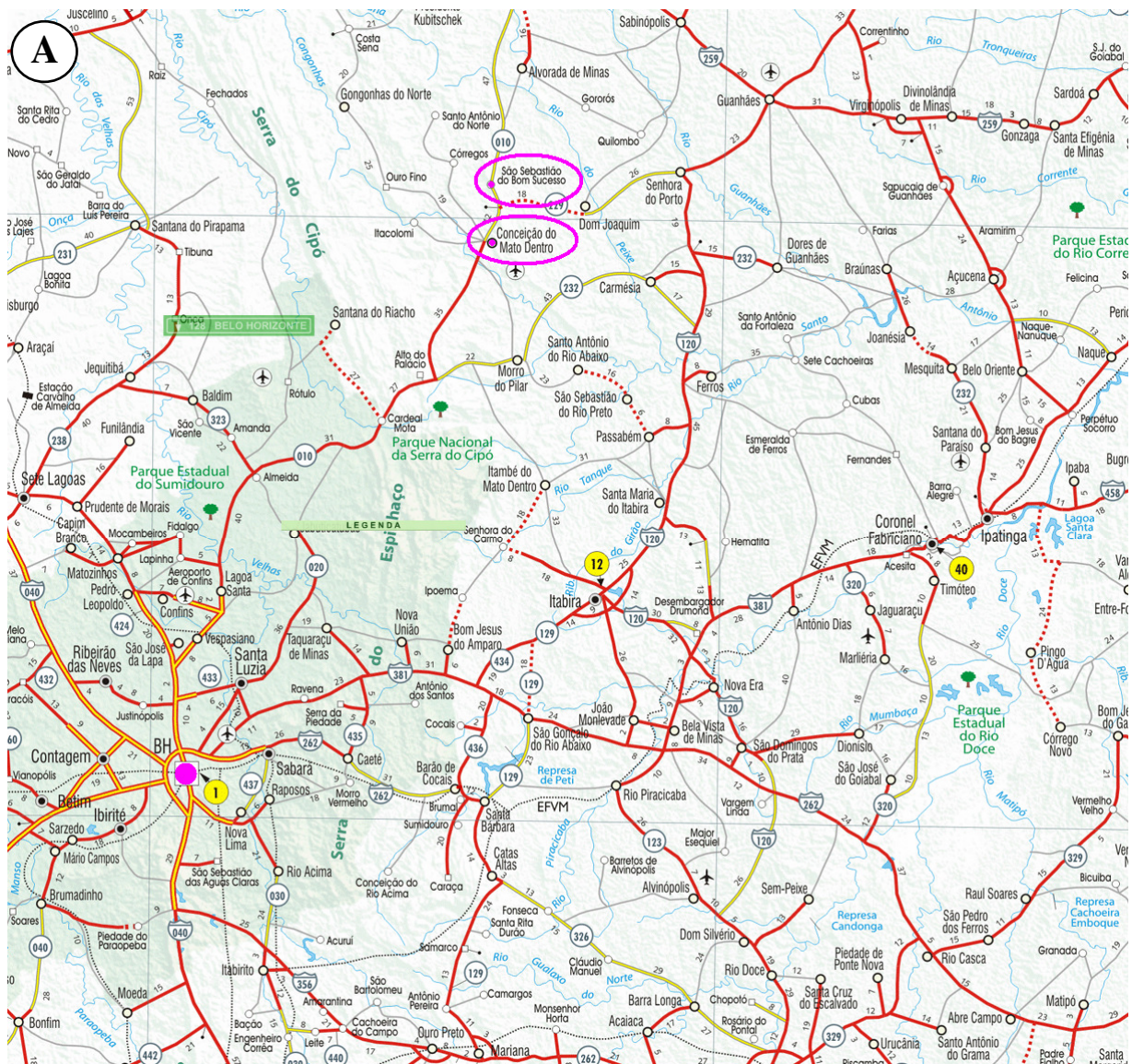
**TABELA 2** - Coluna estratigráfica dos grupos Serro, Guinda e Conselheiro Mata do Supergrupo Espinhaço da SdEM (retirada de ALMEIDA-ABREU, RENGER, 2002).

<b>Grupo</b>	<b>Formação</b>	<b>Litologia</b>	<b>Ambiente</b>
<b>Conselheiro Mata</b>	Rio Pardo Grande	Metapelitos, subordinadamente meta-arenitos, dolomitos	Marinho raso de baixa energia, inter-a-sub-sidal, com oscilações episódicas do nível do mar e eventuais incursões fluviais e eólicas na plataforma marinha
	Córrego Pereira	Metarenitos puros a micáceos, localmente pelitos	
	Córrego da Bandeira	Metapelitos e metaremitos	
	Córrego dos Borges	Metaremitos puros ou micáceos, localmente brechas/conglomerados quartzíticos	
	Santa Rita	Metapelitos e subordinadamente metaremitos	
<b>Guinda</b>	Galho do Miguel	Metaremitos puros	Eólicos
	Sopa-Brumadinho	Metaremitos, metaconglomerados polimiticos, metapelitos e localmente metabrechas quartzíticas de matriz pelítica filitos hematíticos e xistos verdes	Predominante fluvial, localmente progradante em calhas lacustres restritas. Retrabalhamento eólico esporádico
	São João da Chapada	Meta-arenitos, localmente conglomerados e brechas; filitos hematíticos	Fluvial <i>braided</i>
<b>Serro</b>	Itapanhoacanga	Metapelitos, quartzíticos e BIF's localmente dolomitos, filitos hematíticos e metariolitos	Costeiro transgressivo
	Serra do Sapo	BIF's, metapelitos e quartzitos, localmente meta-ultramáficas	Plataformal com seções condensadas
	Jacém	Quartzitos, subordinadamente metapelitos e BIF's, localmente metaultramáficas	Batial e abissal com turbiditos
	Suíte Ultramáfica de Alvorada de Minas	Talco xistos, tremolita-actinolita xistos, clorita xistos, localmente BIF's metapelitos e quartzitos	Diapirismo serpentinitico intra-crustal na crosta adelgada

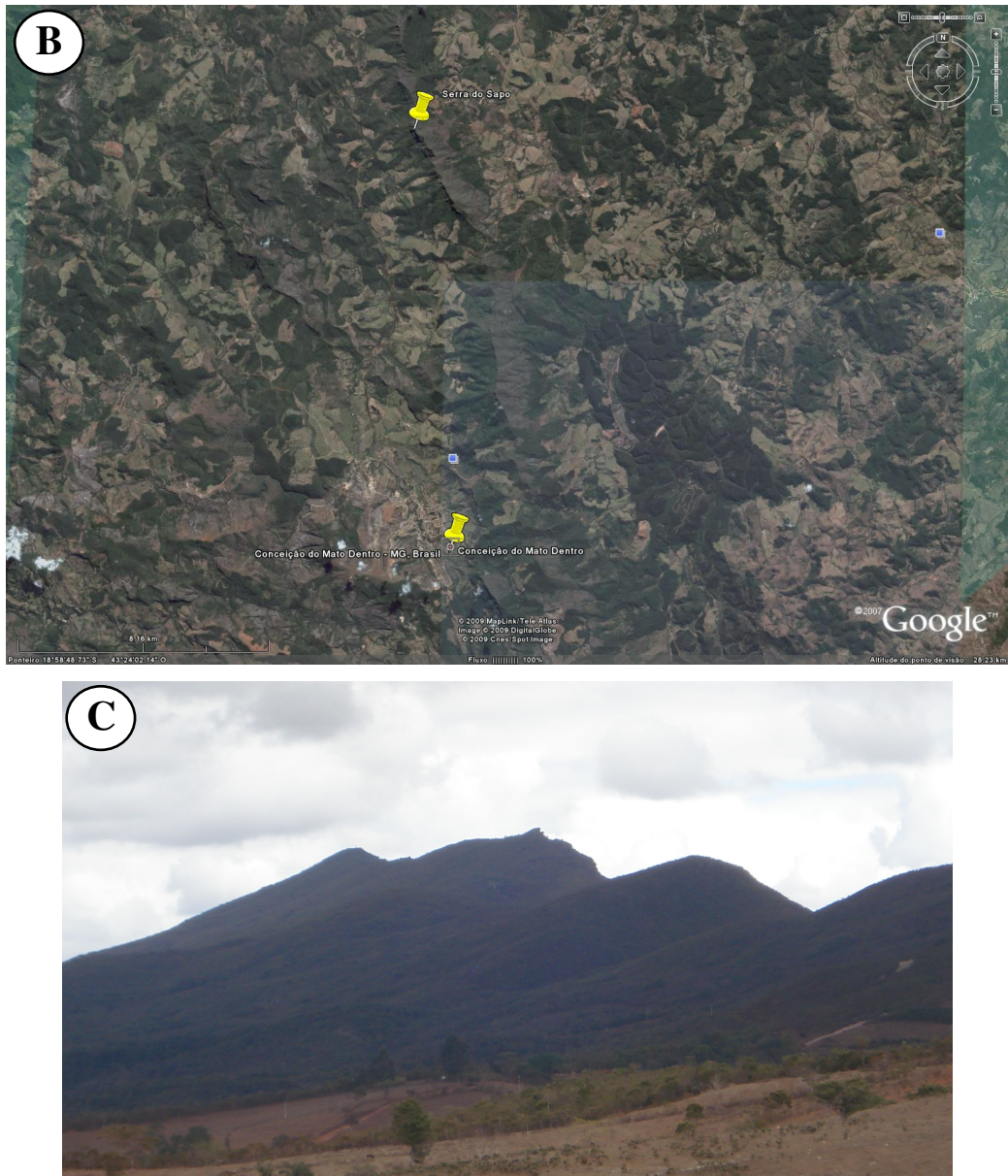
## 2.2. GEOLOGIA LOCAL

A Serra do Sapo situa-se ao lado da vila São Sebastião do Bom Sucesso que pertence ao município de Conceição do Mato Dentro (CMD), Minas Gerais, a nordeste de Belo Horizonte (FIG. 3).

A localização e vias de acesso encontram-se no mapa rodoviário (FIG. 3), no qual saindo de Belo Horizonte segue-se pela rodovia MG-010 sentido Lagoa Santa, percorre-se cerca de 139 Km, via que conduz a cidade de Conceição do Mato Dentro. São Sebastião do Bom Sucesso está aproximadamente 15 Km a nordeste de CMD continuando na MG-010.

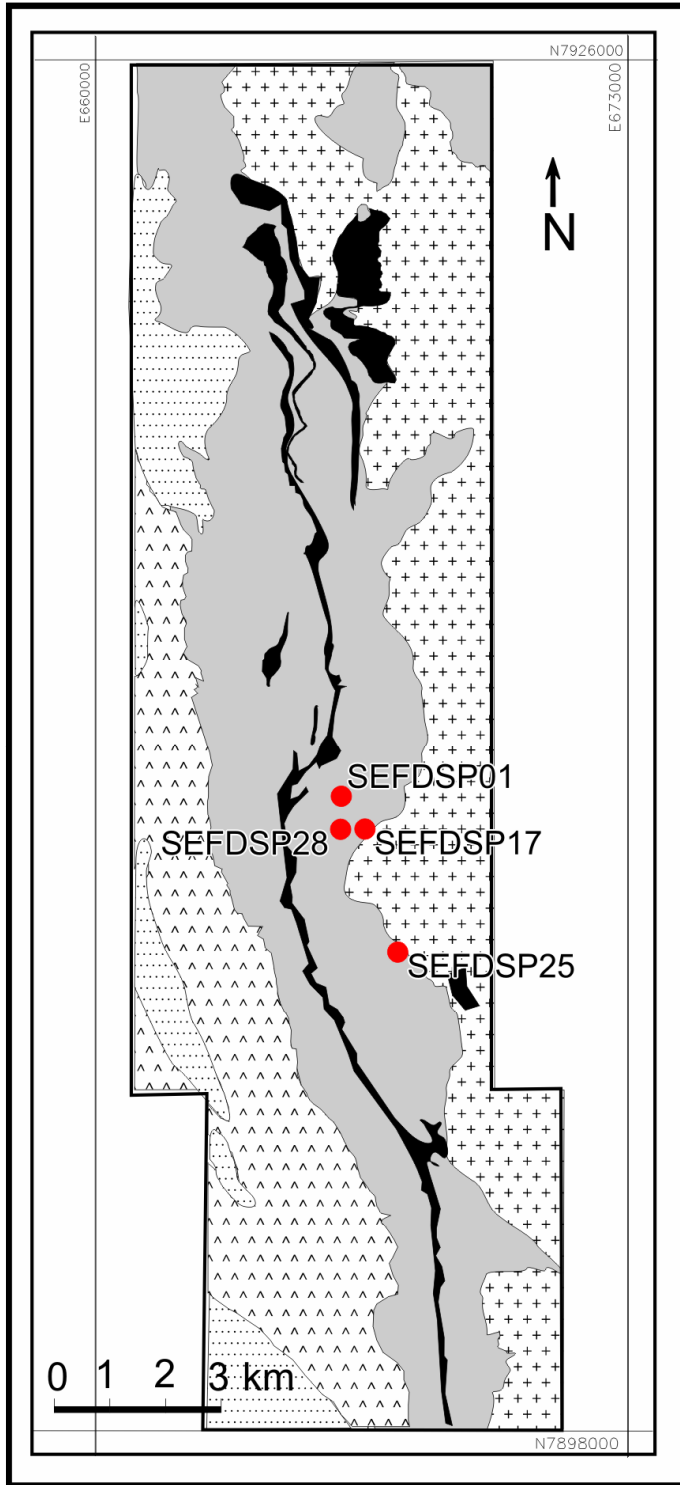










**FIGURA 3** - (A) Mapa de localização; (B) imagem de satélite da região; e (C) fotografia da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, MG - Brasil (Fonte DER/MG e Google Earth).

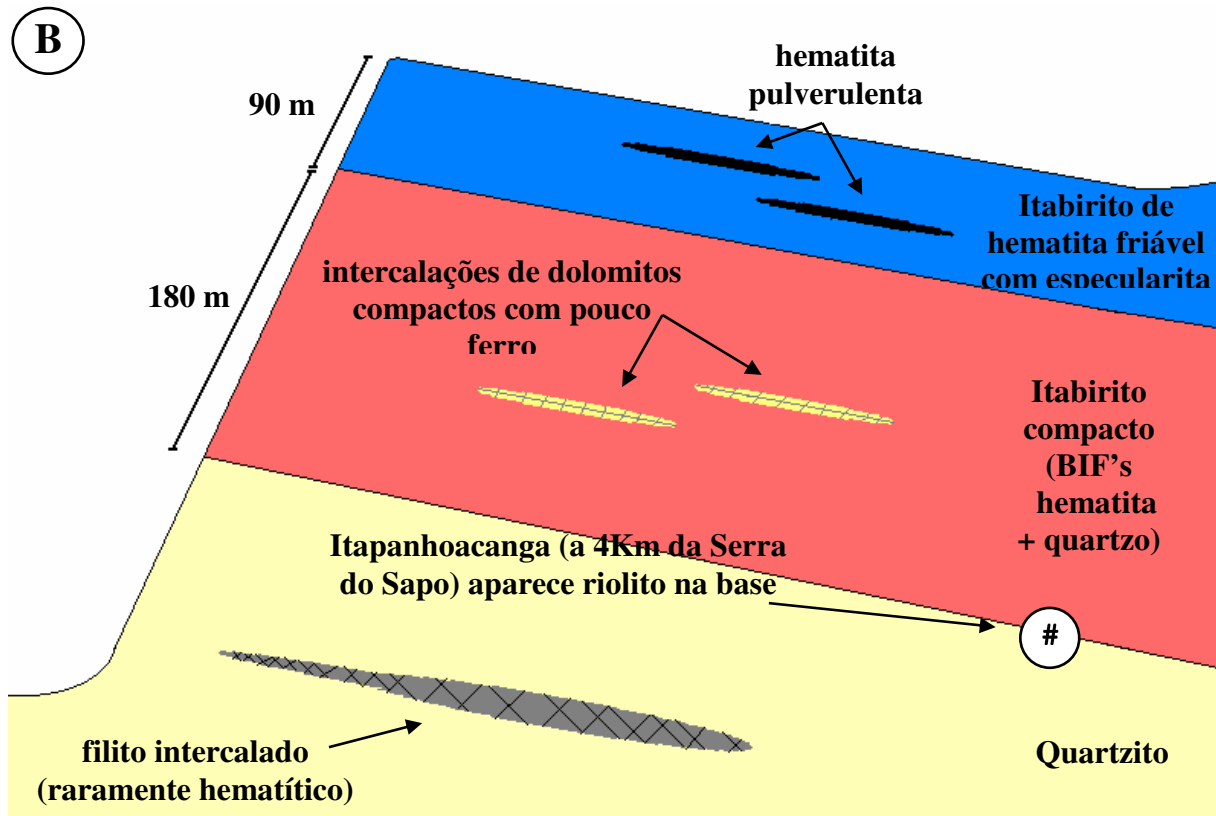
Serra do Sapo é uma denominação local para a parte mais meridional da Serra do Espinhaço. Ocupa uma porção do oeste da Folha Serro (latitudes  $18^{\circ}30'$  e  $19^{\circ}00'S$  e longitudes  $43^{\circ}00'$  e  $43^{\circ}30'W$  - folha s=Serro da FIG. 2) e se estende de sul para norte (KNAUER, GROSSI-SAD, 1997). A FIG. 4 apresenta o mapa geológico da Serra do Sapo com a localização dos pontos amostrados neste trabalho, seguido de um perfil geológico esquemático da mesma.



A

-  **Supergroupo Espinhaço**
-  **Grupo Serro com BIFs (preto)**
-  **Unidade Metaínea Conceição do Mato Dentro**
-  **Unidade Arqueana**

NOME	E	N
SEFDSP01	666005,56	7908001,86
SEFDSP17	666597,96	7907201,44
SEFDSP25	667399,70	7904200,25
SEFDSP28	666002,60	7907194,08



**FIGURA 4** - (A) Mapa geológico da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro, MG - Brasil, com localização dos pontos amostrados nesse trabalho (modificado de V. K. ROLIM). (B) Perfil geológico esquemático da Serra do Sapo (informações concedidas por H. P. MEIRELES e desenhado por L. E. D. AMORIM et al., 2009).

Conforme a TAB. 2 a formação Serra do Sapo está incluída no Grupo Serro da SdEM do Supergrupo Espinhaço.

O Grupo Serro reúne as rochas supracrustais e a Suíte Ultramáfica de Alvorada de Minas que ocorrem no leste da SdEM. Esse grupo é dividido em quatro unidades distintas (TAB. 2) e juntamente com lascas tectônicas do embasamento cristalino compõem o cinturão de cavalgamentos que bordejia toda parte oriental da SdEM. Estas unidades representam conjuntos de litofácies de uma margem continental passiva, empilhados tectonicamente durante a Orogênese Espinhaço (ALMEIDA ABREU et al, 1989, ALMEIDA ABREU, RENGGER, 2002).

A formação Serra do Sapo compõe uma faixa semicontínua, às vezes segmentada em duas faixas paralelas de direção geral N-S, que acompanha a parte oriental da SdEM por mais de 100 km. É representada por espessas camadas de formações ferríferas bandadas que, no conjunto, podem atingir quase 90 m de espessura. Intercalações de quartzitos são comuns podendo ser o litotipo dominante. Na base da sequência podem aparecer quartzitos médios a grossos e metaconglomerados em camadas de pequena espessura, tão bem como filitos



hematíticos. Filitos puros a quartzosos são também comuns, às vezes compondo camadas de dezenas de metros de espessura e de expressiva continuidade lateral (ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002).

Os depósitos de formações ferríferas da Formação Serra do Sapo, segundo Almeida Abreu e Renger (2002), foram sedimentados em ambientes de águas bem mais profundas, i.e., na plataforma e no talude continental. Isto é caracterizado não apenas pela significativa espessura das formações ferríferas (50 a 180 m na Serra do Sapo, Serra da Água Santa e Serra da Serpentina), mas também pela associação com espessos depósitos de pelitos e, sobretudo, pela presença de turbiditos clássicos associados a essas litologias.

A distribuição dos depósitos de BIF's em diferentes compartimentos da bacia parece ter sido uma característica das margens passivas proterozóicas, isto é, as formações ferríferas depositaram-se na Bacia Espinhaço em períodos de transgressão marinha regional e vem explicar porque as BIF's tão espessas e contínuas não foram, exceto localmente, "contaminadas" por sedimentos clásticos. E o pacote de filitos grafitosos que intercala entre 2 unidades itabiríticas na Formação Serra do Sapo pode ser considerado como uma autêntica seção condensada que, apesar de pouco espessa, estende-se por cerca de 25 km de Conceição do Mato Dentro inerente à evolução das margens continentais (ALMEIDA ABREU, 1995; ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002).

Alguns autores consideram que as unidades do Grupo Serro não pertencem ao Sistema Espinhaço, sendo as sequências supracrustais (formações Itapanhocanga, Serra do Sapo e Jacém) pertencentes ao Supergrupo Minas e as rochas da Suite Ultramáfica de Alvorada de Minas seriam integrantes de um cinturão de rochas verdes arqueano (ALMEIDA ABREU, RENGER, 2002).

Assim, estas rochas, no todo ou em parte, tem sido incluídas não só no Supergrupo Espinhaço, mas também em outras unidades consideradas mais antigas, tais como a Sequência Vulcano-Sedimentar de Conceição de Mato Dentro, do Supergrupo Minas, ambos do Paleozóico (KNAUER, SCHRANK, 1993).

## CAPÍTULO 3 - METODOLOGIAS

---

### 3.1. PETROGRAFIA

A petrografia é a descrição criteriosa das rochas e, conseqüentemente, dos minerais que as constituem através da observação de suas propriedades ópticas tais como cor, reflectância, anisotropia, reflexões internas, etc. Estudam-se também propriedades morfológicas e estruturais como hábito, clivagem, texturas, intercrescimentos, granulometria, entre outras (FIGUEIREDO, 2000).

Os estudos petrográficos são feitos em lâminas delgadas e seções polidas da rocha ou de minérios ao microscópio óptico, usando luz visível polarizada transmitida ou refletida, geralmente, em grãos maiores que 20  $\mu\text{m}$  (BLOSS, 1999; PRATES, 2008).

### 3.2. MICROSSONDA ELETRÔNICA

A microsonda eletrônica consiste na emissão de raios-X e excitação, na superfície da amostra, por um feixe fino e focalizado de elétrons. A emissão resultante de raios-X é detectada e analisada por espectrômetros de dispersão de comprimento de onda ou de energia (SKOOG et al, 2002).

Para identificar o elemento emissor da radiação podem ser utilizadas energias (ou comprimentos de onda) específicas dos números atômicos dos elementos constituintes. Na faixa de energia de 0 a 20KeV pode ser determinada no mínimo uma linha analítica de raios-X das famílias K, L ou M dos elementos (CHANDLER, 1977).

Dois métodos possíveis são utilizados neste tipo de análise, a espectroscopia por dispersão de energia - EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) e a espectroscopia por dispersão de comprimento de onda - WDS (*Wavelength Dispersive Spectroscopy*).

Um espectrômetro EDS consiste, basicamente, de um detector no estado sólido (diodo, o mais comum é o Si-Li), o qual coleta o espectro completo de raios-X e o transfere para um analisador multicanal. Esse último tem a função de acumular o número de pulsos, produzidos pelo detector, que caírem em uma faixa definida de energia. A altura dos pulsos de corrente gerada é proporcional à energia dos raios-X, podendo ocorrer sobreposição de picos acarretando no aumento da largura desses (CHANDLER, 1977; REED, 1993).

O espectrômetro de dispersão de energia fornece o espectro completo de uma amostra de forma simultânea, propiciando assim rapidez na análise qualitativa dos constituintes. Assim, o EDS favorece análises rápidas; não tem as grandes limitações relativas às suas partes mecânicas e é mais econômico que o WDS. No entanto, devido à baixa resolução do detector EDS, se houver dúvidas quanto a presença ou a concentração de elementos, a amostra deve ser analisada por WDS.

No espectrômetro por dispersão de comprimento de onda (WDS), a separação dos raios-X de várias energias acontece utilizando-se o caráter ondulatório dos fótons que é analisado através de difração. Para um determinado ângulo de incidência ( $\theta$ ) em um cristal com espaçamento ( $d$ ) conhecido, os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) dos raios-X difratados podem ser calculados (através da Lei de Bragg:  $n\lambda=2d\text{sen}\theta$ ). A medição dos raios-X de diferentes  $\lambda$  é dada pela modificação mecânica da posição do cristal difrator e do detector em relação à amostra, para que haja alteração nos ângulos de detecção. Para cobrir a faixa espectral da maioria das linhas características, vários cristais são usados e, portanto, têm-se diferentes espaçamentos interplanares ( $d$ ) (CHANDLER, 1977; SKOOG et al, 2002).

O WDS é usado para análises quantitativas, sendo necessária a realização da padronização dos elementos requeridos precedentemente às análises. No caso de análise de minerais, a microsonda deve ser calibrada a partir de um padrão geológico amplamente conhecido, preferencialmente a um padrão sintético. Esse procedimento minimiza o erro analítico do equipamento uma vez que, ao utilizar na análise um cristal natural com teores para comparação dos resultados, torna-se mais compatível com a realidade geológica (CHANDLER, 1977; REED, 1993).

Algumas das vantagens que o WDS apresenta são a alta resolução, os excelentes limites de detecção, muito boa condição de análise de elementos de baixo número atômico e grande precisão para análises quantitativas (REED, 1993).

Os limites de detecção do método para análises WDS são da ordem de 100ppm, em condições especiais e para alguns elementos, podendo analisar os elementos do Be ao U. Nas análises por EDS esses limites são 1000ppm e são detectados os elementos do B ao U (FIGUEIREDO, 2000).

Assim, a microsonda eletrônica WDS e EDS são técnicas complementares, com caráter multi-disciplinar que fornecem informações físicas e químicas da superfície do material a ser analisado. Na literatura existem várias descrições de aplicações nos campos de Metalurgia,

Geologia e Cerâmica, sendo que nessas matrizes podem ser obtidos resultados tanto qualitativos quanto quantitativos (SKOOG et al, 2002).

### **3.3. ESTUDOS DE INCLUSÕES FLUIDAS**

No processo de formação dos minerais, pequenas quantidades (geralmente microscópicas) dos fluidos formadores podem ficar aprisionadas durante a cristalização e/ou fechamento de fraturas. Estas frações denominam-se inclusões fluidas (IF) e seus estudos permitem determinar as condições reinantes durante o período de seu aprisionamento, uma vez que elas representam micro-amostras características e a identidade do fluido e/ou ambiente mineralizador.

#### **3.3.1. MICROSCOPIA ÓPTICA DAS IF**

A microscopia é o primeiro estudo que se realiza nas IF, fazendo a caracterização dos mesmos com: (i) a identificação dos modos de ocorrência e distribuição no mineral hospedeiro; (ii) a classificação das diversas tipologias quanto à gênese, composição e processos de aprisionamento (homogêneo e heterogêneo) dos fluidos; (iii) a caracterização de acordo com a morfologia; (iv) a verificação da ocorrência de estrangulamentos, vazamentos, crepitação e metaestabilidade e (v) o mapeamento (ROEDDER, 1984; SHEPHERD et al., 1985).

O método abrange ainda informações relevantes como o reconhecimento de fases constituintes nas IF, a estimativa das suas proporções relativas, a viscosidade, as cores das fases líquidas e gasosas, os índices de refração e a birrefringência (ROEDDER, 1984).

As IF, classificadas quanto ao número de fases presentes à temperatura ambiente (~ 25°C), podem ser divididas em:

- Monofásicas: quando apresentam somente uma fase líquida ou gasosa;
- Bifásicas: quando contém duas fases, sejam elas líquida + gasosa, líquida + sólida, duas líquidas ou sólida + gasosa;
- Trifásicas: quando apresentam uma combinação de três fases, sendo as mais comuns líquida + sólida + gasosa e duas líquidas + gasosa;

- Polifásicas: também chamadas de multifásicas, são constituídas por quatro ou mais fases.

De acordo com sua formação, denominam-se primárias as IF formadas durante o crescimento do cristal pelo aprisionamento dos fluidos ou por processos equivalentes, nas irregularidades da superfície de crescimento do mineral.

Inclusões fluidas, classificadas como secundárias, são aquelas formadas após o término da cristalização do mineral, como consequência de esforços diversos, tectônicos ou não, no qual ocorram penetração e aprisionamento de fluidos. Geralmente estão associadas à zonas de fraturamento.

Além desses dois tipos, Roedder (1984) menciona um terceiro tipo que denomina como pseudo-secundárias ou primárias-secundárias, onde as IF são formadas pela cicatrização de fraturas que se desenvolveram durante o crescimento do mineral.

Essas classificações das IF se baseiam em estudos realizados por microscopia óptica. Salienta-se a importância da sua realização previamente às análises microtermométricas para evitar conclusões errôneas com relação ao fluido mineralizador.

Como algumas amostras deste trabalho eram opacas, tornou-se essencial a utilização da microscopia de infravermelho-MIV no estudo das IF. Foram utilizados os mesmos microscópios para petrografia: o LEICA DMRXP e OLYMPUS BX51, ambos abrangendo a região do infravermelho próximo (NIV).

### **3.3.2. MICROTERMOMETRIA**

A microtermometria consiste na indução de mudanças do estado físico, em função da temperatura, nas fases aprisionadas no interior de uma IF, visando determinar a sua composição.

As transformações que se processam e a temperatura em que ocorrem, aliadas aos diagramas de fase, possibilitam estimar a composição química, frações molares, densidade e salinidade dos fluidos, além das temperaturas e pressões mínimas de formação das IF (FUZIKAWA, 1985).

O resfriamento das IF é feito, normalmente, com a circulação de nitrogênio líquido (-196°C) até o congelamento total das fases presentes. Na sequência são executados estágios

de aquecimento gradual, onde se observam as mudanças ocorridas nas IF ao longo do experimento, associadas às respectivas temperaturas. Com esse procedimento se obtém a temperatura eutética ( $T_e$  – início da fusão), a temperatura de fusão do gelo ( $T_{f_{\text{gelo}}}$ ), a formação de clatratos, nucleação ou não da bolha, entre eventos fortuitos. Com essas informações consegue-se inferir a composição química tanto da fase volátil quanto da fase aquosa, além da salinidade da fase aquosa (ROEDDER, 1984; SHEPHERD et al., 1985).

O aquecimento é efetuado por uma resistência elétrica. O limite de temperatura depende da platina utilizada, podendo alcançar de 600°C até 1350°C - alta temperatura (LIMA et al, 2007). O experimento é conduzido até que seja atingida a homogeneização das fases presentes nas IF, tanto para líquido quanto para vapor. A temperatura de homogeneização ( $T_h$ ) (considerada a temperatura mínima de aprisionamento) do fluido fornece informações sobre a densidade ou volume molar da inclusão fluida e suas isócoras (ROEDDER, 1984; SHEPHERD et al, 1985).

Os estudos microtermométricos são efetuados em platinas especiais acopladas aos microscópios petrográficos, que permitem resfriar e/ou aquecer as amostras.

### **3.3.3. ABLAÇÃO A LASER - ESPECTROMETRIA DE MASSA POR PLASMA INDUTIVAMENTE ACOPLADO**

#### **(LA-ICP-MS - LASER ABLATION INDUCTIVELY COUPLED PLASMA - MASS SPECTROMETRY)**

Esta técnica combina a alta resolução espacial do laser, com a alta sensibilidade, baixo limite de detecção e a capacidade de análises multi-elementares (ALLAN et al, 2005), tornando-se portanto um método analítico eficaz para a rápida determinação de traços multi-elementares e ultra-traço de características geológicas (ROEDDER, BODNAR, 1997).

Um pequeno volume do material de interesse é vaporizado, por meio de uma radiação laser focalizado e transportado por argônio diretamente ao plasma indutivamente acoplado (RIDLEY, LICHTER, 1998). Os íons carregados positivamente são extraídos do ICP e enviados para o espectrômetro de massa através de uma interface de alto vácuo, onde serão separados. No espectrômetro de massa a separação ocorre de acordo com as razões massa/carga e energia/carga e são detectados por um elétron secundário multiplicador. Através do campo duplo centralizado do ICP-MS é possível separar interferência isobárica de perturbação molecular e íons atômicos do analito (SYLVESTER, 2001).

A técnica de LA-ICP-MS tem sido amplamente utilizada para análises químicas com capacidade de detectar elementos traços e razões isotópicas em materiais geológicos, cerâmicos, materiais radioativos sólidos, além de outros produtos sintéticos. Sua aplicação no estudo de IF em minerais possibilita a obtenção de resultados composicionais individualizados (FABRE et al, 1999). Algumas dificuldades analíticas perceptíveis se relacionam principalmente com a calibração da matriz e com o fracionamento de elemento causado pela condensação da partícula durante o aquecimento da ablação. Apesar do limite de detecção variar de acordo com o volume da IF, seu intervalo geralmente está entre 1 e 100  $\mu\text{g/g}$  para a maioria dos elementos (ALLAN et al, 2005).

### 3.3.4. ESPECTROSCOPIA MICRO-RAMAN

A espectroscopia Raman consiste na irradiação de uma amostra com uma fonte potente de laser de radiação monocromática na região do visível ou do infravermelho próximo. O espectro da radiação espalhada é medido em um ângulo frequentemente de  $90^\circ$  com um espectrômetro apropriado (SKOOG et al, 2002). Análises em Raman proporcionam informações da composição, da estrutura e da estabilidade do compostos de coordenação.

Os picos que aparecem nos espectros obtidos correspondem às energias vibracionais pertinentes à estrutura molecular da substância refletora. As intensidades das linhas de Raman são de aproximadamente  $10^{-6}$  da intensidade da fonte o que, como consequência, diminui o limite de detecção e dificulta as medidas em relação à espectroscopia no infravermelho (McMILLAN, HOFMEISTER, 1988; SKOOG et al, 2002).

A técnica Raman é mais abrangente em relação ao infravermelho para investigações de sistemas inorgânicos, pois a região vibracional das ligações metal-ligante está posicionada, geralmente, na região de 100 a  $700\text{ cm}^{-1}$ , onde o espectro de Raman é facilmente observado.

Os espectros de Raman tendem a mostrar poucas superposições de picos, fato que diminui o número de interferentes espectrais, facilitando a quantificação. Podem ser ainda utilizadas microsondas de laser, que possibilitam análises quantitativas de analitos em amostras pequenas como: células de bactérias, componentes em partículas de fumaça e espécies em inclusões microscópicas em minerais (SKOOG et al, 2002).

O desenvolvimento de microfeixe para a espectroscopia Raman acarretou um grande avanço para estudos vibracionais na área de Ciências da Terra, principalmente mineralogia e geoquímica. O micro-Raman tem revolucionado o estudo de IF, pois a análise é realizada *in*

*situ*, minimizando problemas de matriz, além de ser pontual, com obtenção de resultados sem ambiguidade (McMILLAN, HOFMEISTER, 1988).

A espectroscopia micro-Raman constitui uma técnica analítica não destrutiva que permite a observação do objeto a ser analisado por meio de um microscópio óptico acoplado ao espectrômetro e focalização do feixe de laser em um ponto de  $3\mu\text{m}$  (FIGUEIREDO, 2000). O foco do feixe de laser incidente forma, aproximadamente, um cilindro, cujas dimensões são dadas pelo comprimento de onda do laser e pelas características óticas da objetiva. Desse modo, o micro-Raman apresenta melhor resolução espacial lateral do que resolução de profundidade (McMILLAN, HOFMEISTER, 1988).

Assim, a IF é irradiada por um micro feixe intenso de luz para causar a emissão de radiação Raman retroespalhada, característica das espécies polinucleares presentes nas IF (McMILLAN, HOFMEISTER, 1988; ROEDDER, BODNAR, 1997).

Essa técnica tornou-se o instrumento padrão para as análises de espécies polinucleares em IF, principalmente gases como o  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e o  $\text{N}_2$ , alguns íons polinucleares ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ) e mesmo algumas fases sólidas de saturação (matéria carbonosa, silicatos de Fe e Mg) (ROEDDER, BODNAR, 1997).

Na literatura há várias publicações que revelam o sucesso da espectroscopia Raman por excitação a laser nas determinações qualitativas e quantitativas das fases individuais nas inclusões fluidas (BELLO et al, 1998; FUZIKAWA, 1985).

### **3.3.5. PLATINA DE ESMAGAMENTO**

A platina de esmagamento é utilizada em análise, qualitativa e semiquantitativa, de gases sob pressão para se verificar a presença de gases nos fluidos das IF (ROEDDER, 1984).

O esmagamento é um método simples e rápido que consegue determinar qualitativamente a presença de alguns gases, principalmente  $\text{CO}_2$  e hidrocarbonetos leves como  $\text{CH}_4$  (FUZIKAWA, 1985; ROEDDER, 1984).

A técnica consiste em pressionar, entre duas lâminas de vidro ajustadas à platina, um fragmento do mineral com inclusões fluidas. Recomenda-se usar um pequeno fragmento do mineral hospedeiro (quanto menor melhor), onde o tamanho do grão não exceda 0,2mm (SHEPHERD et al, 1985).



O mineral a ser esmagado deve estar imerso em um meio líquido apropriado para que se possa observar a liberação dos gases, desde que o gás presente na IF seja relativamente insolúvel à substância utilizada. A glicerina anidra é o líquido preferido, por ser acessível e a maioria dos gases possuem baixa solubilidade, mas nem sempre é o mais apropriado, pois cada gás é inerte a uma solução específica (ROEDDER, 1984; SHEPHERD et al, 1985).

Ao se pressionar o fragmento, a pressão será gradualmente aumentada e controlada até a quebra total do grão, observando-se a ruptura das inclusões fluidas com a liberação dos gases e a reorganização das bolhas expandidas (SHEPHERD et al, 1985).

O processo de esmagamento pode ser acompanhado ao microscópio, com objetivas de longa distância focal que facilitam o manuseio da platina e favorecem a observação mais detalhada do experimento devido ao aumento do campo visual.

Ressalta-se a importância do uso correto da platina de esmagamento para se evitar interpretações errôneas sobre a pressão reinante nas IF. Para que isto seja alcançado, deve ser observado cuidadosamente o volume dos fluidos presentes nas IF, a frequência e o tamanho com que as IF ocorrem no grão, a existência das bolhas de ar aderentes ao cristal após sua imersão, o uso de meios de imersão com o líquido apropriado conforme o gás a detectar e o aumento para a observação da crepitação (FUZIKAWA, 1985).

## CAPÍTULO 4 - PARTE EXPERIMENTAL

---

### 4.1. EQUIPAMENTOS

Para realização dos estudos petrográficos foram utilizados os microscópios de infravermelho LEICA DMRXP e OLYMPUS BX51, que trabalham na região do infravermelho próximo permitindo a observação de amostras opacas à luz visível, estes pertencentes ao Laboratório de Inclusões Fluidas e Metalogênese (LIFM) do CDTN.

Para os estudos microtermométricos de minerais opacos e translúcidos foi utilizada a platina de infravermelho FTIR600 - Linkam acoplada ao microscópio OLYMPUS BX51 com luz transmitida e incidente, juntamente com os controladores automáticos LNP 94/2 e TMS 94 e software Linksys 32 – Linkam. O equipamento tem como diferencial permitir trabalhar na região do infravermelho próximo *NIR* (RIOS et al, 2006b). A captura de imagens foi feita na câmera de infravermelho QUICAM fast 1394 da QIMAGING™ junto com o programa QCAPTURE SUITE.

Os resultados microtermométricos obtidos foram tratados no software MacFlinCor 0.93, programa específico para interpretação de inclusões fluidas de diversos sistemas químicos que permite o cálculo de isócoras P-T, instalado em um Macintosh (BROWN, HAGEMANN, 1994).

A microssonda eletrônica utilizada foi da marca JEOL modelo JXA8900RL, com 4 espectrômetros WDS e 1 EDS, imageamento de elétrons retroespalhados e secundários, com tensão de aceleração de 15-20 kV e corrente de feixe de elétrons de 12 nA. Todas as amostras foram metalizadas com carbono evaporado formando uma película com espessura de aproximadamente 250Å. Os padrões usados na determinação WDS são da Coleção Ian Steele. O equipamento pertence ao consórcio CDTN/UFMG e encontra-se localizado no Departamento de Física do ICEx-UFMG.

Alguns dados WDS da microssonda eletrônica foram tratados em um microcomputador utilizando o programa Minpet 2.02.

Para a realização do esmagamento foi utilizada a platina de esmagamento francesa Chaixmeca, encaixada ao microscópio óptico OLYMPUS BX51.

As análises por ablação a laser com plasma indutivamente acoplado espectrometria de massa (LA-ICP-MS) das inclusões fluidas foram realizadas no LA-ICP-MS Laboratory do

Institute of Geological Science da Universidade de Leeds, Inglaterra pelo professor Yardley e sua equipe. O equipamento utilizado foi o ICP-MS Agilent 7500c e o sistema de LA Microlas Q Plus com um excimer laser 193nm.

Os estudos de espectroscopia micro-Raman foram realizados na Escola de Engenharia da UFMG, no espectrômetro Raman da marca JOBIN YVON – HORIBA, modelo LabRam HR800 com laser (He Ne) 632,8nm e potência 17mW. Os dados foram tratados no programa LabSpec.

## **4.2. AMOSTRAGEM**

A amostragem de campo foi realizada em setembro de 2007 na Serra do Sapo, distrito de Conceição do Mato Dentro, MG, em parceria com a empresa MMX Mineração & Metálicos S.A. sob a orientação do geólogo Henrile P. Meireles – à época Coordenador de Geologia da Jazida Serra do Sapo, com a colaboração dos geólogos Polianna Costa e Marcelo Mendes também da mesma empresa.

A amostragem objetivou uma coleta representativa de todos os estilos de mineralizações, tipos de veios, litologias e gerações de hematita (TAB. 3).

TABELA 3 - Relação das amostras coletadas.

Jazida	Furo de sondagem	Profundidade (m)	Litologia
Serra do Sapo*	MMX1	afloramento	Hematita semi-compacta
Serra do Sapo*	MMX2	afloramento	Es specularita com quartzo
Serra do Sapo	SEFDSP01	213,05	Hematita compacta
Serra do Sapo	SEFDSP01	215,15	Hematita compacta com bandamento
Serra do Sapo	SEFDSP01	231,15	Veio de quartzo cortado com hematita compacta
Serra do Sapo	SEFDSP01	235,25	Veio quartzo com hematita deformada
Serra do Sapo*	SEFDSP17	314,55	Quartzo com veios de hematita deformada
Serra do Sapo*	SEFDSP25	46,70	Hematita friável, quartzo com specularita
Serra do Sapo	SEFDSP28	48,40	Hematita friável
Serra do Sapo	SEFDSP28	78,00	Hematita semi-compacta bandada em contato quartzo com grãos de hematita
Serra do Sapo	SEFDSP28	83,30	Hematita compacta de granulometria maior
Serra do Sapo	SEFDSP28	110,00	Hematita semi-compacta
Serra do Sapo	SEFDSP28	156,00	Hematita compacta com hematita tardia

\*amostras enviadas anteriormente ao trabalho de campo pela empresa MMX.

### 4.3. LAMINAÇÃO

No Laboratório de Laminação e Polimento do CDTN, foram confeccionadas lâminas petrográficas, de IF, polidas e bipolidas das amostras ferríferas da Serra do Sapo. Foram executadas as seguintes etapas:

- i. impregnação a vácuo da amostra com Entellan (Merck);
- ii. corte da amostra na área selecionada da rocha, utilizando um disco diamantado;

- iii. redução da espessura de uma das faces da amostra, usando abrasivo (mistura de óxido de alumínio e carbureto de silício) de três granulometrias diferentes: 150, 600 e 1000 micras;
- iv. polimento da face desbastada da amostra com pasta de alumina ou diamante;
- v. lavagem da amostra com água e sabão e secagem com gás comprimido;
- vi. abrasão suave, com abrasivo de granulometria 1000, da lâmina de vidro na dimensão desejada para melhor adesão;
- vii. repouso da amostra e da lâmina de vidro em chapa de aquecimento a 50°C por aproximadamente 2 horas até a total secagem;
- viii. colagem do lado da amostra polida na lâmina de vidro levemente desbastada com uma mistura de cola “araldite 24h”; ou com Entellan que permite, neste caso, o descolamento posterior se necessário;
- ix. corte da amostra colada no vidro com a menor espessura possível;
- x. repetição das etapas i (se necessário), iii, iv, v.

No total foram confeccionadas e estudadas 17 lâminas referentes a dez amostras diferentes, das quais a maioria era bipolida: MMX1, MMX2, FSP01-PROF.213,05m (2), FSP01-PROF.231,15m (4), SEFDSP17-PROF.314,55m, SEFDSP25-PROF.46,70m, SEFDSP28-PROF.78,00m, SEFDSP28-PROF.83,30m, SEFDSP28-PROF.156,00m (2); e outras três polidas: FSP01-PROF.213,05m, FSP01-PROF.231,15m, FSP01-PROF.235,25m.

Após a preparação das lâminas, realizou-se o estudo microscópico e petrográfico ao microscópio OLYMPUS BX51, com caracterização dos minerais e posteriormente mapeamento das inclusões fluidas.

#### **4.4. PLATINA DE INFRAVERMELHO FTIR600 - LINKAM**

Um novo sistema específico para se trabalhar na região do infravermelho, constituído de microscópio, platina e controladores, câmera para captura de imagem e respectivos softwares, foi adquirido através do projeto PPM, financiado pelo CNPq, FAPEMIG e CNEN. Instalar e colocar em rotina os novos equipamentos de IV, com total integração, aprendizagem de manuseio, assim como a adequação ao método de estudo e calibração fez parte da proposta de trabalho desta dissertação, conforme já mencionado.

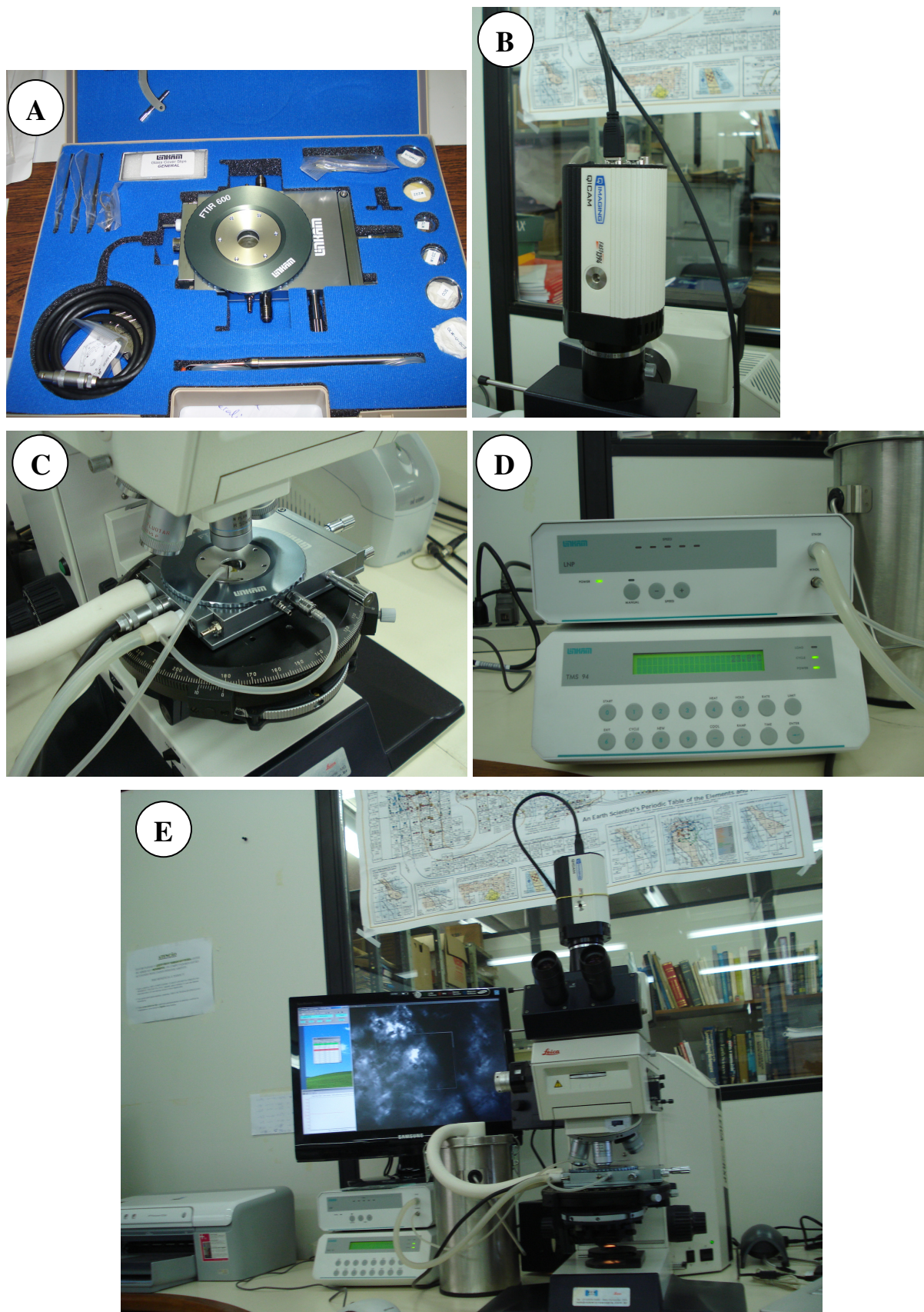
Trata-se da primeira platina de infravermelho (IV), vendida pela Linkam, para aplicações na área de geociências.

A platina FTIR600 – Linkam, específica para se trabalhar na região do infravermelho próximo *NIR*, é programada através dos controladores TMS94 - Linkam para o aquecimento e LNP94/2 - Linkam para o resfriamento (FIG. 5). Os dados obtidos são computadorizados em tempo real de análise, através da interface dos controladores com o computador e a utilização do software Linksys 32 – Linkam.

A FTIR600 – Linkam trabalha com um manipulador XY de grande mobilidade que permite a observação de um amplo campo visual da amostra ao longo do experimento, além de facilitar a localização das áreas de análise. Contém conectores para entrada e saída dos cabos dos controladores de nitrogênio, do gás de purga e anti-embaçante além de uma porta lateral para entrada do porta-amostra, uma tampa superior com janela de vidro transparente para o encaixe da objetiva microscópica e visualização e presilhas na parte inferior para sua fixação no microscópio OLYMPUS BX51, evitando-se assim seu deslocamento e conseqüentemente perda do campo de observação visual (FIG. 5).

Devido à variedade de porta-amostra, a FTIR-600 Linkam permite análises tanto em amostras sólidas quanto líquidas. Os quatro porta-amostra são: (i) um disco de quartzo com 10mm de diâmetro (W10Z); (ii) um disco de safira com 7mm de diâmetro (W7S); (iii) um sistema de lamínulas de vidro com 16mm de diâmetro (W16G) alternadas com anéis de aço inoxidável (RI17); (iv) ou ainda um cadinho de quartzo com 17mm de diâmetro por 3mm de altura (THMS/Q). Para suportar essa estrutura, os porta-amostras são colocados em cadinhos apropriados (G7T; G10T e THMS/CC) para que sejam inseridos na platina.

O resfriamento é feito pela inserção de um fluxo de nitrogênio líquido, podendo atingir uma temperatura mínima de cerca de -196,0 °C sob o controle do LNP94/2 - Linkam, que se conecta à platina, ao recipiente com N<sub>2</sub> (l) e ao computador. Já o aquecimento é efetuado por uma resistência elétrica, podendo atingir um máximo de +600,0°C, controlado pelo TMS94 – Linkam e obtendo-se temperaturas corretas e precisas.



**FIGURA 5** - Imagens da (A) Platina FTIR600 – Linkam; (B) câmera QICAM fast 1394 da QIMAGING™, (C) platina acoplada ao microscópio de infravermelho; (D) controladores TMS94 - Linkam e o LNP94/2 - Linkam; e (E) o sistema completo agrupado.

Os controladores permitem programar: (i) a um limite de temperatura, (ii) a velocidade do experimento ( $^{\circ}\text{C}/\text{min.}$ ), (iii) perfis sequenciados de aquecimento e/ou resfriamento que atingem um específico limite de temperatura em um período de tempo; (iv) o tempo de permanência a certa temperatura; (v) sequências de medições, com rampas diversificadas e/ou em ciclos.

O TMS94 - Linkam usa uma termopar tipo S de Pt / Rh com precisão da temperatura de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ , uma resolução comutável de  $0,1^{\circ}\text{C}$  a  $0,01^{\circ}\text{C}$  e uma variação do tempo de espera entre as sequências (hold) de 0 a 9999 segundos.

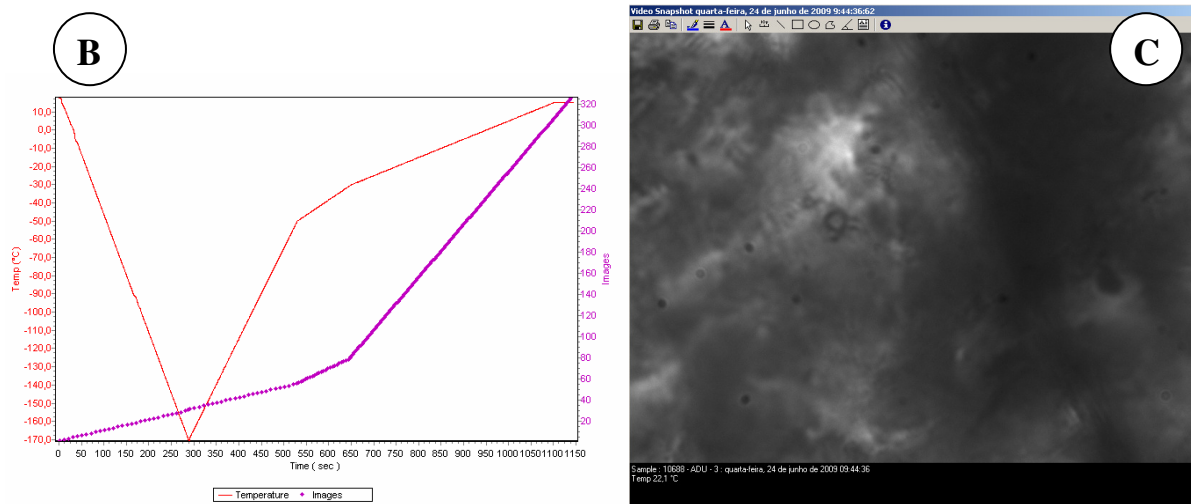
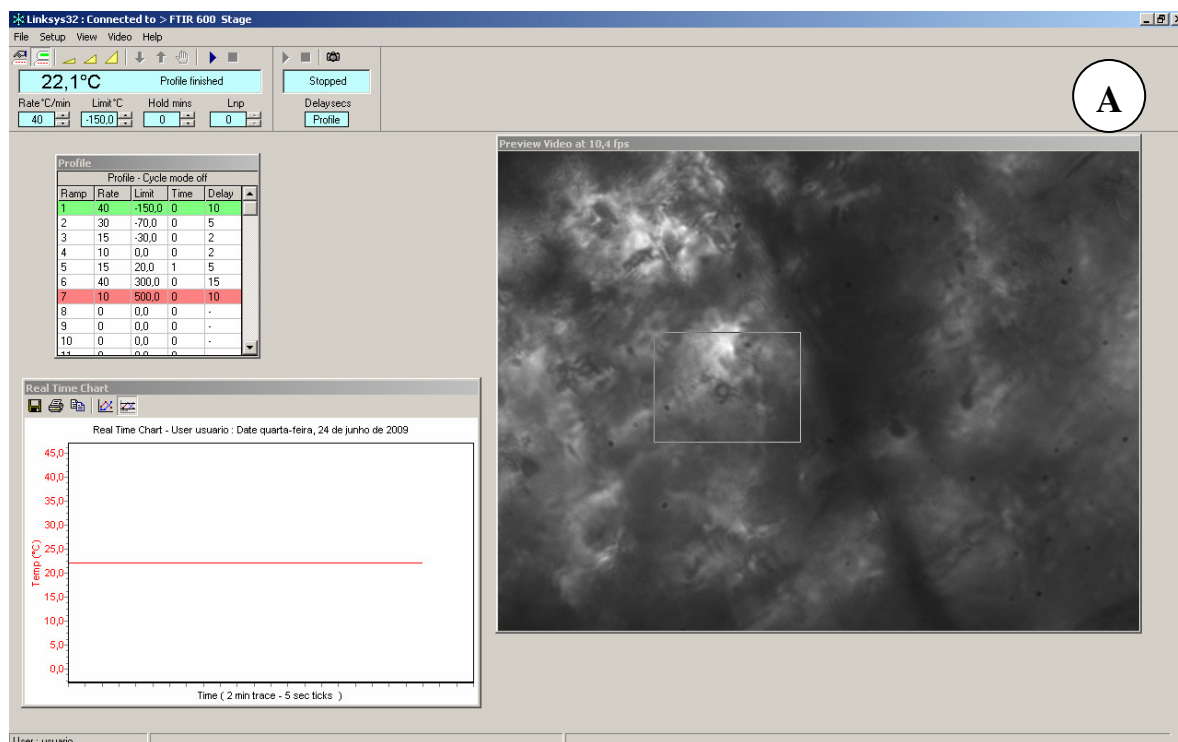
O LNP94/2 - Linkam pode atingir taxas com valores de até  $-130^{\circ}\text{C}/\text{min}$  e, dependendo das condições, também reduzir a quantidade de  $\text{N}_2(\text{l})$  gasto, com maior repetibilidade nos resultados.

Por se tratar de minerais opacos, a análise deve ser seguida por observação visual que requer uma câmera de infravermelho para captura de imagens. Para complementar esses novos equipamentos, específicos para região do IV, a câmera de infravermelho QUICAM fast 1394 da QIMAGING™ foi associada ao programa QCAPTURE SUITE, através de uma interface digital que permite o seu total controle, com rápida transferência de imagens da câmera para o computador e obtenção de fotos (FIG. 5).

O software Linksys 32 - Linkam (FIG. 6) é o responsável por integrar todos os componentes da platina com a câmera, tornando-os automatizados. O programa permite definir as condições experimentais e executa automaticamente todos os comandos, concebendo gráfico da temperatura em função do tempo real de análise e armazenamento dos dados. Ao mesmo tempo tem-se disponível a visualização da amostra ao longo do experimento com captura de imagens e dados da análise (temperatura momentânea, velocidade, identificação da amostra, equipamentos utilizados, data e hora). Adicionalmente, é possível fazer a edição das fotos e produzir vídeos, com a reprodução fiel da análise.

O sistema integrado pela platina FTIR600 – Linkam de infravermelho acoplada ao microscópio OLYMPUS BX51 com luz transmitida e incidente, a câmera QUICAM fast 1394 da QIMAGING™ e o software Linksys 32 – Linkam foi instalado no LIFM/CDTN. Embora o fabricante da platina advertisse sobre a não necessidade de sua calibração anteriormente ao início das análises microtermométricas, foram realizados testes do equipamento comparados com a platina de aquecimento/resfriamento FLUID INC. U.S.G.S. (United States Geological Survey).





**FIGURA 6** - Imagem da (A) janela do software Linksys 32 – Linkam, (B) com o gráfico gerado e (C) a foto para produção do vídeo.

Foram avaliados o grau de transparência com diversas IF de diferentes amostras opacas e a calibração da platina com conferência dos valores de temperatura das inclusões fluidas sintéticas do padrão Bubbles Inc.

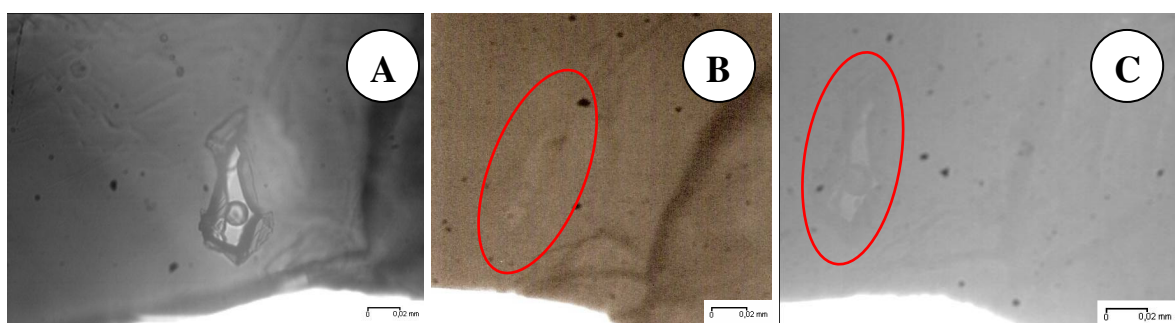
Para a calibração não foi necessário nenhum ajuste nos valores na FTIR600-Linkam, ocorrendo apenas a verificação das temperaturas pois essa se encontrava calibrada, com medidas precisas e exatas, mostrando erro na casa decimal.

A maioria das IF tiveram a transparência prejudicada após inserção na platina, o que se agravou ao longo da microtermometria. Foram feitos testes tanto de resfriamento quanto de aquecimento na platina, os quais demonstraram o seu bom funcionamento, com a observação da amostra e obtenção de informações a respeito do fluido composicional da IF. Notou-se claramente que a nitidez ficava prejudicada no aquecimento quando comparada ao resfriamento. Isso pode ser associado com a influência do calor na captura de imagem uma vez que se trata de uma câmera de infravermelho.

Avaliando as platinas, notou-se que a FLUID INC. U.S.G.S. teve uma visualização bastante precária durante o experimento a baixas temperaturas, restringindo observações da modificação de fase e na exatidão dos dados (FIG. 7). Portanto, a FTIR600 – Linkam apresentou melhores condições de trabalho, bons resultados e melhores condições de visualização (dentro do limite do sistema), além do diferencial de seu sistema ser automatizado, o que propicia amplas vantagens.

Deve-se destacar, no entanto, que os experimentos foram realizados com microscopia de infravermelho, o que implica trabalhar com algumas limitações visuais, quando comparado com os estudos rotineiros de IF em minerais transparentes.

Os estudos microtermométricos desenvolvidos foram realizados com a nova platina FTIR600 - Linkam, específica para análises na região do *NIR*, nas IF presentes nos minerais opacos e transparentes.



**FIGURA 7** - Fotomicrografias da IF à temperatura de 26,7°C externa à platina (A); inserida na platina U.S.G.S. (B); e inserida na platina FTIR600 - Linkam (C). Amostra MMX 2 - Serra do Sapo.

## CAPÍTULO 5 - RESULTADOS

---

As amostras estudadas apresentam, em geral, hematita e quartzo como minerais principais e, em alguns casos, calcita, clorita e moscovita como minerais secundários. A estrutura bandada é um aspecto habitual das amostras de hematita na área de estudo (FIG. 8).



**FIGURA 8** - Hematita bandada com quartzo (*BIF*).

Foram aplicadas as metodologias descritas no Capítulo 3, conforme as características de cada amostra e disponibilidade do equipamento. Salienta-se que nem todos os minerais foram analisados por todas as técnicas descritas.

Visando destacar o contexto das formações ferríferas da Serra do Sapo, os resultados são apresentados por técnicas utilizadas nos respectivos minerais. Os dados de algumas análises encontram-se nas tabelas, em anexo, restringindo-se o texto à apresentação dos resultados de maior relevância.

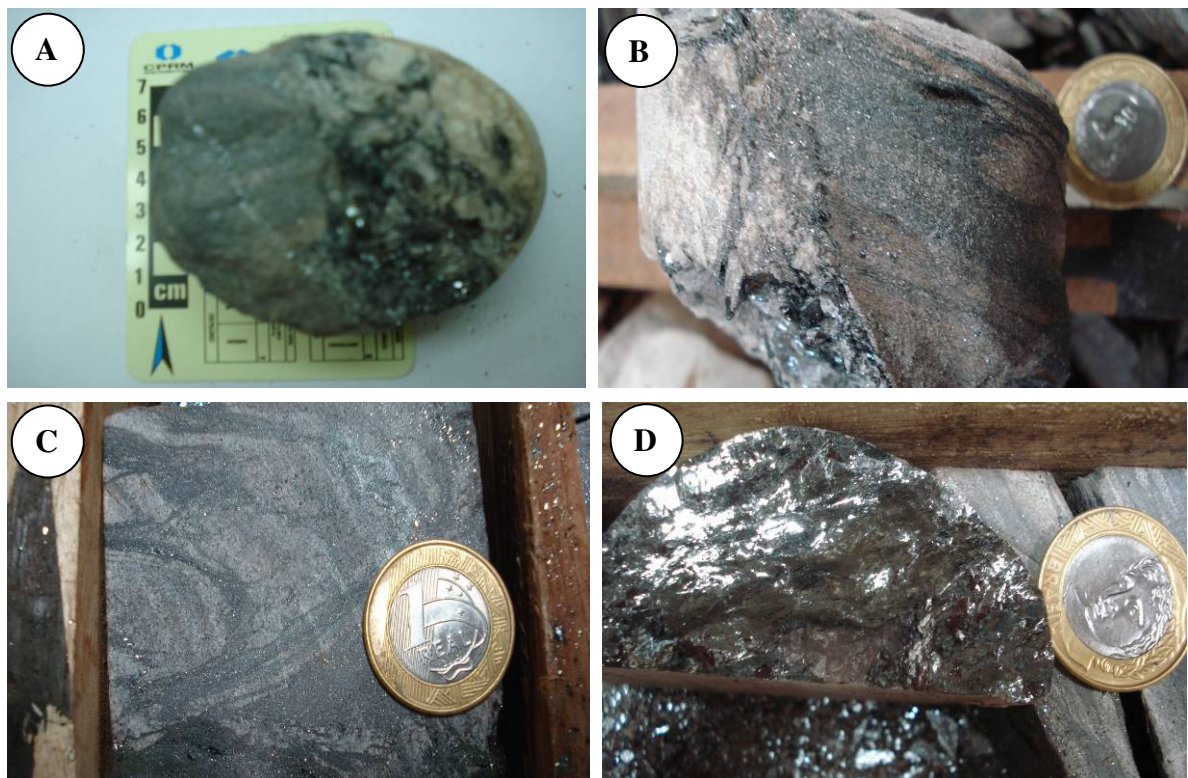
### 5.1. PETROGRAFIA

Durante as análises petrográficas das amostras coletadas foram identificados os minerais presentes, suas associações, textura, coloração, hábito, intercrescimento e grau de deformação.

### 5.1.1. Hematita

A hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) possui estrias na face cristalográfica  $c$ , elasticidade quando lamelar, dureza 6,5 e cor de traço vermelho. Não exibe clivagem, embora a variedade especular possa apresentar uma partição micácea pronunciada. Tornam-se magnéticas somente depois de serem reduzidas no fogo. Sob luz polarizada refletida é uniaxial negativa (BARTHELMY, 2009; DEER et al, 1974; GAINES et al, 1997; MACHADO et al, 2009; RALPH, RALPH, 2009; WINGE et al, 2009).

O aspecto da hematita mostra-se bem diversificado, variando de acordo com o local de amostragem. Geralmente apresenta coloração cinza claro a cinza escuro, textura granoblástica a lepidoblástica, estrutura foliada, maciça ou granular, hábito lamelar (especularita) a granular e brilho metálico (FIG. 9).



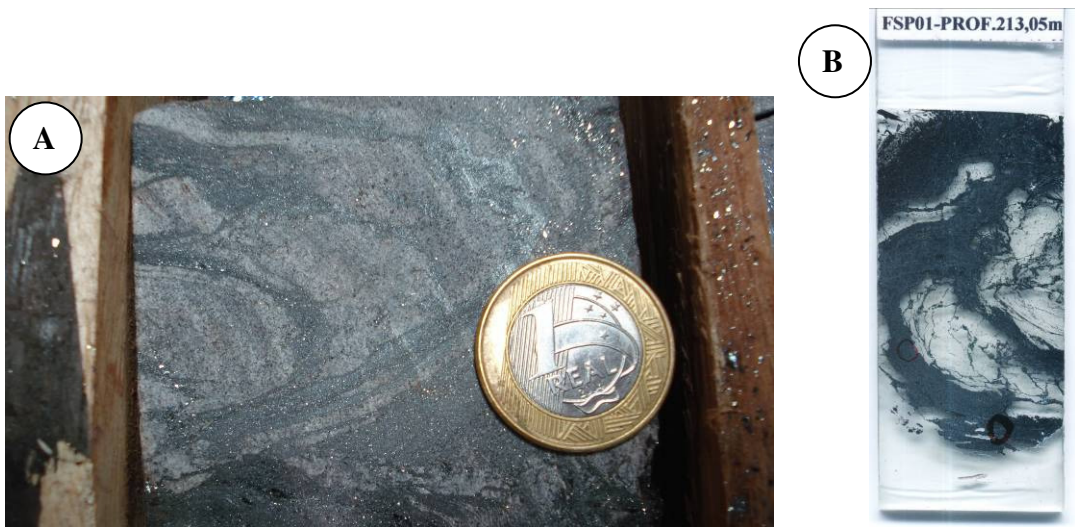
**FIGURA 9** - Aspectos texturais das diferentes amostras de formações ferríferas da Serra do Sapo: (A) hematita friável (B) hematita semi-compacta (C) hematita compacta (D) especularita.

Estudos aprofundados não foram possíveis em todas as amostras coletadas, uma vez que nem todas possuíam o grau necessário de transparência, mesmo quando submetidas à incidência da radiação *NIR*. Isso inviabilizou os estudos nas amostras SEFDSP17-PROF.314,55m, SEFDSP25-PROF.46,70m, SEFDSP28-PROF.83,30m.



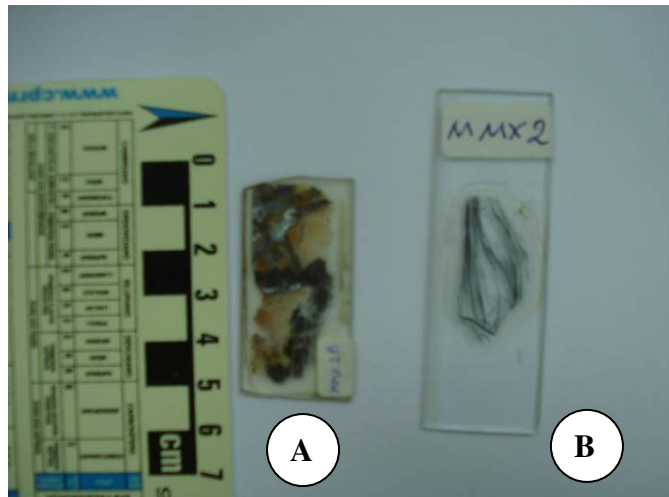
Na amostra FSP01-PROF.235,25m os cristais de hematita estão mais bem formados quando comparados às amostras descritas acima, porém escassas regiões apresentaram transparência adequada. Observa-se também deformação da hematita no veio de quartzo. Ocorrem algumas IF muito pequenas (aproximadamente 5 microns) e escuras na hematita.

Na amostra FSP01-PROF.213,05m observa-se que o mineral sofreu deformação, pois está dobrado e corta o quartzo (FIG. 10).



**FIGURA 10** - (A) Fotografia da amostra FSP01-PROF.213,05m e (B) sua respectiva lâmina delgada.

As amostras MMX foram enviadas pela empresa MMX Mineração & Metálicos S.A. sem informação, no entanto, de sua exata localização. De acordo com as características das amostras, todas coletadas em afloramento, foram encontrados dois tipos de hematita: (i) MMX1 com hematita semi-compacta, de brilho metálico, coloração cinza avermelhado; (ii) MMX2 com hematita lamelar / especularita, na qual as lâminas são pequenas, com brilho metálico, cor cinza e inclusas no quartzo sem direção preferencial (FIG. 11).



**FIGURA 11** - Fotografia das lâminas das amostras (A) MMX1, (B) MMX2.

A especularita da amostra MMX2 não apresentou transparência, impossibilitando seu estudo. Posteriormente foram preparadas lamínulas com outros pedaços de especularita dessa amostra, que apresentaram boa transparência sob a radiação IV, condição essa também observada na hematita da amostra MMX1.

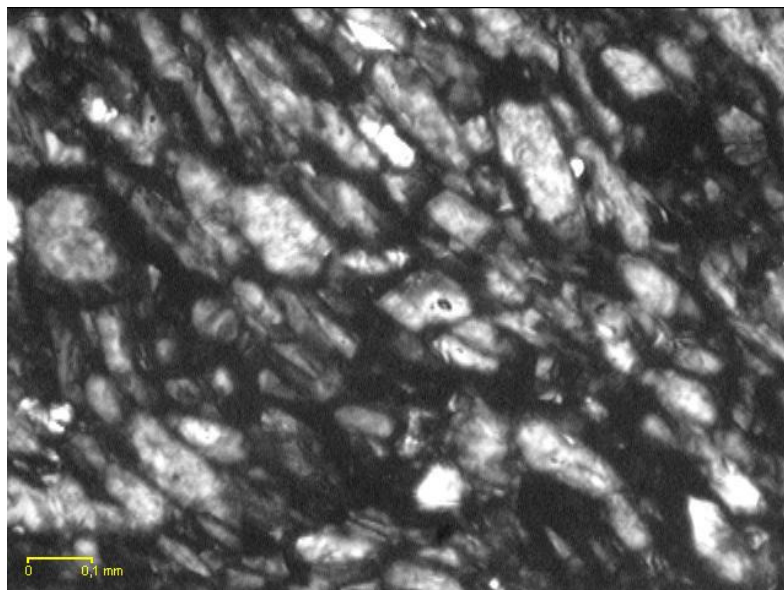
A transparência ou não da hematita pode ocorrer em função da variação da composição original dos sedimentos, da intensidade de deformação, do grau de metamorfismo e alteração hidrotermal (ROSIÈRE, RIOS, 2004).

As hematitas foram agrupadas e classificadas de acordo com as características apresentadas, enquadrando-se em três gerações diferentes: Hematita I, II e III.

#### 5.1.1.a.Hematita I

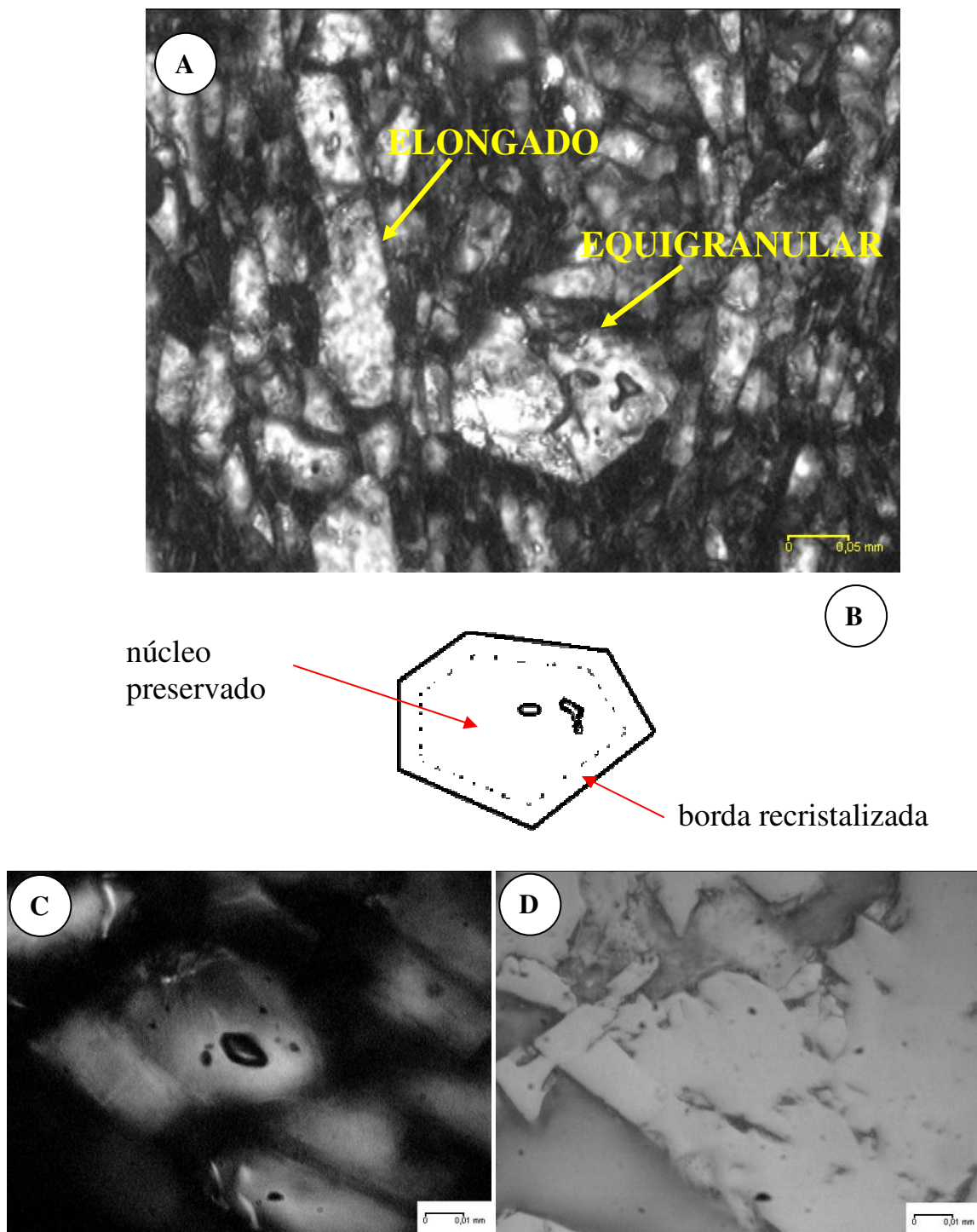
Os seguintes aspectos caracterizam esta geração de hematita: (i) granular com tendência tabular; (ii) mineral recristalizado na borda; (iii) mineral orientado; (iv) as inclusões fluidas aparecem no núcleo do cristal; (v) o mineral não está relacionado ao veio de quartzo. Aparentemente trata-se da geração precoce de hematita (FIG. 12).

A hematita correspondente à geração I será denominada hematita granular com tendência tabular e pode ser observada na amostra FSP01-PROF.213,05m.



**FIGURA 12** - Fotomicrografia da Hematita I (hematita granular) sob luz transmitida IV. Amostra FSP01-PROF.213,05m.

A Hematita I é constituída por grãos equigranulares (aprox. 0,16 x 0,14 mm) ou alongados (aprox. 0,2 x 0,05 mm) em um arranjo de textura granoblástica, recristalizados na borda (FIG. 13). Em hematitas da Mina Conceição, por exemplo, essa textura foi considerada resultante de recristalização parcial em função de processos pós-tectônicos (ROSIERE et al, 2001; ROSIERE, RIOS, 2004).



**FIGURA 13** - Fotomicrografias da Hematita I granular (A) destaque para os cristais alongados e equigranulares. (B) Ilustração do cristal equigranular com recristalização nas bordas e núcleo preservado com presença de IF. Outro cristal com IF no centro (C) sob LT, (D).sob LR,. Amostra FSP01-PROF.213,05m.

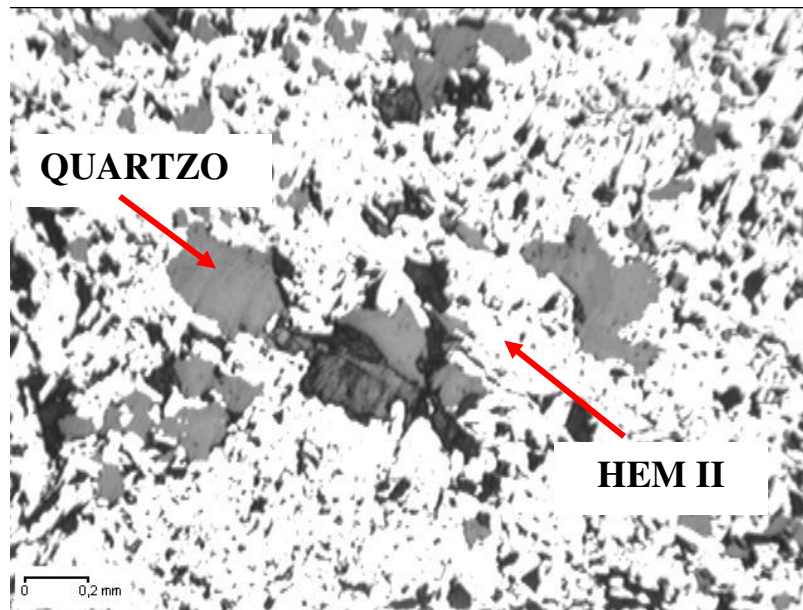
#### 5.1.1.b. Hematita II

O termo Hematita II designa a hematita tabular/especularítica com quartzo (FIG. 14), observada na amostra FSP01-PROF.213,05m.



Suas características são: (i) tabular/especularítica com quartzo entremeado; (ii) ausência de transparência; (iii) formação posterior à Hematita I.

As relações texturais indicam que o tipo morfológico da hematita II (cristais tabulares) foi desenvolvido posteriormente à hematita I, sugerindo sua formação secundária como consequência de esforços metamórficos. Ressalta-se também sua ocorrência em zonas, posteriores à hematita I, cortadas pelo quartzo. Sob luz infravermelha, encontraram-se vestígios da hematita I em contato com alguns dos cristais tabulares da hematita II.



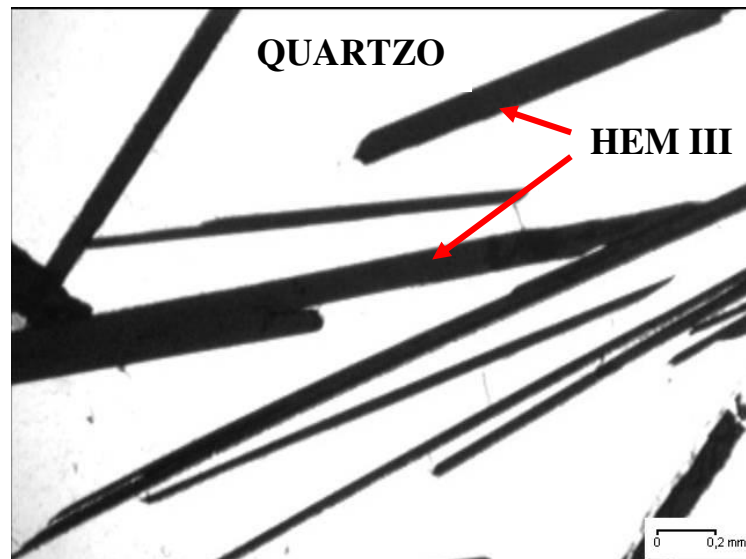
**FIGURA 14** - Fotomicrografia da Hematita II (hematita tabular/especularítica) com quartzo, sob luz refletida. Amostra FSP01-PROF.213,05m.

Quanto ao aspecto, a Hematita II ocupa uma posição intermediária entre a fase granular (Hem. I) e a especular (Hem. III), com feição tabular. A sua relação com o quartzo não é bem definida, apresentando minerais desordenados, sem homogeneidade, às vezes predominando cristais maiores (0,5 x 0,3 mm) de quartzo e outras vezes de hematita. Também é possível observar cristais menores, de formato irregular.

A ausência de transparência da Hem. II dificultou um maior detalhamento, obtendo-se poucas informações sobre as características petrográficas do mineral.

### 5.1.1.c. Hematita III

Denomina-se hematita III a especularita *ss*, presente na amostra MMX2. Exibe típicos (i) cristais alongados especularíticos e inseridos (ii) na massa de quartzo (FIG. 15). É provável que se trate da geração mais tardia de hematita.



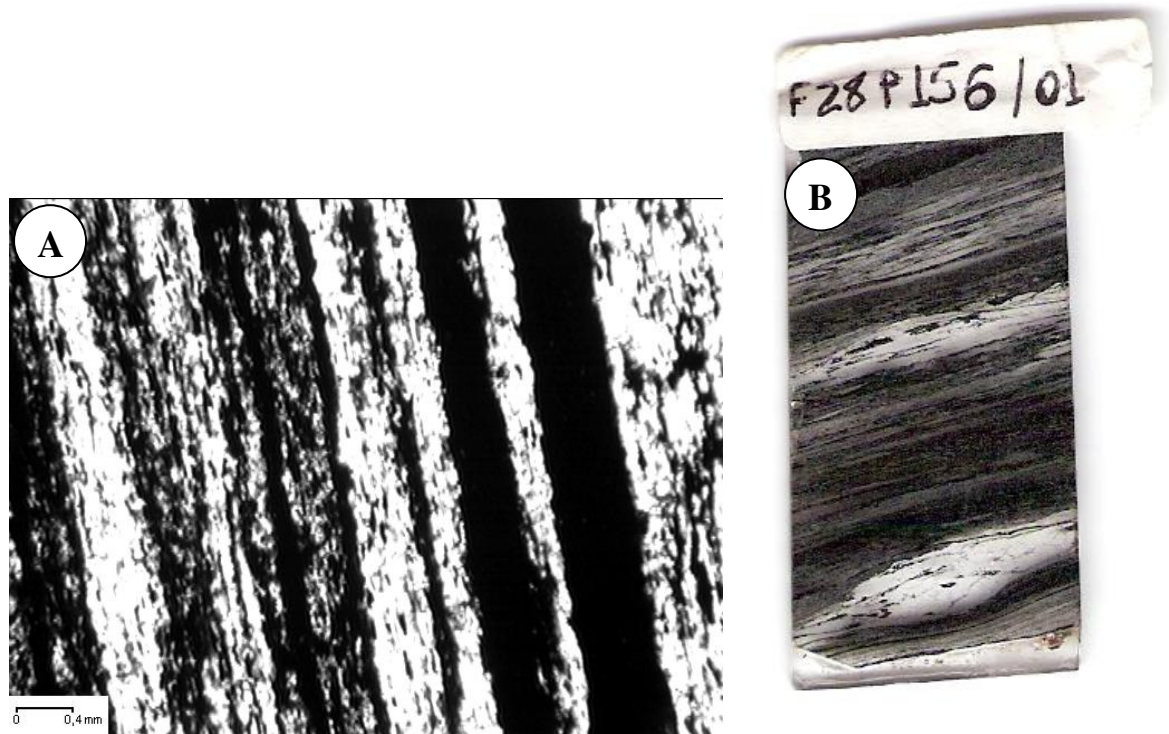
**FIGURA 15** - Fotomicrografia da Hematita III (especularita) no veio de quartzo sob a radiação *NIR* com luz transmitida. Amostra MMX2.

A hematita/especularita apresenta cristais placóides, alongados, de tamanho médio 3 mm, com formato poligonal, acicular e textura xistosa sendo encontrada nos veios de quartzo-hematita. A Hematita III também está entrelaçada a outros minerais, como clorita e mica (FIG. 16).



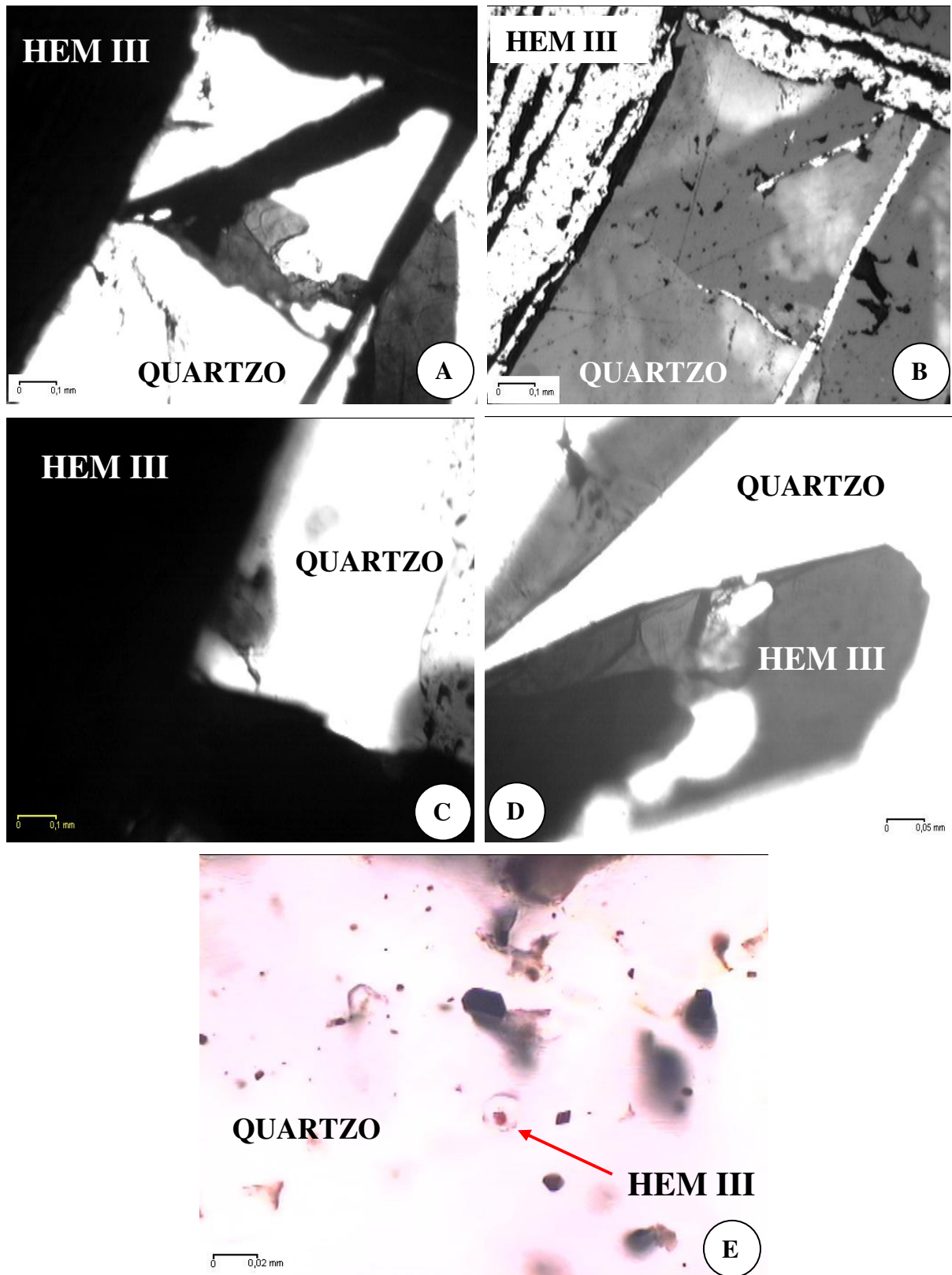
**FIGURA 16** - Fotomicrografias da Hematita III (especularita) associada à mica e a clorita (A) sob a luz transmitida polarizada; (B) luz refletida. Amostra FSP01-PROF.231,15m.

A Hematita III compõe a formação ferrífera bandada (BIF) apresentando pequenas placas sem formato definido, formando finas camadas intercaladas com quartzo (FIG. 17).



**FIGURA 17** - Fotomicrografia da especularita (cor preta) intercalada com o quartzo (cor cinza) (BIF) sob a radiação IV LT (A) e imagem da superfície da lâmina digitalizada (B). Amostra FSP28-PROF.156,00m.

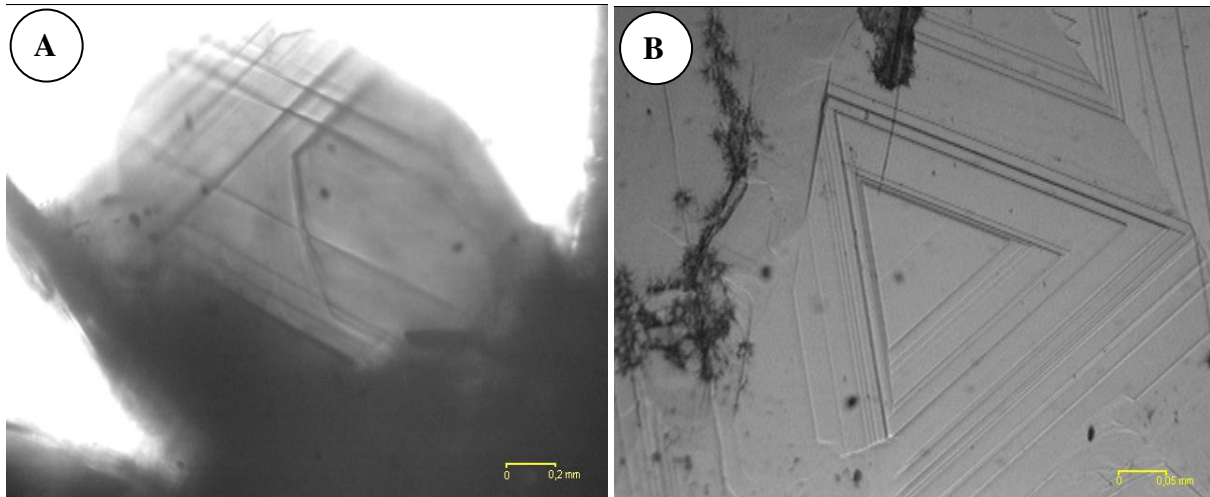
A ordem de formação desses minerais ainda não está totalmente definida, uma vez que a Hematita III tanto pode englobar o quartzo, quanto pode ser englobada por ele. Na FIG. 18 observa-se esta correlação revelada com o uso da microscopia de infravermelho (FIG. 18A, B). A especularita se forma aprisionando pedaços de quartzo mas também ocorrem pequenos cristais de hematita completamente envolvidos pelo quartzo (FIG. 18D, E).



**FIGURA 18** - Fotomicrografias mostrando a formação da especularita em relação ao quartzo sob a radiação IV. (A) placa de especularita formando-se sob quartzo entre os cristais – LT (B) imagem “A” com LR (C) filete de especularita ligando os dois - LT (D) especularita contendo cristais de quartzo - LT (E) quartzo envolvendo a hematita - LT. Amostra FSP01-PROF.231,15m.



Destaca-se hematita/especularítica lamelar, com geminação e linhas de crescimento nítidas (FIG. 19).



**FIGURA 19** - Fotomicrografias da especularita com linhas de crescimento sob a radiação IV (A) LT (B) LR. Amostra MMX2.

Sob a incidência da radiação na região do infravermelho próximo, a especularita foi o mineral que apresentou melhor transparência em relação às três gerações de hematita estudadas. Isto pode estar relacionado à presença de prováveis elementos traços que ocupam os interfícios da rede cristalina e a modificam ou substituem os elementos principais compatíveis.

Na literatura não existe diferença composicional entre a hematita e a especularita. Strunz e Nickel (2002) definem especularita (ou ferro especular) como sinônimo da hematita. Cristalograficamente tanto a hematita quanto a especularita são classificadas como óxidos simples, com uma razão cátion:oxigênio 2:3, no sistema trigonal e estrutura romboédrica (GAINES et al, 1997; STRUNZ, NICKEL, 2002). As hematitas podem exibir uma ampla variação do hábito e sendo assim, a especularita é considerada como a versão especular da hematita (BARTHELMY, 2009, MACHADO et al, 2009, RALPH, RALPH, 2009, WINGE et al, 2009).

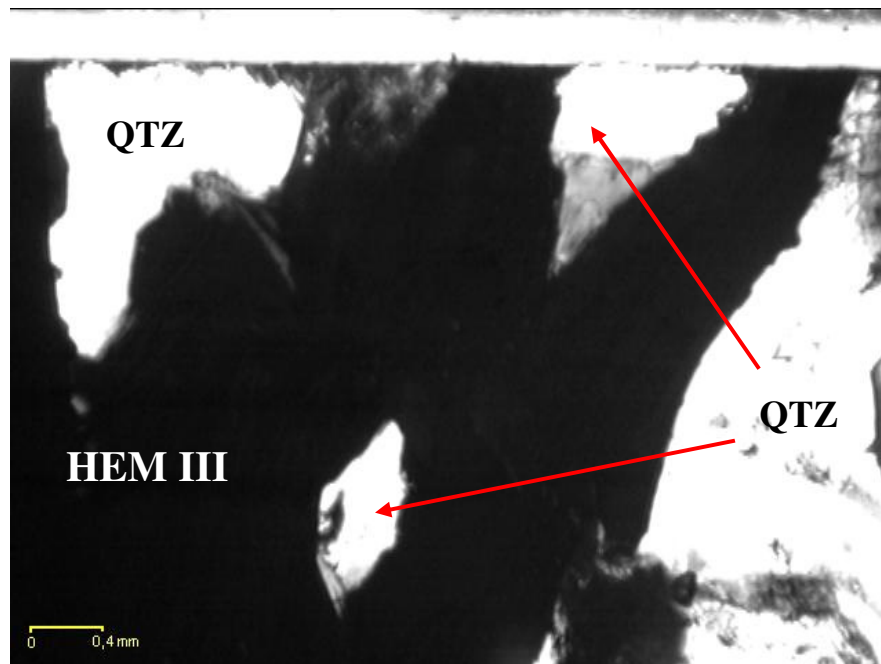
Embora o escopo deste trabalho não contemple a investigação da transparência diferenciada nas diversas gerações de hematita, as análises realizadas por microsonda eletrônica fornecem resultados sobre a composição das Hematitas I, II e III. Permanece decisivamente indefinida a questão da transparência preferencial em alguns cristais de hematita sob a radiação IV. Para auxiliar na compreensão desse fato sugere-se desenvolver

trabalhos posteriores, para determinação da cristaloquímica através de difração de raios-X, espectroscopia no infravermelho, além de análises da composição química com a devida quantificação de elementos traços (LA-ICP-MS) e termogravimetria, entre outras técnicas.

### 5.1.2. Quartzo

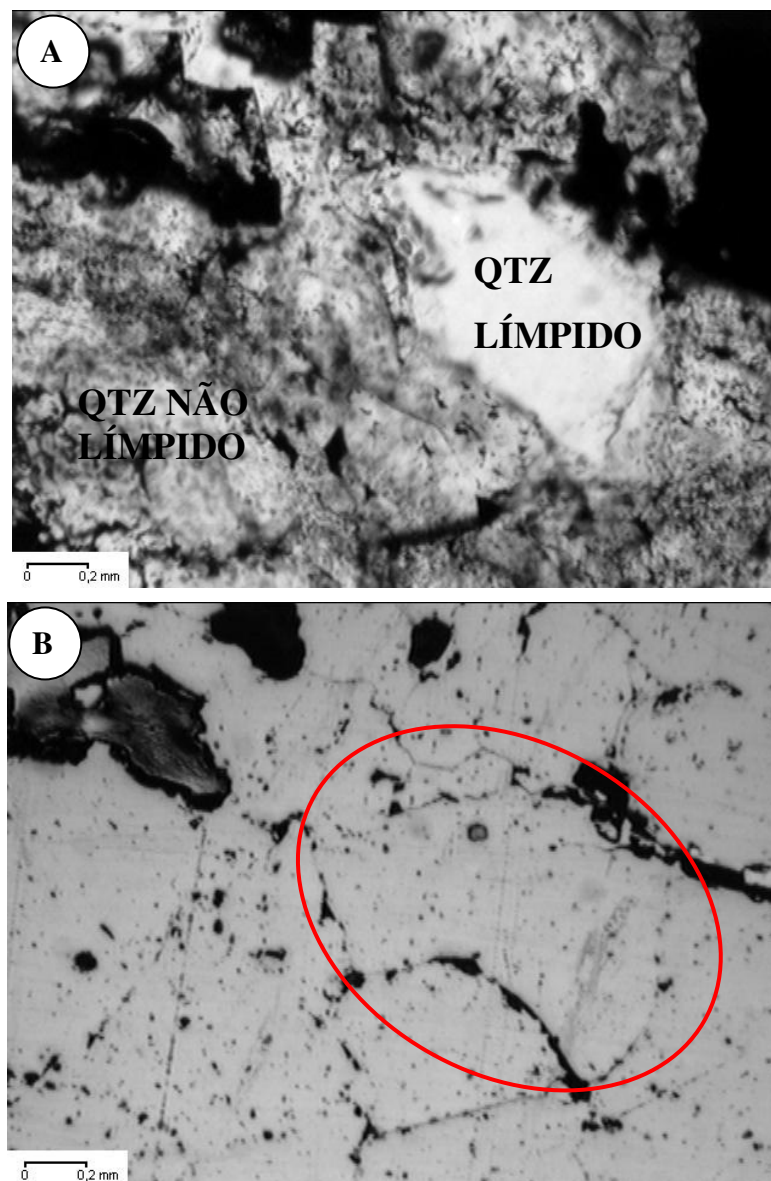
O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é um mineral que possui muitas variedades (rosa, leitoso, ametista, etc.) e cores diversas, traço de cor branco, dureza 7, hábito cristalino prismático. Não tem clivagem e a fratura é conchoidal, com brilho vítreo e sob luz polarizada é uniaxial positivo. Segundo Strunz e Nickel, 2002, é classificado como óxido com razão metal:oxigênio 1:2, na subdivisão dos cátions pequenos, Família da Sílica no Grupo Quartzo. O seu sistema é trigonal, na classe trapezoédrica (DEER et al, 1974, GAINES et al, 1997, BARTHELMY, 2009, MACHADO et al, 2009, RALPH, RALPH, 2009, WINGE et al, 2009).

A presença do quartzo é usual nas amostras selecionadas e frequentemente aparece associado à hematita, seja sob a forma de finas camadas nas BIF's intercalando a hematita, ou como veios, ou em forma de corpo maciço (agregado) envolvendo a specularita (FIG. 17, 15, 14). Também foi notada a presença de quartzo incluído na specularita (FIG. 20).



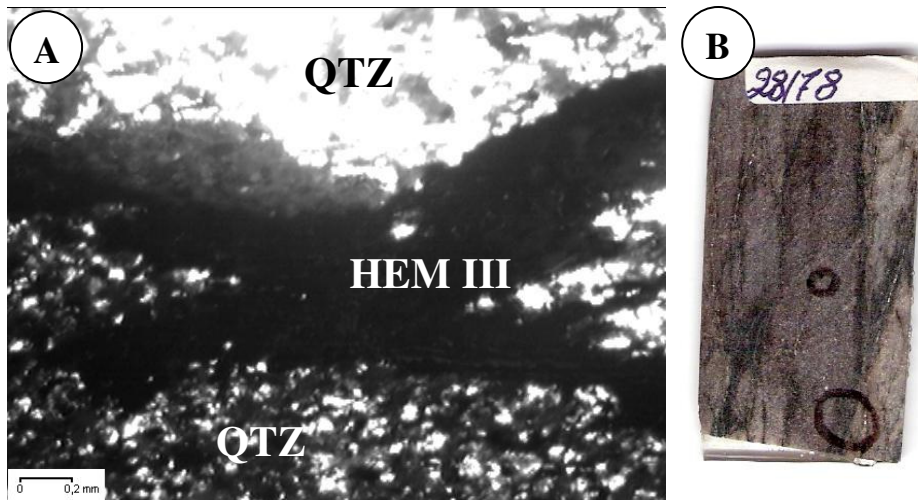
**FIGURA 20** - Fotomicrografia do quartzo envolvido pela specularita sob a radiação *NIR* com luz transmitida. Amostra FSP01-PROF.231,15m.

Notou-se diferenças morfológicas no quartzo numa mesma região das amostras estudadas, sendo um mais límpido e outro sujo (FIG 21). O quartzo límpido aparece em menor frequência, com grãos de contorno definido rodeados pelo quartzo não límpido. No geral, esse último tipo de quartzo, sem formato definido e com aspecto de “poeira” mesclado na massa, é o predominante. Sob luz refletida não se observou diferenças texturais entre os dois tipos de quartzo, somente distinguindo-os através do contorno do grão (FIG. 21). Foi sugerido então que também existem na área em estudo gerações distintas de quartzo.



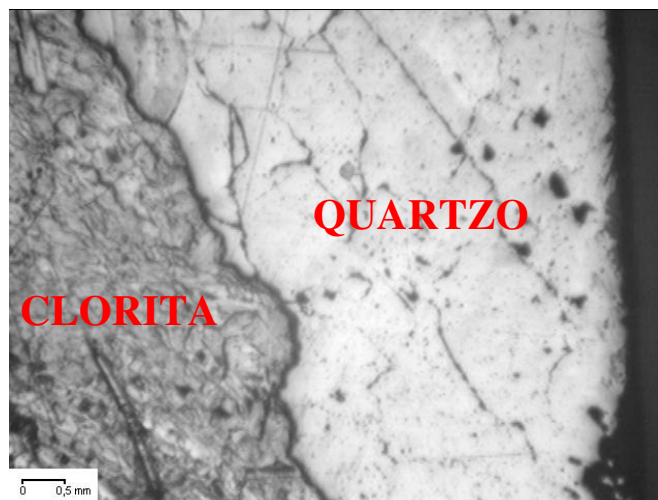
**FIGURA 21** - Fotomicrografias do quartzo límpido e não límpido sob a radiação *NIR* com (A) luz transmitida e (B) luz refletida. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

Em outra amostra o quartzo exibe grãos com aspectos distintos, separados pela especularita. Embora ambos mostrem aparência turva foram distinguidos pela concentração de pequenos grãos de óxidos de ferro mesclados ao quartzo. A região mais densa reflete, em amostra de mão, uma coloração rósea (FIG. 22).



**FIGURA 22** - (A) Fotomicrografia dos quartzos não límpidos separados pela hematita sob a radiação IV LT (B) imagem da lâmina digitalizada. Amostra FSP28-PROF.78,00m - Serra do Sapo, CMD.

Também foi observada as relações entre o quartzo e os demais minerais observados nas lâminas. Todos estão associados ao quartzo porém exibem diferentes superfícies de contato com ele. Dentre os minerais estão a clorita, a mica, a calcita e a granada (FIG. 16, 23, 25, 26, 27).



**FIGURA 23** - Fotomicrografia do quartzo em contato irregular com a clorita sob a radiação NIR (LR). Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

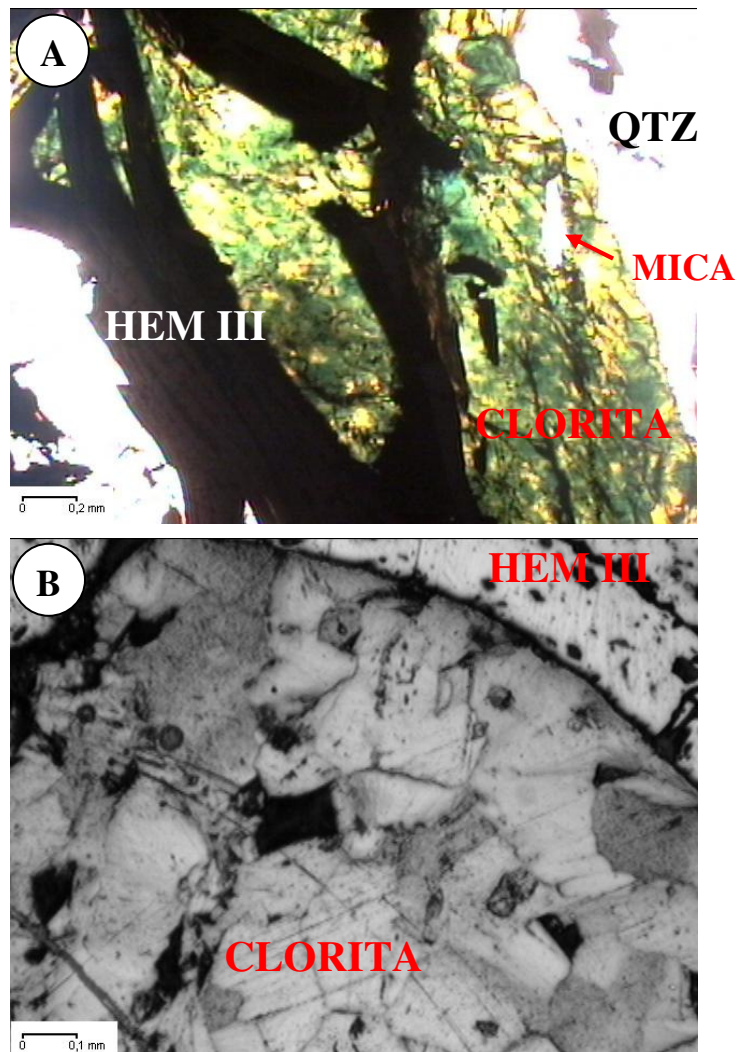


### 5.1.3. Outros Minerais

#### 5.1.3.a. Cloritas

A clorita  $((\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_{12}[(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_{16})$  é um filossilicato, de estrutura em camadas muito semelhante a da mica, de hábito lamelar/micáceo, geralmente formada por alteração de outros minerais, através de processos secundários, hidrotermais ou metamórficos (DEER et al, 1971; DEER et al, 1974; GAINES et al, 1997; RALPH, RALPH, 2009; STRUNZ, NICKEL, 2002; MACHADO et al, 2009).

A clorita ocorre somente em algumas regiões da área estudada sendo observada somente na amostra FSP01-PROF.231,15m. Apresenta coloração verde amarelada e aparece associada ao quartzo, mica e hematita III (especularita) (FIG. 24). Acredita-se que a clorita formou-se junto a hematita III.

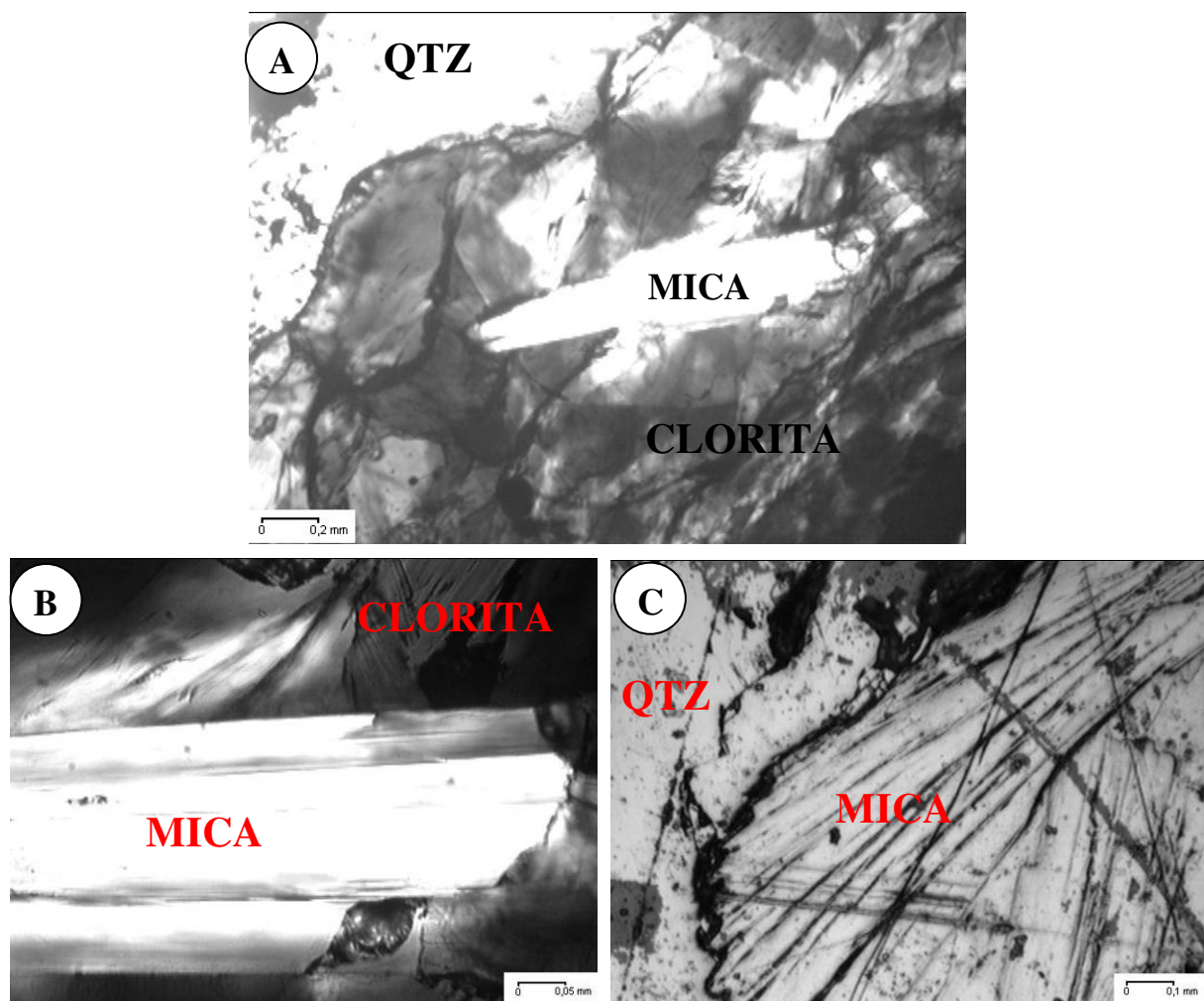


**FIGURA 24** - Fotomicrografias da clorita nas amostras estudadas sob a radiação NIR (A) LT e (B) LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

### 5.1.3.b. Micas

As micas pertencem ao grupo dos filossilicatos e são caracterizadas pelo hábito micáceo (placas ou folhas), coloração variada, forte pleocroísmo e uma perfeita clivagem basal, podendo ser facilmente partidas. São alumino-silicatos com fórmula geral  $X_2Y_{4-6}[(Si,Al)_8O_{20}](OH, F)_4$  que apresentam uma ampla variação química (K, Na, Mg, Al, Fe, Li, etc). Dependendo do(s) elemento(s) constituinte(s) presentes são classificadas como moscovita, biotita, lepidolita entre outros (DEER et al, 1971; DEER et al, 1974; STRUNZ, NICKEL, 2002; MACHADO et al 2009; RALPH, RALPH, 2009).

As micas ocorrem com menor frequência na amostragem analisada e em grande parte como porções internas no meio da clorita, podendo ser observada somente nas lâminas da amostra FSP01-PROF.231,15m (FIG. 24A e 25).

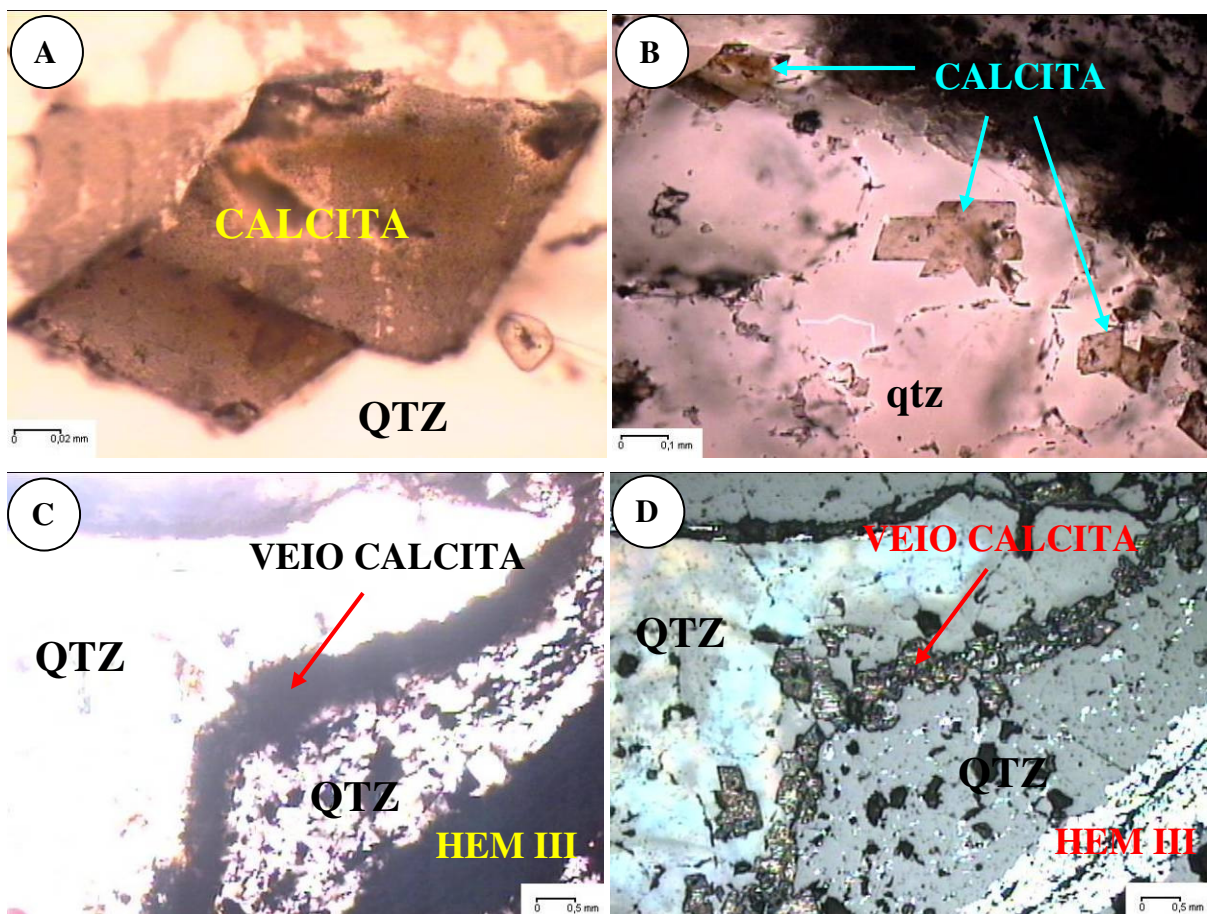


**FIGURA 25** - Fotomicrografias da clorita nas amostras estudadas sob a radiação *NIR* (A, B) LT; (C) LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

### 5.1.3.c. Calcita

A calcita é um carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), com ampla variedade de formas e cores, sendo o mais comum o hábito prismático ou romboédrico. Sob luz polarizada é uniaxial negativo e possui clivagem perfeita, o que facilita sua identificação (DEER et al, 1974; STRUNZ, NICKEL, 2002; BARTHELMY, 2009; MACHADO et al, 2009; WINGE et al, 2009).

A calcita nas lâminas estudadas apresentou cristais isolados com coloração amarelo escuro a marrom, de tamanho médio de 0,20 x 0,15mm, rodeados pelo quartzo, com hábito romboédrico bem evidente e característico. Também foi possível encontrar veios de calcita incluso no quartzo e envolvendo minerais como a granada, a mica e pedaços de óxido de ferro e quartzo (FIG. 26).



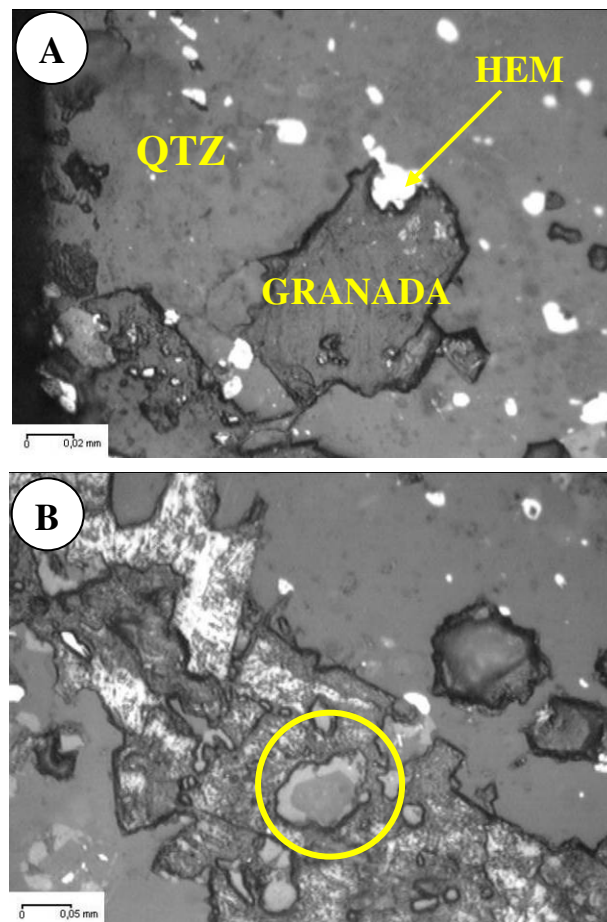
**FIGURA 26** - Fotomicrografias da calcita nas amostras estudadas (A, B, C) LT e (D) LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.



#### 5.1.3.d. Granada

Os minerais do grupo das granadas possuem fórmula geral  $X_3Y_2[SiO_4]_3$ , onde  $X=Ca$ ,  $Fe$ ,  $Mg$ ,  $Mn$ , etc. e  $Y=Al$ ,  $Cr$ ,  $Fe$ , etc. Podem ser incolores ou exibir colorações róseas, amareladas ou marrons em seção laminada. Não apresentam clivagem, têm textura complexa e são distinguidos por seus altos índices de refração e também por serem minerais isotrópicos. As granadas são minerais característicos particularmente de rochas metamórficas, mas também podem ser encontrados nos outros tipos de rochas (BARTHELMY, 2009; DEER et al, 1974; DEER et al, 1975; STRUNZ, NICKEL, 2002).

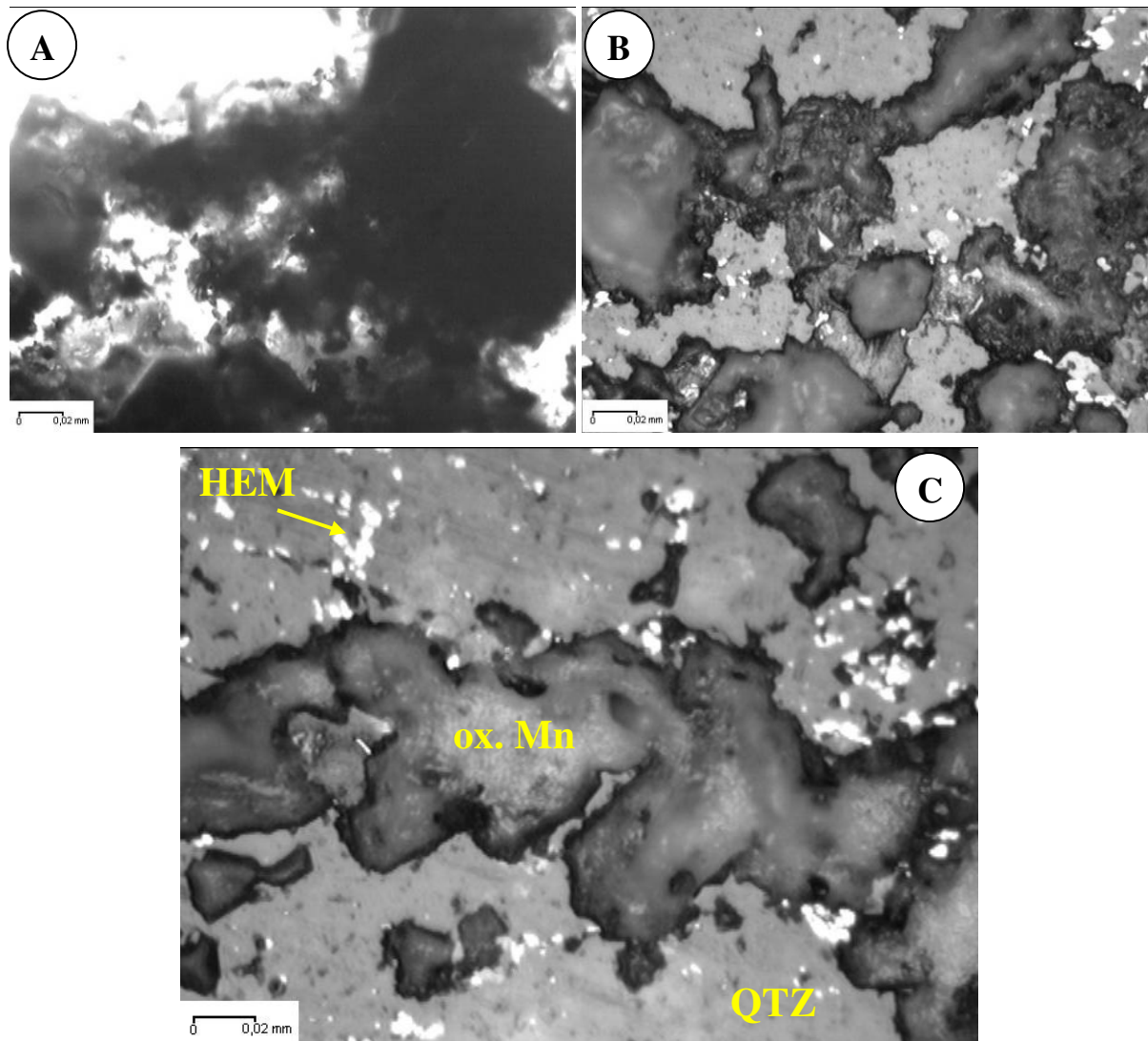
As granadas, assim como as micas, são pouco frequentes e ocorrem em cristais finos, geralmente contidos no veio de calcita ou no meio do quartzo (FIG. 27). As granadas aparecem contornando pequenos grãos de quartzo formando as coronas (FIG. 27B). Outra relação de contato observada é da granada com a hematita III, na qual essa hematita é envolvida pela granada (FIG. 27A).



**FIGURA 27** - Fotomicrografias das granadas nas amostras estudadas sob a radiação *NIR LR* (A) granada em contato com a hematita inserida no quartzo (B) granada envolvendo o quartzo (corona) e dentro do veio de calcita. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

### 5.1.3.e. Óxido de manganês

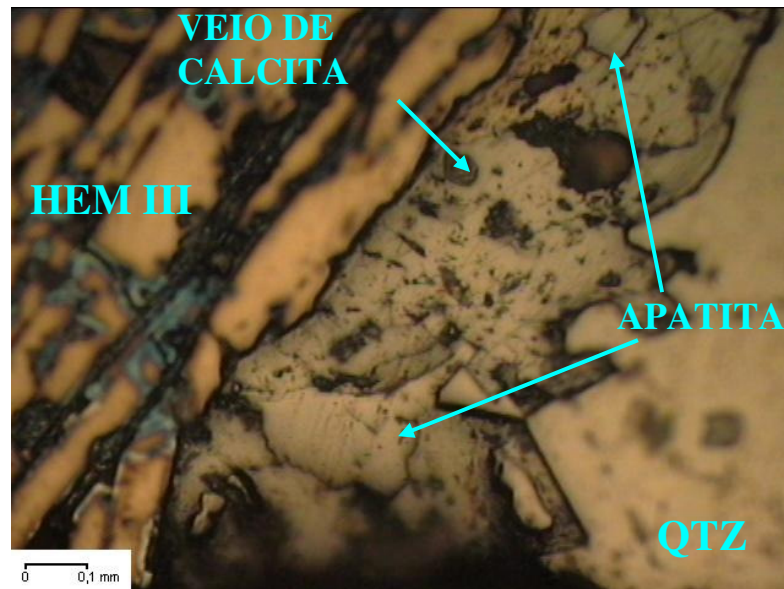
Junto aos grãos de hematita-especularita observa-se um mineral que não foi identificado petrograficamente, devido ao mau polimento das amostras. Esse mineral apresenta-se sem formato definido, aparece placóide em veios e exibe aspecto pregueado, cor preta e brilho metálico. Encontra-se na massa de quartzo, próximo à especularita e, às vezes, contém vestígios de granada. A análise por microsonda eletrônica permitiu identificá-lo como um óxido de manganês (FIG. 28).



**FIGURA 28** - Fotomicrografias do veio de óxido de manganês no quartzo sob a radiação *NIR* (A) um aglomerado do óxido de manganês com a LT (B) imagem “A” com LR (C) óxido de manganês com hematita - LR. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

### 5.1.3.f. Apatita

A apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{OH},\text{Cl})$ ), observada em pequenos cristais, geralmente está contida no veio de calcita ou associada ao quartzo. É incolor, com polarização similar à do quartzo, com elevado índice de refração (FIG. 29).



**FIGURA 29** - Fotomicrografia da apatita no veio de carbonato sob a radiação NIR (LR). Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

## 5.2. MICROSSONDA ELETRÔNICA

As análises por microsonda eletrônica (ME) foram realizadas nos minerais descritos petrograficamente em diferentes regiões, com o objetivo de se conhecer suas respectivas composições químicas e confirmar a classificação dos minerais. Foram feitas tanto análises qualitativas por EDS, quanto quantitativas por WDS.

A tensão ideal para ser usada nas análises por ME deve ser 2 a 3 vezes maior que a energia do elemento a analisar (por exemplo:  $K\alpha \text{ Fe}=6,7\text{KeV} \therefore \text{tensão}=15\text{KeV}$ ). Um outro fator é a corrente ( $i$ ) utilizada, pois quanto maior a corrente melhor será a análise, porém maior será o diâmetro ( $\varnothing$ ) do feixe. Foi escolhida a corrente  $i=20\text{nA}$  resultando em um  $\varnothing \approx 1\mu\text{m}$ .

O tempo de contagem ( $t$ ) também influencia, uma vez que seu aumento melhora a qualidade dos resultados acarretando, no entanto, maior custo e maior tempo de análise. Assim, a padronização para os elementos presentes em maior quantidade foi realizada em um

tempo menor enquanto um tempo maior foi empregado para os elementos traços (ex. na hematita  $t=10s$  para o Fe e  $t=20s$  para o Ti).

Nas análises por WDS, ressalta-se o problema na padronização, pois dependendo dos elementos analisados pode haver sobreposição das raiais  $K\alpha$  e  $K\beta$  com valores muito próximos. Assim deve-se conhecer os valores de energia dos elementos separados, eleger a respectiva raia mais conveniente, e se necessário, fazer a correção do valor do pico descontando o valor relativo do outro elemento, caso haja interferência da raia escolhida após a junção dos espectros. Também salienta-se que as mesmas condições experimentais estabelecidas durante a padronização foram aplicadas às amostras.

Para o efeito da não homogeneidade do padrão foram analisados 6 vezes (“tiros”) em locais distintos e em 2 cristais diferentes para um mesmo elemento. Além disso, no mineral sob estudo selecionaram-se locais limpos, isto é, sem buracos, rachaduras, partes escuras ou estranhas, e longe das bordas, para evitar a aquisição do valor errado do pico.

Nas amostras analisadas seguiram-se as mesmas condições para seleção do cristal a ser analisado, principalmente devido ao efeito da não homogeneidade. Esta é uma questão relevante, pois analisar áreas com irregularidades pode conduzir a conclusões errôneas. O uso de cristais distintos e grandes em diferentes lâminas foi útil para comparar a composição de um mesmo mineral estudado, além de permitir um tratamento estatístico e aumentado a representatividade das análises.

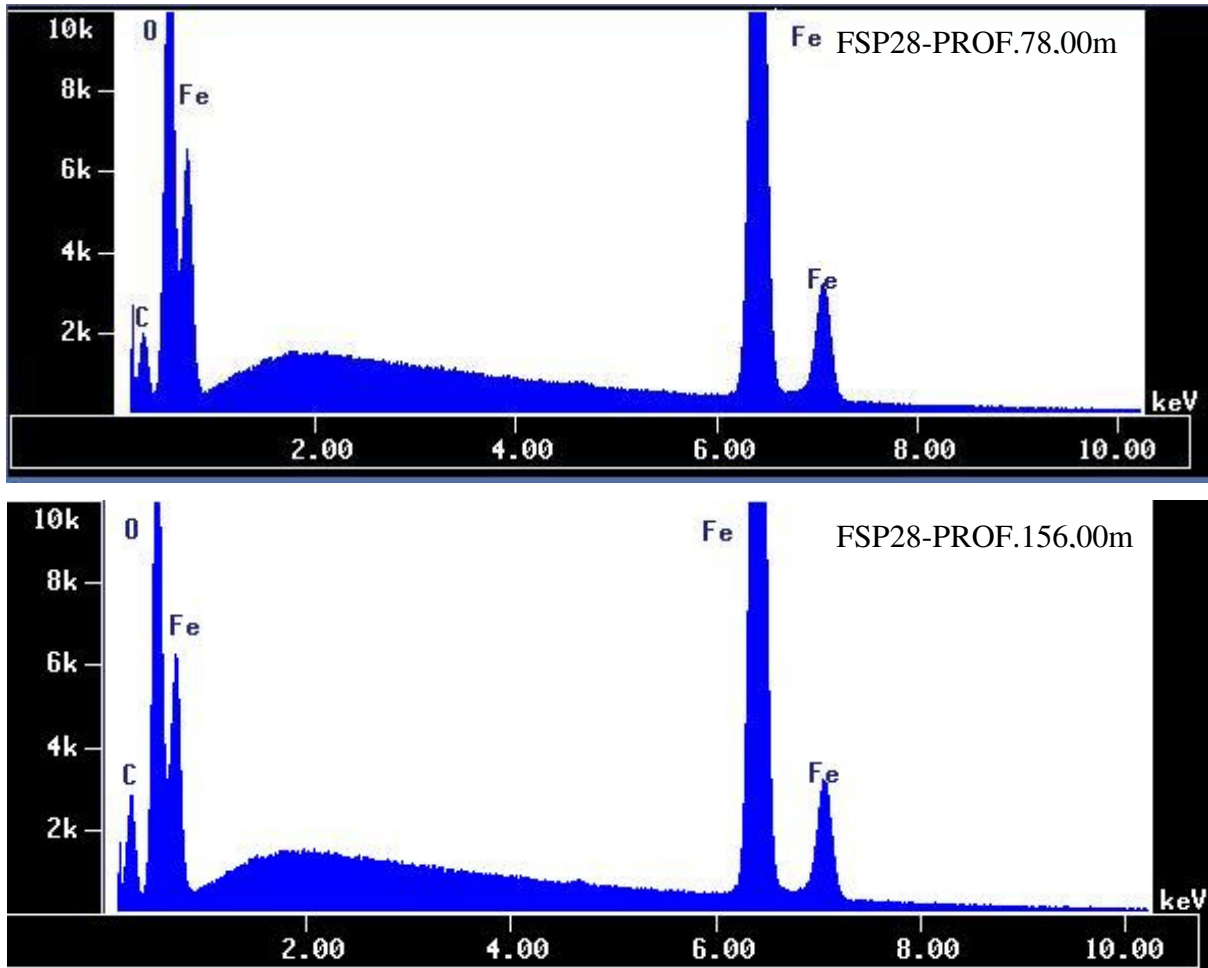
### **5.2.1. Hematita**

Inicialmente foram feitas análises qualitativas das hematitas em diversas amostras na ME por EDS para saber se sua composição química é equivalente a teórica e também a possível presença de outros elementos (FIG. 30).

No entanto, não foi detectado pela microsonda nenhum elemento químico diferente dos constituintes da hematita, ou seja, Fe e O. O carbono (C) que aparece em ambos os espectros da FIG. 30 refere-se ao processo de metalização aplicado na lâmina anteriormente à análise. Nota-se também que não houve diferenças composicionais entre as amostras analisadas.

Assim, foi feita análise quantitativa por WDS nas três gerações de Hematita I, II, III, visando identificar diferenças composicionais entre elas (TAB. 1, ANEXO A). Os elementos

selecionados para análise foram os comumente presentes na hematita, conforme descrito na literatura, uma vez que o espectrograma não revelou nenhum elemento diferenciado.



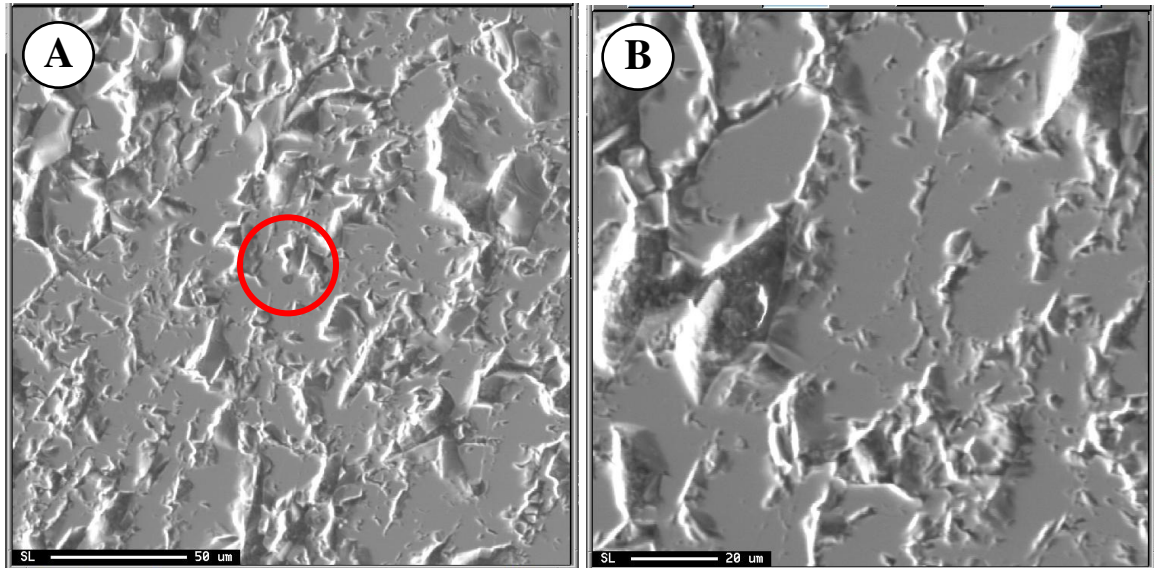
**FIGURA 30** - Espectrogramas da hematita obtidos na ME em duas amostras diferentes mostrando os seus principais constituintes. Amostras FSP28-PROF.78,00m e FSP28-PROF.156,00m - Serra do Sapo, CMD.

Na FIG. 31 observam-se imagens de uma das amostras estudadas. Com auxílio dessa imagem é possível escolher o local a ser analisado na ME por WDS, facilitando sua localização e evitando “tiros” em buracos e outros minerais. A imagem revela, sobretudo, a textura da superfície da amostra permitindo distinguir os minerais.

Os dados expressos na TAB. 1, ANEXO A demonstraram que as hematitas contêm exclusivamente Fe, variando de 99,1 a 100,5% de ferro total (FeO\*). Essas hematitas não apresentam Ti, Al, Mg, Mn, V, Au, Cr, Si, ao nível de detecção da microsonda, acusando respectivos valores inferiores a casa decimal percentual (<0,09%).



É importante destacar que a análise revelou que não houve diferenças composicionais entre as gerações de Hematita I, II e III em relação aos elementos estudados, ou seja, do ponto de vista químico a composição das três gerações estudadas é a mesma.



**FIGURA 31** - Imagem da hematita I obtida na ME (A) presença de buracos na área analisada; (B) aspecto do setor analisado. Amostras FSP01-PROF.213,05m - Serra do Sapo, CMD.

Na tentativa de se detectar algum outro elemento que justificasse a diferença entre as hematitas foram feitas análises com tempo de contagem bem maior ( $t=500s$ ). Não foram, no entanto, observadas mudanças nos resultados. A repetição das análises nas hematitas mesmo em condições instrumentais distintas de corrente, tensão e tempo foi considerada desnecessária, uma vez que, caso esteja presente algum outro elemento, seu teor encontra-se abaixo do limite de detecção da microsonda (1000ppm).

Desse modo, a fórmula química da hematita obtida foi  $Fe_2O_3$  (70,0% de Fe e 30,0% de O), conforme a fórmula teórica, ressaltando que a microsonda não distingue o estado de valência do elemento, sendo nesse caso o valor de ferro total.

A hematita pertence ao sistema trigonal ( $a=b \neq c$ ,  $\alpha=\beta \neq \gamma$  e  $V=a^2c \cdot \text{sen}60^\circ$ ) e tem estrutura romboédrica (FIG. 32), com seis unidades de fórmula por malha elementar ( $Z=6/Z=PMx(Vxd/166,02)$ ), com os parâmetros  $a=5,03\text{\AA}$  e  $c=13,75\text{\AA}$ , densidade relativa (d) de  $5,3 \text{ g/cm}^3$  (BLOSS, 2000; DEER et al., 1974; DYAR et al, 2000; KLEIN, HURLBUT Jr., 1993; STRUNZ, NICKEL, 2001).

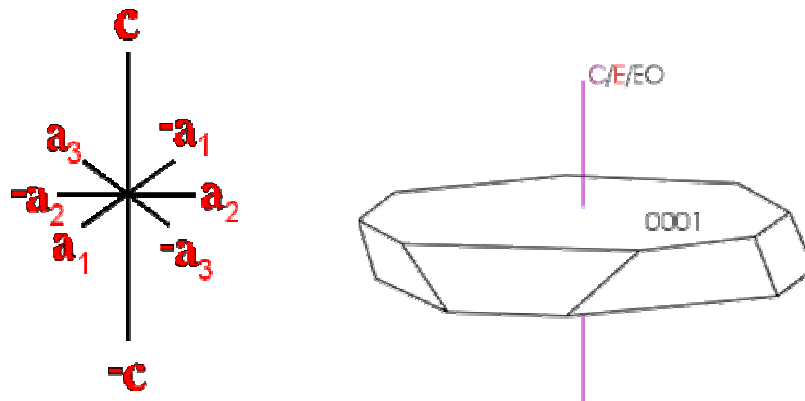


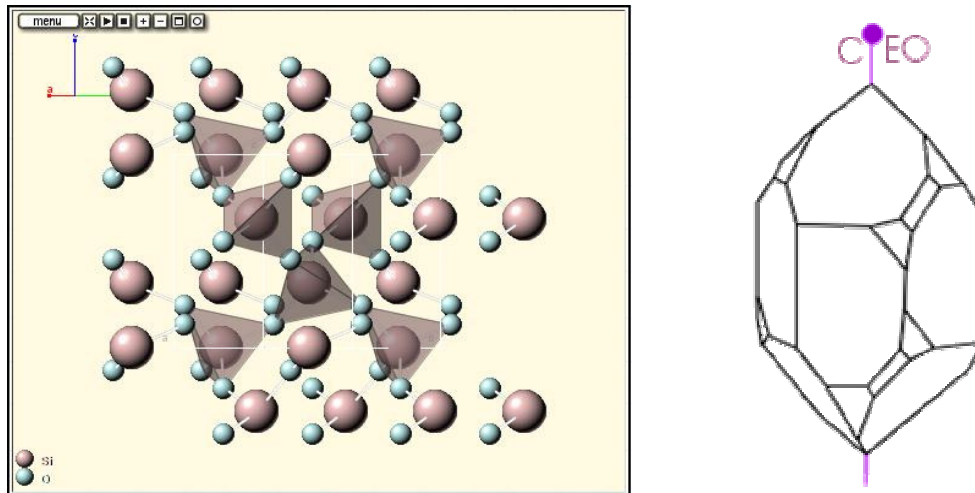
FIGURA 32 - Sistema hexagonal, classe trigonal romboédrico, forma cristalográfica da hematita (Imagem retirada de BARTHELMY, 2009; MACHADO et al, 2009).

### 5.2.2. Quartzo

O quartzo também foi analisado por EDS na ME, visando principalmente diferenciar a composição química dos diferentes tipos de quartzo encontrados. Para isso, foram realizadas análises tanto em locais límpidos quanto em locais não límpidos e também naqueles com aspecto de “poeira” devido ao óxido de ferro misturado.

Assim como observado para as hematitas, o quartzo não apresentou nenhum constituinte além dos pertencentes à sua fórmula química teórica (Si e O). Como a microsonda não detecta traços, os resultados não apresentaram nenhuma diferença entre os tipos de quartzo. Somente naquele com “poeira” confirmou-se a presença de óxido de ferro junto ao quartzo (jaspe).

O quartzo pertence ao grupo dos tectossilicatos. Sua estrutura cristalina é trigonal trapezoédrica, composta por tetraedros de SiO<sub>4</sub> (FIG. 33), com três unidades de fórmula na célula unitária (Z=3) (BLOSS, 2000; DEER et al, 1974; DYAR et al, 2000; STRUNZ, NICKEL, 2001).

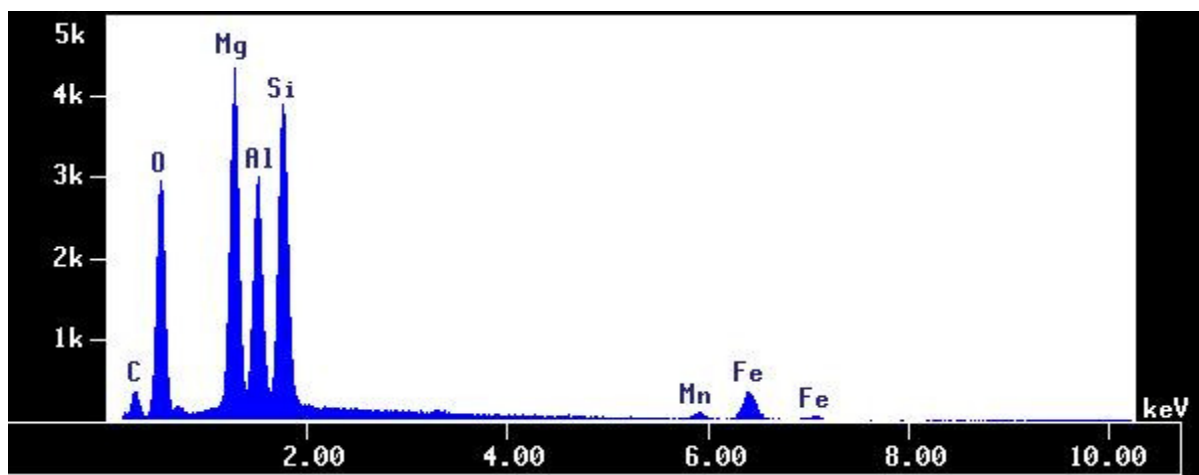


**FIGURA 33** - Estrutura do quartzo com os tetraedros em 3D e forma cristalográfica do quartzo, sistema trigonal traapezoédrica (Imagem retirada de BARTHELMY, 2009; MACHADO et al, 2009).

### 5.2.3. Cloritas

A Série das Cloritas tem a fórmula química geral  $(Mg,Al,Fe)_{12}[(Si,Al)_8O_{20}](OH)_{16}$  e agrupa minerais como clinocloro, diabantita, ripidolita, pennantita, brunsvigita, peninita, gonierita entre outros, todos com estrutura em folha (DEER et al, 1971; DEER et al, 1974; STRUNZ, NICKEL, 2001).

A caracterização química do mineral foi obtida através da análise com a ME, inicialmente por EDS, procurando determinar os constituintes presentes e se realmente tratava de um dos minerais do grupo da clorita (FIG. 34).



**FIGURA 34** - Espectrograma da clorita obtido na ME mostrando os seus principais constituintes. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

O espectrograma indicou a presença do Mg, Al e Si em maior intensidade, seguido por Mn e Fe, concordante com o esperado para a composição da clorita.

Na sequência foram feitas, por WDS, um total de 16 análises distintas em diferentes cristais. Os resultados são apresentados na TAB. 2, ANEXO A.

Ao analisar os dados quantitativamente obtidos, comprova-se que se trata de uma clorita magnésiana, com alto teor de Si, Mg e Al (somados ~70%) caracterizando um alumínio silicato rico em magnésio, seguido de Fe (8,5% de FeO\*) e quantidades irrisórias de Ba, K e Ti (~0,01%). Acredita-se que a coloração verde do mineral apresentada na secção laminada possa ser ocasionada por Fe<sup>2+</sup>, apesar da não identificação do íon do ferro presente, uma vez que se constatou FeO\* nas análises.

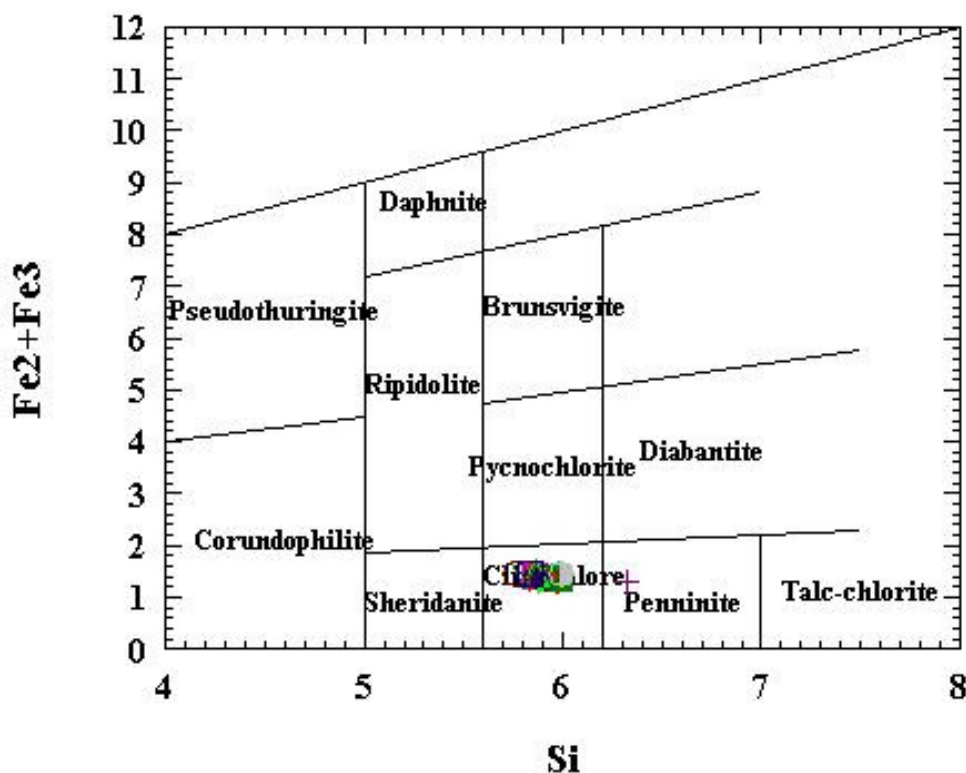
As análises, em geral, totalizaram-se em aproximadamente 86% e não próximo de 100%, o que já era previsto, uma vez que a clorita tem cerca de 10 a 13% de H<sub>2</sub>O na sua constituição e a microsonda não a detecta.

Mesmo assim, ao se adicionar em algumas análises a porcentagem da água ao valor final, a soma foi inferior a 100% (por exemplo, amostra clorita-1 na TAB. 2, ANEXO A). Esse artifício pode ser justificado pelos valores do Mg, Si e Al ficarem subestimados na presença da água, já que a água tem o efeito de absorver os raios-X da análise, principalmente dos elementos leves.

Conforme mencionado, as análises na ME não identificam o estado de valência dos elementos e os resultados são expressos sob a forma de seus óxidos mais comumente encontrados. Os dados obtidos foram tratados visando-se identificar de qual(is) mineral(is) da Série das Cloritas se tratava. Assim, foram executados os cálculos baseados na estrutura cristalina das cloritas, que são classificadas no sistema monoclinico prismático (detalhes no CAP. 5.3).

Em posse dos dados tratados (vide TAB.7, ANEXO B), utilizou-se o programa Minpet 2.02 para interpretação dos valores encontrados, sendo esses plotados em um diagrama com a razão Fe/(Fe+Mg) em função do Si (FIG. 35).

No diagrama, os dados em geral situaram-se na região entre 5,6 a 6,2 do Si e de 0 a 2 no Fe, classificando as cloritas como clinocloro. Apenas uma amostra desviou da tendência e foi classificada como peninita, mesmo assim, se encontrando próxima à zona de interface entre os minerais (FIG. 35).



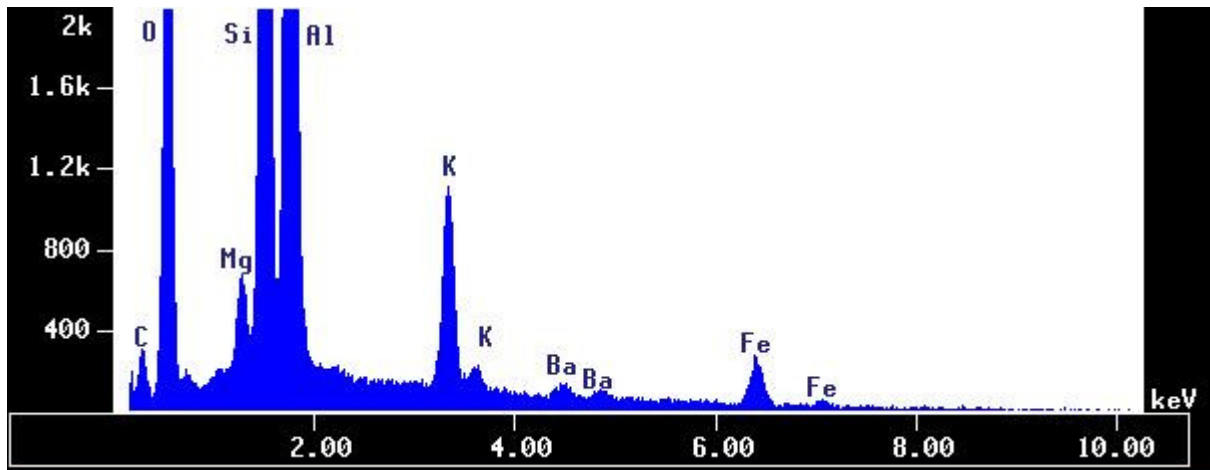
**FIGURA 35** - Diagrama de classificação das cloritas para as amostras estudadas (gerado com o programa MINPET, versão 2002).

A fórmula química do clinocloro é um pouco complexa, porém isso não foi empecilho para o seu cálculo. A fórmula estrutural encontrada apresentou-se muito semelhante à teórica  $(Mg_{10}, Al_2)(Si_6, Al_2)O_{20}(OH)_{16}$ , somente diferenciando-se no teor de magnésio, que foi substituído pelo ferro (cerca de 20%). Quanto ao grau de substituição de silício por alumínio, o clinocloro está no intermédio da Série das Cloritas considerando-se em um extremo a ripidolita (rica em ferro) e no outro a peninita (rica em magnésio).

#### 5.2.4. Micas

O Grupo das micas é representado por vários minerais, sendo os mais comuns a moscovita, a glauconita, a lepidolita e a biotita. A fórmula química geral é  $X_2Y_{4-6}Z_8O_{20}(OH,F)_4$  onde os principais elementos dos sítios X são K, Na ou Ca; no Y são Al, Mg ou Fe; e Z são o Si ou Al. Dependendo da quantidade de elementos situados na posição Y as micas são subdivididas em duas classes: di-octaedro (Y=4) e tri-octaedro (Y=6) (DEER et al, 1971, 1974; STRUNZ, NICKEL, 2001).

Visando identificar a qual mineral da Série das Micas referia-se a amostra, foi realizada a análise qualitativa da mica por EDS na microsonda (FIG. 36).



**FIGURA 36** - Espectrograma da mica obtido na ME mostrando os seus principais constituintes. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

O espectrograma obtido ratifica os estudos petrográficos anteriormente realizados confirmando por sua composição ser um mineral pertencente ao grupo das micas. Revela ainda a presença dos elementos Si, Al, Mg, K, O, Fe e Ba, tendo esses dois últimos picos menos intensos. Em seguida, foram realizadas por WDS 14 análises em diversos cristais visando caracterizá-los composicionalmente (TAB. 3, ANEXO A).

Os valores obtidos foram, em média, de um alumino silicato (50,5% de SiO<sub>2</sub> e 29,9% de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de K<sub>2</sub>O, FeO\*, MgO e BaO com respectivamente 8,1%, 5,4%, 2,0% e 1,5%. Os elementos Mn e Ti também foram quantificados, mas como os teores de seus óxidos foram inferiores a 0,1%, esses foram desconsiderados no cálculo da fórmula química.

Baseado nas análises químicas obtidas a partir da ME, juntamente com auxílio da petrografia, o mineral referido da região em estudo pode ser classificado como moscovita, de fórmula química (K,Ba)(Al,Fe,Mg)<sub>2</sub>[Si<sub>3</sub>AlO<sub>10</sub>](OH,F)<sub>2</sub>.

Os resultados das micas analisadas finalizaram com médias de 97%, valor esse um pouco alto, uma vez que a moscovita é um mineral hidratado e os constituintes OH e/ou F que não são medidos pela microsonda, equivalem juntos a um percentual de aproximadamente 4% (DEER et al, 1971).

Observou-se uma variação no valor percentual total das micas analisadas, oscilando de 95,6% a 99,3%. Uma das possíveis causas está associada à padronização, pois o uso de um padrão não adequado de algum elemento para o mineral em estudo pode, em parte, ter afetado o fechamento da análise. Isso é condizente com o fato de se ter efetivado análises em diferentes dias, influenciando na padronização que foi realizada com alguns padrões diferentes, ainda que com os mesmos parâmetros experimentais.

O valor do potássio também alterou em função da mica analisada, tendo algumas amostras teores de cerca de 10% de  $K_2O$ , conforme esperado e outras concentrações inferiores (ex. mica-7 com 5,9% de  $K_2O$ ). As micas com baixo valor percentual de K são, em geral, as que apresentaram soma total elevada em relação as demais e alto teor de Si, Al, além da presença de Ba, o que não é comum em moscovitas (TAB. 3, ANEXO A). Todas essas evidências são indícios de que a moscovita foi alterada, pois o K é um dos primeiros elementos a ser liberado ou substituído quando se inicia o processo de alteração.

A fórmula química  $(K,Ba)(Al,Fe,Mg)_2[Si_3AlO_{10}](OH,F)_2$  obtida representa um isomorfo da moscovita. A literatura relata pequenas quantidades de Ba substituindo o K aparentemente bem acomodadas na estrutura  $2M_1$  e também descreve a presença de 2-4% de  $Fe_2O_3$ , sendo que as moscovitas com alto teor de FeO estão geralmente associadas ao alto teor de  $SiO_2$ . O baixo teor de Mn (<1%) é comum nas moscovitas (DEER et al, 1971, 1974; STRUNZ, NICKEL, 2001).

Os dados obtidos permitiram concluir que se trata do mineral moscovita que é um filossilicato (hábito em placas ou folhas), do grupo das micas, classificado no sistema cristalino monoclinico prismático ( $Z=4$ ), pertencente à classe di-octaedro ( $Y=4$ ). A ocorrência da substituição do Si por Al na coordenação tetraédrica é eletrostaticamente contrabalanceada pela substituição equivalente do Al por íons bivalentes na posição octaédrica (DEER et al, 1974).

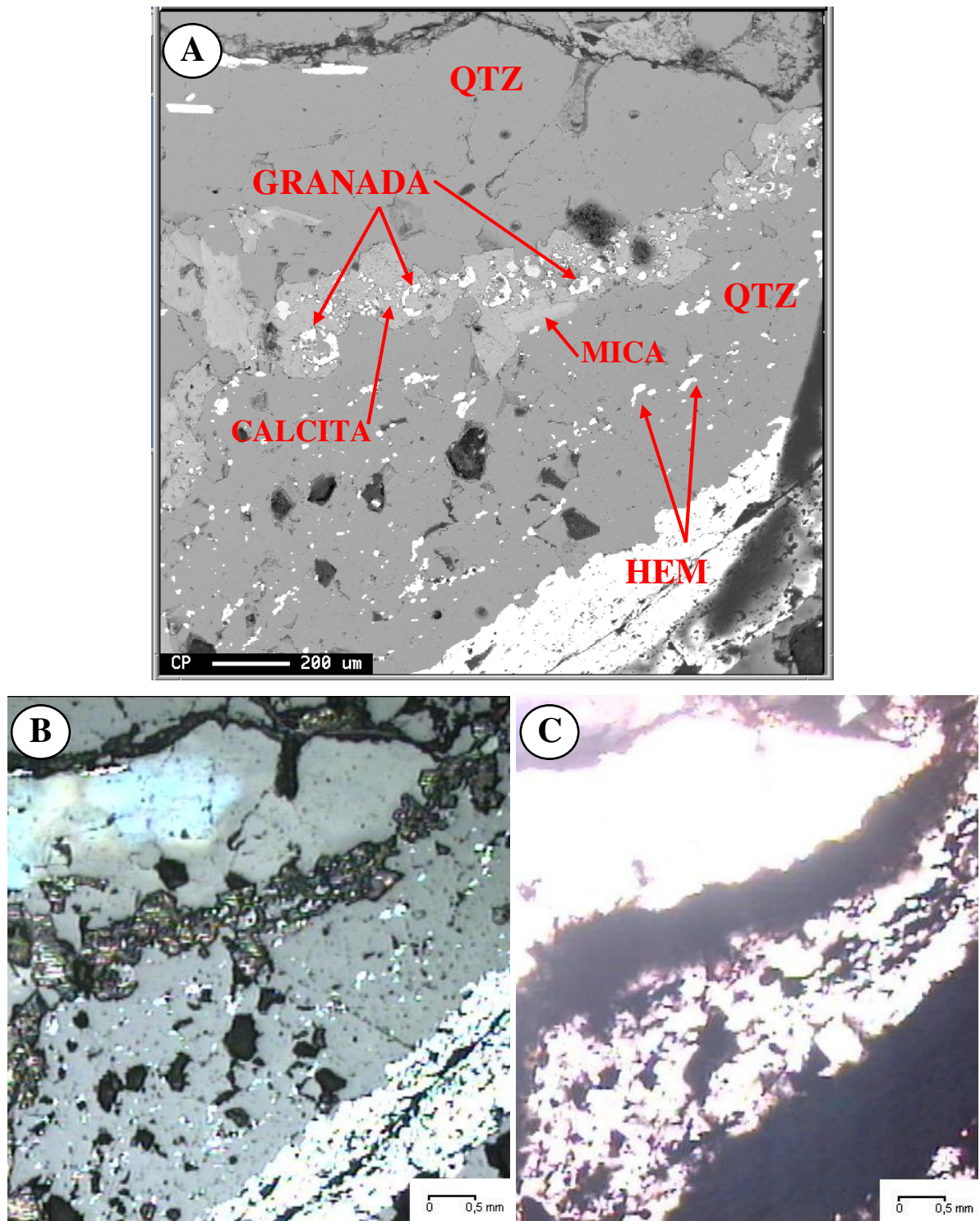
### 5.2.5. Granadas

As granadas podem ser divididas em duas séries: (i) a pirlspita, série que contém Al na sua composição, como piropo, almadina e espessartita; e (ii) a ugrandita, série que engloba minerais com Ca, como uvarovita, grossulária e andradita (DEER et al., 1974).

Durante os estudos petrográficos suspeitou-se da presença de granada. O mineral foi analisado na microsonda visando sua caracterização. A FIG. 37 A mostra a imagem de



elétrons retro-espalhados da região analisada. O espectro da análise qualitativa (EDS) apresentou os seguintes elementos: Si, Al, Mn, Ca e Fe, o que todavia não foi suficiente para classificar o mineral.



**FIGURA 37** - (A) Imagem obtida na ME da área analisada com granada; (B) a mesma área vista ao microscópio óptico sob LR; e (C) na LT. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

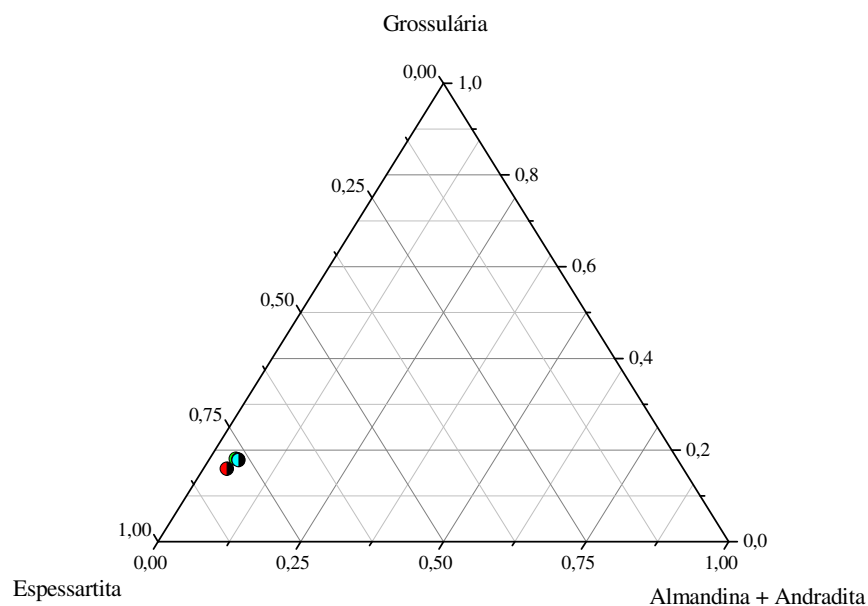


Quatro amostras distintas de granada foram quantificadas por WDS e os resultados estão dispostos na TAB. 4, ANEXO A. As análises revelaram que os principais constituintes são SiO<sub>2</sub>, MnO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> com 36,5%, 33,5% e 19,0% respectivamente; em menor quantidade o CaO e FeO\* (6,3% e 4,0% cada) e traços de MgO (0,2%). Todas as análises tiveram um bom fechamento, com médias em torno de 99,6%, indicando uma boa quantificação.

Com base nos resultados foi efetuado o tratamento dos dados, com cálculo da fórmula química baseada em 12 oxigênios para a célula unitária e sua classificação entre os minerais do grupo da granada (FIG. 38). Os dados completos estão na TAB. 5, ANEXO A.

Nas granadas analisadas, a espessartita (78% Mn<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>) é o tipo molecular dominante, seguido em menor percentual pela grossulária (Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>) e com taxas mínimas de almandina (Fe<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>) e andradita (Ca<sub>3</sub>(Fe<sup>3+</sup>,Ti)<sub>2</sub>[SiO<sub>4</sub>]<sub>3</sub>). Não se observou vestígios da uvarovita em nenhuma das granadas analisadas.

A espessartita é um aluminossilicato de manganês da série piralspita do grupo das granadas. Sua ocorrência é um pouco menos comum que as demais espécies de granadas, sendo geralmente encontrada em ambientes ricos em manganês e também em rochas sedimentares regionalmente metamorfizadas, magmáticas e em pegmatitos (DEER et al, 1974, 1975; STRUNZ, NICKEL, 2001).

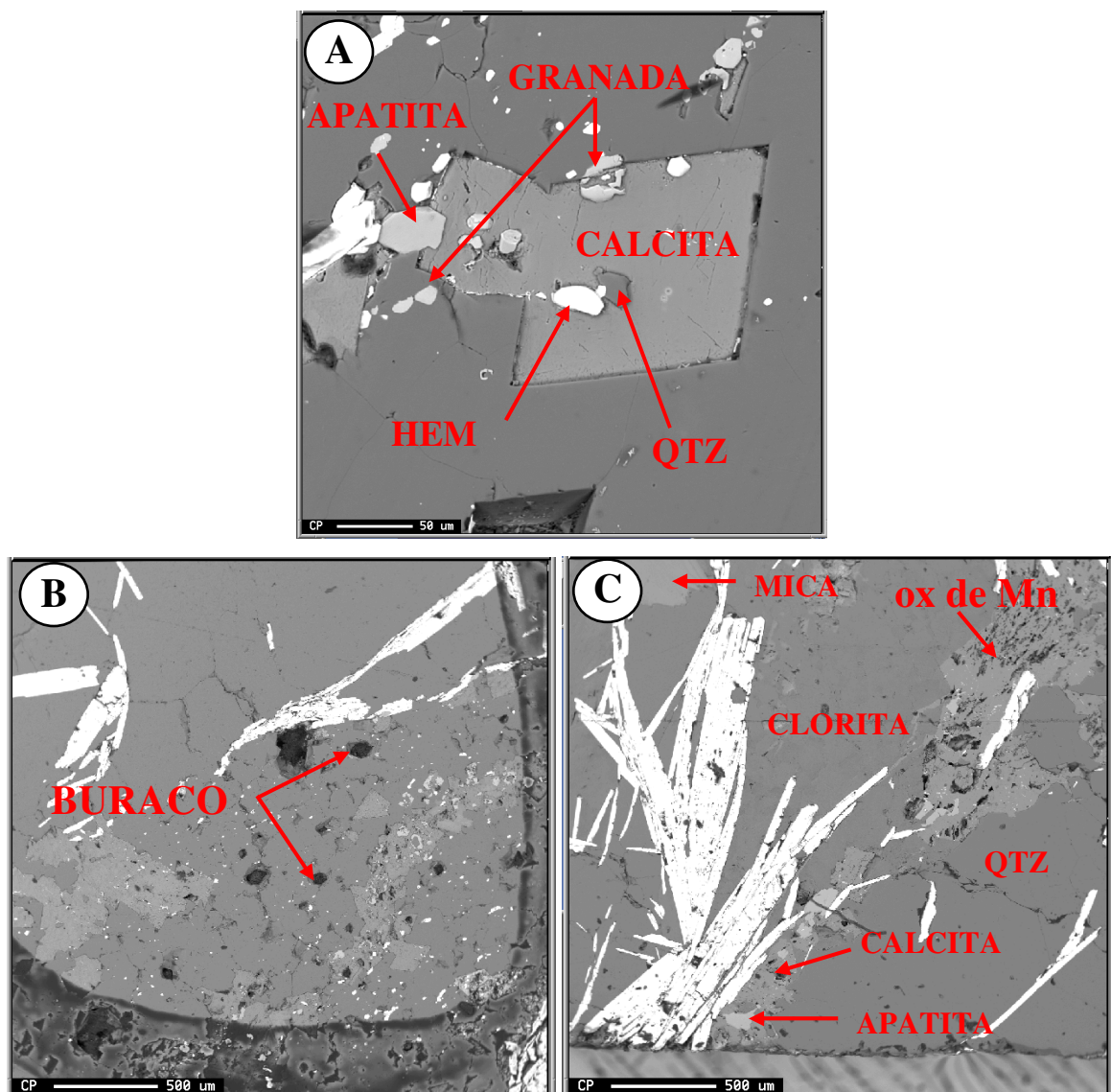


**FIGURA 38** - Distribuição e classificação dos cristais de granada a partir dos resultados tratados por microsonda WDS. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

### 5.2.6. Outros Minerais

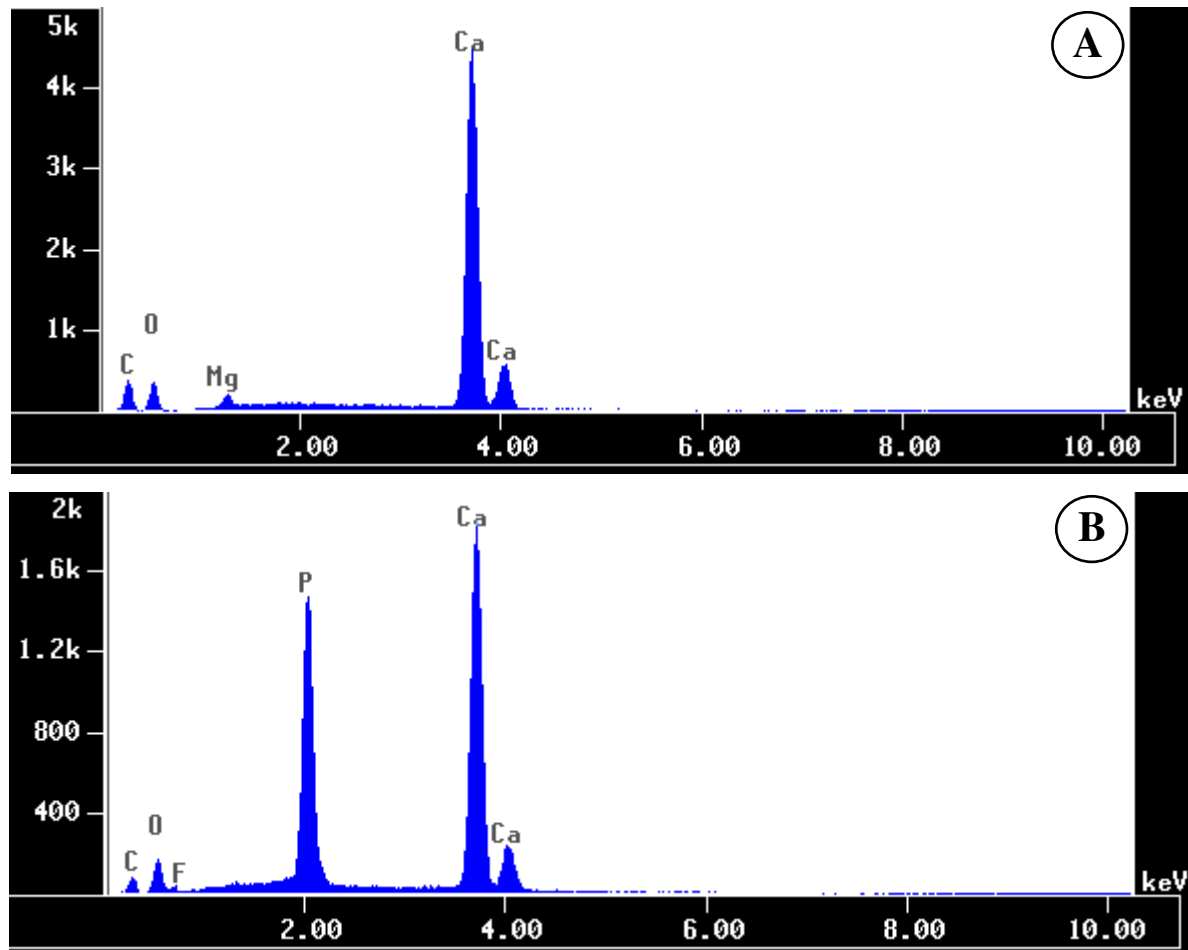
Nas lâminas estudadas foram petrograficamente observados óxido de manganês (MnO), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) e a apatita ( $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F},\text{Cl})$ ). Esses minerais foram também analisados qualitativa e quantitativa na ME. A FIG. 39 mostra imagens dos minerais analisados obtidas por elétrons retro-espalhados na ME.

A apatita está inclusa no veio da calcita, sendo que essa última também hospeda a granada, mica, fragmentos de quartzo e hematita. Já o óxido de manganês, conforme descrito anteriormente, forma aglomerados na massa de quartzo e próximo à hematita. Sua identificação somente foi realizada na microsonda.



**FIGURA 39** - Imagens obtidas por ME (A) da calcita, apatita, quartzo, granada, hematita e granada; (B) na área analisada com minerais e buracos; (C) região que contém apatita, óxido de manganês entre outros. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD

As análises qualitativas, nos três minerais, não apresentaram nenhum elemento químico diferente dos seus respectivos constituintes, isto é, MnO para o óxido de manganês, CaO e  $P_2O_5$  para apatita e CaO para a calcita (FIG. 40).



**FIGURA 40** - Espectrogramas obtidos na ME mostrando os principais constituintes (A) da calcita; e (B) apatita. Amostras FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

Portanto, foi feita a caracterização composicional por WDS na ME do óxido de manganês, calcita e apatita (TAB. 4, ANEXO A).

Os dados da calcita analisada apresentaram teores de 53,7% de CaO e valor inferior a 1% de MgO correspondendo a fórmula química  $CaCO_3$ . O fechamento das análises em 54,7% representa um bom resultado, sabendo que 44% equivalem à fração do carbonato não quantificada pela microsonda (DEER et al, 1974).

A quantificação da apatita apresentou teores médios de 41,6% de  $P_2O_5$ , 55,9% de CaO, 4,2% de F. As análises totalizaram em 100,37%, isso descontando o valor equivalente ao oxigênio que foi substituído pelo flúor. Assim sendo, a interpretação dos resultados procedeu

no mineral flúor apatita  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3\text{F}$  (DEER et al., 1974, 1975). Apesar da escassez do cristal de apatita, não houve comprometimento da integridade do resultado.

Todas as análises do óxido de manganês mostraram alto teor de Mn sendo que cada amostra, no entanto, apresentou uma quantidade diferente de MnO (33,0%, 58,8%, 71,4%). Uma das amostras, a ox. manganês-1 indicou quantidade relevante de Fe (29,5% FeO\*) e um pouco de Al (2,8%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), sendo que as demais amostras contêm teores irrisórios desses óxidos (<0,5% de cada um). As análises tiveram um baixo fechamento (por volta de 66%) e não apresentaram quantidades relevantes de Si, Mg, K, Ba e Ti (<1%).

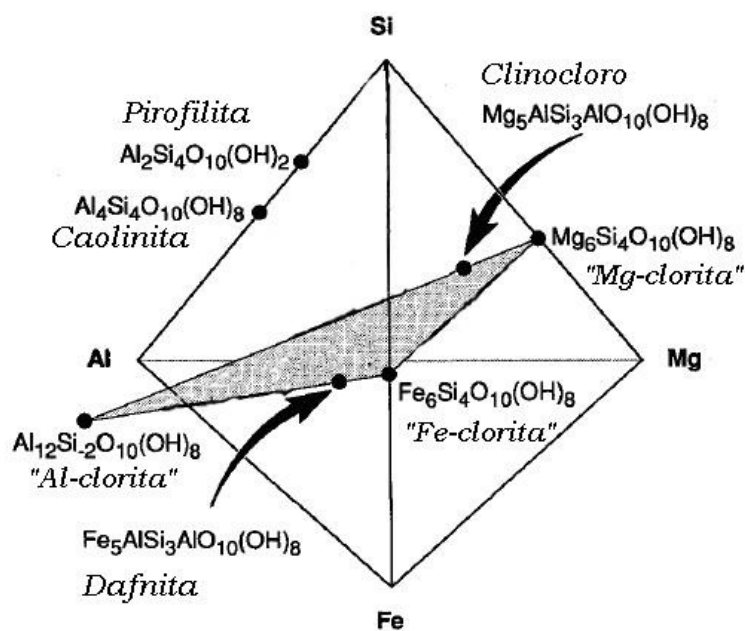
Não foi realizada uma boa análise na ME para esse óxido de manganês. As possíveis causas estão relacionadas principalmente ao mau polimento da lâmina e também por se tratar de uma região caracterizada pela presença buracos.

O tamanho dos cristais e a ausência de formas cristalográficas associado às análises químicas não representativas de algum óxido de manganês não permitiu a identificação desse mineral.

### 5.3. GEOTERMÔMETRO DA CLORITA

O uso de geotermômetros permite determinar as condições de temperatura e pressão em que o sistema cristalizou (BIONDI et al, 2002). A temperatura é obtida a partir da coexistência de pares minerais em equilíbrio, durante sua cristalização nas rochas. Há uma variedade de pares como: arsenopirita-pirita, hornblenda-plagioclásio, calcita-dolomita, granada-biotita; quartzo-hematita e quartzo-wolframita (geotermômetros isotópicos). As cloritas também permitem elaborar geotermômetros, como será descrito a seguir. Foi escolhido o das cloritas por ser o mais adequado ao trabalho.

Conforme mencionado no CAP. 5.2 a interpretação dos dados por ME indicou uma clorita magnésiana, classificada como clinocloro (TAB. 6 e 7, ANEXO B). A FIG. 41 mostra a posição do clinocloro em relação a classificação das cloritas como Al-clorita, Fe-clorita e Mg-clorita.



**FIGURA 41** - Diagrama tetraédrico de Si-Al-Fe-Mg com interseção de um plano ternário com vértices Al-clorita; Fe-clorita, Mg-clorita usado para representação da Série das Cloritas (modificado de CARITAT et al, 1993).

Na literatura há diferentes métodos para calcular o geotermômetro da clorita, entre eles o de Cathelineau (1988), Jowett (1991), Kranidiotis e McLean (1987), Walshe (1986) e Hutcheon (1990). Os métodos baseiam-se na cristalquímica do mineral, cada qual com sua particularidade, que podem indicar variações na temperatura de cristalização dependendo do ambiente de ocorrência, da estrutura cristalográfica, ou da composição química da clorita (CARITAT et al, 1993; CATHELINEAU, 1988).

O estudo geotermométrico desenvolvido baseou-se exclusivamente nos dados da composição química da clorita, obtidos a partir de análises em microsonda eletrônica com detector WDS.

A classificação composicional da clorita é baseada na substituição do silício pelo alumínio podendo variar de  $[\text{Si}_7\text{Al}]$  a  $[\text{Si}_4\text{Al}_4]$  e o magnésio pelo alumínio também com a taxa de  $\text{Mg}_{11}\text{Al}$  a  $\text{Mg}_8\text{Al}_4$  (DEER et al, 1971).

A metodologia de cálculo usado neste trabalho foi o proposto por Cathelineau e Nieva (1985). Esse método fundamenta-se segundo critérios de ocupação do sítio cristalográfico tetraédrico por Al, que mostra um aumento no conteúdo de  $\text{Al}_{\text{IV}}$  com o acréscimo da

temperatura. Essa relação entre o  $Al_{IV}$  e a temperatura foi expressa na equação 1:

$$T (^{\circ}C) = (Al_{IV} + 0,0826) / 0,00471 \quad (1)$$

Para aplicação dessa equação foi necessário conhecer o valor exato de Al correspondente a posição tetraédrica nas cloritas amostradas. Então, iniciou-se com o cálculo da fórmula estrutural sob o valor normalizado obtido por ME onde obtivemos  $(Mg,Al,Fe)_{12} [(Al,Si)_8 O_{20}] (OH)_{16}$ . Seguiu-se com o cálculo do número de cátions com base em 36 (O + OH) e alcançando o valor correspondente a quantidade de Al na posição tetraédrica das cloritas (TAB. 8, ANEXO B).

Para a determinação das temperaturas de cristalização com a equação de Cathelineau e Nieva (1985), as quantidades de  $Al_{IV}$  foram recalculadas tendo como base fórmulas estruturais com 14 oxigênios (“meia fórmula”), conforme procedimento definido por esses autores.

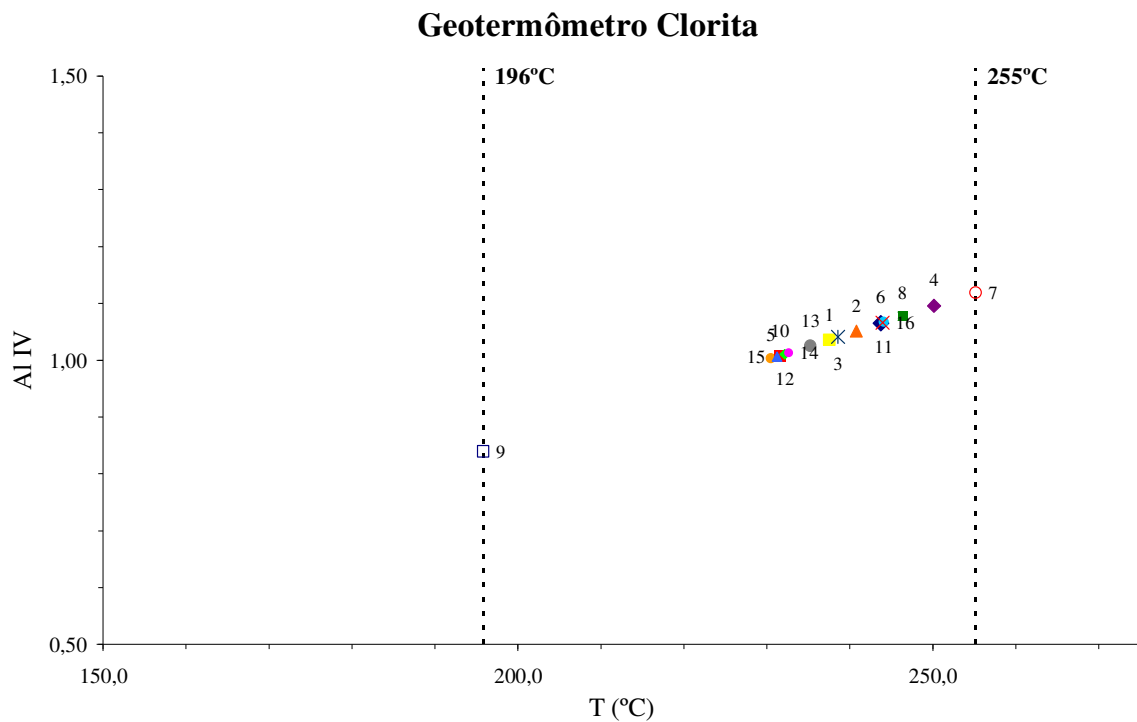
Os dados do cálculo para estimativa da temperatura a partir da EQ. 1 encontra-se na TAB. 4. Com esses valores construiu o gráfico do geotermômetro, apresentado na FIG. 42.

Observa-se que os pontos apresentaram uma distribuição uniforme e linear. O Al na posição tetraédrica ( $Al_{IV}$ ) da clorita aumenta regularmente com a temperatura, demonstrando a boa correlação dos resultados. Com o uso do geotermômetro obteve-se uma temperatura mínima de 196°C e máxima de 255°C (FIG. 42). A amostra clorita-9 está mais afastada dos demais resultados, sendo responsável do baixo limite inferior e consequentemente pela ampliação da faixa de temperatura.

O geotermômetro da clorita tem uma maior confiabilidade para temperaturas entre 130 e 310°C (CATHELINÉAU, 1988). Os valores obtidos encontram-se no intervalo dessa faixa de aplicação.

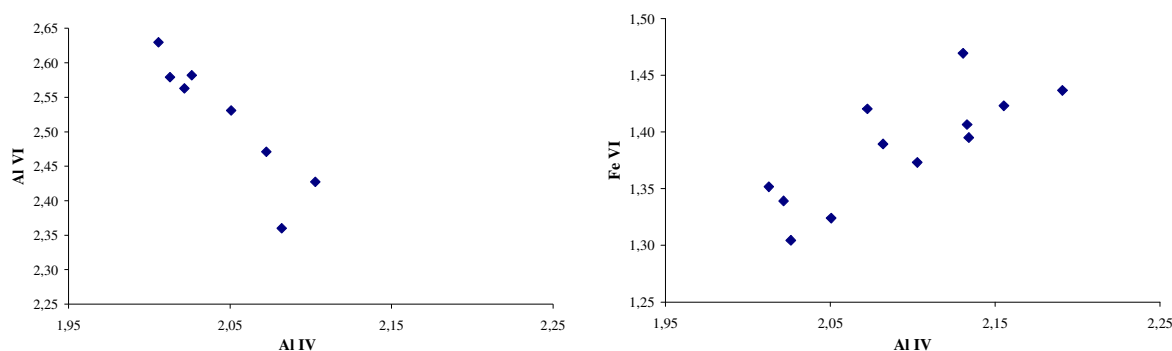
**TABELA 4** - As quantidades equivalente de Al na posição octaédrica ( $Al_{VI}$ ), tetraédrica ( $Al_{IV}$ ) e recalculado ( $Al_{IV} / 2$ ) com as suas respectivas temperaturas de geotermômetro em diferentes amostras.

Clorita	$Al_{VI}$	$Al_{IV}$	$Al_{IV} / 2$	T (°C)
1	2,471	2,072	1,036	237,538
2	2,427	2,103	1,051	240,758
3	2,360	2,082	1,041	238,549
4	2,502	2,191	1,095	250,097
5	2,630	2,006	1,003	230,467
6	2,477	2,131	1,065	243,707
7	2,472	2,238	1,119	255,153
8	2,622	2,155	1,078	246,329
9	3,255	1,679	0,840	195,819
10	2,878	2,016	1,008	231,541
11	2,634	2,134	1,067	244,076
12	2,563	2,022	1,011	232,152
13	2,531	2,051	1,025	235,214
14	2,582	2,026	1,013	232,627
15	2,579	2,013	1,006	231,207
16	2,651	2,133	1,066	243,958

**FIGURA 42** - Gráfico com as temperaturas mínima e máxima do geotermômetro da clorita calculadas com a equação e os procedimentos definidos por de Cathelineau & Nieva (1985).



Cathelineau e Nieva (1985) descreve correlações entre o  $Al_{IV}$  e o  $Al_{VI}$  e o  $Fe_{VI}$ , que também foram observadas nas cloritas analisadas nesse trabalho. O Al tetraédrico é negativamente correlacionado com o  $Al_{VI}$  e positivamente correlacionado com Fe na posição octaédrica (FIG. 43). Também deve-se considerar a diminuição da fração molar do membro final rico em  $Si_{IV}$  com temperatura crescente (RIBEIRO-KWITKO, 2004).



**FIGURA 43** - Gráficos da correlação entre o Al tetraédrico ( $Al_{IV}$ ) em função do  $Al_{VI}$  e  $Fe_{VI}$  octaédrico.

A temperatura também é dependente, em partes, da variação nas razões molares de Fe e Mg, mas como esses são fortemente influenciáveis pelas condições geoquímicas do ambiente geológico, não são consideradas para os cálculos no procedimento definido por Cathelineau (1985) (RIBEIRO-KWITKO, 2004).

O desenvolvimento deste estudo foi realizado para estabelecer as temperaturas de cristalização das cloritas da Serra do Sapo, CMD usadas como geotermômetro. As interseções das linhas que limitam as temperaturas de cristalização das cloritas com as isócoras definirão os intervalos de pressão nos quais as hematitas cristalizaram.

#### 5.4. INCLUSÕES FLUIDAS

Nas hematitas I e III identificaram-se inclusões primárias, que foram aprisionadas no cristal em crescimento, e inclusões secundárias, que se alojaram posteriormente, nos contatos dos grãos e também em fraturas que cortam os grãos.

Foram identificados os seguintes tipos de inclusões: monofásicas, bifásicas e trifásicas (aquosas com cristais de saturação). Foram medidas as dimensões de cada IF e as relações volumétricas entre as fases líquida, vapor e sólida.

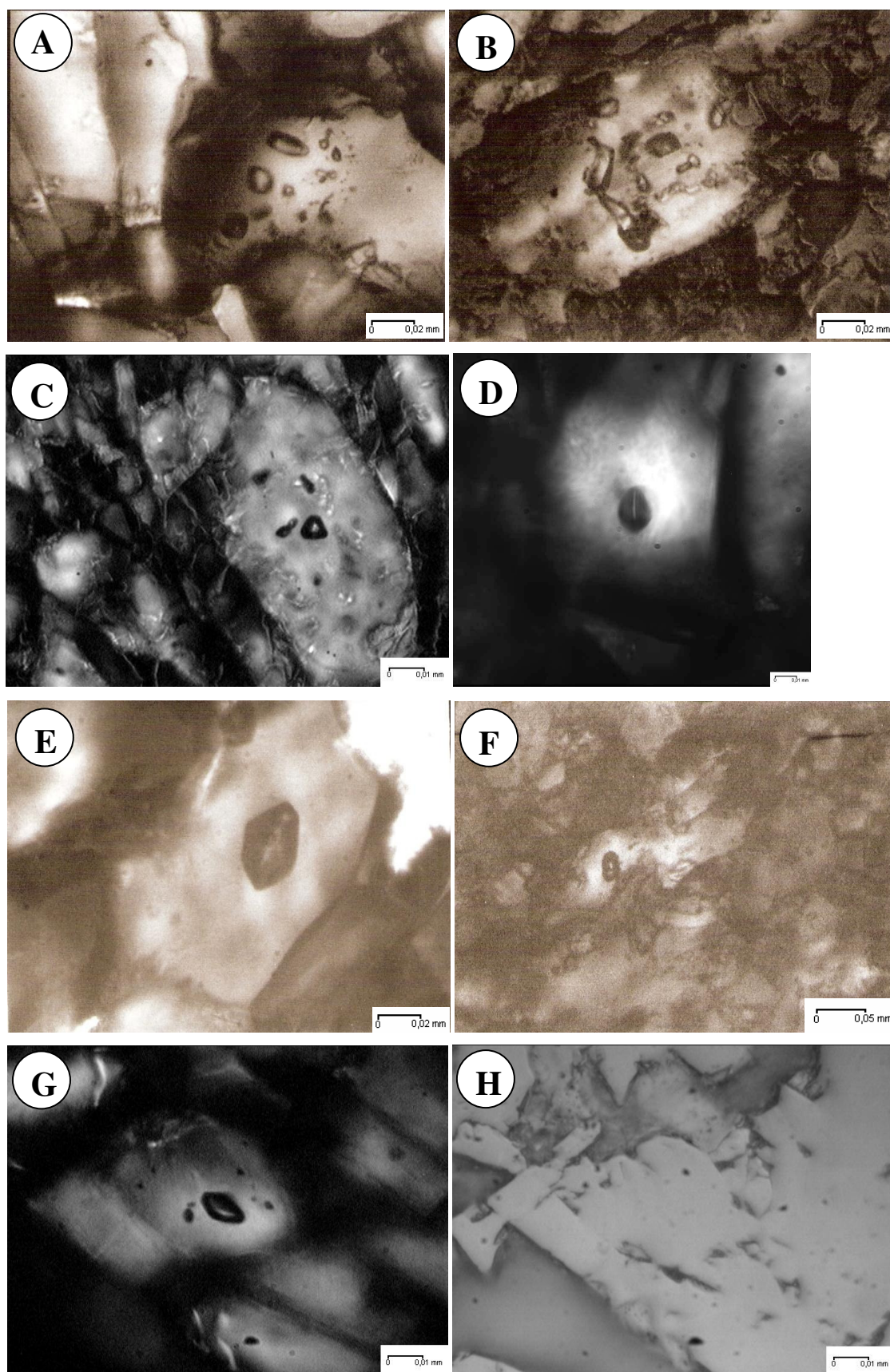
### **5.4.1. Microscopia das Inclusões Fluidas**

#### **5.4.1.a. Inclusões Fluidas Hematita I**

Foram observados dois tipos de inclusões fluidas na Hematita I: monofásicas e bifásicas, ambas frequentemente localizadas no núcleo do cristal.

As inclusões monofásicas são muito abundantes, arredondadas e pequenas, com tamanho médio de 10 a 15  $\mu\text{m}$ . Encontram-se agrupadas (FIG. 44A, B, C).

A relação vapor/líquido, nas inclusões bifásicas, equivale a 10% v/v e, em alguns casos, nota-se a vibração da bolha. Em geral, são escuras e pequenas (20 a 30 $\mu\text{m}$ ), apresentando-se em formatos irregulares com predomínio do hexagonal (FIG. 44E, F, G). Essas IF são encontradas principalmente isoladas mas também podem ocorrer no centro do cristal.



**FIGURA 44** - Fotomicrografias das IF primárias na Hematita I sob a radiação IV em LT (A, B, C) monofásicas e (D, E, F, G) bifásicas. (H) corresponde a “G” sob LR. Amostra FSP01-PROF.213,05m - Serra do Sapo.

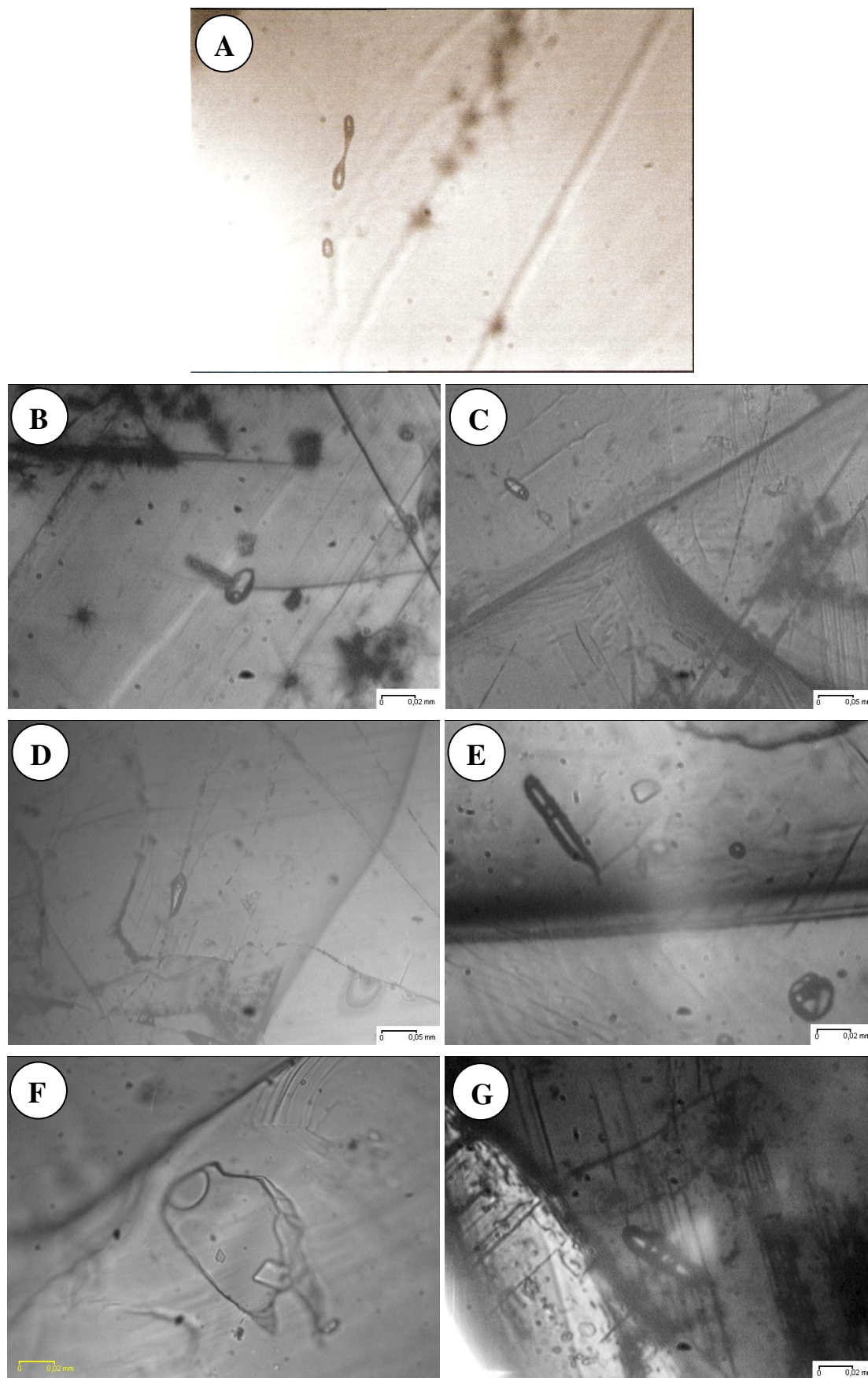
#### 5.4.1.b. Inclusões Fluidas Hematita III

Nas Hematitas geração III (especularita) foi observada a presença de inclusões fluidas primárias, predominantemente bifásicas, algumas trifásicas. Raramente foram observadas inclusões monofásicas, as quais são pequenas e possivelmente originadas por estrangulamento (FIG. 45A).

As inclusões bifásicas são abundantes e a relação vapor/líquido equivale a 15% v/v. Apresentam, em geral, formas irregulares, predominando a alongada (FIG. 45E), sendo nítidas e pequenas, com tamanho médio de 40  $\mu\text{m}$  (FIG. 45B).

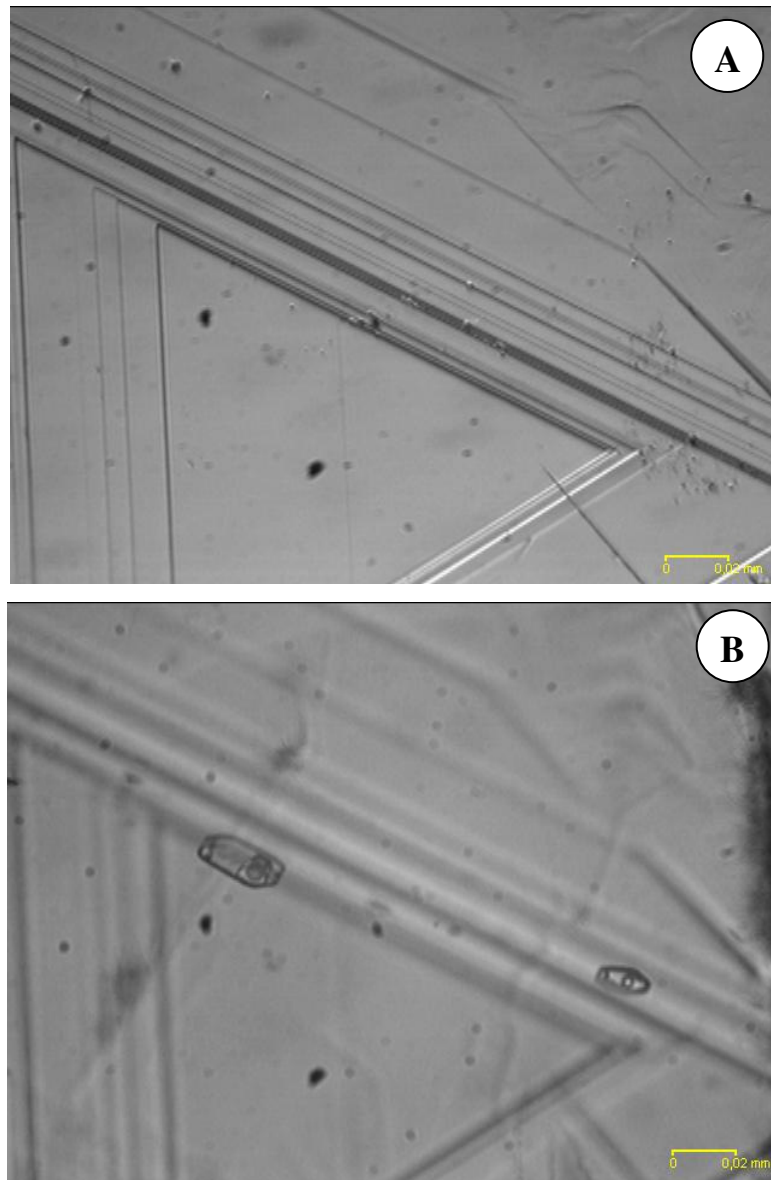
Nas IF trifásicas são encontradas uma fase líquida, uma sólida e outra gasosa, com uma relação média de 15% bolha, 15% cristal e 70% aquosa. A fase sólida apresenta formatos bem definidos, quadrados ou retangulares, sendo restrita a essa geração de hematita (friável). Essas inclusões, geralmente primárias (FIG. 45F), possuem tamanho médio de 30 a 50  $\mu\text{m}$ .





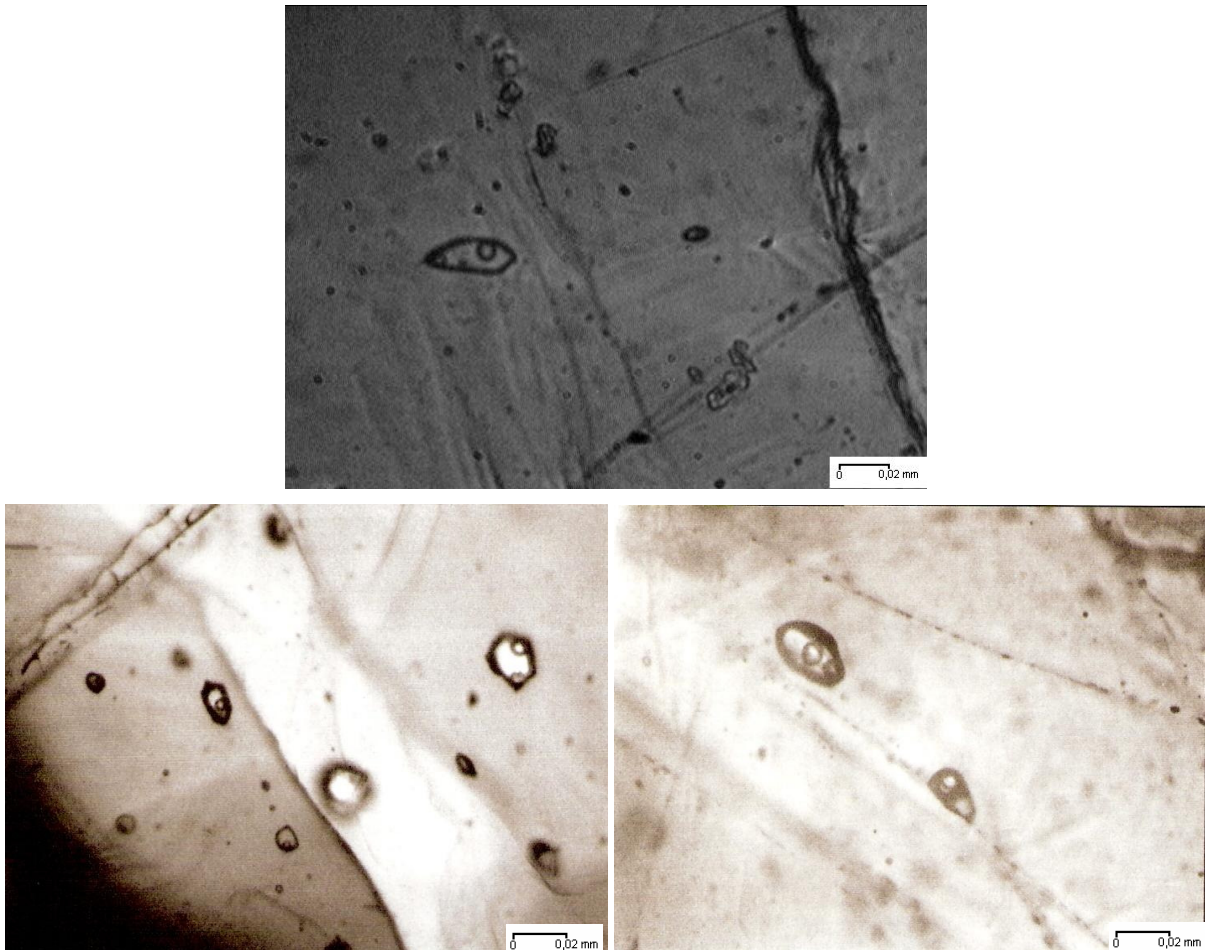
**FIGURA 45** - Fotomicrografias de inclusões fluidas (A) monofásica com estrangulamento (B, C, D, E) bifásicas e (F, G) trifásica (L+G+S) na Hematita III sob a radiação IV na LT. Amostra MMX2 - Serra do Sapo, CMD.

As IF primárias da Hematita III são encontradas em grande parte isoladas, orientadas paralelamente à linha de crescimento (FIG. 46A). Em relação às demais são maiores e mais definidas, prevalecendo as bifásicas (líquido + gás) (FIG. 46B).



**FIGURA 46** - Fotomicrografia de inclusões fluidas primárias, trifásicas com birrefringência na Hematita III sob a radiação IV (A) na LR e (B) na LT. Amostra MMX 2 - Serra do Sapo, CMD.

As IF secundárias são observadas nas bordas dos cristais, na região de contato entre os grãos ou dispostas segundo trilhas nas fraturas do mineral. Não ultrapassam 5  $\mu\text{m}$  de tamanho. O formato é irregular e a fraca visibilidade dificultou a classificação dessas IF. Morfologicamente foram classificadas como bifásicas e trifásicas (com uma fase sólida) (FIG. 47).



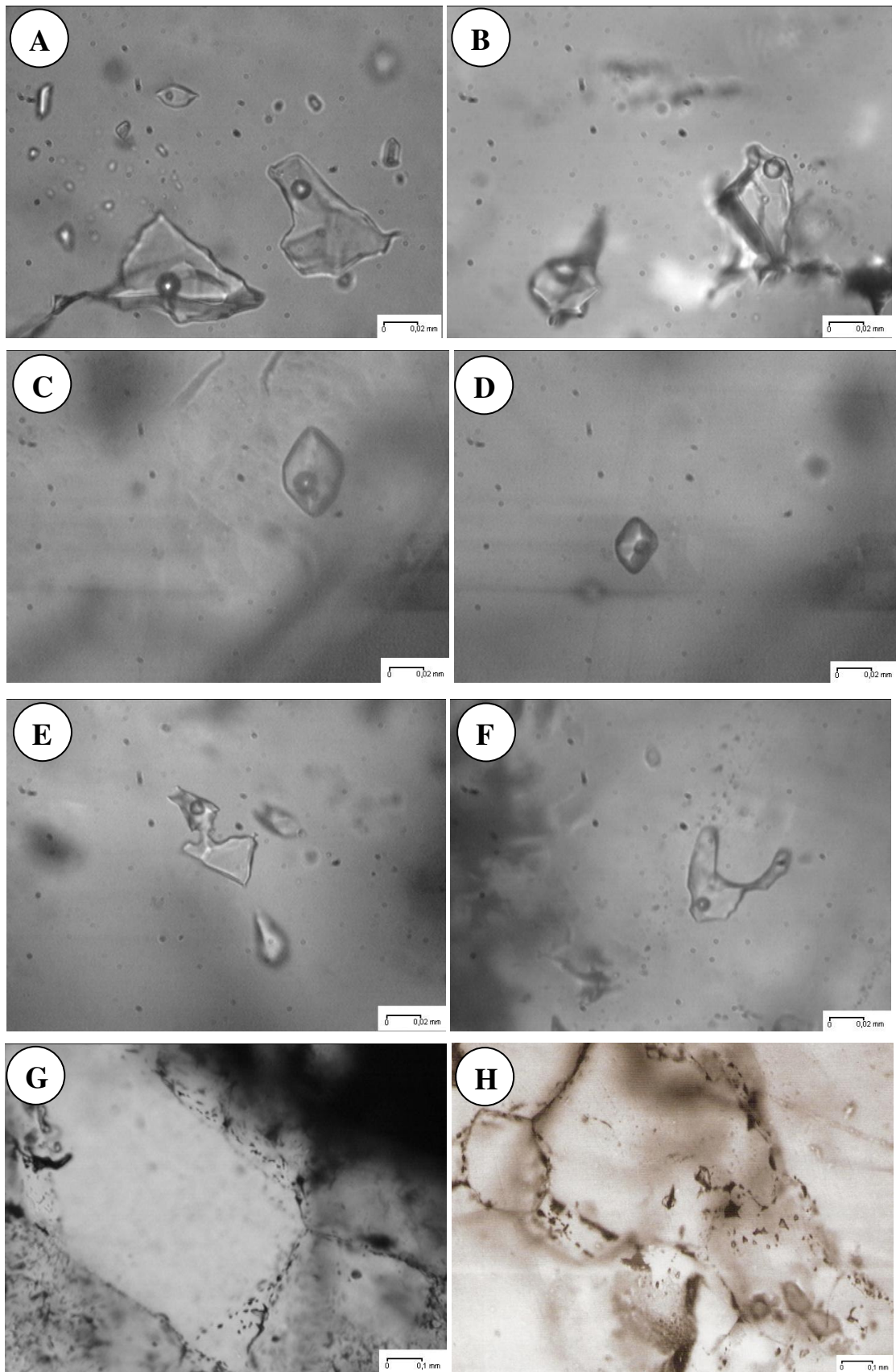
**FIGURA 47** - Fotomicrografias de IF secundárias, bifásicas e trifásicas na Hematita III sob a radiação IV na LT. Amostra MMX 2 - Serra do Sapo, CMD.

#### 5.4.1.c. Inclusões Fluidas Quartzo

A microscopia no quartzo constatou elevada frequência de inclusões fluidas em quase todas as amostras estudadas, principalmente de origem secundária, notadamente bifásicas (líquido + gás) (FIG. 48).

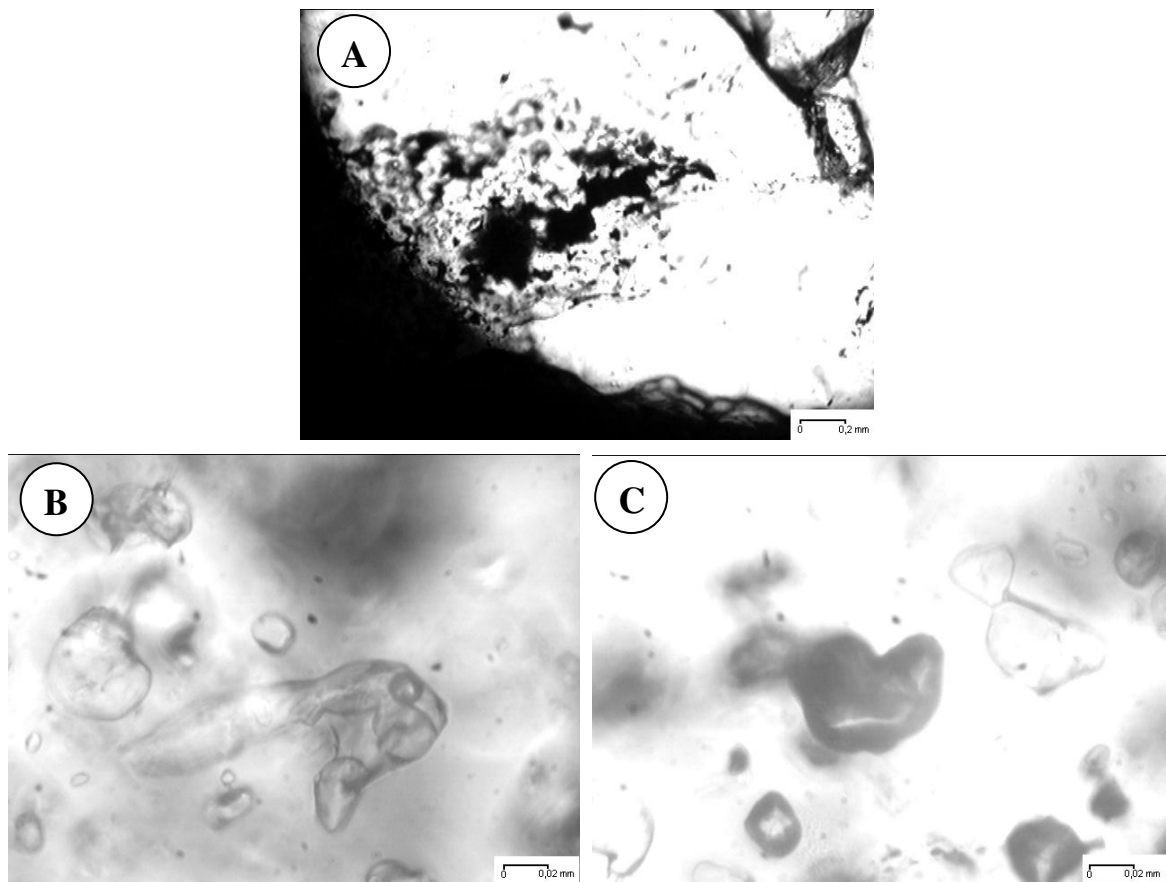
A distribuição aleatória das inclusões dificultou sua classificação. O tamanho varia desde 5 a 130  $\mu\text{m}$ , as formas são arredondadas a prismáticas, com uma média de 10% na fase vapor em IF maiores. Algumas IF apresentam nítido estrangulamento ou constituem trilhas dispostas nos contatos dos cristais (FIG. 48). Correspondem às menores inclusões observadas ( $<4\mu\text{m}$ ).





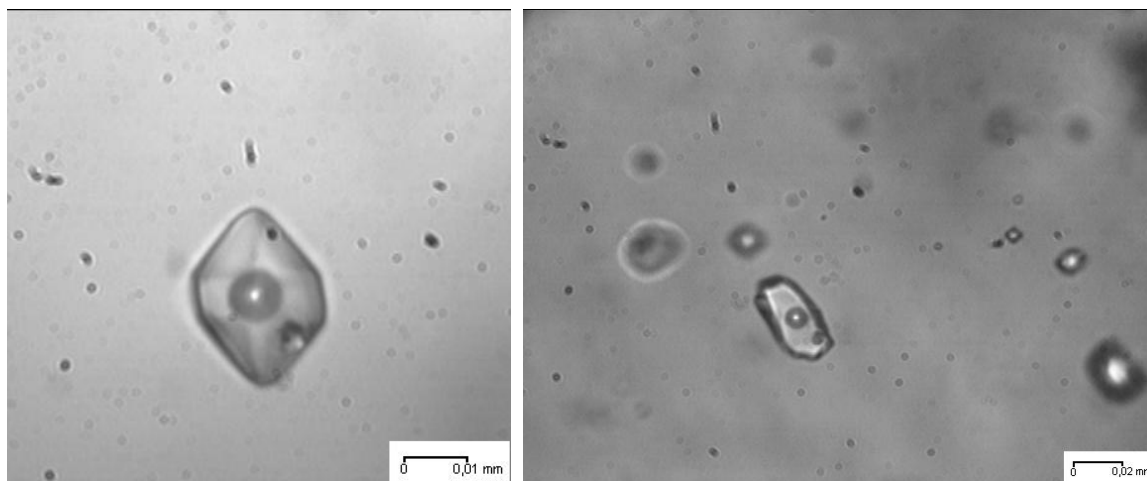
**FIGURA 48** - Fotomicrografias de IF (A, B) bifásicas e monofásicas em conjunto; (C, D) bifásicas com formato poligonal; (E, F) sofrendo estrangulamento; (G, H) em trilhas nos contatos dos cristais de quartzo sob a LT. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

Na amostra FSP01-PROF.231,15m destaca-se uma região com inclusões fluidas distintas das demais. O modo de ocorrência, dispostas parecendo um cluster, sugere uma penetração do fluido que ficou restrito a um determinado setor (FIG. 49A). O conjunto exibe uma maior concentração de IF sobrepostas, predominantemente monofásicas (líquido) arredondadas. As bifásicas líquidas apresentam formato variado e composição com 10% vapor (FIG. 49B).



**FIGURA 49** - Fotomicrografias de IF bifásicas no quartzo sob a LT. (A) conjunto de IF restritas a uma região do quartzo; IF (B) monofásicas e (C) bifásicas dessa região. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

Algumas IF trifásicas também aparecem restritas a outra região do quartzo. O sólido contido na inclusão não é um cristal de saturação, mas sim um grão aprisionado juntamente a IF bifásica (FIG. 50). Essa diversidade de inclusões fluidas confinadas a certas áreas do quartzo corrobora para a ocorrência de gerações diferentes do mineral.



**FIGURA 50** - Fotomicrografias de IF trifásicas no quartzo sob a LT. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.

#### 5.4.2. Microtermometria

Análises microtermométricas de infravermelho, com medidas de resfriamento e aquecimento, utilizando a platina Linkam de IV foram realizadas nas inclusões fluidas presentes na hematita, na especularita e no quartzo. Não foi possível, entretanto, obter muitos valores da temperatura de homogeneização ( $T_h$ ) das IF na hematita/especularita devido à diminuição significativa da visibilidade com o aumento de temperatura no transcorrer do aquecimento. Esse fenômeno também foi verificado durante a criometria. Por isso, poucas leituras de temperatura eutética ( $T_e$ ) foram efetuadas, o que não interferiu na interpretação dos resultados.

Os dados foram tratados no programa MacFlinCor 0.93 para o sistema  $H_2O-NaCl-[KCl]$  (BODNAR, VITYK, 1994) que forneceu a salinidade do fluido, densidade e fração molar, entre outras informações (ANEXO D).

##### 5.4.2.a. Hematita I

A TAB.13, ANEXO D apresenta as temperaturas eutética, de fusão do gelo e de homogeneização e também o volume da fase vapor e as respectivas molalidade, fração molar, densidade e volume molar da fase líquida para todas as IF, além da temperatura e pressão críticas.

As temperaturas de fusão do gelo ( $T_{f_{\text{gelo}}}$ ) obtidas nas IF bifásicas da hematita granular foram predominantemente -12 a -14°C, sendo os valores menores -15,6°C e os maiores

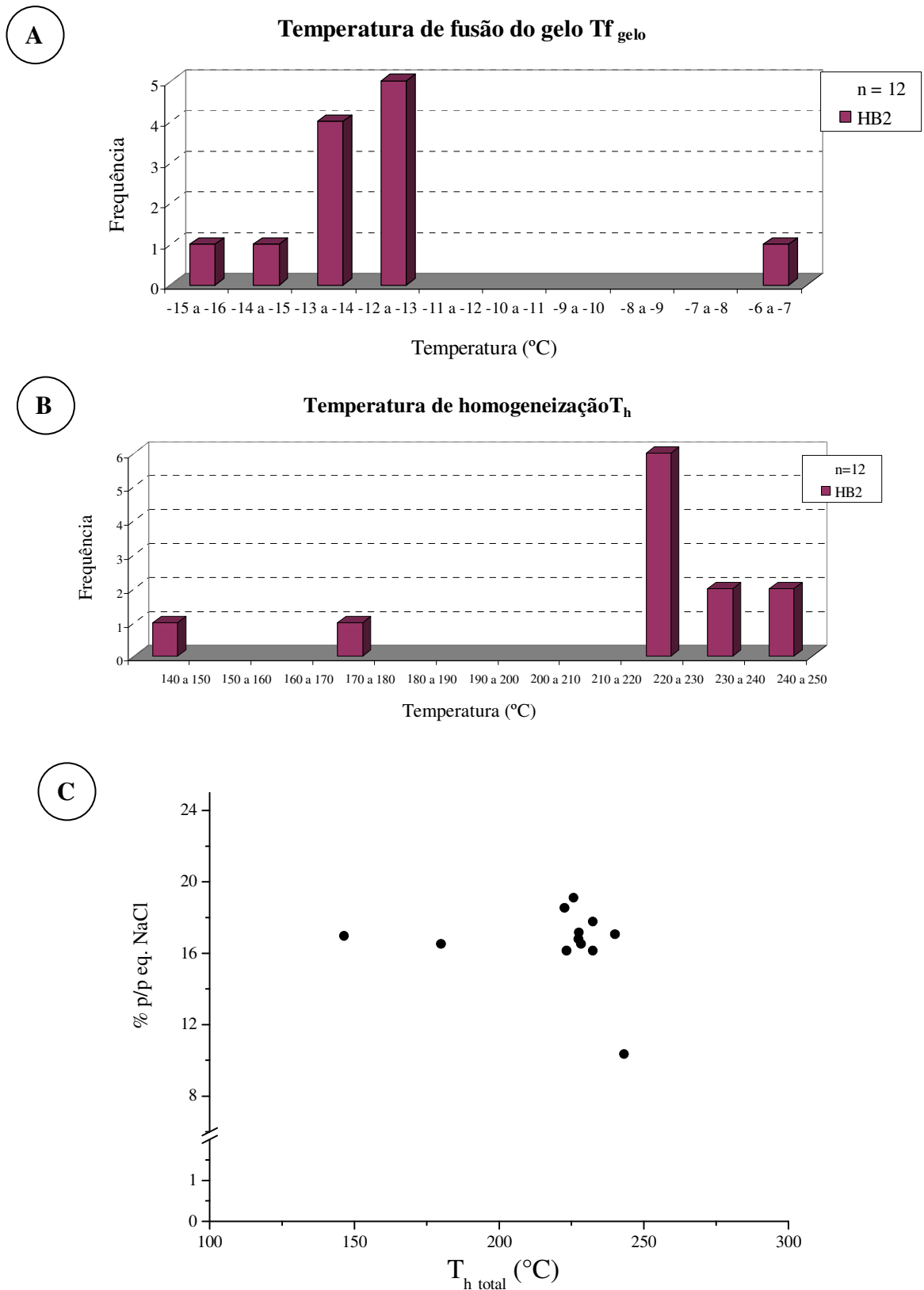
-6,9°C (FIG. 51A). O valor médio da temperatura eutética ( $T_e$ ) foi -36,7°C. No decorrer do experimento não foi observada nenhuma evidência de  $\text{CO}_2$  na fase gasosa da IF, designando-a como aquo-salina e sendo a bolha de vapor d'água. Portanto, a salinidade do fluido obtida foi de 17% em peso equivalente de NaCl.

Esses valores correspondem apenas às inclusões primárias bifásicas, uma vez que as IF monofásicas eram muito pequenas e se encontravam agrupadas, o que impossibilitou seu estudo.

A temperatura de homogeneização total ( $T_{h \text{ total}}$ ) para a fase líquida foi medida entre 220 e 240°C (FIG. 51B). O fluido da hematita granular apresentou uma densidade de 0,97 g/cm<sup>3</sup>, volume molar de 21,0 cm<sup>3</sup>/mol e fração molar de 0,06 do NaCl.

No diagrama de salinidade em função da temperatura de homogeneização total (FIG. 51C) todas as inclusões exibem um único conjunto de valores de salinidade relativamente alto.

As isócoras construídas com os dados da pressão (P) versus temperatura (T) (TAB. 16, ANEXO D) de todas as inclusões fluidas analisadas exibem uma uniformidade, com uma inclinação íngreme (FIG. 1, ANEXO D).



**FIGURA 51** - Histogramas de frequência (A) das temperaturas de fusão do gelo; (B) das temperaturas de homogeneização; e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total para as IF bifásicas na Hematita I da Serra do Sapo, CMD.

#### 5.4.2.b. Especularita (Hematita III)

As IF foram resfriadas até  $-120^{\circ}\text{C}$  e aquecidas até o limite de  $+280^{\circ}\text{C}$ . Os dados estão descritos na TAB.14, ANEXO D. Apesar das IF estarem divididas em dois grupos denominados EM1 e EF1, todas as inclusões das especularitas analisadas microtermometricamente referem-se às inclusões bifásicas primárias. Ou seja, a classificação foi usada somente para distinguir a localização da amostra.

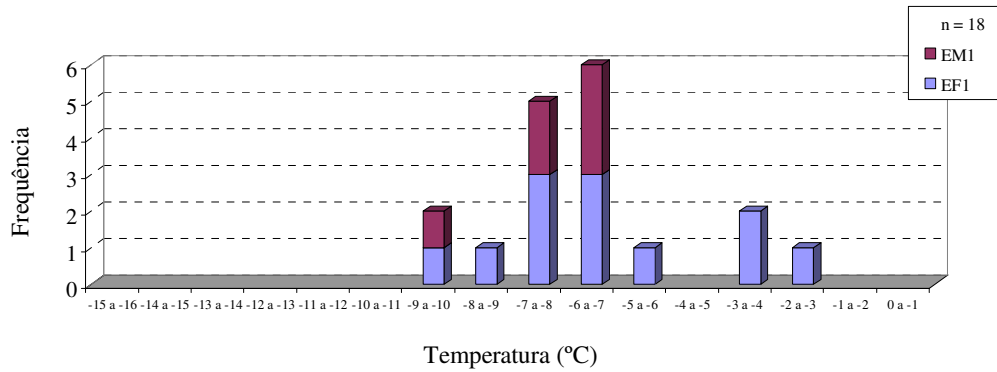
Para essas IF foram obtidos valores médio da  $T_e$  de  $-27,8^{\circ}\text{C}$ , enquanto a  $T_f$  variou de  $-6$  a  $-8^{\circ}\text{C}$ , com temperatura de homogeneização total para a fase líquida sendo de  $240$  a  $260^{\circ}\text{C}$  (FIG. 52). A salinidade está em torno de  $10$  a  $12\%$  em peso equivalente de NaCl, com densidade média de  $0,9\text{ g/cm}^3$ , volume molar de  $21,4\text{ cm}^3/\text{mol}$ , molalidade de  $1,9\text{ mol/Kg}$  e fração molar de  $0,03$  de NaCl. A temperatura crítica ( $T_c$ ) e a pressão crítica ( $P_c$ ) são  $464,7^{\circ}\text{C}$  e  $462,3\text{ bar}$ , respectivamente. Não foram observados indícios da presença de  $\text{CO}_2$ , formação de clatratos e nem a nucleação de fases gasosas carbônicas.

A salinidade, quando mostrada em um gráfico em função da  $T_{h\text{total}}$ , apresentou uma distribuição que varia de acordo com o local da amostra (FIG. 52C). As IF do grupo EF1 diferenciaram-se entre si, aparentando seguir por uma linha com o aumento de temperatura de homogeneização e conduzindo ao outro grupo de IF, ficando algumas agrupadas junto com as IF do EM1.

Nas isócoras (calculadas  $P \times T$  - TAB. 17, ANEXO D) da especularita se notou a separação em dois conjuntos: um mais populoso que limita inferiormente a pressão e outro na região mais elevada do diagrama pouco representativo (FIG. 2, ANEXO D).

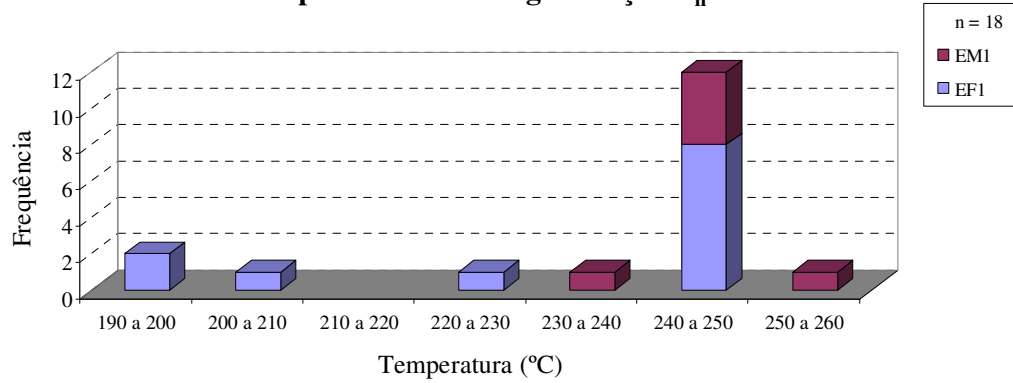
**A**

**Temperatura de fusão do gelo  $T_{f_{\text{gelo}}}$**

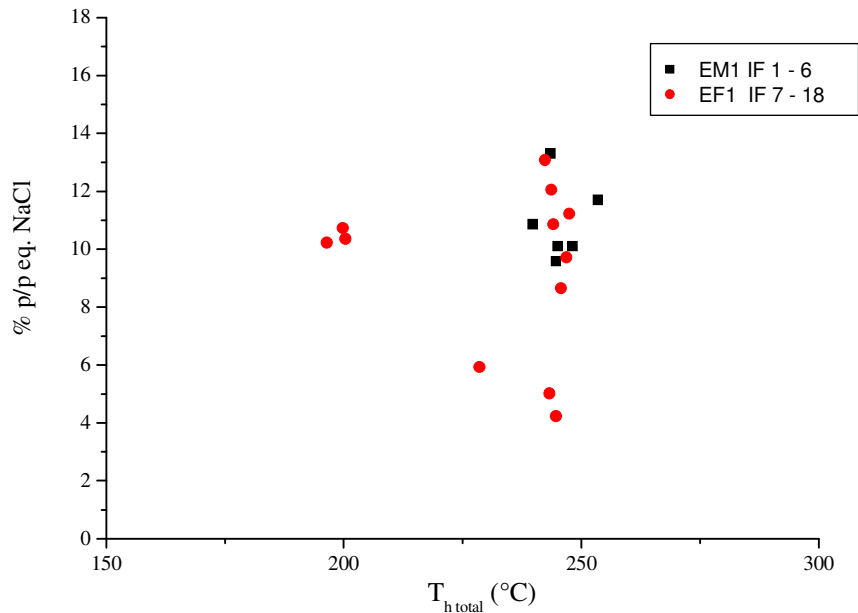


**B**

**Temperatura de homogeneização  $T_h$**



**C**



**FIGURA 52** - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total para as IF bifásicas na especularita da Serra do Sapo, CMD.

#### 5.4.2.c.Quartzo

Nas IF presentes no quartzo foram efetuados um total de 110 medidas microtermométricas englobando tanto as bifásicas quanto as trifásicas (TAB. 15, ANEXO D). As amostras foram separadas em 2 grupos e nomeadas de acordo com a população de IF e conseqüentemente tratadas em separado e posteriormente coligadas. Apesar de não se tratar de um mineral opaco, utilizou-se a platina FTIR600 Linkam para o resfriamento e o aquecimento.

Para as inclusões bifásicas (QP1, QP2 e QC15 - TAB. 15, Anexo D) obteve-se uma temperatura de homogeneização bem variável para a fase líquida, abrangendo de 120 a 420°C, com uma pequena concentração entre 280 a 340°C (FIG. 53).

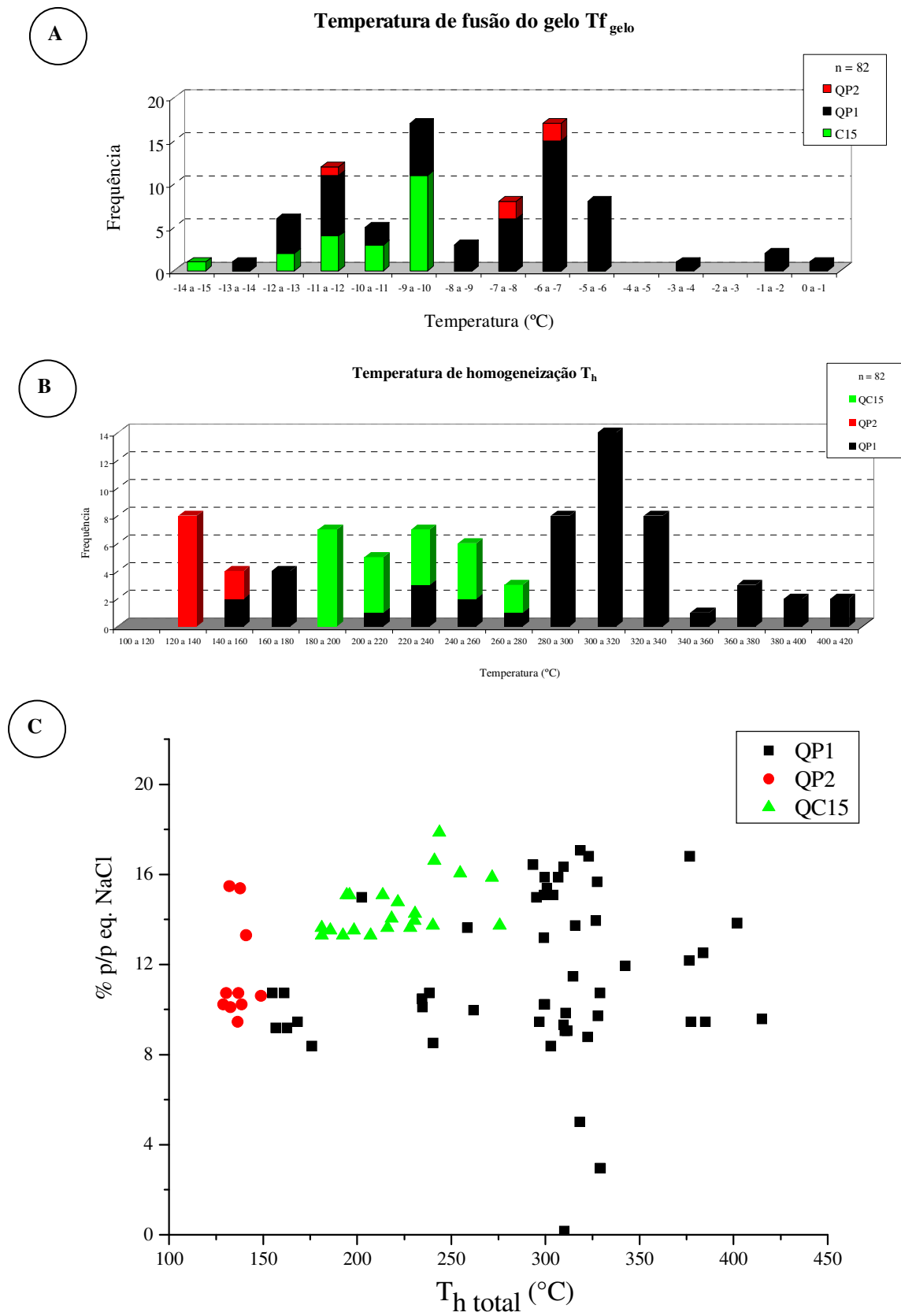
A salinidade calculada indicou valores entre 10 e 16% em peso equivalente de NaCl, sendo a temperatura de fusão do gelo predominante -6 a -12°C (FIG. 53) e a  $T_e$  -27,2°C, revelando uma densidade média de 0,9 g/cm<sup>3</sup>.

Embora durante o resfriamento não se tenha observado nenhum indicativo de CO<sub>2</sub>, algumas IF com bolhas maiores (~ 20% de fase vapor) apresentaram comportamento diferenciado das demais. Assim, suspeitou-se da presença de vestígios de compostos orgânicos na bolha, o que ocasionou a realização de análises por espectroscopia micro Raman.

A combinação das amostras mostrou a formação de dois grupos isolados (QP2 e QC15) e a dispersão dos dados correspondentes à QP1. Os valores obtidos para a salinidade ficaram restritos à área do gráfico entre 8 e 16 % p/p equiv. NaCl enquanto os valores de  $T_{h\ total}$  variam de 100 a 400°C.

Os valores de pressão e temperatura para a construção das isócoras (TAB. 18, ANEXO D) foram agrupados por amostra. Isso tornou possível a observação detalhada do alinhamento para cada análise (FIG. 3, ANEXO D).





**FIGURA 53** - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total das inclusões fluidas bifásicas no quartzo da Serra do Sapo, CMD.

As IF trifásicas (QTP3, QTP4 TAB. 15, ANEXO D) forneceram valores médios de  $T_e$  de  $-30,5^\circ\text{C}$ , com a temperatura de fusão dividida por amostra nas faixas de  $-10$  a  $-12^\circ\text{C}$  e outra de  $-13$  a  $-15^\circ\text{C}$  (FIG. 54A), indicando uma salinidade média de  $16,4\%$  em peso equivalente de NaCl.

Conforme explicitado no CAP. 5.4.1.c, nas IF trifásicas os sólidos presentes não são cristais de saturação, mas sim representam alguma impureza aprisionada durante a sua formação. O experimento de aquecimento foi seguido até o limite de  $550^\circ\text{C}$  e não houve nenhuma alteração na fase sólida, confirmando o esperado. Assim sendo, a temperatura de homogeneização total aqui trata-se da homogeneização apenas da fase vapor para a fase líquida.

No histograma da  $T_h$  (FIG. 54B) também foi verificada a dispersão dos dados em duas áreas extremas de  $100$  a  $140^\circ\text{C}$  e  $320$  a  $360^\circ\text{C}$ . No entanto, diferentemente da  $T_f$ , a divisão se deu somente em relação à temperatura de homogeneização, com mistura das amostras.

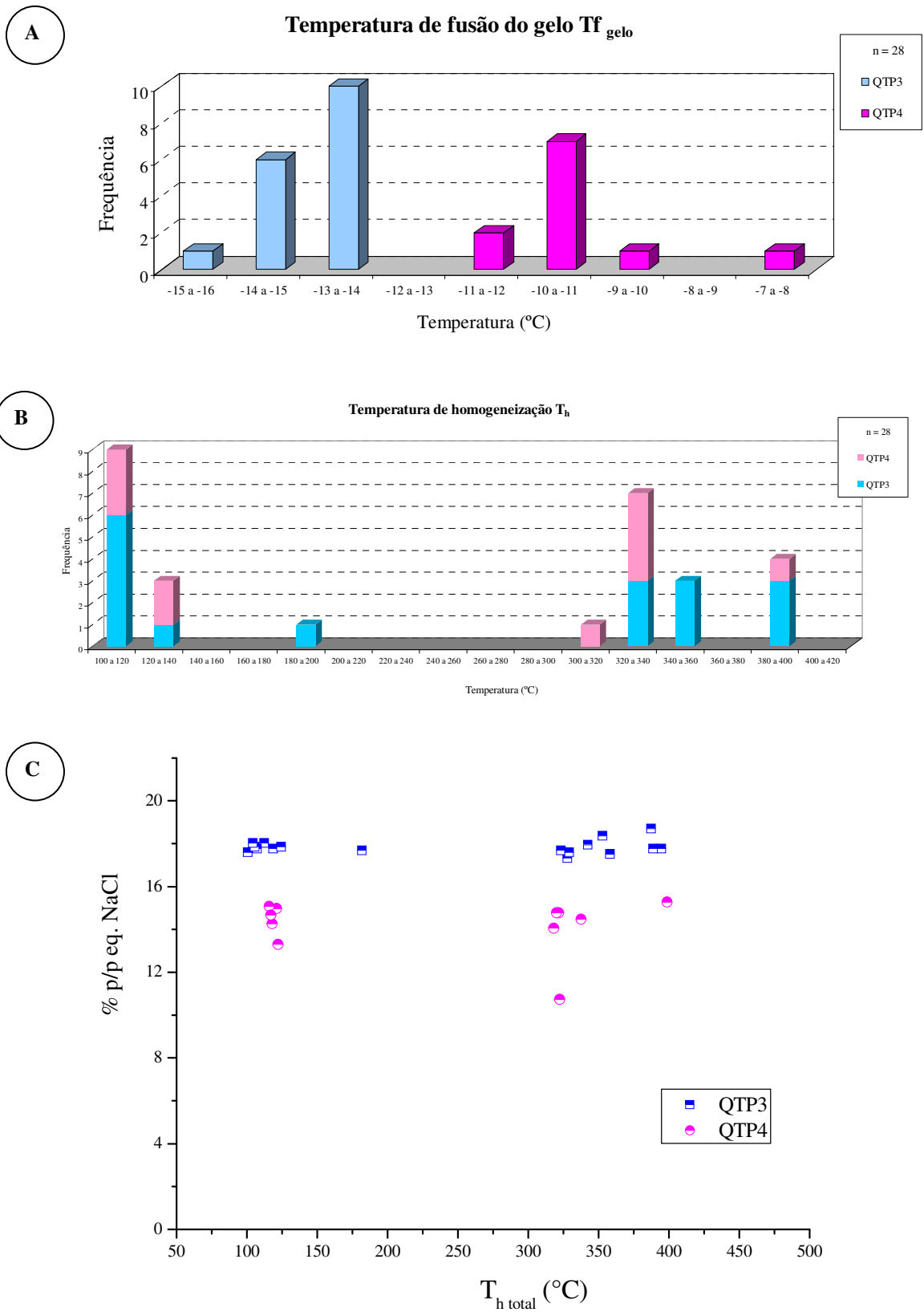
Assim, a distribuição dos dados da salinidade em função da  $T_h$  seguiu a mesma tendência, com a separação em dois grupos distintos e uniformidade na salinidade (FIG. 54C).

As isócoras foram semelhantes entre as amostras, com duas tendências de inclinação (TAB. 18 e FIG. 4, ANEXO D).

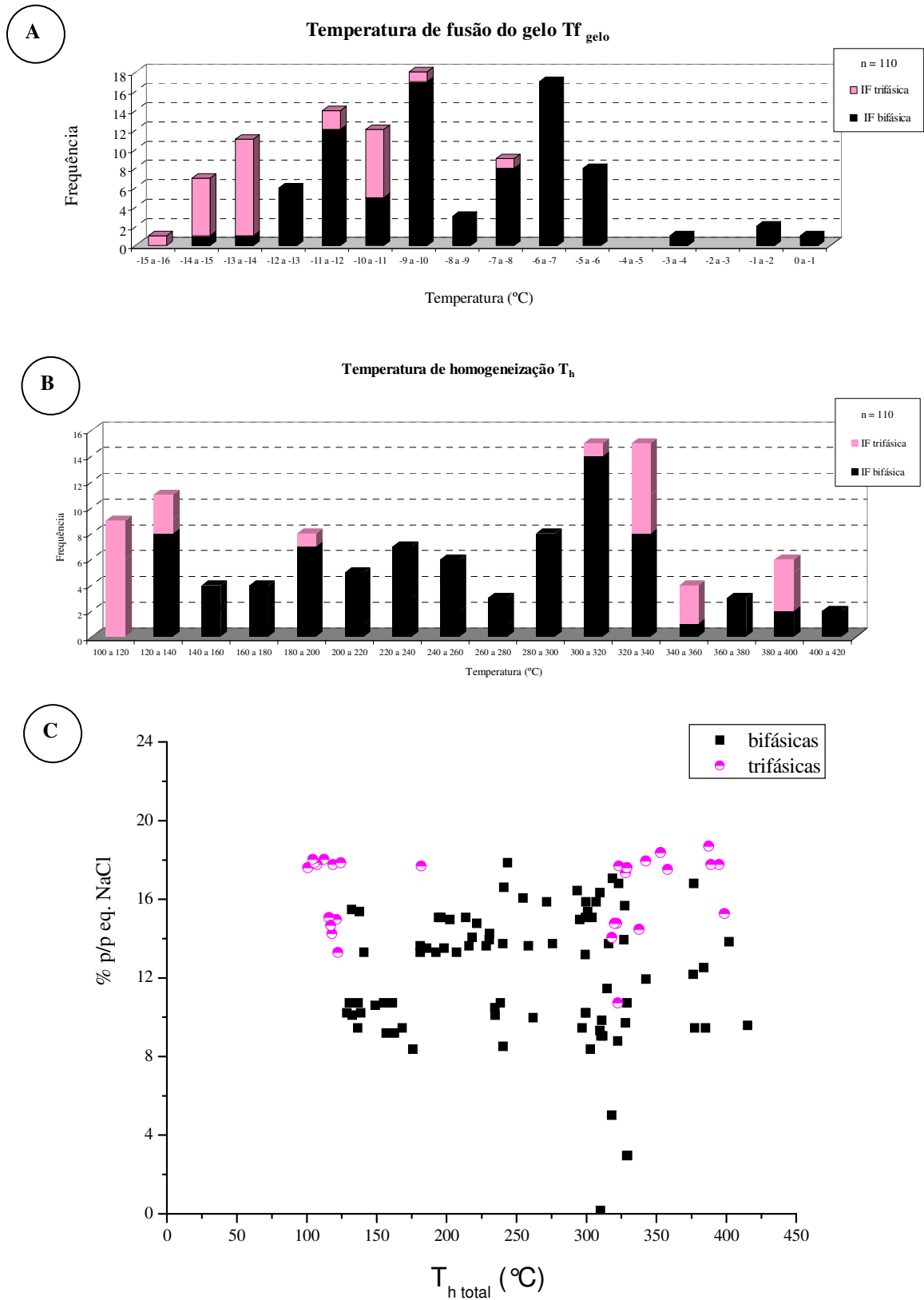
Ao se comparar os dados obtidos para as IF bifásicas e trifásicas do quartzo, verifica-se a diferença nas  $T_f$  e  $T_{h\text{ total}}$  com pouca sobreposição dos dados, prevalecendo as trifásicas entre as temperaturas de  $100-125^\circ\text{C}$  e  $300-350^\circ\text{C}$  (FIG. 55). Considerando os limites obtidos, as inclusões trifásicas apresentam valores ligeiramente superiores de salinidade. Os dados todavia abrangem uma ampla faixa de temperatura de homogeneização (FIG. 55C).

No geral, as IF trifásicas apresentaram em relação a  $T_e$ , molalidade, fração molar, densidade, temperatura e pressão crítica (TAB. 15, ANEXO D) uma média superior às IF bifásicas.

O comportamento das isócoras explicito na FIG. 5, ANEXO D demonstra uma certa orientação e inclinação das retas, com predominância das trifásicas na parte superior e inferior do diagrama, envolvendo as bifásicas, sem entrelace das isócoras.



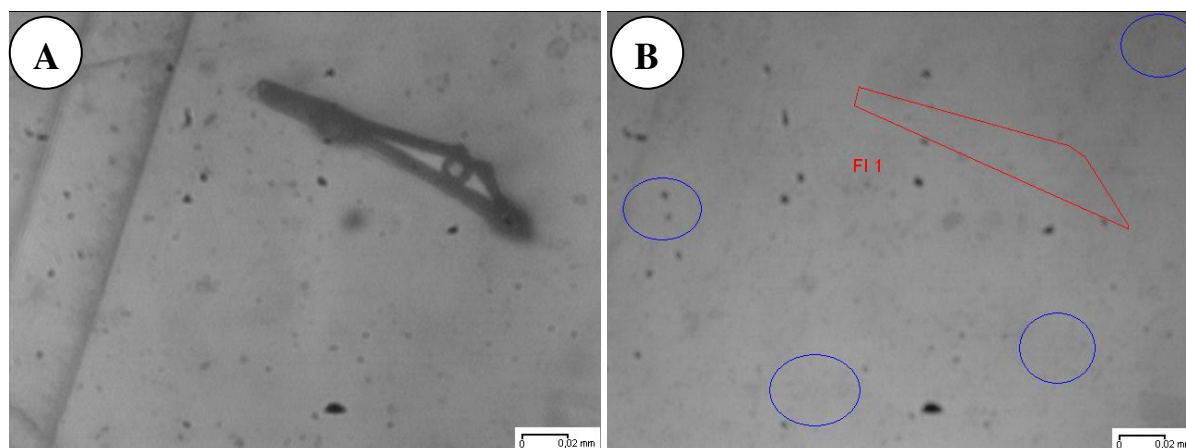
**FIGURA 54** - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total das IF trifásicas no quartzo da Serra do Sapo, CMD.



**FIGURA 55** - Histogramas de frequência das (A) temperaturas de fusão do gelo (B) temperaturas de homogeneização e (C) gráfico da salinidade em % equivalente de NaCl p/p versus a temperatura de homogeneização total das inclusões fluidas bifásicas e trifásicas no quartzo da Serra do Sapo, CMD.

### 5.4.3. Ablação a Laser - Plasma Indutivamente Acoplado - Espectrometria de Massa

A análise por LA-ICP-MS foi realizada em IF representativas na Hematita I e na especularita. Como são minerais opacos e o equipamento do Institute of Geological Science da Universidade de Leeds não possuía um sistema de infravermelho, foi necessária a realização de um mapeamento diferenciado (FIG. 56).



**FIGURA 56** - Fotomicrografias das IF na especularita sob a radiação IV (A) e marcada na luz refletida (B). Serra do Sapo, CMD.

Para análise por LA-ICP-MS foram selecionadas IF de fácil localização sob a luz refletida, e de tamanho maior que  $40\mu\text{m}$ .

Foram determinados quantitativamente os elementos Li, Mg, K, Ca, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Sr, Sb, Ba e Pb. A quantificação foi baseada no método do padrão interno que usa, durante o experimento, uma substância padrão diferente daquela a ser determinada (analito) sob as mesmas condições de análise da substância de interesse (SKOOG, 2002).

Foi utilizado o Na23 ( $1\mu\text{g/g}$ ) como padrão interno na determinação, uma vez que os dados anteriormente obtidos na microtermometria já indicavam uma estimativa da porcentagem equivalente de NaCl em peso.

Dessa forma, o sódio também foi o sinal de quantificação e os valores brutos obtidos para os demais elementos nas inclusões fluidas são multiplicados pela razão entre a concentração do elemento analisado e o conteúdo de Na, visando encontrar o verdadeiro teor (HEINRICH et al, 2003).

Inicialmente foram feitas medidas (em triplicata) da sensibilidade relativa dos padrões utilizados nas análises por LA-ICP-MS (TAB. 9, ANEXO C). Juntamente obtiveram-se os

limites de detecção para os elementos e esses limites são relativos à detecção do teor fictício de sódio (1ppm Na) (TAB. 11, ANEXO C).

Em seguida, foram feitas as análises das IF, que consistiram em tiros sequenciados no mineral hospedeiro sem inclusão fluida (background - BG) e com a IF a ser analisada. A partir dessa diferença se obtém a cps relativa somente à IF, sendo esse valor dividido pelo valor relativo ao cps do Na (padrão). Na sequência é feita a correlação da cps com concentração em gramas dos padrões previamente analisados, e a equivalência para ppm com cálculo do desvio e do erro experimental (TAB. 10, ANEXO C).

Todavia, esses dados ainda não são os considerados como o teor final na inclusão fluida. Os valores obtidos passaram por um recálculo a fim de que as concentrações dos cátions analisados fossem compensadas pelo peso do cloreto obtido a partir da estimativa da salinidade equivalente na microtermometria.

Na literatura, Allan et al (2005) discutem o uso desta normalização e a melhor forma de fazê-la em relação ao conteúdo de Na nas amostras onde grandes concentrações de outros cátions também se encontram presentes.

Portanto, foi realizada a normalização das análises de acordo com a % peso/peso de NaCl equivalente. Especificamente, para tal, dividiu-se o valor da concentração obtida por LA-ICP-MS pelo peso atômico de cada elemento investigado, visando obter as proporções atômicas. Concomitantemente, foi feito um cálculo, para cada elemento, para se obter um fator de conversão para balancear as cargas positivas dos cátions em relação ao cloreto equivalente da solução. Esse fator é um valor individual para cada IF, pois está diretamente correlacionado com o nox do cátion e com a salinidade da inclusão analisada.

Ao se multiplicar as proporções atômicas por esse fator de conversão foram obtidas as proporções atômicas normalizadas em NaCl equivalente. Para expressar as análises em ppm, multiplicou-se as proporções atômicas normalizada pelo peso atômico.

A TAB. 12, ANEXO C apresenta os resultados analíticos obtidos pelo método LA-ICP-MS, normalizadas de acordo com a salinidade equivalente de NaCl. Ao todo foram feitos 57 tiros, sendo 54 na hematita III - especularita (ESP 1.1 a 8.4) e 3 na Hematita I (HEM 9.1 a 9.3). Somente foram considerados os dados daquelas IF (destacadas em negrito na TAB. 12, ANEXO C) que correspondiam exatamente à área previamente selecionada, uma vez que os minerais são opacos e o operador do equipamento não dispunha de sistema de infravermelho, conforme já mencionado.

A quantidade relativamente pequena da Hematita I (3 IF) analisada por LA-ICP-MS é devido a escassez de inclusões fluidas bifásicas nesse mineral, principalmente nos parâmetros exigidos pelo método, além da dificuldade na obtenção dos dados microtermométricos previamente realizados.

Os resultados das concentrações em ppm das IF nas hematitas-especularitas analisadas foram plotados para uma melhor visualização dos dados. As variações separadas por grupos de elementos são a seguir resumidas (FIG. 57).

Nos gráficos não consta o Fe analisado, pois seu teor na IF não é confiável, uma vez que é o principal constituinte do mineral hospedeiro e pode haver sobreposição dos valores. No entanto sua presença é certa, somente não se tendo seguridade quanto à sua concentração.

#### *Hematita I*

As inclusões fluidas analisadas na Hematita I eram todas bifásicas e pequenas e apresentaram conteúdos com:

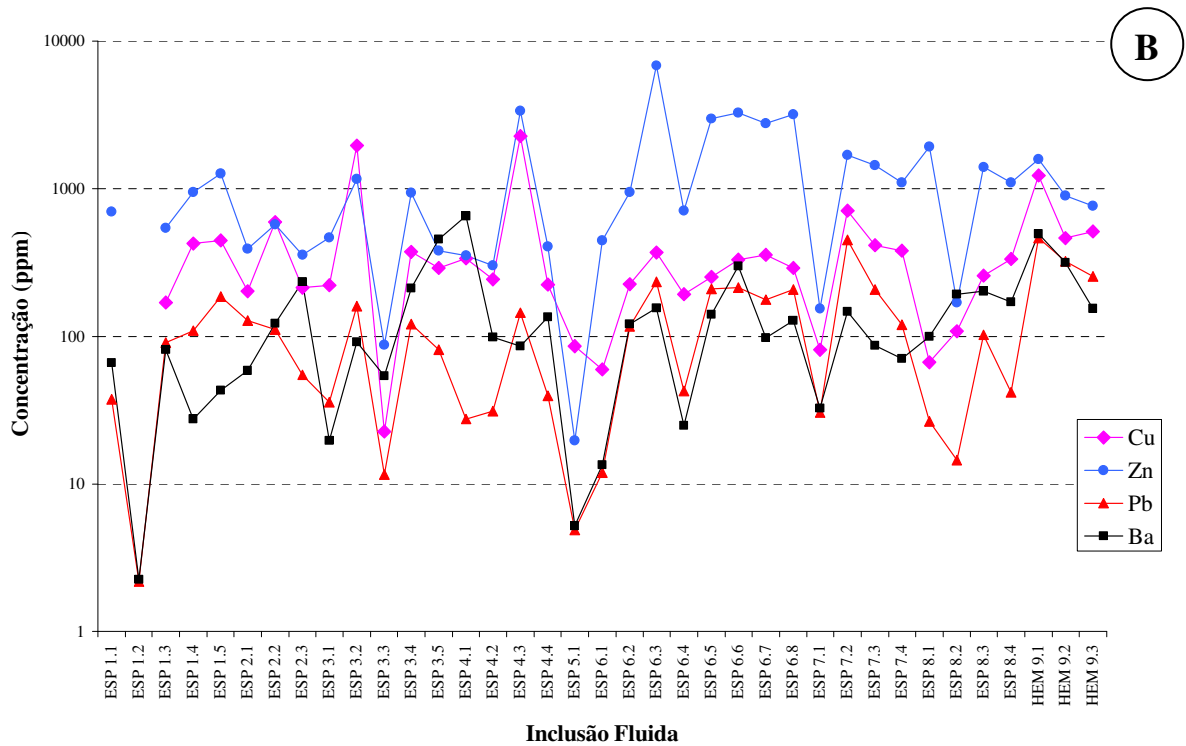
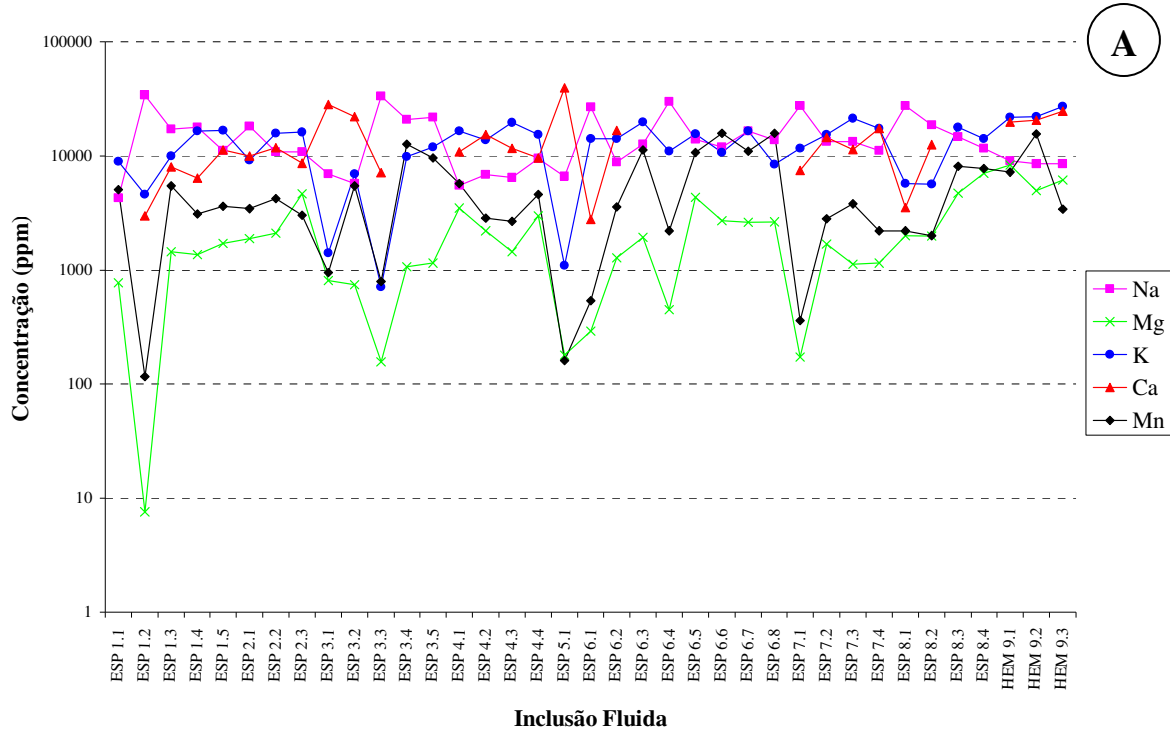
- aproximadamente 24.000ppm de K, 21.800ppm de Ca e 8.700ppm de Na
- Mg variando entre 5.000 e 8.400ppm e o Mn variando de 4.000 a 8.700ppm
- concentração 1.100ppm de Zn e 750ppm de Cu
- 350ppm para o Ba e Pb
- inferiores de 300ppm para o As
- teores de 130ppm de Li e Sr
- 105ppm de Sb

Os valores de Zn, Sb e Na não apresentaram grandes variações em diferentes IF da hematita I (FIG. 57). Os valores de Mn, Ba, Sr, Cu e As, ao contrário, mostraram variação superior de 60% nos resultados das análises.

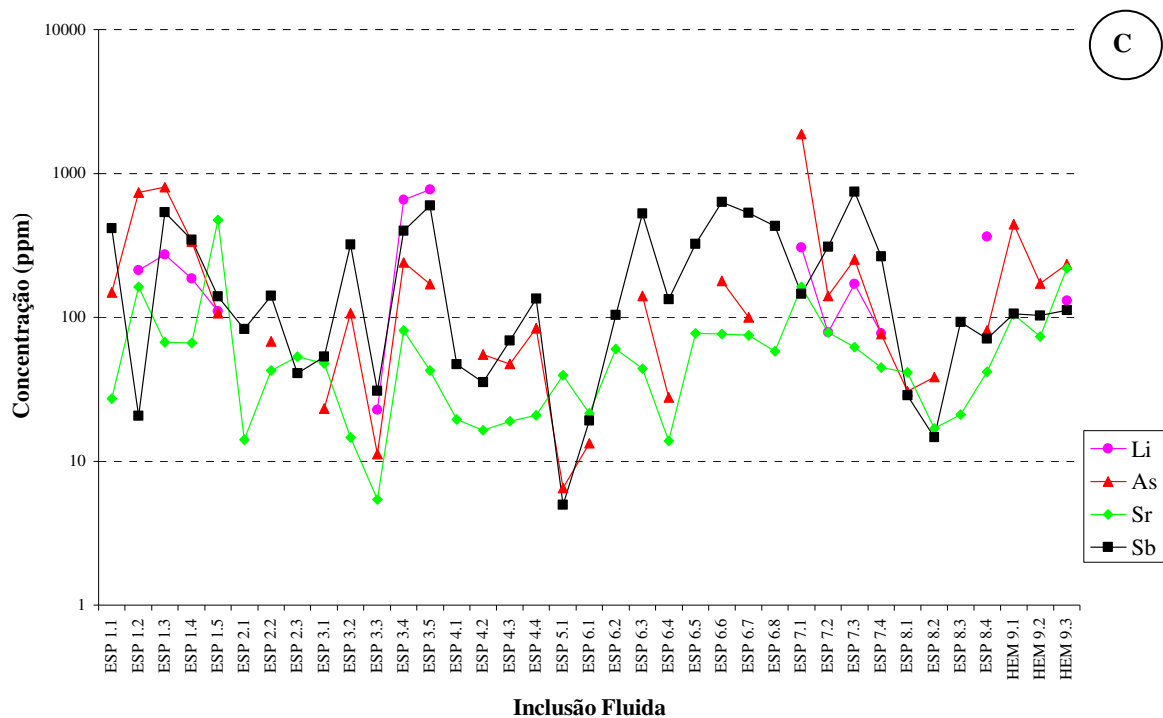
#### *Especularita*

Na especularita os cátions que apresentaram uma maior concentração foram o Na, Ca e K, com médias de 15.300ppm, 12.600ppm, 12.200ppm, respectivamente, seguidos pelo Mn com 5.100ppm, Mg com 1.900ppm e Zn com cerca de 1.300ppm. Em menor quantidade foram

detectados os elementos Cu com 390ppm, Li, As e Sb com ~250ppm cada, Ba com 130ppm e o Sr e Pb com quantidades menores que 100ppm.



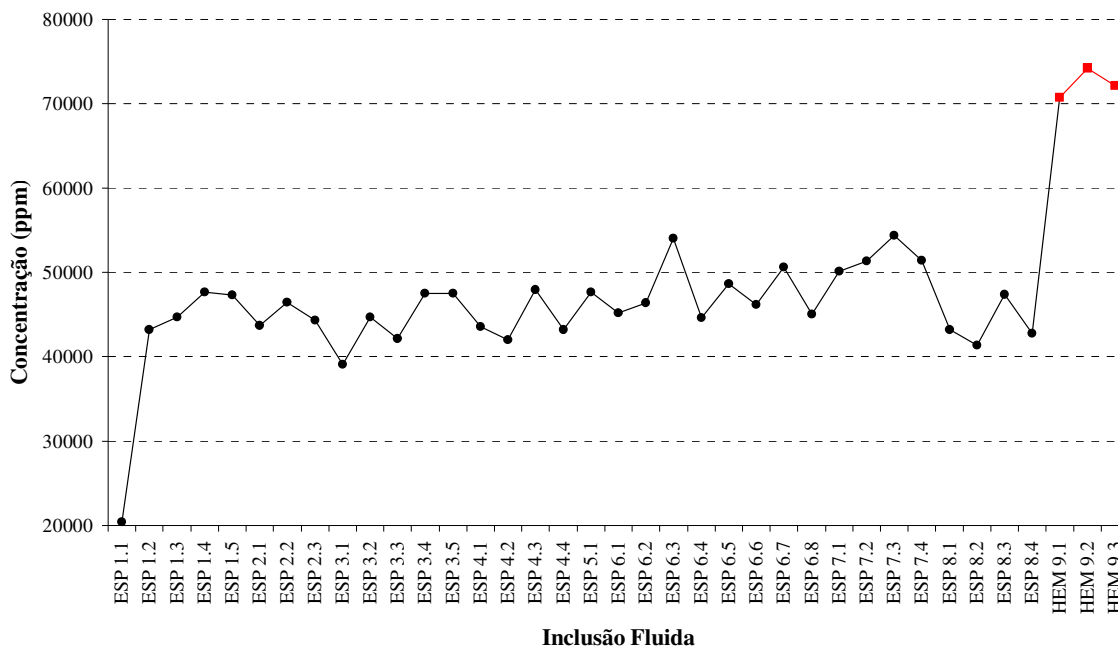




**FIGURA 57** - Gráficos das concentrações de diferentes elementos para as IF analisadas por LA-ICP-MS. (A) Na, Mg, K, Ca e Mn; (B) Cu, Zn, Pb e Ba; (C) Li, As, Sr e Sb na Hematita I e especularita da Serra do Sapo, CMD.

Os resultados para as inclusões da Hematita I revelaram teores relativamente mais elevados daqueles obtidos na especularita (FIG. 58) exibindo, no entanto, a mesma tendência proporcional.

No geral, os resultados apresentaram-se homogêneos em relação à variação de amostra (FIG. 58) e quanto à concentração os elementos encontram-se dispostos em dois conjuntos: um grupo com concentrações mais elevadas e outro com concentrações menores.



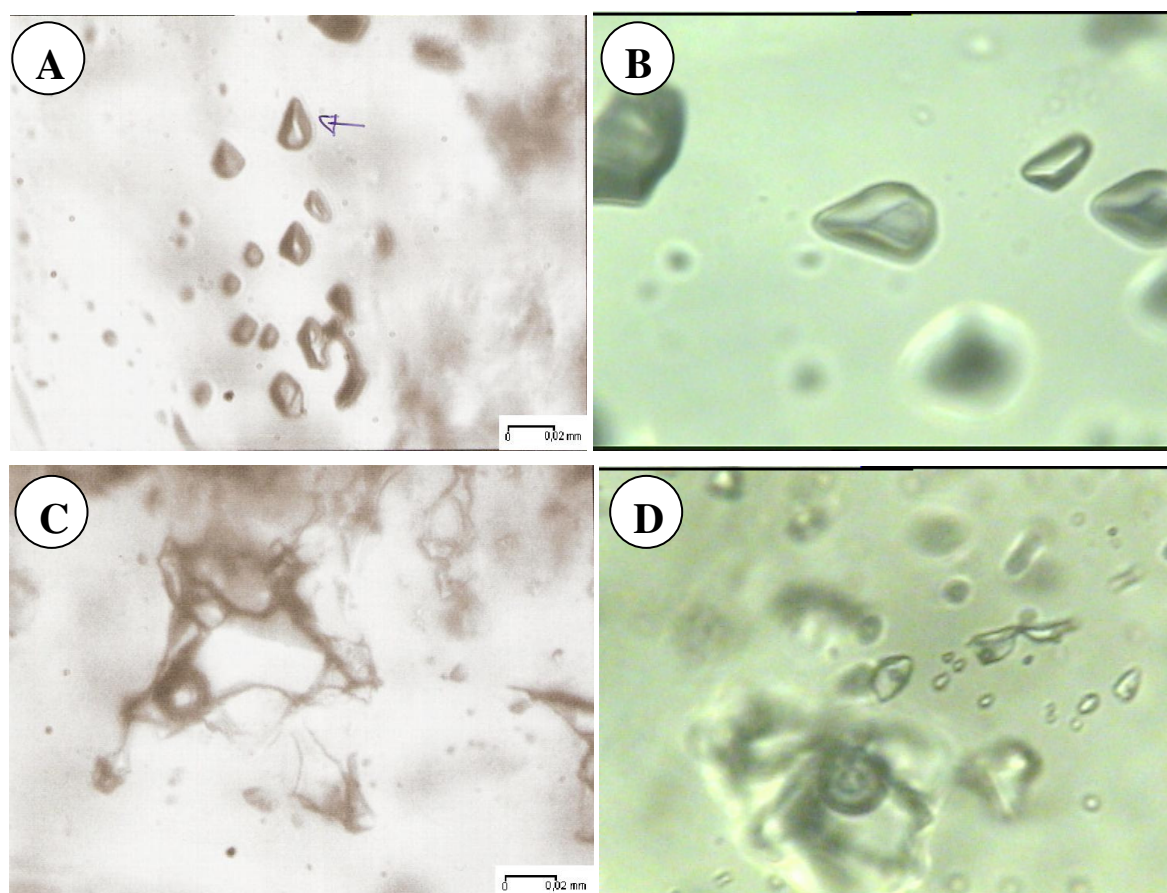
**FIGURA 58** - Gráfico do somatório dos valores médios da concentração de todos os cátions analisados por LA-ICP-MS para cada inclusão fluida da especularita e da hematita I da Serra do Sapo, CMD.

#### 5.4.4. Espectroscopia micro Raman

Realizaram-se análises, em algumas inclusões fluidas presentes no quartzo, utilizando a técnica de espectroscopia de micro Raman (FIG. 59), empregando um tempo de 30s. Apesar das análises por microtermometria não evidenciarem a presença de CO<sub>2</sub>, manteve-se a realização do método para esclarecer suspeitas com relação àquelas IF de comportamento singular. Foram selecionadas IF monofásicas e bifásicas (FIG. 60), com bolhas grandes (20%v/v) e escuras, localizadas em diferentes regiões da amostra.



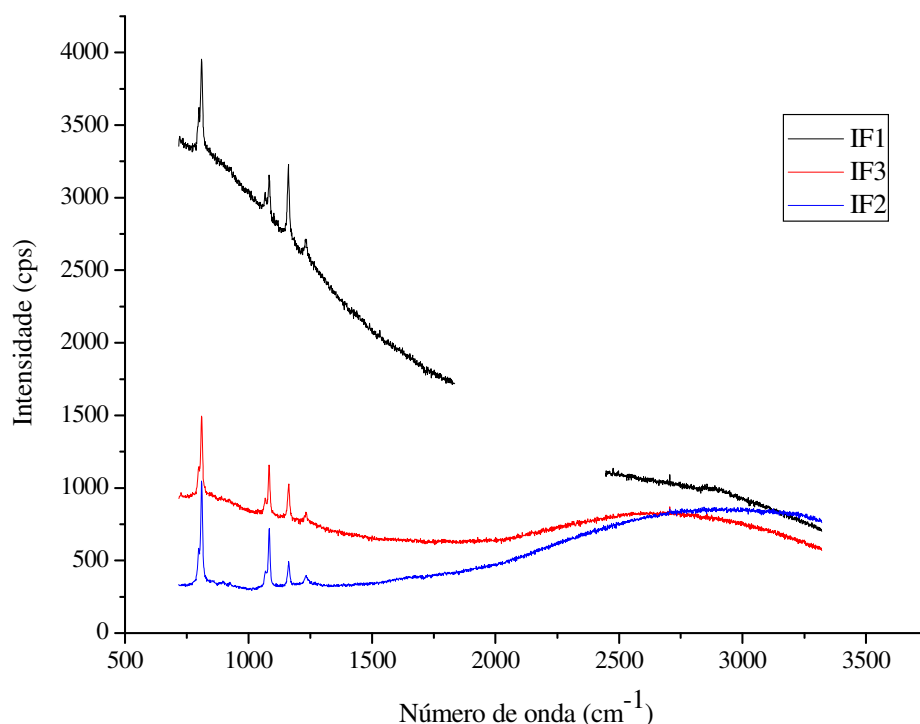
**FIGURA 59** - Fotografia do equipamento de espectroscopia micro Raman utilizado.



**FIGURA 60** - Fotomicrografias das IF no quartzo (A) monofásicas, (B) imagem A ampliada, (B, C) bifásicas analisadas por espectroscopia micro Raman. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD. As imagens da letras B e D estão com aumento de 800x obtidas a partir microscópio do Raman.

Espectros obtidos para três IF no quartzo estão registrados na FIG. 61. Verificou-se por micro Raman que o  $\text{CO}_2$  não está presente em nenhuma inclusão fluida do quartzo, devido à ausência da banda de  $1388\text{cm}^{-1}$  que corresponde ao estiramento C-O do  $\text{CO}_2$  (TAB. 5). Da mesma forma não foi detectado  $\text{CH}_4$  (banda  $2917\text{cm}^{-1}$ ) ou vestígios de matéria orgânica (SILVERSTEIN et al, 1994). Os picos iniciais, com intensidade baixa, nas três análises em  $806\text{cm}^{-1}$ ,  $1083\text{cm}^{-1}$  e  $1160\text{cm}^{-1}$  respectivos ao quartzo, porém esses espectros não apresentam todos os picos característicos do mineral. O pico em  $2700\text{cm}^{-1}$  é devido a influência da luz externa ao equipamento e a luminescência faz com que a linha base ascenda. A banda larga a partir de  $1600\text{cm}^{-1}$  é referente à presença da  $\text{H}_2\text{O}$ , comprovando ser um fluido de natureza aquo-salino.

No decorrer do experimento não foi observado nenhum indicativo de  $\text{CO}_2$  ou compostos orgânicos em diferentes IF analisadas, coerentes com os resultados microtermométricos. A similaridade dos espectros obtidos justificou a não efetivação de excessivas medidas.



**FIGURA 61** - Espectros de micro Raman para três inclusões fluidas (IF1 e IF3 monofásicas e IF2 bifásica) no quartzo da Serra do Sapo, CMD.

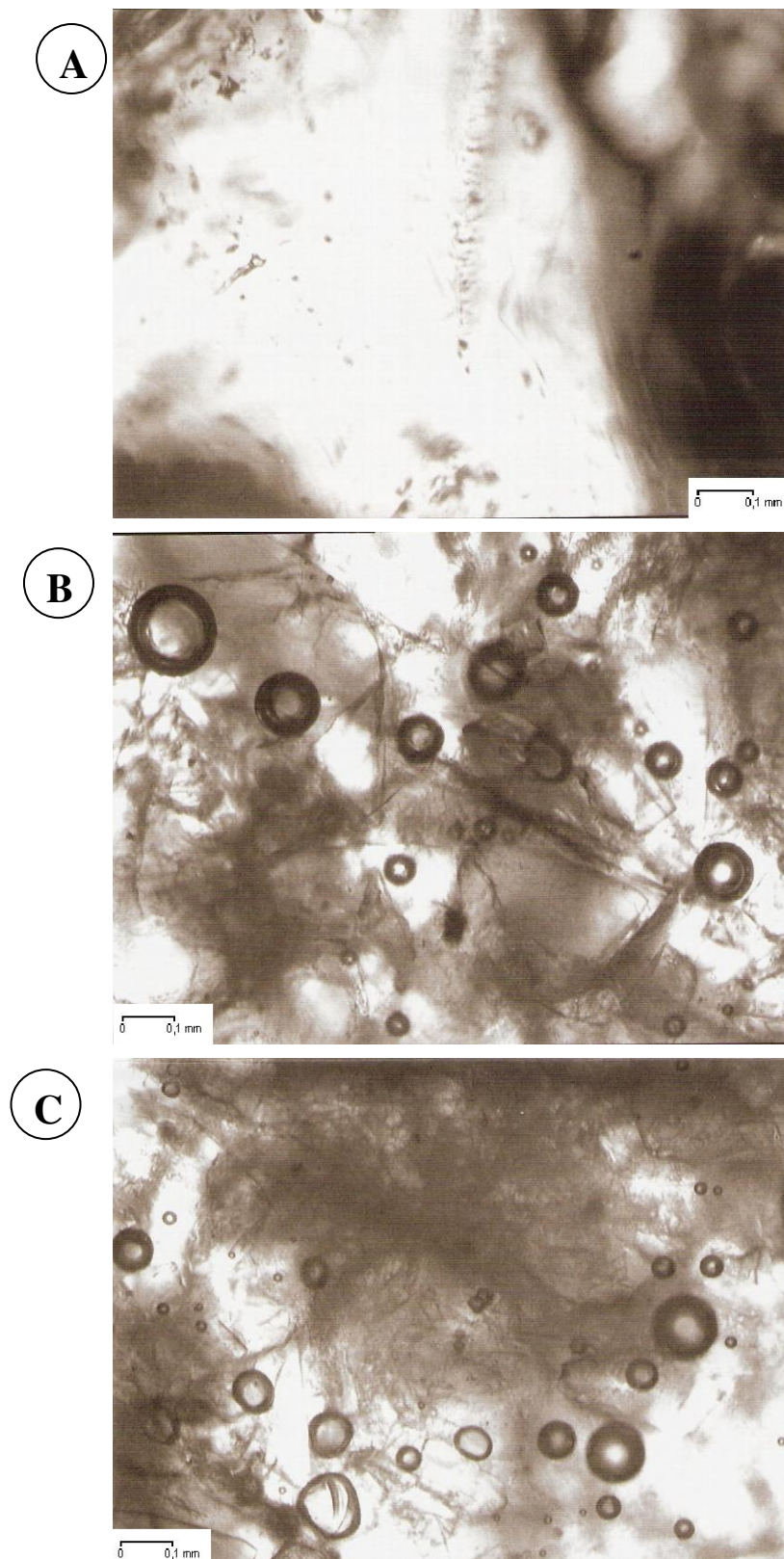
**TABELA 5** - Frequência dos espectros Raman das espécies gasosas mais comuns, encontradas em IF naturais, para um comprimento de onda de 515 (ALVES, 1995)

<b>Composto</b>	<b>Frequência (cm<sup>-1</sup>)</b>
CO <sub>2</sub>	1388
O <sub>2</sub>	1555
CO	2143
N <sub>2</sub>	2331
HS <sup>-</sup>	2580
H <sub>2</sub> S	2611
CH <sub>4</sub>	2917
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	2954
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	2890
H <sub>2</sub>	4156

#### 5.4.5. Platina de Esmagamento

Visando a execução do esmagamento, cristais de quartzo foram selecionados pertencentes ao veio associado à especularita. Por tratar do quartzo, um mineral com grande quantidade e variedade de inclusões fluidas, não foi possível ter um controle de todas as IF presentes. Para imersão do cristal utilizou-se glicerina, uma vez que a maioria dos gases possui baixa solubilidade.

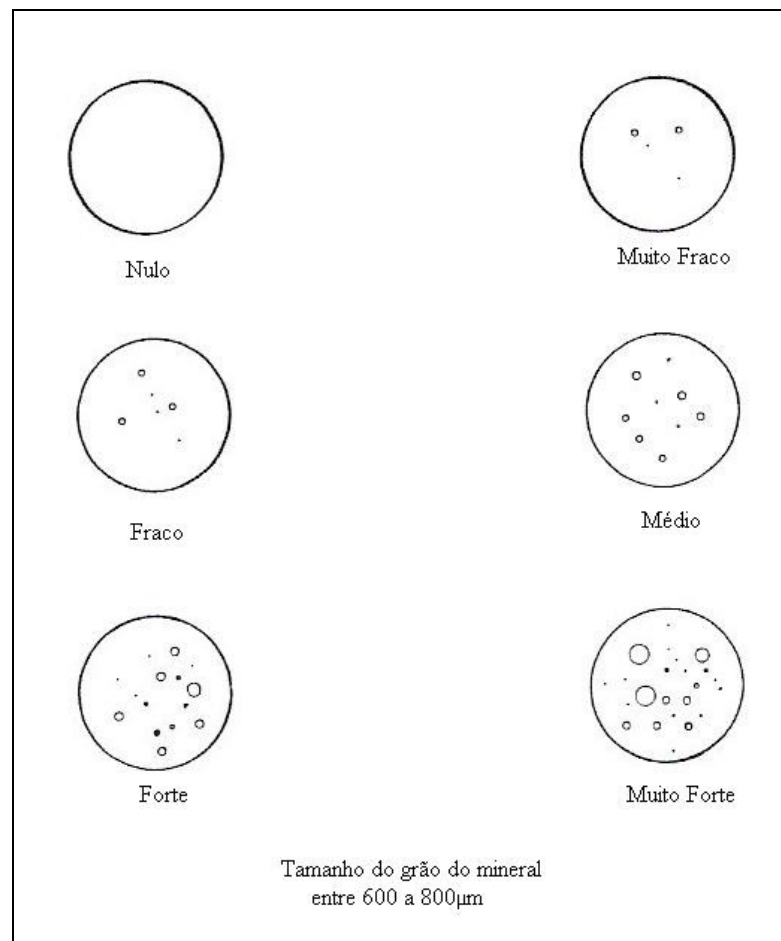
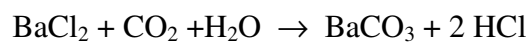
No decorrer dos experimentos, durante o esmagamento, verificou-se a formação progressiva de bolhas produzidas pelos gases sob pressão. A sequência das etapas de esmagamento, em um grão representativo, pode ser observada na FIG. 62. Segundo a quantidade de gases liberados em todos cristais esmagados, a classificação pode ser considerada como liberação média (FIG. 63).



**FIGURA 62** - Fotomicrografias da sequência de esmagamento de um cristal de quartzo com inclusões fluidas imerso em glicerina (A) antes de iniciar, (B) fase de maior liberação, e (C) antes do término do experimento. Amostra FSP01-PROF.231,15m - Serra do Sapo, CMD.



Esses resultados sugerem a possível presença de fases carbônicas, provavelmente aprisionado em inclusões fluidas. Como a presença de fases carbônicas não foi verificada nas IF primárias ou secundárias através da microtermometria ou da espectroscopia Raman, supõe-se que esses compostos moleculares estejam presentes em inclusões intergranulares, ou até associados aos carbonatos tardios que estão misturados no quartzo, outra possibilidade seria a inserção de ar durante o experimento. Para comprovar a presença de CO<sub>2</sub> utilizando esse método, deveria ter realizado o esmagamento em solução de cloreto de bário e observar se ocorreria a formação do carbonato de bário, pela seguinte reação:



**FIGURA 63** - Carta comparativa dos gases liberados para classificação (modificado de FUZIKAWA, 1985).

## CAPÍTULO 6 - DISCUSSÃO

---

---

Através de estudos petrográficos e de IF constatamos a existência de diferentes gerações de óxidos de ferro. Uma granular com formação precoce, a Hematita I; outra com cristalização tabular, a Hematita II; e uma posterior com hábito já totalmente especular, a Hematita III (especularita).

As inclusões fluidas presentes nas Hematitas I e III e no quartzo associado da Serra do Sapo foram estudadas por microscopia óptica no infravermelho, microtermometria, LA-ICP-MS, espectroscopia de micro-Raman e platina de esmagamento, além do geotermômetro da clorita e microsonda eletrônica nos minerais.

Os resultados correlacionados e suas interpretações, suposições e comparações serão aqui abordados em sessões que possam corroborar para uma melhor compreensão do significado metalogenético do minério de ferro da Serra do Sapo.

### A HEMATITA I (GRANOBLÁSTICA) E SUA RELAÇÃO COM A MAGNETITA

Os cristais de hematita granular (Hem G) constituem uma textura granoblástica e se formaram por processos de recristalização parcial ou total durante o metamorfismo. As análises magnetométricas e de espectroscopia Mössbauer (ANEXO E) comprovaram a ausência de magnetita e a presença da maghemita em íntima associação com a Hematita I. Isto sugere que esse mineral foi originado a partir de processos secundários de oxidação.

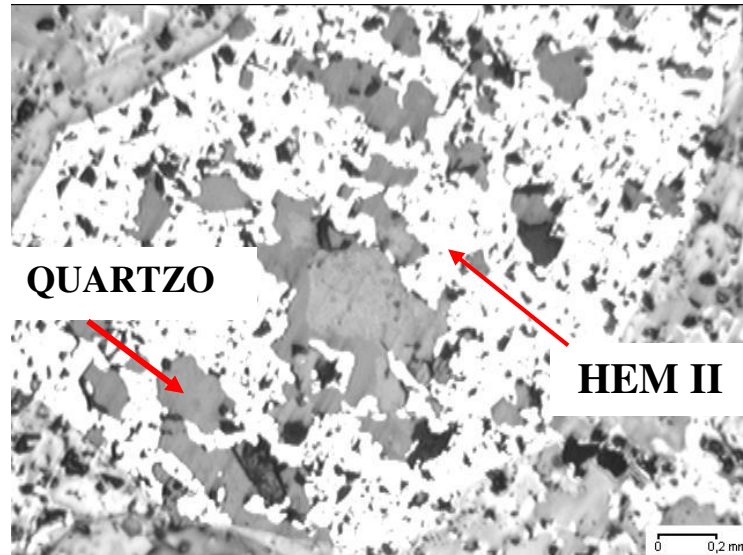
É notável o fato de muitos cristais não apresentarem IF, principalmente os alongados (FIG. 13), enquanto alguns exibem inclusões monofásicas e bifásicas, geralmente nos núcleos preservados dos cristais.

### ORIGEM DAS HEMATITAS II E III

A Hematita II apresenta morfologia microlamelar precipitada no interstício e seus cristais associados ao quartzo (FIG. 64) (porém sem formar veios), não sendo transparente sob



a luz infravermelha. A especularita (Hematita III), por outro lado, está associada aos veios de quartzo.



**FIGURA 64** - Fotomicrografia da Hematita II (hematita tabular) com quartzo sob luz refletida. Amostra FSP01-PROF.213,05m, Serra do Sapo, CMD.

Os veios de quartzo/especularita estão associados a outros minerais que não aparecem nos corpos de minério. Tratam-se principalmente da clorita, moscovita, calcita e granada que não apresentam relações texturais/ temporais claras que permitam determinar uma sequência paragenética. Os fluidos parecem ser similares aos encontrados na especularita (vide TAB. 6).

A Hematita III (especularita) apresenta nítida transparência sob o infravermelho, sendo possível estudar suas feições internas e as características dos fluidos aprisionados. Essa geração se formou a temperaturas levemente superiores as da Hem I. A existência de inclusões fluidas sustenta a tese de que a formação da especularita possa ser consequência da difusão assistida por fluidos (LAGOEIRO, 1998; ROSIERE et al, 2001; SIEMES et al, 2003).

Esses fluidos são, no entanto, bem diferentes dos estudados na Hematita I (granoblástica). Embora a temperatura da Hematita III seja levemente superior, a diminuição na salinidade e os distintos teores de alguns elementos, observados no estudo de LA-ICP-MS, confirmam que os fluidos são diferentes (vide tópico *Discussão dos Dados de LA-ICP-MS*).

## DIFERENÇA ENTRE OS FLUIDOS DAS HEMATITAS

As gerações de hematita da Serra do Sapo, CMD, se diferenciam por: (i) hábito característico de cada uma, (ii) morfologia das IF, e (iii) composição de seus fluidos (TAB. 6). Em decorrência da não transparência sob a luz infravermelha, não foi estudado o fluido da hematita tabular, Hem II.

O fluido da hematita granular é caracterizado por maior salinidade (17% p/p equiv. NaCl) e níveis mais elevados de Ca e K quando comparados ao da especularita. O fluido desse último mineral contém 10-12% p/p equiv. NaCl enquanto as inclusões fluidas, aprisionadas no quartzo associado à especularita, apresentaram aproximadamente 12% p/p equiv. NaCl.

O valor médio da temperatura eutética ( $-36,7^{\circ}\text{C}$ ) para a Hematita I está inserido na faixa de temperatura do sistema salino  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{FeCl}_2$  (SHEPHERD et al, 1985) (TAB. 7). Para especularita, a  $T_e$  na faixa de  $-26^{\circ}\text{C}$  (TAB. 6) corresponde aos sistemas aquo-salinos  $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{KCl}$  e  $\text{H}_2\text{O}-\text{MgCl}_2$  (FIG. 65A).

As temperaturas de fusão do gelo e de homogeneização total para as Hematita I e III são apresentadas na FIG. 65. Ao se comparar os valores obtidos durante a criometria é possível observar nitidamente a separação entre as gerações da hematita. Durante o aquecimento, essa divisão também é observada embora as temperaturas de homogeneização ( $T_h$ ) estejam mais próximas, com uma inversão da sequência, isto é, os valores de  $T_h$  da Hematita I são relativamente inferiores aos da especularita.

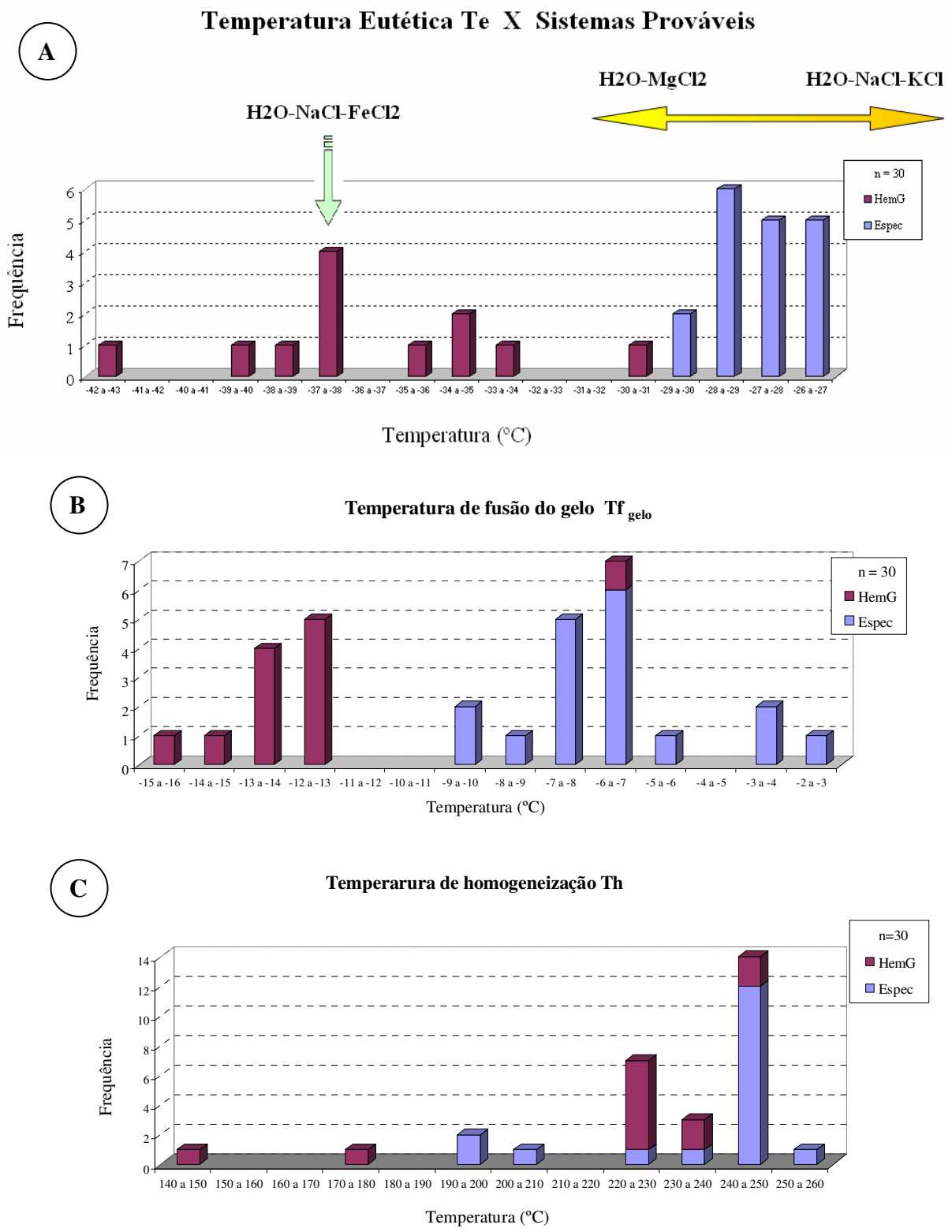
Ao se comparar o fluido do quartzo com o da especularita, observa-se similaridade entre eles, muito embora o quartzo apresente temperaturas de homogeneização mais elevadas (TAB. 6). Nesse caso seriam genética e composicionalmente equivalentes.

A diferença de salinidade e de cátions, entre a hematita granular e o quartzo-especularita, sugere que fluidos com composições diferentes participaram durante fases específicas da mineralização.

**TABELA 6** - Comparação entre os fluidos da Hematita I e III (especularita) e quartzo da Serra do Sapo, CMD.

	<b>Hematita I</b>	<b>Hematita III</b>	<b>Quartzo</b>
Hábito dos cristais	granular, incipientemente recristalizados	especular	prismático
Transparência sob IV	sim	sim	sim
Tipo de IF	monofásicas, bifásicas (L+G)	bifásicas (L+G), trifásicas (L+G+S)	monofásicas, bifásicas (L+G)
Fase carbônica	não	não	não
Fases sólidas	não	sim (pseudo-cúbicos)	não
Salinidade * (%p/p equiv. NaCl)	16 a 18	10 a 12	9 a 15
T <sub>h total</sub> (°C)*	220 a 240	240 a 260	280 a 340
T <sub>e</sub> (°C)*	-37 a -39	-26 a -29	-26 a -30
Hidratos	não	não	não
LA-ICP-MS (ppm) <sup>1</sup>	72.426,58	49.837,48	NA
Micro-Raman	NA	NA	vapor d'água, não tem CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub>

\* faixa predominante; NA = não analisado; <sup>1</sup> média do somatório da concentração de todos os cátions analisados.



**FIGURA 65** - Histogramas de frequência das temperaturas (A) eutética com os prováveis sistemas aquo-salinos, (B) de fusão do gelo; (C) de homogeneização total para as inclusões fluidas bifásicas na hematita granular (Hem G) e na especularita (Espec), Serra do Sapo, Espinhaço, M.G.

**TABELA 7** - Dados de fase selecionados para sistemas aquo-salinos considerados mais relevantes para inclusões fluidas aquosas (extraído de Shepherd et al, 1985).

Sistemas salinos	Temperatura eutética (°C)	Fases sólidas
H <sub>2</sub> O-NaCl-CaCl <sub>2</sub>	-55 (-52)	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O + CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-MgCl <sub>2</sub> -CaCl <sub>2</sub>	-52,2	gelo + MgCl <sub>2</sub> .12H <sub>2</sub> O + CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
* H <sub>2</sub> O-KCl-CaCl <sub>2</sub>	-50,5	gelo + CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-CaCl <sub>2</sub>	-49,5	gelo + CaCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> -K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-37,0	gelo + (K, Na) <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-FeCl <sub>2</sub>	-37,0	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O + FeCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-FeCl <sub>2</sub>	-35,0	gelo + FeCl <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-MgCl <sub>2</sub>	-35,0	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O + MgCl <sub>2</sub> .12H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-MgCl <sub>2</sub>	-33,6	gelo + MgCl <sub>2</sub> .12H <sub>2</sub> O
* H <sub>2</sub> O-NaCl-KCl	-23,5 (-22,9)	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-21,7	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .5H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl-NaHCO <sub>3</sub>	-21,8	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O + NaHCO <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O-NaCl-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-21,4	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaCl	-21,2 (-20,8)	gelo + NaCl.2H <sub>2</sub> O
*H <sub>2</sub> O-KCl	-10,6	gelo
H <sub>2</sub> O-NaHCO <sub>3</sub> -Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-3,3	gelo + NaHCO <sub>3</sub> + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-NaHCO <sub>3</sub>	-2,3	gelo + NaHCO <sub>3</sub>
H <sub>2</sub> O-Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-2,1	gelo + Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> .10H <sub>2</sub> O
H <sub>2</sub> O-Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-1,2	gelo + Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .10H <sub>2</sub> O

\* dados incertos para KCl.nH<sub>2</sub>O hidratado, portanto, não inclusos

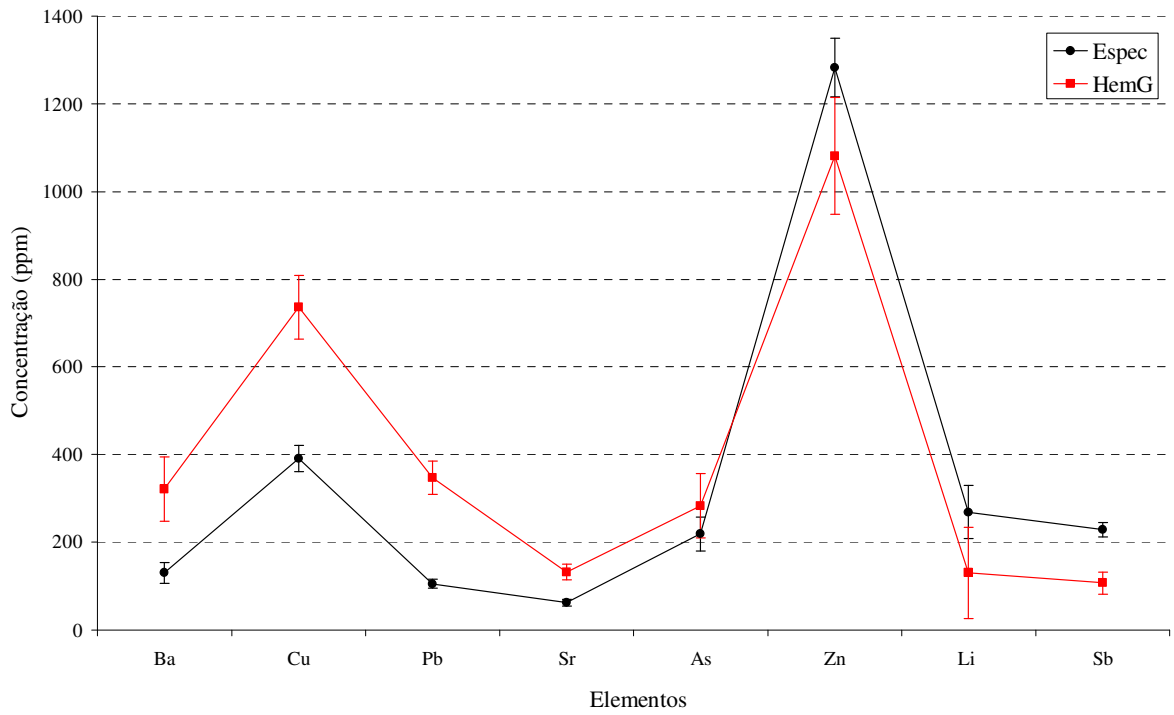
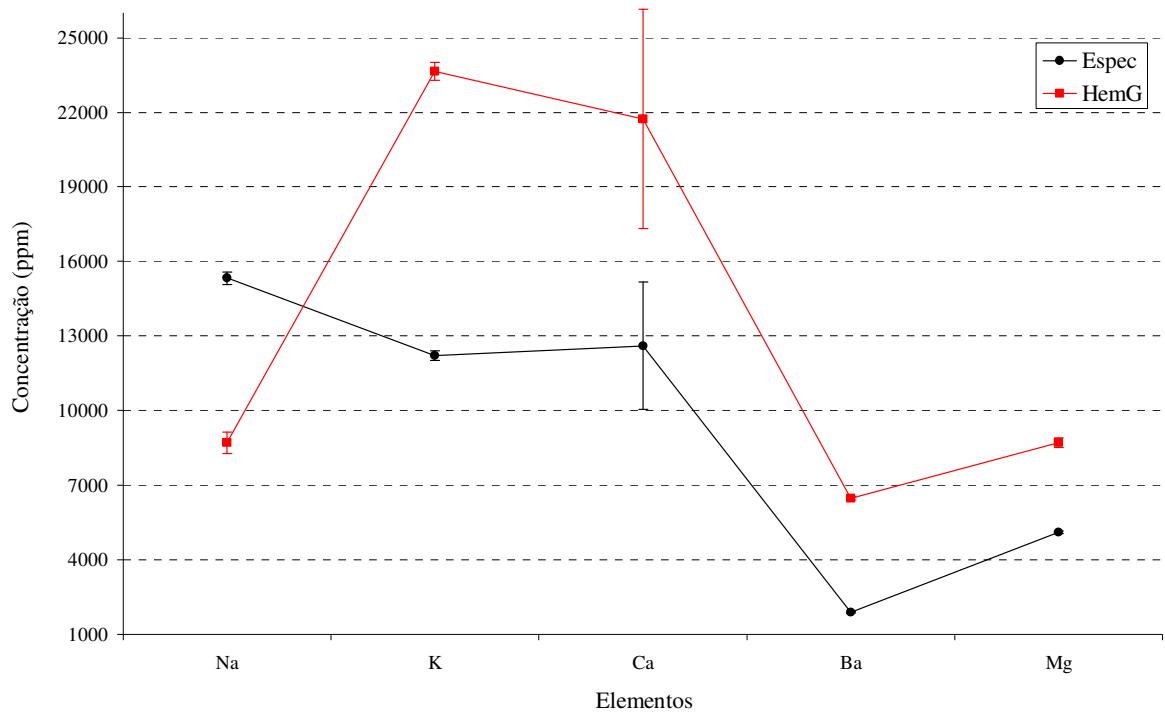
## DISCUSSÃO DOS DADOS DE LA-ICP-MS

As inclusões fluidas da Hematita I apresentaram maior salinidade que as da especularita. Isto vem acompanhado do aumento abrupto do teor de alguns cátions analisados (TAB. 8 e FIG. 66). Ao se comparar os dados da hematita I com os da especularita constatou-se um aumento de 48% no teor de K, 42% de Ca, 59% de Ba, 71% Mg, 41% Mn, 47% de Cu, 70% Pb, 53% Sr e 22% As (FIG. 66). Por outro lado, os demais elementos analisados (Li e Sb) tiveram um decréscimo médio de 45% em relação à especularita.

**TABELA 8** - Concentrações médias dos elementos presentes no fluido da Hematita I e III (especularita) segundo análise por LA-ICP-MS e suas respectivas salinidades estimadas a partir da microtermometria.

Elementos	Concentração nos fluidos* (ppm)	
	Hematita I	Hematita III
K	24.000	12.200
Ca	21.800	12.600
Na	8.700	15.300
Mg	6.700	1.900
Mn	6.500	5.100
Zn	1.100	1.300
Cu	750	390
Pb	350	105
Ba	320	130
As	285	220
Sr	135	65
Li	130	270
Sb	107	230
Salinidade <sup>1</sup> (%p/p equiv. NaCl)	16 a 18	10 a 12

\* valores médios; <sup>1</sup> faixa predominante



**FIGURA 66** - Diferença entre os fluidos na Hematita I (HemG) e a especularita (Espec) em relação aos elementos traços analisados por LA-ICP-MS, da Serra do Sapo, CMD.

As análises por LA-ICP-MS permitiram caracterizar os fluidos da Hematita I e Hematita III em termos de elementos traço (TAB. 8) sendo determinados dois padrões diferentes:

- Hematita I: K>Ca>Na>Mg>Mn>Zn>Cu>Pb>Ba>As>Sr>Li>Sb
- Especularita: Na>Ca>K>Mn>Mg>Zn>Cu>Li>Sb>As>Ba>Pb>Sr

Para a Hematita I esses resultados estão coerentes com o sistema salino H<sub>2</sub>O-NaCl-FeCl<sub>2</sub>, estimado a partir da T<sub>e</sub> (FIG. 65A, TAB. 7); o cátion Fe<sup>2+</sup> foi detectado mas não quantificado. Salienta-se que os altos teores de K, Ca e Ba observados na Hem I coincidiram com o valor de maior salinidade da especularita.

O Li presente no fluido da especularita aparece em proporções bem maiores (até 100%) que o da Hematita I (TAB. 8). O Li não foi encontrado em especularitas de Timbopeba (PEREIRA et. a, 2006) embora apareça com teores muito baixos para veios Au-Fe tipo jacutinga em outros depósitos do QF, como Fábrica (< 2 ppb), Córrego do Feijão (48ppb) e Itabira (10ppb) (LÜDERS et al, 2005).

O teor de Mg no fluido da hematita granular (Hem I) é muito maior do que o da Hematita III (3,5 vezes) (TAB. 8). No entanto, se a temperatura eutética da Hem III (especularita) sugere a presença de sistema salino rico em Mg e o LA-ICP-MS revela teores baixos, surge a pergunta: onde foi parar o Mg do fluido? Provavelmente este Mg participou da formação dos minerais clorita e moscovita. A presença desses minerais pode ser consequência de processos de desestabilização e suas formações ocorram em condições favoráveis de temperatura e pressão na presença de (K<sub>2</sub>O<sub>x</sub>, MgO<sub>y</sub>)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O (DERR et al, 1971).

Os estudos petrográficos na Serra do Sapo sugerem que a clorita e a moscovita estejam associadas à especularita. Ambos apresentam teores de Mg na sua composição; o clinocloro com 25% de MgO e a moscovita com 2% de MgO. Assim, as condições de formação da clorita reforçam a sua utilização como geotermômetro nos cristais da Hematita III para estimativa da pressão e da profundidade. Ressalta-se, também, que as análises por microsonda, nas três gerações de hematita, não indicaram a presença de MgO na sua composição química, dentro do limite de detecção do método.

Ainda sobre o Mg, os fluidos das especularitas dos depósitos de Fábrica, Córrego do Feijão e Itabira apresentaram teores muito baixos deste elemento, da ordem de ppb



(LÜDERS et al, 2005). Nos cristais de especularita de Gongo Soco e Itabira o teor de MgO não foi analisado (CABRAL et al, 2006).

A moscovita formada no veio, além de Mg, também apresenta K na sua composição. Provavelmente, isto seja um dos motivos da diminuição do teor de K, no fluido da especularita, em relação ao da Hematita I.

A diminuição do teor de Ca do fluido da hematita I, em relação ao da especularita, pode estar relacionada à presença da calcita associada somente a esse último mineral. A presença de rochas dolomíticas (Formação Gandarela) associadas à BIFs, no Quadrilátero Ferrífero, descritas por Rosière e Rios (2004) e Cabral et al (2006), não foi observada nas amostras estudadas da Serra do Sapo.

## ISÓCORAS DOS FLUIDOS ESTUDADOS

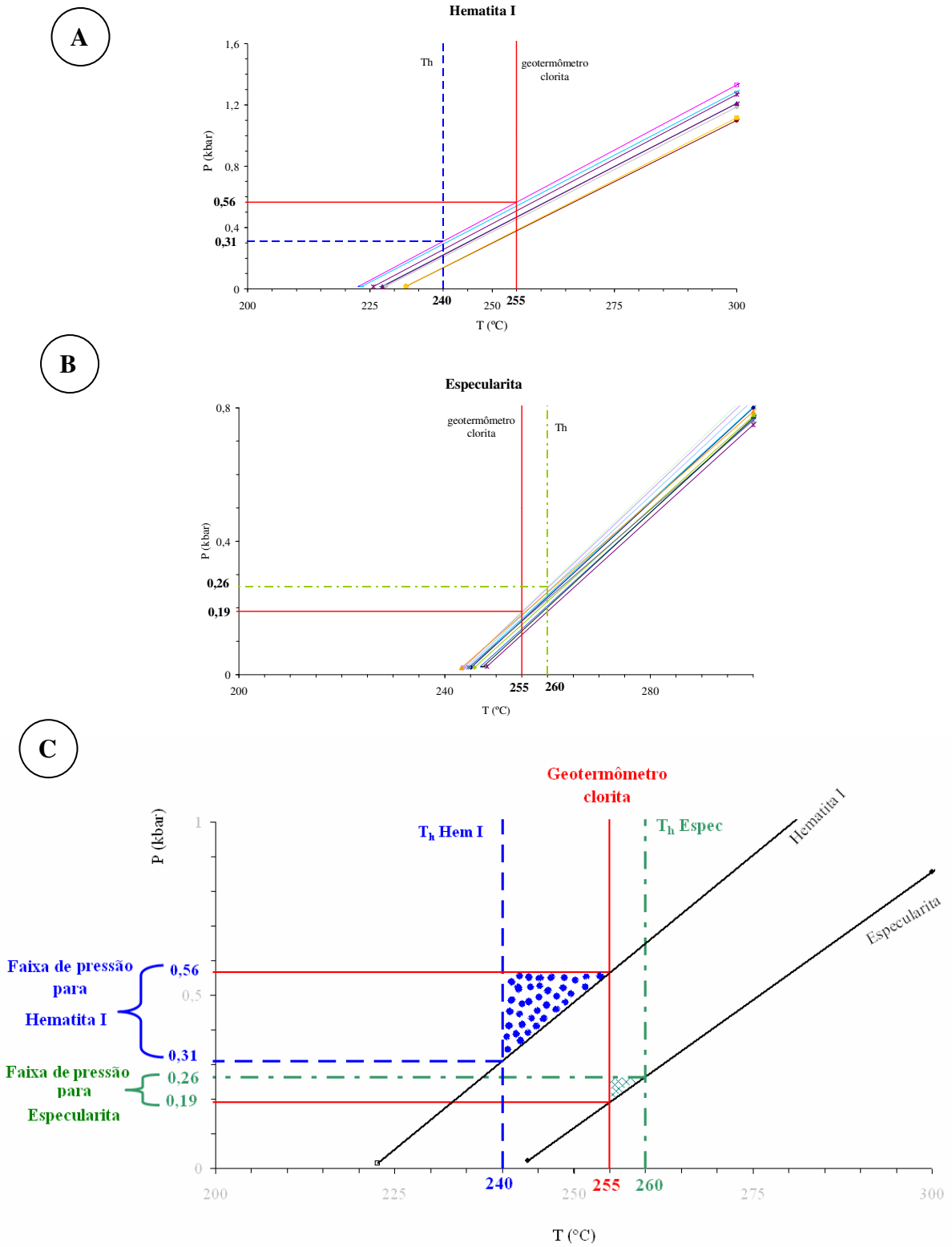
Foram obtidas isócoras das inclusões fluidas mais representativas da Hematita I e da especularita. Observa-se que todas seguem a mesma tendência na inclinação; as isócoras da Hematita I apresentaram inclinações mais acentuadas quando comparadas às da especularita (FIG. 67).

O geotermômetro da clorita foi utilizado como referência, a partir do pressuposto que a clorita e a especularita precipitaram juntas e estão em equilíbrio textural.

A pressão mínima de formação, estimada a partir dos respectivos valores médios da temperatura de homogeneização, sem aplicação do geotermômetro, correspondeu a 0,31kbar para a hematita granular e 0,26kbar para a especularita (FIG. 67).

O uso da temperatura do geotermômetro clorita (255°C) na interseção das isócoras forneceu pressões de 0,56 Kbar para a HemG e 0,26 Kbar para a especularita (FIG. 67).

Observa-se que a temperatura obtida pelo geotermômetro permaneceu entre os valores da  $T_h$  para as diferentes gerações de hematita estudadas. A Hematita I apresenta valores inferiores ao geotermômetro enquanto a Hematita III exhibe valores superiores, conforme era esperado, de acordo com resultados obtidos a partir das análises microtermométricas.



**FIGURA 67** - Gráfico das isócoras associadas ao geotermômetro para estimar a pressão mínima de formação da (A) hematita granular, (B) especularita e (C) comparação de ambas as gerações da Serra do Sapo, CMD.

Ao se comparar as áreas sob os valores da pressão mínima de formação, obtida de acordo com a  $T_h$  e o geotermômetro, nota-se uma maior variação para a Hematita I. Ou seja,

os seus valores apresentam um gradiente de variação maior do que os da especularita que exhibe valores das pressões mais próximos. Além disso, a hematita granular apresenta uma pressão mais elevada, permanecendo a especularita na parte inferior do diagrama (FIG. 67C).

A pressão estimada a partir do geotermômetro indica que a hematita granular formou-se a uma profundidade de aproximadamente 1500m enquanto que a especularita formou-se a 750m.

No geral, todos os valores de pressão obtidos para ambas as gerações foram relativamente baixos, sendo os da especularita inferiores aos da hematita granular. Fato este aceitável, uma vez que o valor da pressão calculada para a especularita possivelmente refere-se à soma vetorial das pressões litostática, tectônica e de confinamento. Assim, baseando-se nos cálculos, uma anula a outra por atuarem em sentidos opostos e o valor da pressão obtida será resultante dessa associação. Isto fortalece a tese da especularita ter sido formada por difusão assistida por fluidos.

Ressalta-se todavia que os valores foram inferidos para a hematita granular, uma vez que a origem da clorita tenha ocorrido junto a especularita, de tal modo não comprometendo a validade do geotermômetro.

O uso de geotermômetros no geral requer cautela, principalmente na interpretação dos dados, lembrando que os valores obtidos correspondem à pressão mínima de formação e uma estimativa da profundidade.

## **METAMORFISMO E PRESERVAÇÃO DE IF**

As granadas podem ser interpretadas como minerais característicos de metamorfismo de grau baixo a intermediário (400-600°C) (WINKLER, 1976). Sabe-se também que a granada pode ser encontrada em alguns granitos, pegmatitos e rochas vulcânicas ácidas (DEER et al, 1975).

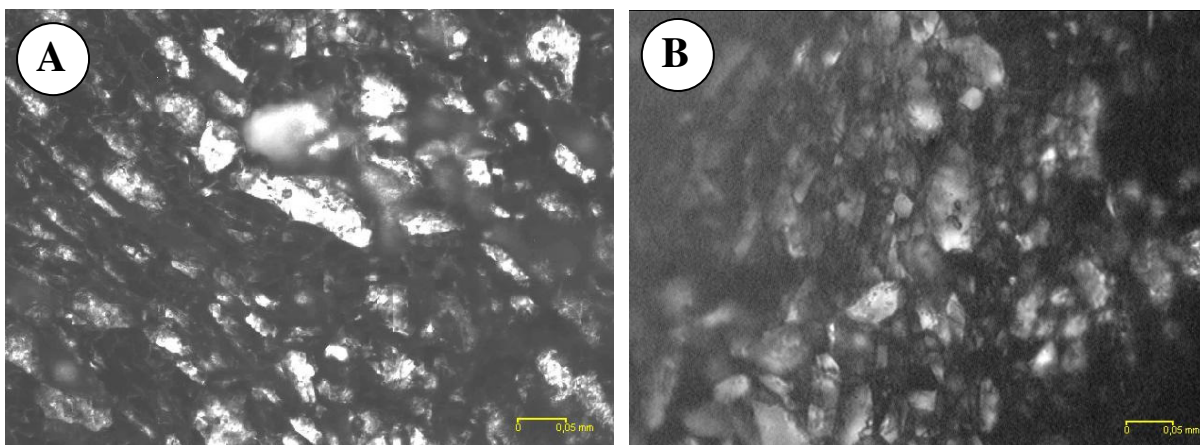
Na Serra do Sapo, CMD, foi observada a presença de granadas associadas aos veios de quartzo. Os estudos composicionais revelaram espessartita ( $Mn_3Al_2[SiO_4]_3$ ), como tipo molecular dominante, seguido pela grossulária ( $Ca_3Al_2[SiO_4]_3$ ) (FIG. 38). Na literatura há relatos da espessartita ser encontrada em maiores proporções nos pegmatitos, granitos e

rochas com auréolas de contato, acompanhada pela almandina ( $\text{Fe}_3\text{Al}_2[\text{SiO}_4]_3$ ) (DEER et al, 1975).

Marshall et al (2001) estudaram o problema de preservação de IF em condições de metamorfismo e afirmaram que não há respostas claras para o problema da estabilidade de IF durante o metamorfismo.

Mesmo com a ausência de um indicador de metamorfismo, foram desenvolvidos testes com cristais de Hematita I (granular) para avaliar a estabilidade das IF. Os cristais foram submetidos a aquecimentos prolongados até um limite de 500°C (em uma taxa de 15°C/min e 10 minutos a 500°C). Nos experimentos foram observados que as IF da hematita granular não crepitarão com a elevação da temperatura (FIG. 68).

Os resultados sugerem que as inclusões da Hematita I da Serra do Sapo são estáveis quando submetidas a temperaturas de até 500°C. Essas evidências sugerem que a geração de hematita granular não sofreu grandes alterações, tais como perda de fluidos quando submetidas às condições de metamorfismo.



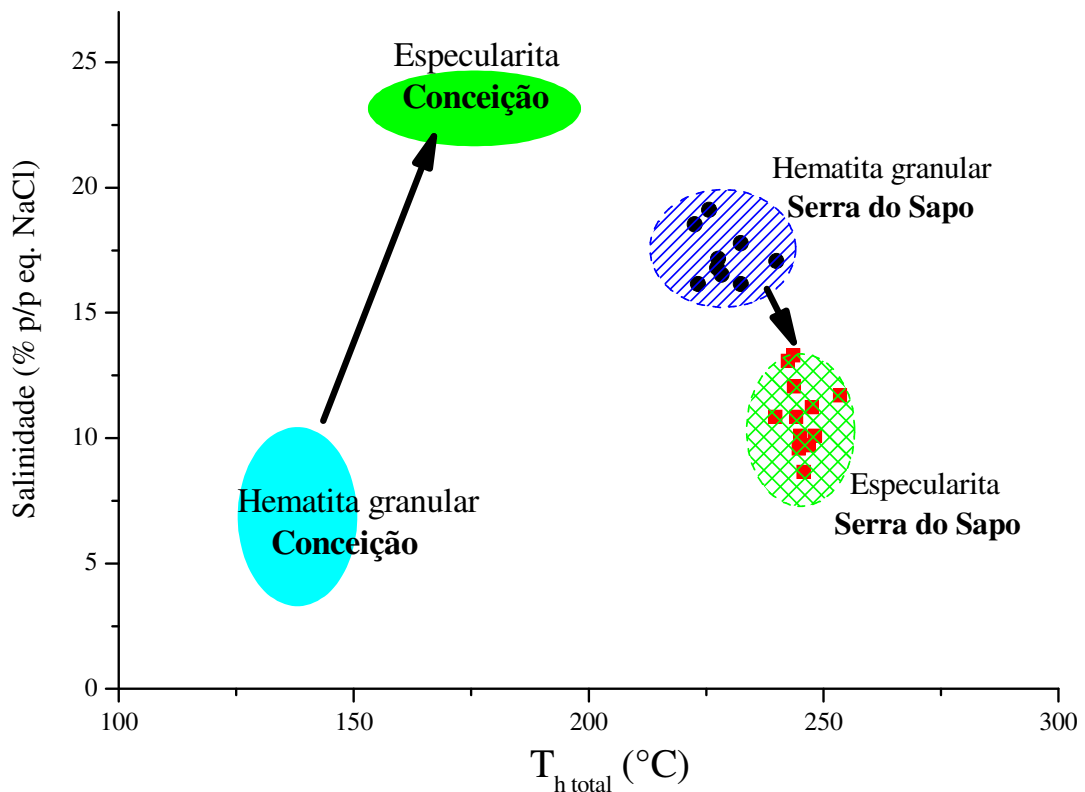
**FIGURA 68** - Fotomicrografias dos cristais de Hematita I (A) antes de ser submetida ao aquecimento e (B) após o experimento, usando a platina de infravermelho FTIR600 Linkam, sob a luz IV. Amostra FSP01-PROF.213,05m - Serra do Sapo, CMD.

## COMPARAÇÃO COM OS FLUIDOS DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

Na Serra do Sapo, os fluidos presentes nas IF das Hematitas I apresentam maior salinidade (média de 17%p/p equivalente NaCl) e temperatura ( $T_h = 230^\circ\text{C}$ ) quando

comparados aos fluidos das IF do minério de ferro da Mina Conceição (ROSIÈRE, RIOS, 2004), sendo que nenhum deles apresentou fases carbônicas (FIG. 69).

Ao se comparar os fluidos da especularita (Hematita III) observa-se que também apresentam grandes diferenças composicionais, tendo os fluidos da Serra do Sapo uma menor salinidade (10-12% p/p equiv. NaCl) e maior  $T_h$  (240-260°C) que os fluidos da Mina Conceição (FIG. 69).



**FIGURA 69** - Gráfico de salinidade versus temperatura de homogeneização total para comparação dos fluidos entre a Serra do Sapo e a Mina de Conceição (ROSIÈRE, RIOS, 2004) - borda leste do QF.

Ocorre inversão na sequência do processo de evolução dos fluidos da hematita granular para a especularita na Serra do Sapo em relação à Mina Conceição (FIG. 69), no qual o fluido passa de baixa salinidade da hematita granular para alta na especularita, com pouco aumento da temperatura. Os limites superiores da temperatura de homogeneização da Hem G sobrepõem com os inferiores da especularita. Por outro lado, na Serra do Sapo observa-se o oposto: a hematita granular passando da alta salinidade para teores menores na especularita, sugerindo a ocorrência de um processo de diluição com pequeno aumento da temperatura.

Cada depósito fica nitidamente restrito à uma área do gráfico, sem sobreposição dos dados de salinidade e  $T_h$ .

A TAB. 9 contém dados sobre a composição dos fluidos da especularita, comparando as formações do minério de ferro da Serra do Sapo - Espinhaço com outros depósitos do Supergrupo Minas.

**TABELA 9** - Comparação dos dados microtermométricos e concentração de alguns cátions obtidos em inclusões fluidas da especularita provenientes de diferentes depósitos de ferro do Quadrilátero Ferrífero.

Localização	Tf (°C)	T <sub>h</sub> (°C)	Salinidade (% p/p equiv. NaCl)	Concentração* (ppm)		
				Li	K	Mg
Serra do Sapo <sup>1</sup> (1)	-8 a -6	240 a 260	10 a 12	270	12.200	1.900
Conceição (2)	-24,5 a -17	140 a 205	30	NA	NA	NA
Itabira <sup>2</sup> (3)	-11,3 a -10	275 a 362,3	15	0,01	0,594	0,033
Fábrica <sup>2</sup> (3)	-9,8 a -7,5	217,9 a 228,9	11,1 a 13,7	0,002	0,157	0,011
Córrego Feijão <sup>2</sup> (3)	-7,3 a -4,5	189,3 a 203,8	7 a 11	0,048	1,538	0,108
Gongo Soco <sup>2</sup> (3)	-8,0 a -6,2	148,1 a 167,4	10 a 12	NA	NA	NA
Timbopeba <sup>1</sup> (4)	-17 a -15	160 a 180	19	NA	NA	150.000

Tf = temperatura de fusão do gelo; T<sub>h</sub> = temperatura homogeneização; \*valor médio das IF analisadas; NA = não analisado. <sup>1</sup>analisado por LA-ICP-MS, os dados foram normalizados de acordo com a salinidade equivalente em NaCl. <sup>2</sup>analisado por *Crush-leach*. (1) o presente trabalho; (2) ROSIÈRE; RIOS, 2004; (3) LÜDERS et al, 2005; (4) PEREIRA et al, 2006.

A composição nas IF dos cristais de especularita (Hem III), associados aos veios da Serra do Sapo, também é diferente daquele estudado nas especularitas relacionadas aos veios Au-Fe, tipo jacutinga, dos depósitos Itabira e Timbopeba (TAB. 9).

Os valores de salinidade do minério especularítico na Serra do Sapo são mais baixos do que os depósitos de Conceição (ROSIÈRE, RIOS, 2004) e Timbopeba (PEREIRA et al, 2006) porém semelhantes aos determinados pelo Lüders et al, (2005) nos depósitos Córrego Feijão e Gongo Soco para veios Au-Fe, tipo jacutinga.

Existe uma tendência do aumento gradativo das temperaturas dentro da faixa de 140 a 362°C, começando por Conceição, seguido por Gongo Soco, Timbopeba, Córrego do Feijão, Fábrica, Serra do Sapo e finalmente Itabira.

## **IMPLICAÇÕES GENÉTICAS**

As análises de relações texturais, aliadas aos estudos de IF preservadas nos cristais de Hematita I e III na Serra do Sapo sugerem um modelo genético para o desenvolvimento dos dois tipos de minérios: um deles corresponde ao do tipo maciço (possivelmente concordante?) e outro tabular, claramente discordante, possivelmente formado por difusão assistida por fluidos.

Um primeiro episódio de mineralização originou cristais de Hematita I, a partir de fluidos de média/ elevada temperatura e elevada salinidade, no qual poderiam ter participado águas subterrâneas profundas responsáveis pela elevada salinidade desses fluidos (a exemplo do observado no escudo canadense por FRATE, FRITZ, 1987 e GUHA, KANWAR, 1987). Outra opção estaria relacionada a um evento hidrotermal onde não haveria participação magmática - granítica, em função da pouca profundidade (máximo de 1500m).

Esses fluidos, fortemente oxidantes, auxiliaram na total transformação da magnetita em hematita, às custas de um proto-minério magnético conforme indicado pela presença da maghemita.

Os cristais de especularita (Hem III) foram gerados posteriormente à Hematita I, através da penetração de fluidos de média salinidade, com uma temperatura da ordem de 250°C, em uma associação especularita - quartzo.

A presença de Li nos fluidos mineralizadores, principalmente na especularita, pode ser um indicativo de fonte magmática pegmatítica. O Li é um elemento associado aos fluidos dos corpos pegmatíticos localizados nas proximidades da Serra do Sapo, em Santa Maria de Itabira, MG (cidade aproximadamente à 90km da Serra do Sapo) (MARCIANO, et al, 1994).

Na última década ficou comprovado por datações (RIBEIRO-ALTHOFF, et al, 1997) que boa parte dos pegmatitos da Província Pegmatítica Oriental foram originados durante o evento Brasileiro. Este trabalho na Serra do Sapo propõe que a formação das especularitas

estaria genética e temporalmente associada ao evento Brasileiro, portanto relacionada à formação dos pegmatitos.

O aumento verificado nos teores de Sb (na especularita) também pode estar geneticamente relacionado aos pegmatitos Brasileiro, já que esse elemento encontra-se associado à estrutura dos nióbio-tantalatos, minerais bastante frequentes nesses corpos magmáticos (MEMETOVA, et al, 2005).

Embora fases carbônicas não tenham sido encontradas nos fluidos mineralizadores primários, sua presença foi indicada pelo teste de esmagamento. Estes compostos moleculares poderiam estar associados a eventos tardios, em fluidos aprisionados em fraturas ou inclusões intergranulares. Provavelmente exista alguma relação genética dessas fases carbônicas com os fluidos carbônicos encontrados em hematitas de jacutinga (LÜDERS, et al, 2005) ou quartzo tardio de veios especularita-quartzo em Conceição (ROSIÈRE, RIOS, 2004), ou até nos fluidos carbônicos primários associados aos pegmatitos da região de Santa Maria de Itabira (MARCIANO, et al, 1994).



## CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO

---

- Nos fluidos mineralizadores associados ao minério de ferro da Serra do Sapo, Conceição do Mato Dentro – MG, Supergrupo Espinhaço foram diferenciadas três gerações de hematita.
- Hematita I, mais antiga, com textura granoblástica, parcial ou totalmente recristalizada, não associada ao quartzo, que sob radiação infravermelha mostrou um bom grau de transparência.
- Hematita II, com textura micro lamelar, precipitada nos interstícios da massa dos cristais de quartzo e que mesmo quando submetida à luz infravermelha não se torna transparente.
- Hematita III, mais nova, corresponde à specularita, estando associada aos veios de quartzo. A diminuição da pressão de desconfinamento do fluido do veio, nas fraturas, possibilitou a precipitação dessa hematita, fortalecendo a tese de sua geração condicionada ao fluido do veio.
- Os veios de quartzo/especularita estão associados a outros minerais, como a clorita, moscovita, calcita e granada, que não aparecem nos corpos do minério.
- As granadas apresentam provável origem hidrotermal e não metamórfica, corroborado pela diminuição de Mn no fluido, tendo em vista sua presença restrita aos veios de quartzo.
- As análises magnetométricas e de espectroscopia Mössbauer comprovam a presença de maghemita, em íntima associação com a Hematita I. Nenhuma magnetita foi encontrada. Esses dados sugerem a origem da Hematita I a partir de processos secundários de oxidação.
- A platina FTIR600 – Linkam, específica para a região do infravermelho próximo, foi implantada no Laboratório de Inclusões Fluidas e Metalogênese - LIFM/CDTN durante o desenvolvimento desta dissertação.
- A microtermometria nas inclusões fluidas (IF) indica que o fluido original da Hematita I (granular) pertence ao sistema aquo-salino  $H_2O-NaCl-FeCl_2$  com temperaturas mínimas de 220-240°C e salinidade média de 17% p/p equiv. NaCl.

- A Hematita III (especularita) foi formada por soluções do sistema aquo-salino  $H_2O-NaCl-KCl$  (provavelmente com  $MgCl_2$ ) dentro de um intervalo com temperaturas de 240-260°C e salinidades de 10-12% p/p equiv. NaCl.
- Fases carbônicas não foram constatadas nos fluidos dos veios de quartzo através da espectroscopia Raman.
- Na intersecção dos dados do geotermômetro clorita (255°C) com as isócoras dos fluidos destacam-se pressões de 0,56 Kbar e 0,26 Kbar para a formação da hematita granular e specularita, respectivamente.
- O minério de ferro origina-se possivelmente entre 750m de profundidade (especularitas) e 1500m (hematitas granulares).
- Elementos traços, obtidos através de LA-ICP-MS das IF, mostram maior concentração de K, Ca, Ba, Mg, Mn, Cu, Pb, Sr e As nas soluções da Hematita I, quando comparadas com os da specularita. Na Hematita III (especularita) ocorrem maiores teores de Li e Sb.
- A presença de Li e Sb nos fluidos da specularita da Serra do Sapo pode ser indicativa de fonte magmática pegmatítica.
- Este trabalho na Serra do Sapo propõe que a formação das specularitas estaria genética e temporalmente associada ao evento Brasiliano, portanto relacionada à formação dos pegmatitos.
- As IF da Hematita I da Serra do Sapo são estáveis quando submetidas a temperaturas de até 500°C, sugerindo que a Hematita I (granular) não sofreu grandes alterações tais como perda de fluidos sob condições de metamorfismo.
- A composição das IF da specularita (Hematita III) da Serra do Sapo é diferente daquelas relacionadas aos veios Au-Fe, tipo jacutinga, nos depósitos Itabira e Timbopeba.
- Os fluidos formadores do minério de ferro da Serra do Sapo, CMD, são diferentes daqueles observados nos demais depósitos do Quadrilátero Ferrífero aqui comparados, destacando a inversão dos possíveis processos de evolução em relação à Mina de Conceição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

---

ALKMIM, F. F. O que faz de um cráton um cráton? O cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: MATESSO NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D.R.; BRITO-NEVES, B.B (Eds.) **Geologia do Continente Sul-Americano**. 2004. cap. I, p.1-35.

ALLAN, M. M.; YARDLEY, B. W. D.; FORBES, L. J.; SHMULOVICH, K. I.; BANKS D.A.; SHEPHERD, T. J. Validation of LA-ICP-MS fluid inclusion analysis with synthetic fluid inclusions. **American Mineralogist**, Washington, v. 90, p. 1767-1775, 2005.

ALMEIDA ABREU, P. A. O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional (Minas Gerais): o rifte, a bacia e o orógeno. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 3, n. 1, p. 1-18, 1995.

ALMEIDA ABREU, P. A.; RENGER, F. E. Serra do Espinhaço Meridional: um orógeno de colisão do mesoproterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 1-14, 2002.

ALMEIDA ABREU, P.A.; KNAUER, L.G., HARTMANN, M.B.; SANTOS G.G.V. DOS; GUIMARÃES M.L.V.; ABREU F.R. DE; SCHRANK A.; PFLUG R. Estratigrafia, faciologia e tectônica do Supergrupo Espinhaço na região de Serro - Conceição do Mato Dentro, Minas Gerais, Brasil. **Zbl. Geol. Paläont.**, Stuttgart, v. 5/ 6, p. 857–873, 1989.

ALVES, J. V. **Estudo das inclusões fluidas em veios de quartzo da mina de ouro de São Bento, Santa Bárbara, MG**. 1995. 99p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade Federal de Minas Gerais, 1995.

BAILLY, L.; BOUCHOT, V.; BÉNY, C.; MILÉSI, J. P. Fluid inclusion study of stibinite using infrared microscopy: an example from the Brouzils Antimony Deposit (Vendee, Armorican Massif, France). **Economic Geology**, Lancaster, v. 95, p. 221-226, 2000.

BARROS, H. L. C. **Química Inorgânica: uma introdução**. Belo Horizonte, 2001.

BARTHELMY, D. **Mineralogy Database** ©2000-2008. Disponível em: [www.webmineral.com/](http://www.webmineral.com/). Acesso em: 07 mar. 2009.

BELLO, R.M. DA S.; GANDINI, A.L.; MARCIANO, V.R.P.R.O.; FUZIKAWA, K.; CARVALHO, F.M.S.; SVISERO, D.P.; SOUZA, L.A.C.; DANTAS, M.S.S. Caracterização mineralógica e composição química das inclusões fluidas de berilo do pegmatito Ipê, Município de Governador Valadares, Minas Gerais. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, 45-54, 1998.

BIONDI, J. C.. Distribuição no tempo geológico dos principais depósitos minerais brasileiros: 2. Épocas metalogenéticas. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.29, n.4, p.517-526, 1999.

BIONDI, J. C.; FRANKE, N. D.; DE CARVALHO P. R. S.; VILLANOVA, S. N. Processo Mineralizador e Modelo Genético da Mina de ouro Schramm (SC-Brasil). **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 32, n. 4, p. 461-470, 2002.

BLOSS, F. D. **Optical Crystallography**. Washington: The Mineralogical Society of America, 1999.

BLOSS, F. D. **Crystallography and Crystal Chemistry: an introduction**. Washington: The Mineralogical Society of America, 2000.

BODNAR, R. J.; VITYK, M.O. Interpretation of microthermometric data for H<sub>2</sub>O-NaCl fluid inclusions. In: De Vivo, B.; Frezzotti, M. (Eds.) **Fluid inclusions in minerals: methods and applications**. Blacksburg: Virginia Tech., 1994. p. 117-130.

BROWN, P. E.; HAGEMANN, S. G. MacFlinCor: a computer program for fluid inclusion data reduction and manipulation. In: DE VIVO, B.; FREZZOTTI, M. L. (Eds.) **Fluid Inclusions in Minerals: methods and applications**. Blacksburg: Virginia Tech., 1994. p. 231-250.

CABRAL, A. R.; LEHMANN, B.; GALBIATTI, H. F.; ROCHA FILHO, O.G. Evidence for metre-scale variations in hematite composition within the Palaeoproterozoic Itabira Iron Formation, Minas Gerais, Brazil. **Mineralogical Magazine**, v. 70(5), p. 591-602, 2006.

CAMPBELL, A. R. et al. Infrared fluid inclusion microthermometry on coexisting wolframite and quartz. **Economic Geology**, Lancaster, v. 82, p. 1640-1645, 1987.

CAMPBELL, A. R.; HACKBARTH, C. J.; PLUMLEE, G. S.; PETERSEN, U. Internal Features of Ore Minerals Seen with the Infrared Microscope. **Economic Geology**, Lancaster, v. 79, p. 1387-1392, 1984.

CARITAT, P.; HUTCHEON, I.; WALSHE, J. L. Chlorite Geothermometry: a review. **Clays and Clay Minerals**, v. 41, n. 2, p. 219-239, 1993.

CATHELINEAU, M.; NIEVA D. A. chlorite solid solution geothermometer the Los Azufres (Mexico) geothermal system. **Contributions to Mineralogy and Petrology**, v. 91, p. 235-244, 1985.

CATHELINEAU, M. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. **Clays and Clay Minerals**, v. 23, p. 471-485, 1988.

CHANDLER, J. A. **X-Ray Microanalysis in the Electron Microscope (Practical Methods in Electron Microscopy)**. Amsterdam: North-Holland Publishing, 1977.

CLOUT, J. M. F.; SIMONSON, B. M. Precambrian Iron Formations and Iron Formation-Hosted Iron Ore Deposits. **Economic Geology**, Lancaster, v. 100<sup>th</sup> Anniversary, p. 643-679, 2005.

COEY, J. M. D.; CUGAT, O.; McCAULEY, J.; FABRIS, J. D. A portable soil magnetometer. **Revista de Física Aplicada e Instrumentação**, São Paulo, v.7, p. 25-30, 1992.

CORDEIRO, J. **Geologia da Folha Serro, Minas Gerais**. Belo Horizonte: COMIG/UFMG, Relatório inédito, 2008.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Rock Forming Minerals**. London: Longman Longman Group Limited, 1971.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **An introduction to the rock-forming minerals**. London: Longman Group Limited, 1974.

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Rock Forming Minerals**. London: Longman Group Limited, 1975.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. Disponível em: < <http://www.dnpm.gov.br> > Acesso em: 09/02/2009.

DUSSIN, I. A.; DUSSIN, T. M. Supergrupo Espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.3, n.1, p.19-26,1995.

DYAR M. D.; GÜNTER M. E.;TASA D. **Mineralogy and Optical Mineralogy**. Chantilly: The Mineralogical Society of America, 2000.

FABRE, C.; BOIRON, M. C.; DUBESSY, J.; MOISSETTE, A. Determination of ions in individual fluid inclusions by laser ablation optical emission spectroscopy: development and applications to natural fluid inclusions. **Journal of Analytical Atomic Spectrometry**, v. 14, p. 913–922, 1999.

FABRIS, J. D.; COEY, J. M. D. Espectroscopia Mössbauer do  $^{57}\text{Fe}$  e Medidas Magnéticas na Análise de Geomateriais. In: ALVARES, V.; V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F. de; MELLO, J.W.V de; COSTA, L.M. da (Eds.) **Tópicos em Ciências do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2, p. 47-102.

FIGUEIREDO, B. R. **Minérios e ambientes**. Campinas, SP: Ed. Unicamp, 2000.

FUJIKAWA, K. Inclusões fluidas: métodos usuais de estudo e aplicações. **Contribuições à Geologia e à Petrologia**, Núcleo de Minas Gerais – SBGM, p.29-44, 1985.

GAINES, R. V.; H., SKINNER, C. W.; FOORD, E. E.; MASON, B.; ROSENZWEIG, A. **Dana's New Mineralogy: The System of Mineralogy of James Dwight Dana and Edward Salisbury Dana**, 8<sup>th</sup> ed., John Wiley & Sons, Inc. p. 217, 1997.

HEINRICH, C. A.; PETTKE, T.; HALTER, W. E.; AIGNER-TORRES, M.; AUDÉTAT, A.; GÜNTHER, D.; HATTENDORF, B.; BLEINER, D.; GUILLONG, M.; HORN I. Quantitative multi-element analysis of minerals, fluid and melt inclusions by laser-ablation inductively-coupled-plasma mass-spectrometry. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 67, n. 18, p. 3473–3496, 2003.

HUTCHEON, I. Clay-carbonate reactions in the Venture área, Scotia Shelf, Nova Scotia, Canada: in Fluid Mineral Interactions: A Tribute to H. P. Eugster, R.J. Spencer and I-M Chou, eds, **The Geochemical Society Special Publication** v.2, p. 199-212, 1990.

JOWETT, E. C. Fitting iron and magnesium into the hydrothermal chlorite geothermometer. In: GAC/MAC/SEG JOINT ANNUAL MEETING, 1991, Toronto. **Program with Abstracts...** Toronto: 1991. 16, A62, p. 27-29.

KLEIN, C; HURLBUT Jr., C. S. **Manual of Mineralogy**. John Wiley & Sons, 21<sup>st</sup> ed, 1993.

KNAUER, L. G. **Evolução geológica do Pré-Cambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada**. 1990. 298 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1990.

KNAUER, L. G. O Supergrupo Espinhaço Em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. **Geonomos**, Belo Horizonte, v.15, n. 1, p. 81-90, 2007.

KNAUER, L. G.; SCHRANK, A. A origem dos filitos hematíticos da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 1, n. 1, p. 33-38,1993.

KRANIDIOTIS, P.; MACLEAN, W.H. Systematics of chlorite alteration at the Phelps Dodge massive sulfide deposit, Matagami, Quebec: **Economic Geology**. v. 82, p. 1898-1911, 1987.

LAGOEIRO, L. E. Transformation of magnetite to hematite and its influence on the dissolution of iron oxide minerals. **Journal of Metamorphic Geology**, v. 16, p. 415-423, 1998.

LIMA, T. A. F.; RIOS, F. J.; OLIVEIRA, E. K. Repositório de Rejeito de Alto Nível (RANR) no Brasil: o emprego da Platina Leitz HS 1350 no auxílio para escolha de sítio. In: INTERNATIONAL NUCLEAR ATLANTIC CONFERENCE – INAC, 2007, Santos. **Proceedings...**Santos: INAC, 2007.

LINDENMAYER, Z. G.; LAUX, J. H.; TEIXEIRA, J. B. G. Considerações sobre a origem das formações ferríferas da formação Carajás, Serra dos Carajás. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 31, n. 1, p. 21-28, 2001.

LÜDERS, V.; ZIEMANN, M. Possibilities and limits of infrared light microthermometry applied to study of pyrite-hosted fluid inclusions. **Chemical Geology**, v. 154, p. 169-178, 1999.

LÜDERS, V.; ROMER, R. L.; CABRAL, A. R.; SCHMIDT, C.; BANKS, D. A.; SCHNEIDER, J. Genesis of itabirite-hosted Au-Pd-Pt-bearing hematite-(quartz) veins, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: constraints from fluid inclusion infrared microthermometry, bulk crush-leach analysis and U-Pb systematics. **Mineralium Deposita**, Berlin, v. 40, p. 289-306, 2005.

MACHADO, F. B.; MOREIRA, C. A.; ZANARDO, A; ANDRE, A. C.;GODOY, A. M.; FERREIRA, J. A.; GALEMBECK, T.; NARDY, A. J. R.; ARTUR, A. C.; OLIVEIRA, M. A. F. de. **Enciclopédia Multimídia de Minerais**. ©2003-2008. Disponível em <http://www.rc.unesp.br/museudpm>. Acesso em: 07/03/2009.

MARSHAK, S.; ALKMIM, F. F.. Proterozoic contraction/extension tectonics of the Southern São Francisco Regions, Minas Gerais, Brazil. **Tectonics**, v. 8, n. 3, p. 555-571,1989.

MARSHALL, B.; GILES, A. D.; HAGEMANN, S. G. Fluid inclusion in metamorphosed and synmetamorphic (including metamorphogenic) base and precious metal deposits: Indicators of ore-forming conditions and/or ore-modifying histories? **Reviews in Economic Geology**, v. 11, p. 119–148, 2000.

McMILLAN, P. F.; HOFMEISTER, A. M. Infrared and Raman Spectroscopy. In: Frank C. Hawthorne (Ed) **Reviews in Mineralogy. Spectroscopic Methods in Mineralogy and Geology**. Washington: The Mineralogical Society of America, 1988. v. 18, p. 99-159.

NEVES, J. M. C.; FUZIKAWA, K.; RIOS, F. J.; CHAVES, A. O.; ALVES, J. V. **Excursão Geológica cortando a parte Oeste do Sinclinal Moeda - Quadrilátero Ferrífero**. Roteiro de excursão. Belo Horizonte: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, 2006.

PEREIRA, A. R. P.; RIOS, F. J.; ROSIÈRE, C. A.; CHAVES, A. O.; TUBRETT, M. Estudo de Inclusões Fluidas em Especularitas da mina de Timbopeba (Quadrilátero Ferrífero, MG) utilizando Microscopia e Microtermometria de Infravermelho e LA-ICP-MS. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43, 2006, Aracaju. **Anais...** São Paulo: SBG, 2006. v.1, p.307.

PFLUG, R. Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais. **DNPM/DGM, Not. Prel. Est.** Rio de Janeiro, v. 142: p. 1-20, 1968.

PIRES, F. R. M.; PASIN, D. A. B.; BITTENCOURT, B. R.; PILOTTO, D. Origin of the Hard Hematite Deposits of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil – Field, Textural and Fluid Inclusion Studies. Fremantle, WA. **Iron Ore Conference**, p. 19-21, 2005.

PRATES, S. P. **Significado Metalogenético da Mineralogia da Jazida da Cachoeira (Província Uranífera de Lagoa Real)**. 2008. 128p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais) – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2008.

RALPH, J.; RALPH, I. **Mindat** ©1993-2009. Disponível em <http://www.mindat.org/> Acesso em: 07/03/09.

REED, S.J.B. **Electron microprobe analysis**. 2<sup>nd</sup> ed. Cambridge: Cambridge University, 1993.

RIBEIRO-KWITKO, R.; DE OLIVEIRA, C. G. O Depósito Aurífero de Antônio Pereira, Quadrilátero Ferrífero: condições P-T e natureza dos fluidos mineralizadores **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 117-126, 2004.

RICHARDS, J. P.; KERRICH, R. Observations of zoning and fluid inclusions in pyrite using a transmitted infrared light microscope. **Economic Geology**, Lancaster, v. 88, p. 716-723, 1993.

RIDLEY, W. I.; LICHTER, F.E M. Trace and ultratrace element analysis by laser ablation ICP-MS Applications of microanalytical techniques to understanding mineralizing processes. In: McKibben, Michael A; Shanks, Wayne C , III; Ridley, W. Ian, (eds.) **Reviews in Economic Geology**, vol.7, p.199-215. 1998.

RIOS, F. J.; FUZIKAWA, K.; ALVES, J. V.; NEVES, J. M. C. Aplicação da luz infravermelha (IV) no estudo petrográfico e de inclusões fluidas em minerais opacos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 783-784, 2000.

RIOS, F. J.; FUZIKAWA, K.; ALVES, J. V.; GONÇALVES, R. M.; CHAVES, A. O.; SOUZA, A. M.; CHAVES, A. M. D. V.; PEREIRA, A. R. P.; LIMA, T. A. F.; NEVES, J. M. C.; PÉREZ, C. A.; GUILLOT, M. G.; MATTOS, E. V.; ROSIÈRE, C. A. Estudos por  $\mu$ XRF-Sincrotron de fluidos mineralizadores detectados em minérios uraníferos, ferríferos e depósitos epitermais. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 59, n. 4, p. 373-377, 2006a.

RIOS, F. J.; ALVES, J. V.; PÉREZ, C. A.; COSTA, E. C.; ROSIÈRE, C. A.; FUZIKAWA, K.; NEVES, J. M. C.; CHAVES, A. O.; PRATES, S. P.; BARRIO, R. E. Combined investigations of fluid inclusions in opaque ore minerals by NIR/SWIR microscopy and microthermometry and synchrotron radiation X-ray fluorescence. **Applied Geochemistry**, v. 21, p. 813–819, 2006b.

ROEDDER, E. Fluid Inclusions. Mineralogical Society of America. **Reviews in Mineralogy**, Washington, v. 12, p. 664, 1984.

ROEDDER, E.; BODNAR, R. J. Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits. In: BARNES, H. L. (Ed.) **Fluid Inclusion Studies of Hydrothermal Ore Deposits**. John Wiley and Sons, 1997, p. 1-26. Tradução de Kazuo Fuzikawa.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do Quadrilátero Ferrífero – uma visão geral e discussão. **Geonomos**, Belo Horizonte, v. 8, n. 2, p. 27-43, 2000a.

ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE JR., F. Brazilian Iron Formations and their geological setting. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 2, p. 274-278, 2000b.

ROSIÈRE, C. A.; SIEMES, H.; QUADE, H.; BROKMEIER, H.-G.; JANSEN, E.M. Microstructures, textures and deformation mechanisms in hematite. **Journal of Structural Geology**, v. 23, p. 1429–1440, 2001.

ROSIÈRE, C. A.; RIOS, F. J. The origin of hematite in high-grade iron ores based on infrared microscopy and fluid inclusion studies: the example of the Conceição Mine, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. **Economic Geology**, Lancaster, v. 99, p. 611–624, 2004.

ROSIÈRE, C. A.; RIOS, F. J. Specularitic iron ores and shear zones in the Quadrilátero Ferrífero District. **Applied Earth Science** (Trans. Inst. Min. Metall. B), v. 115, n. 4, p. 1-5, 2006.

ROSIÈRE, C. A.; SPIER, C. A.; RIOS, F. J.; SUCKAU, V. E. The Itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview: In: Hagemann, S.; Rosière, C. A.; Gutzmer, J.; Beukes, N. (Eds.) Banded Iron Formation–Related High-Grade Iron Ore, **Reviews in Economic Geology**, v.15, p. 223-254, 2008.

SCHOLL, W. U.; FOGAÇA, A. C. C. Estatigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. In: I SIMP. GEOL. MINAS GERAIS, **Anais...** Diamantina: 1979, p. 55-73.



SHEPHERD, T. J.; RANKIN, A. H.; ALDERTON, D. H. M. **A Practical Guide to Fluid Inclusion Studies**. Glasgow, London: Blackie and Son Ltd, 1985.

SIEMES, H.; KLINGENBERG, B.; RYBACKI, E.; NAUMANN, M.; SCHÄFER, W.; JANSEN, E.; ROSIÈRE, C. A. Texture, microstructure and strength of hematite ores, experimentally deformed in the temperature range 600° to 1100°C and at strain rates between 10<sup>-4</sup> and 10<sup>-6</sup>s<sup>-1</sup>. **Journal of Structural Geology**, v. 25, p. 1371–1391, 2003.

SILVERSTEIN, R. M.; BASSLER, G. C.; MORRIL, T. C. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. Guanabara Koogan: Rio de Janeiro, 1994. 387p.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de Análise Instrumental**. 5ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

STRUNZ, H.; NICKEL, E. H. **Strunz Mineralogical Tables. Chemical Structural Mineral Classification System**. 9 ed. Stuttgart: Schweizerbart, 2001.

SYLVESTER, P. **Laser Ablation - ICP-MS Principles and Applications**. Short Courses Series. Mineralogical Association of Canada, v. 29, p. 243, 2001.

TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C.; FAIRCHILD, T.; TAIOLI, F. **Decifrando a Terra**. 2ª ed. São Paulo: Editora Oficina de Textos, 2003.

WALSHE, J. L. A six-component chlorite solid solution model and the conditions of chlorite formation in hydrothermal and geothermal systems: **Economic Geology**. v. 81, p. 681-703, 1986.

WINGE, M. *et al.* **Glossário Geológico Ilustrado** ©2001-2008. Disponível em <http://www.unb.br/ig/glossario/> Acesso em: 07/03/09.

WINKLER, H.G.F. **Petrogenesis of Metamorphic Rocks**. 4<sup>th</sup> ed. Nova York: Springer-Verlag, 1976.

**ANEXO**

---

---

**ANEXO A – Análises da Microsonda Eletrônica dos Minerais**

**Tabela 1.** Dados da microsonda eletrônica em três diferentes gerações de hematita.

<b>Amostra</b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>Au</b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MgO</b>	<b>V<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Total</b>
Hem I - 1	0,027	0,038	0,011	0,037	0,013	100,274	0,000	0,010	0,000	100,41
Hem I - 2	0,068	0,034	0,000	0,039	0,058	99,268	0,017	0,021	0,000	99,51
Hem I - 3	0,058	0,071	0,021	0,048	0,067	99,721	0,000	0,000	0,006	99,99
Hem I - 4	0,045	0,021	0,012	0,022	0,013	100,101	0,005	0,047	0,000	100,27
Hem I - 5	0,055	0,058	0,011	0,011	0,093	99,143	0,002	0,000	0,000	99,37
Hem II - 1	0,052	0,060	0,005	0,000	0,067	99,149	0,027	0,016	0,015	99,39
Hem II - 2	0,041	0,046	0,009	0,003	0,093	99,630	0,030	0,018	0,000	99,87
Hem II - 3	0,081	0,040	0,018	0,060	0,000	99,919	0,000	0,000	0,002	100,12
Hem II - 4	0,033	0,027	0,000	0,002	0,040	100,484	0,008	0,049	0,004	100,65
Hem II - 5	0,069	0,000	0,027	0,024	0,000	100,500	0,000	0,000	0,009	100,63
Hem II - 6	0,054	0,070	0,067	0,000	0,062	100,371	0,000	0,047	0,000	100,67
Hem III - 1	0,087	0,011	0,080	0,000	0,000	99,511	0,000	0,023	0,025	99,74
Hem III - 2	0,046	0,029	0,021	0,000	0,080	99,816	0,007	0,000	0,000	100,00
Hem III - 3	0,073	0,033	0,000	0,046	0,124	99,291	0,000	0,000	0,000	99,57
Hem III - 4	0,061	0,014	0,000	0,002	0,084	100,112	0,000	0,062	0,000	100,34
Hem III - 5	0,059	0,037	0,037	0,015	0,049	99,878	0,003	0,000	0,000	100,08

valores expressos em % p/p, \* análise de ferro total, V = 15 KeV, i = 20nA, t = 20s

**Tabela 2.** Dados da microsonda eletrônica em cloritas.

Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO*	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O	BaO	TiO <sub>2</sub>	Total
clorita-1	29,061	18,901	8,327	24,668	1,260	0,023	0	na	82,24
clorita-2	29,337	19,121	8,167	25,742	1,272	0	0	na	83,64
clorita-3	29,046	18,498	8,154	25,464	1,173	0,009	0	na	82,34
clorita-4	28,984	19,867	8,571	25,197	1,296	0,005	0,002	na	83,92
clorita-5	29,299	19,226	8,273	23,770	1,333	0,026	0,026	na	81,95
clorita-6	29,258	19,487	8,758	24,692	1,640	0	0	na	83,84
clorita-7	30,092	20,873	8,885	27,155	1,443	0,009	0	0,002	88,46
clorita-8	30,487	21,145	8,876	26,402	1,397	0	0,016	0,006	88,33
clorita-9	33,221	22,006	8,087	24,228	1,466	0,009	0,064	0,023	89,10
clorita-10	31,684	21,986	8,926	25,853	1,378	0,013	0,005	0,011	89,86
clorita-11	30,319	20,908	8,621	26,011	1,514	0,004	0,006	0,023	87,41
clorita-12	31,095	20,234	8,328	26,968	1,403	0,010	0	0,003	88,04
clorita-13	31,016	20,266	8,253	27,387	1,344	0	0,007	0	88,27
clorita-14	30,802	20,160	8,042	26,836	1,270	0	0,035	0,019	87,16
clorita-15	30,932	20,128	8,349	26,662	1,263	0	0,009	0,019	87,36
clorita-16	30,422	21,046	8,721	26,035	1,446	0,012	0,022	0,024	87,73

valores expressos em % p/p, \* análise de ferro total, V = 15 KeV, i = 20nA, t = 20s, na = não analisado

**Tabela 3.** Dados da microsonda eletrônica em micas.

Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO*	MgO	MnO	K <sub>2</sub> O	BaO	TiO <sub>2</sub>	Total
mica-1	48,921	27,995	5,064	2,053	0,078	10,621	0,894	na	95,63
mica-2	49,281	28,068	5,430	1,935	0,105	11,033	0,465	na	96,32
mica-3	48,588	28,694	5,029	2,008	0,106	10,546	1,277	na	96,25
mica-4	49,925	28,839	5,036	2,066	0,083	10,493	0,627	na	97,07
mica-5	49,081	29,513	4,897	1,798	0,060	9,778	1,544	na	96,67
mica-6	48,955	29,747	5,543	1,696	0,055	10,120	1,072	na	97,19
mica-7	50,214	31,436	6,102	1,606	0,070	5,873	2,648	0,131	98,08
mica-8	52,094	31,394	6,263	1,706	0,060	6,076	1,300	0,052	98,95
mica-9	52,219	29,036	5,868	2,860	0,047	7,317	1,448	0,058	98,85
mica-10	51,427	31,603	6,604	1,608	0,078	6,193	1,156	0,063	98,73
mica-11	52,199	30,828	5,415	2,138	0,007	6,404	2,239	0,065	99,30
mica-12	50,837	31,138	4,224	1,763	0,041	5,970	2,847	0,122	96,94
mica-13	52,049	30,651	4,819	2,040	0,047	6,268	2,354	0,095	98,32
mica-14	50,915	29,732	5,148	2,160	0,054	6,695	1,776	0,077	96,56

valores expressos em % p/p, \* análise de ferro total, V = 15 KeV, i = 20nA, t = 20s, na = não analisado

**Tabela 4.** Dados da microsonda eletrônica em granadas, calcita, apatita e óxido de manganês.

Amostra	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO*	MgO	MnO	CaO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	F	K <sub>2</sub> O	BaO	TiO <sub>2</sub>	Total
granada-1	36,123	18,808	4,166	0,188	33,825	5,954	na	na	na	na	na	99,06
granada-2	36,649	19,088	4,088	0,200	33,188	6,783	na	na	na	na	na	100,00
granada-3	36,511	19,278	4,066	0,207	33,687	5,964	na	na	na	na	na	99,71
granada-4	36,761	18,891	4,072	0,157	33,191	6,639	na	na	na	na	na	99,71
calcita-1	na	na	na	1,697	na	52,741	0,072	0	na	na	na	54,51
calcita-2	na	na	na	0,978	na	53,146	0,116	0,060	na	na	na	54,30
calcita-3	na	na	na	1,634	na	53,936	0,112	0	na	na	na	55,68
calcita-4	na	na	na	0,000	na	54,861	0,067	0	na	na	na	54,93
†apatita-1	na	na	na	0,00	na	56,588	41,434	4,420	na	na	na	100,58
†apatita-2	na	na	na	0,00	na	56,152	40,738	3,849	na	na	na	99,12
†apatita-3	na	na	na	0,00	na	56,383	42,580	4,249	na	na	na	101,42
†apatita-4	0,102	0,009	0,074	0,003	0,153	54,522	na	na	na	na	na	54,86
ox. manganês-1	0,678	2,835	29,507	0,223	33,000	na	na	na	0,005	0,206	0,004	66,46
ox. manganês-2	0,357	0,522	0,128	0,080	58,828	na	na	na	0	0,149	0	60,06
ox.manganês-3	0,353	0,327	0,272	0,058	71,429	na	na	na	0,005	0,311	0,015	72,77

valores expressos em % p/p, \* análise de ferro total, V = 15 KeV, i = 20nA, t = 20s, na = não analisado, † valor total descontado a substituição do O por F

**Tabela 5.** Tratamento dos dados da granada, com cálculo baseado em 12 oxigênios para a célula unitária e sua classificação.

	<b>granada 1</b>	<b>granada 2</b>	<b>granada 3</b>	<b>granada 4</b>
SiO <sub>2</sub>	36,12	36,65	36,51	36,76
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,81	19,09	19,28	18,89
FeO*	4,17	4,09	4,07	4,07
MgO	0,19	0,20	0,21	0,16
MnO	33,83	33,19	33,69	33,19
CaO	5,95	6,78	5,96	6,64
Total	99,06	100,00	99,71	99,71
oxigênios	12	12	12	12
TSi	2,977	2,984	2,985	3,004
TAl	0,000	0,000	0,000	0,000
Al IV	1,827	1,832	1,857	1,820
Fe <sup>3+</sup>	0,220	0,199	0,173	0,172
Fe <sup>2+</sup>	0,067	0,079	0,105	0,106
Ti	0,000	0,000	0,000	0,000
Mn	2,361	2,289	2,332	2,297
Mg	0,023	0,024	0,025	0,019
Ca	0,526	0,592	0,592	0,592
almandina	2,25	2,66	3,42	3,54
piropo	0,78	0,81	0,83	0,64
grossulária	15,76	17,89	17,72	17,68
espessartita	79,31	76,70	76,37	76,47
uvarovita	0,00	0,00	0,00	0,00
andradita	1,90	1,94	1,65	1,67

valores dos óxidos expressos em % p/p, \* análise de ferro total, T = posição tetraédrica

**ANEXO B – Dados do Geotermômetro da Clorita**



**Tabela 6.** Composições, em % de peso, das cloritas associadas ao minério de ferro da Serra do Sapo (MG).

Nº	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO*	MnO	MgO	BaO	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O <sup>a</sup>	Total
1	29,061	18,901	8,327	1,260	24,668	0	0,023	na	13,0	95,24
2	29,337	19,121	8,167	1,272	25,742	0	0	na	13,0	96,64
3	29,046	18,498	8,154	1,173	25,464	0	0,009	na	13,0	95,34
4	28,984	19,867	8,571	1,296	25,197	0,002	0,005	na	13,0	96,92
5	29,299	19,226	8,273	1,333	23,77	0,026	0,026	na	13,0	94,95
6	29,258	19,487	8,758	1,640	24,692	0	0	na	13,0	96,84
7	30,092	20,873	8,885	1,443	27,155	0	0,009	0,002	13,0	101,46
8	30,487	21,145	8,876	1,397	26,402	0,016	0	0,006	13,0	101,33
9	33,221	22,006	8,087	1,466	24,228	0,064	0,009	0,023	13,0	102,10
10	31,684	21,986	8,926	1,378	25,853	0,005	0,013	0,011	13,0	102,86
11	30,319	20,908	8,621	1,514	26,011	0,006	0,004	0,023	13,0	100,41
12	31,095	20,234	8,328	1,403	26,968	0	0,010	0,003	13,0	101,04
13	31,016	20,266	8,253	1,344	27,387	0,007	0	0	13,0	101,27
14	30,802	20,160	8,042	1,270	26,836	0,035	0	0,019	13,0	100,16
15	30,932	20,128	8,349	1,263	26,662	0,009	0	0,019	13,0	100,36
16	30,422	21,046	8,721	1,446	26,035	0,022	0,012	0,024	13,0	100,73

valores expressos em % p/p, \* ferro total considerado para cálculo como Fe<sup>2+</sup>, V = 15 KeV, i = 20nA, t = 20s, <sup>a</sup> valor tabelado, na = não analisado

**Tabela 7.** Número de cátions com base em 36 (O + OH) das cloritas da Serra do Sapo (MG).

Nº	Cloritas	Si <sup>4+</sup>	Al	Fe <sup>2+</sup>	Mn <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ba <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Ti <sup>4+</sup>	Classificação			
										Si	Fe*	Mg	Fe*/(Fe* + Mg)
1	<i>Clinocloro</i>	5,928	4,544	1,420	0,218	7,501	0,000	0,006	na	5,928	1,420	7,501	0,159
2	<i>Clinocloro</i>	5,897	4,530	1,373	0,217	7,714	0,000	0,000	na	5,897	1,373	7,714	0,151
3	<i>Clinocloro</i>	5,918	4,442	1,389	0,202	7,734	0,000	0,002	na	5,918	1,389	7,734	0,152
4	<i>Clinocloro</i>	5,809	4,693	1,437	0,220	7,529	0,000	0,001	na	5,809	1,437	7,529	0,160
5	<i>Clinocloro</i>	5,994	4,636	1,415	0,231	7,250	0,002	0,007	na	5,994	1,415	7,250	0,163
6	<i>Clinocloro</i>	5,869	4,607	1,469	0,279	7,384	0,000	0,000	na	5,869	1,469	7,384	0,166
7	<i>Clinocloro</i>	5,762	4,710	1,423	0,234	7,751	0,000	0,002	0,000	5,762	1,423	7,751	0,155
8	<i>Clinocloro</i>	5,845	4,778	1,423	0,227	7,546	0,001	0,000	0,001	5,845	1,423	7,546	0,159
9	<i>Peninita</i>	6,321	4,934	1,287	0,236	6,872	0,005	0,002	0,003	6,321	1,287	6,872	0,158
10	<i>Clinocloro</i>	5,984	4,894	1,410	0,220	7,279	0,000	0,003	0,002	5,984	1,410	7,279	0,162
11	<i>Clinocloro</i>	5,866	4,768	1,395	0,248	7,502	0,000	0,001	0,003	5,866	1,395	7,502	0,157
12	<i>Clinocloro</i>	5,978	4,585	1,339	0,228	7,729	0,000	0,002	0,000	5,978	1,339	7,729	0,148
13	<i>Clinocloro</i>	5,949	4,582	1,324	0,218	7,832	0,001	0,000	0,000	5,949	1,324	7,832	0,145
14	<i>Clinocloro</i>	5,974	4,608	1,304	0,209	7,759	0,003	0,000	0,003	5,974	1,304	7,759	0,144
15	<i>Clinocloro</i>	5,987	4,592	1,352	0,207	7,693	0,001	0,000	0,003	5,987	1,352	7,693	0,149
16	<i>Clinocloro</i>	5,867	4,784	1,407	0,236	7,485	0,002	0,003	0,003	5,867	1,407	7,485	0,158

\*ferro total considerado para cálculo como Fe<sup>2+</sup>, na = não analisado

**Tabela 8.** Cálculo das fórmulas estruturais e da quantidade de Al em posição tetraédrica das cloritas da Serra do Sapó. Fórmula estrutural geral das cloritas =  $(\text{Mg,Al,Fe})_{12} [(\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20}] (\text{OH})_{16}$ .

Nº	Si	Al <sub>VI</sub>	Fe	Mn	Mg	Ba	K	Ti	Soma	Al <sub>IV</sub>	Al <sub>IV</sub> /2	Fórmula estrutural calculada
1	5,928	2,471	1,420	0,218	7,501	-	0,006	na	11,616	2,072	1,036	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,616} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
2	5,897	2,427	1,373	0,217	7,714	-	-	na	11,731	2,103	1,051	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,731} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
3	5,918	2,360	1,389	0,202	7,734	-	0,002	na	11,689	2,082	1,041	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,689} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
4	5,809	2,502	1,437	0,220	7,529	-	0,001	na	11,689	2,191	1,095	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,689} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
5	5,994	2,630	1,415	0,231	7,250	0,002	0,007	na	11,535	2,006	1,003	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,535} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
6	5,869	2,477	1,469	0,279	7,384	0,000	0,000	na	11,609	2,131	1,065	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,609} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
7	5,762	2,472	1,423	0,234	7,751	0,000	0,002	0,000	11,882	2,238	1,119	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,882} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
8	5,845	2,622	1,423	0,227	7,546	0,001	0,000	0,001	11,820	2,155	1,078	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,820} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
9	6,321	3,255	1,287	0,236	6,872	0,005	0,002	0,003	11,660	1,679	0,840	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,660} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
10	5,984	2,878	1,410	0,220	7,279	0,000	0,003	0,002	11,793	2,016	1,008	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,793} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
11	5,866	2,634	1,395	0,248	7,502	0,000	0,001	0,003	11,784	2,134	1,067	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,784} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
12	5,978	2,563	1,339	0,228	7,729	0,000	0,002	0,000	11,863	2,022	1,011	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,863} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
13	5,949	2,531	1,324	0,218	7,832	0,001	0,000	0,000	11,905	2,051	1,025	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,905} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
14	5,974	2,582	1,304	0,209	7,759	0,003	0,000	0,003	11,859	2,026	1,013	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,859} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
15	5,987	2,579	1,352	0,207	7,693	0,001	0,000	0,003	11,834	2,013	1,006	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,834} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$
16	5,867	2,651	1,407	0,236	7,485	0,002	0,003	0,003	11,787	2,133	1,066	$(\text{Mg,Al,Fe})_{11,787} (\text{Al,Si})_8 \text{O}_{20} (\text{OH})_{16}$

na = não analisado

**ANEXO C – Análises por Ablação à Laser - Plasma Indutivamente  
Acoplado - Espectrometria de Massa (LA-ICP-MS) das  
Inclusões Fluidas em Hematitas**

**Tabela 9.** Sensibilidade relativa dos padrões utilizados nas análises de LA-ICP-MS.

<b>Padrões</b>	<b>Li</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Sr</b>	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>Pb</b>
n610a	0,41473033	1	0,5737	0,89698	0,02757	1,23324	0,03206	0,5641	0,20488935	0,2212659	1,37346	0,63377	0,18752	0,78756
n610a	0,40668004	1	0,5683	0,90535	0,02744	1,22403	0,03166	0,557832	0,20053759	0,2177336	1,37248	0,62819	0,19112	0,78771
n610a	0,40250514	1	0,56362	0,88797	0,02748	1,21566	0,0308	0,55254	0,20325053	0,2197259	1,38521	0,63203	0,19036	0,81077

\* todos resultados estão expressos em ppm, foi utilizado  $1\mu\text{g/g}$  de  $\text{Na}^{23}$  como padrão interno sendo o sinal de quantificação.

**Tabela 10.** Resumo da composição das inclusões fluidas analisadas no LA-ICP-MS de acordo com estes elementos estudados.

Amostras	Li	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Sr	Sb	Ba	Pb
<b>ESP 1.1</b>	<0,038188	1	0,18032	2,08946	<1,6018	1,1903	24258,7	16,84442	0,16396654	0,035123	0,00638	0,09761	0,0155	0,00877
<b>ESP 1.2</b>	0,0062154	1	0,00022	0,13417	0,08673	0,00339	187,189	<9,3359E-05	<5,092E-05	0,0214153	0,00476	0,0006	6,6E-05	6,4E-05
<b>ESP 1.3</b>	0,0157979	1	0,08373	0,57847	0,46628	0,31438	5712,68	0,009807	0,03136723	0,0466906	0,00387	0,03114	0,0047	0,00525
<b>ESP 1.4</b>	0,0104439	1	0,07591	0,92393	0,35748	0,1735	4591,07	0,023908	0,0528026	0,0187396	0,0037	0,0194	0,00153	0,00611
<b>ESP 1.5</b>	0,00988279	1	0,15378	1,50742	1,0113	0,32339	5066,85	0,039834	0,11346458	0,0096251	0,04269	0,01249	0,00387	0,01671
ESP 1.6	0,00904327	1	0,11446	2,09045	1,44019	0,30465	5108,96	0,096256	0,07271035	0,0050138	0,00477	0,01122	0,00569	0,01285
ESP 1.7	0,01022247	1	0,09604	1,42418	0,50532	0,32838	5829,33	0,026187	0,03735278	0,0075345	0,0071	0,01938	0,00441	0,01061
ESP 1.8	0,00519003	1	0,06514	1,79985	0,53721	0,1255	3030,15	0,042737	0,16181238	0,0035771	0,00258	0,01349	0,00261	0,00908
ESP 1.9	0,00739871	1	0,07157	1,06984	0,53109	0,14455	4429,84	0,06086	0,07349525	0,0038705	0,00411	0,01498	0,0041	0,01108
<b>ESP 2.1</b>	<0,0062589	1	0,10372	0,50352	0,54609	0,1896	2852,49	0,011059	0,02141662	<0,0031435	0,00077	0,00451	0,00319	0,00702
<b>ESP 2.2</b>	<0,012113	1	0,19288	1,45474	1,09135	0,3891	9190,18	0,054843	0,05280365	0,0062574	0,00393	0,01301	0,01121	0,01023
<b>ESP 2.3</b>	<0,0073599	1	0,43301	1,49675	0,79307	0,27931	6525,51	0,019637	0,03280466	<0,0034902	0,00491	0,00378	0,0217	0,00505
ESP 2.4	<0,026444	1	0,1945	1,33185	1,93759	0,94957	3995,01	0,023463	0,04534956	<0,011789	0,01101	0,00237	0,16092	0,00616
ESP 2.5	<0,018749	1	0,38517	1,1095	<0,86728	0,8705	14389,9	0,019573	0,04936465	<0,0081456	0,00195	0,00771	0,0023	0,00807
ESP 2.6	0,00462957	1	0,05973	1,32545	0,47485	0,16533	3384,49	0,033565	0,03245868	<0,0015458	0,00147	0,00221	0,0055	0,00342
ESP 2.7	0,01250183	1	0,07767	0,92866	<0,39148	0,32999	7461,64	0,035166	0,03986768	<0,0037623	0,0022	0,0025	0,00986	0,00486
ESP 2.8	0,01085413	1	0,08744	1,05409	0,40225	0,34744	5814,15	0,039651	0,04481281	<0,003403	0,00239	0,00174	0,01138	0,0052
ESP 2.9	0,02001918	1	0,09909	1,10324	<0,59955	0,6626	10597,2	0,020634	0,04608689	<0,0055025	0,00203	0,00517	0,01151	0,00785
ESP 2.10	0,00660351	1	0,05989	0,92056	0,22243	0,11578	3448,3	0,029125	0,02165093	<0,0015066	0,00518	0,0014	0,00171	0,00284

\* todos resultados estão expressos em ppm, foi utilizado 1µg/g de Na<sup>23</sup> como padrão interno sendo o sinal de quantificação.

**Continuação Tabela 10.** Resumo da composição das inclusões fluidas analisadas no LA-ICP-MS de acordo com estes elementos estudados.

Amostras	Li	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Sr	Sb	Ba	Pb
<b>ESP 3.1</b>	<0,0037047	1	0,11585	0,20234	4,02882	0,13557	2905,23	0,031912	0,06697458	0,0033251	0,00687	0,00766	0,00283	0,00514
<b>ESP 3.2</b>	<0,020503	1	0,1307	1,2141	3,84521	0,95047	21649,6	0,34239	0,20344036	0,0186171	0,00257	0,05584	0,01605	0,02789
<b>ESP 3.3</b>	0,00068571	1	0,00474	0,0214	0,21406	0,02391	391,212	0,000681	0,00264127	0,0003382	0,00016	0,00093	0,00162	0,00035
<b>ESP 3.4</b>	0,03132427	1	0,05134	0,47089	<0,91421	0,60755	11200,9	0,017954	0,0449449	0,0115144	0,00387	0,01912	0,01016	0,00579
<b>ESP 3.5</b>	0,03518143	1	0,05251	0,54733	<0,65933	0,44009	8543,34	0,013273	0,01730639	0,0077532	0,00195	0,02715	0,02078	0,00371
ESP 3.6	0,01758753	1	0,17464	0,43957	3,00463	0,35968	5559,84	0,05172	0,06604544	<0,0040813	0,00593	0,00725	0,01763	0,00548
ESP 3.7	0,00107161	1	0,012	1,35802	0,35784	0,01976	468,017	0,006023	0,0067021	<0,00025548	0,00071	0,00085	0,00025	0,00047
<b>ESP 4.1</b>	<0,017429	1	0,62831	2,97204	1,95434	1,02874	6918,72	0,060648	0,0632929	<0,0088901	0,00353	0,00845	0,11765	0,00495
<b>ESP 4.2</b>	<0,012316	1	0,32299	2,01857	2,25637	0,41697	6093,83	0,035642	0,04391185	0,0080553	0,00239	0,00514	0,01444	0,00453
<b>ESP 4.3</b>	<0,0085698	1	0,22199	3,02335	1,7945	0,4139	8236,23	0,349931	0,51672296	0,0072789	0,00292	0,01062	0,01325	0,02231
<b>ESP 4.4</b>	<0,015298	1	0,31603	1,62798	1,01408	0,48657	10187,6	0,023542	0,04298532	0,0089124	0,0022	0,01421	0,01421	0,00416
ESP 4.5	<0,020072	1	0,10931	0,64606	7,24815	0,01698	<0,19239	0,012254	0,05912153	<0,012064	0,00136	<0,0020789	0,00384	0,00181
<b>ESP 5.1</b>	<0,00088073	1	0,02721	0,16531	5,99143	0,02443	607,686	0,012982	0,0029981	0,0009903	0,00598	0,00076	0,00079	0,00074
ESP 5.2	<0,00090428	1	0,02948	0,17544	6,53488	0,02309	456,131	0,014211	0,00321161	0,0006063	0,00594	0,00055	0,00085	0,00077
ESP 5.3	0,00629975	1	0,05319	1,80382	1,06142	0,13153	3266,21	0,031813	0,03641747	0,0037635	0,00139	0,0048	0,00456	0,00261
ESP 5.4	0,00302793	1	0,04295	0,23686	0,46287	0,09526	1924,14	0,00352	0,00271328	0,0028673	0,00053	0,00141	0,00692	0,00077
ESP 5.5	0,01799342	1	0,39682	1,64282	<0,55332	0,61488	4851,49	0,029118	13,1966364	<0,0056923	0,00275	0,00202	0,02981	0,00237

\* todos resultados estão expressos em ppm, foi utilizado  $1\mu\text{g/g}$  de  $\text{Na}^{23}$  como padrão interno sendo o sinal de quantificação.

**Continuação Tabela 10.** Resumo da composição das inclusões fluidas analisadas no LA-ICP-MS de acordo com estes elementos estudados.

Amostras	Li	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Sr	Sb	Ba	Pb
<b>ESP 6.1</b>	<0,00044495	1	0,01089	0,53071	0,10343	0,02	367,642	0,002226	0,01662014	0,0004974	0,0008	0,00071	0,0005	0,00045
<b>ESP 6.2</b>	<0,0087782	1	0,14403	1,60401	1,89725	0,4034	5126,26	0,025445	0,10712845	<0,0034118	0,00682	0,01167	0,0136	0,01308
<b>ESP 6.3</b>	<0,016669	1	0,1527	1,57643	<0,72377	0,88653	13717,9	0,029249	0,5400602	0,0111967	0,00348	0,04155	0,01232	0,01863
<b>ESP 6.4</b>	<0,0016982	1	0,01508	0,36634	<0,078394	0,07424	1739,09	0,006456	0,02376333	0,0009314	0,00047	0,00446	0,00083	0,00142
<b>ESP 6.5</b>	<0,013853	1	0,31068	1,11683	<0,61095	0,76192	12632,1	0,018073	0,21256299	<0,0051261	0,00554	0,02307	0,01004	0,01501
<b>ESP 6.6</b>	<0,022118	1	0,22522	0,89795	<1,0208	1,31576	22020,8	0,027716	0,27292238	0,01499	0,0064	0,05298	0,02499	0,0178
<b>ESP 6.7</b>	<0,011256	1	0,15846	1,00066	<0,50991	0,66638	12067,6	0,021654	0,16724818	0,0060537	0,00456	0,03239	0,00595	0,01075
<b>ESP 6.8</b>	<0,019069	1	0,19135	0,60929	<0,85663	1,14418	15433,8	0,020965	0,23021367	<0,0071408	0,0042	0,03118	0,00925	0,01507
<b>ESP 7.1</b>	0,011048	1	0,00627	0,42368	0,27084	0,01299	1270,0	0,002936	0,00559603	0,0679429	0,00591	0,00525	0,00117	0,00111
<b>ESP 7.2</b>	0,00589482	1	0,12759	1,15837	1,09504	0,21	4300,61	0,05319	0,12652739	0,0105588	0,00594	0,02316	0,01102	0,03373
<b>ESP 7.3</b>	0,01272126	1	0,08407	1,59295	0,85408	0,28489	9196,38	0,031058	0,10820081	0,0189317	0,00462	0,05551	0,00645	0,01551
<b>ESP 7.4</b>	0,00689272	1	0,10356	1,55923	1,55665	0,19801	4871,36	0,03409	0,09816961	0,0068314	0,004	0,02364	0,00634	0,01075
ESP 7.5	0,00808677	1	0,04925	2,48689	1,60855	0,27205	6527,07	0,062317	0,10477233	0,0070378	0,00226	0,01894	0,02295	0,01306
ESP 7.6	0,01335694	1	0,05714	0,78961	<0,49191	0,51165	8751,17	0,014317	0,09254098	0,0084422	0,0021	0,03335	0,00601	0,01732
<b>ESP 8.1</b>	<0,0015986	1	0,07307	0,20692	0,12896	0,08001	1234,35	0,002412	0,06973733	0,0011075	0,00151	0,00104	0,00362	0,00096
<b>ESP 8.2</b>	<0,0025489	1	0,10607	0,30265	0,67668	0,10713	1330,31	0,005823	0,00908103	0,0020608	0,00091	0,00079	0,01039	0,00078
<b>ESP 8.3</b>	<0,014502	1	0,31906	1,20774	<0,66098	0,55519	8490,98	0,017529	0,09534226	<0,005524	0,00143	0,00627	0,01375	0,00699
<b>ESP 8.4</b>	0,03102211	1	0,60417	1,20569	<0,51703	0,66652	9825,3	0,028705	0,09396552	0,0069664	0,00359	0,00607	0,0146	0,00359
<b>HEM 9.1</b>	<0,0098398	1	0,91886	2,39808	2,18998	0,79513	5139,08	0,135782	0,17442206	0,0488625	0,01152	0,01168	0,0544	0,05105
<b>HEM 9.2</b>	<0,018396	1	0,57907	2,59455	2,41543	1,81468	9175,68	0,054271	0,10488238	0,0202097	0,0086	0,01208	0,03703	0,03769
<b>HEM 9.3</b>	0,01527268	1	0,72003	3,16499	2,89364	0,39804	4998,1	0,060094	0,08949346	0,027543	0,02566	0,01312	0,018	0,02993

\* todos resultados estão expressos em ppm, foi utilizado 1µg/g de Na<sup>23</sup> como padrão interno sendo o sinal de quantificação.



**Tabela 11.** Resumo do limite de detecção das amostras analisadas no LA-ICP-MS de acordo com os elementos estudados.

Amostras	Li	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Sr	Sb	Ba	Pb
<b>ESP 1.1</b>	0,038187783	0,17067	0,000951	0,097363	1,601813	0,027701	0,341433	0,0146222	0,0081659	0,01519096	0,000393	0,003496	0,006346	0,002884
<b>ESP 1.2</b>	0,000244713	0,00105	6,58E-06	0,0006	0,010523	0,000184	0,002231	9,34E-05	5,09156E-05	9,8243E-05	2,71E-06	2,39E-05	4,38E-05	1,73E-05
<b>ESP 1.3</b>	0,008234925	0,03584	0,000289	0,019924	0,364473	0,005866	0,074777	0,0030523	0,001595826	0,0032953	8,48E-05	0,000771	0,001494	0,000546
<b>ESP 1.4</b>	0,005538539	0,0241	0,000191	0,013498	0,243168	0,003985	0,049754	0,0020684	0,001112839	0,00227233	5,6E-05	0,000511	0,000987	0,000371
<b>ESP 1.5</b>	0,006465688	0,02981	0,000154	0,016188	0,263375	0,004583	0,057081	0,0024933	0,001382534	0,00258621	6,36E-05	0,000569	0,001028	0,000478
ESP 1.6	0,004969613	0,02215	0,000256	0,011978	0,205352	0,003259	0,045089	0,0018339	0,000910738	0,00200095	4,34E-05	0,000425	0,000825	0,00033
ESP 1.7	0,007405127	0,03257	0,000185	0,017987	0,312062	0,005403	0,066598	0,0027566	0,001517255	0,00295815	7,65E-05	0,000694	0,001236	0,000505
ESP 1.8	0,003128188	0,01434	7,66E-05	0,007637	0,126431	0,002189	0,026515	0,0012038	0,000685894	0,00111872	3,16E-05	0,000276	0,000511	0,000237
ESP 1.9	0,004372206	0,02017	0,000218	0,010339	0,176629	0,002844	0,039433	0,0016237	0,000843933	0,00172668	3,7E-05	0,000363	0,000703	0,000287
<b>ESP 2.1</b>	0,006258898	0,02762	0,000308	0,016954	0,330069	0,004844	0,073924	0,0024595	0,001121612	0,00314345	0,000144	0,000308	0,00047	0,00032
<b>ESP 2.2</b>	0,012113083	0,05219	0,000453	0,032723	0,563286	0,00837	0,122527	0,0045058	0,00196297	0,00533799	0,000211	0,000686	0,00118	0,000645
<b>ESP 2.3</b>	0,007359936	0,03253	0,000319	0,019757	0,359061	0,005489	0,080769	0,0029231	0,001241144	0,00349025	0,000149	0,000421	0,000683	0,000414
ESP 2.4	0,026443649	0,11064	0,001048	0,067363	1,219454	0,018718	0,270302	0,0098964	0,004079468	0,01178923	0,000488	0,001384	0,00224	0,001404
ESP 2.5	0,018749207	0,08211	0,000764	0,050353	0,867277	0,012896	0,188488	0,0068777	0,002972172	0,00814556	0,000319	0,001077	0,001785	0,000977
ESP 2.6	0,003450058	0,01545	0,000151	0,009416	0,167123	0,002467	0,036729	0,0013117	0,000560226	0,00154584	6,33E-05	0,000197	0,00029	0,000169
ESP 2.7	0,008397358	0,03618	0,000338	0,021947	0,391481	0,006026	0,087784	0,0032078	0,00131647	0,00376227	0,000157	0,000469	0,000881	0,000466
ESP 2.8	0,007321448	0,03312	0,000343	0,019615	0,349573	0,008638	3,910023	0,0030407	0,002668617	0,00340297	0,000545	0,000905	0,001809	0,002668
ESP 2.9	0,012134485	0,05309	0,000515	0,030796	0,599547	0,008667	0,132354	0,0045188	0,001884019	0,00550246	0,00024	0,000605	0,001102	0,000591
ESP 2.10	0,003400939	0,01495	0,000132	0,009294	0,160916	0,002426	0,035091	0,0012874	0,000546015	0,00150663	6,17E-05	0,000192	0,000345	0,000183

\* todos resultados estão expressos em ppm

**Continuação Tabela 11.** Resumo do limite de detecção das amostras analisadas no LA-ICP-MS de acordo com os elementos estudados.

Amostras	Li	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Sr	Sb	Ba	Pb
<b>ESP 3.1</b>	0,00370467	0,01504	0,000137	0,008546	0,154775	0,002033	0,033529	0,0010234	0,000534308	0,00149432	4,03E-05	0,000254	0,000293	0,000306
<b>ESP 3.2</b>	0,020503283	0,08399	0,000629	0,049717	0,90498	0,012018	0,170268	0,0062111	0,004165929	0,01006771	0,000185	0,001339	0,001884	0,001842
<b>ESP 3.3</b>	0,000600475	0,00244	1,94E-05	0,001482	0,026415	0,000376	0,005242	0,0001809	0,000123595	0,00029643	5,7E-06	3,63E-05	5,82E-05	5,39E-05
<b>ESP 3.4</b>	0,021321517	0,0855	0,000698	0,050847	0,914211	0,013134	0,182956	0,0063787	0,00443429	0,01027679	0,000205	0,001305	0,001489	0,00193
<b>ESP 3.5</b>	0,015221082	0,06332	0,000474	0,036739	0,659333	0,009361	0,129564	0,0046982	0,003773997	0,00772063	0,000139	0,000969	0,001419	0,001382
ESP 3.6	0,008070171	0,03283	0,000284	0,019768	0,364843	0,004949	0,068254	0,0024219	0,001792472	0,00408129	8,34E-05	0,000529	0,000605	0,000763
ESP 3.7	0,000530045	0,00213	1,74E-05	0,001264	0,022727	0,000327	0,004548	0,0001586	0,000110235	0,00025548	5,1E-06	3,24E-05	3,7E-05	4,8E-05
<b>ESP 4.1</b>	0,01742883	0,07256	0,000888	0,042529	0,762969	0,008845	0,156505	0,00592	0,00497565	0,00889011	0,000367	0,001521	0,002394	0,00083
<b>ESP 4.2</b>	0,012315523	0,05482	0,000728	0,031699	0,598947	0,006415	0,111331	0,0046208	0,003576852	0,00694449	0,0003	0,001212	0,001965	0,000677
<b>ESP 4.3</b>	0,008569848	0,03596	0,000473	0,021374	0,390082	0,004283	0,080383	0,0030417	0,00232298	0,00458177	0,000195	0,000804	0,001277	0,00044
<b>ESP 4.4</b>	0,015298353	0,0603	0,000806	0,035639	0,658733	0,007306	0,136893	0,0052488	0,003956757	0,00782634	0,000333	0,00137	0,001896	0,000713
ESP 4.5	0,020072479	0,08969	0,001279	0,054035	1,037558	0,011204	0,192392	0,0077608	0,006293785	0,01206406	0,000528	0,002079	0,003017	0,001128
<b>ESP 5.1</b>	0,000880727	0,00354	2,48E-05	0,001971	0,038025	0,000403	0,006352	0,0002762	0,000170624	0,00040926	1,43E-05	5E-05	5,28E-05	4,04E-05
ESP 5.2	0,000904276	0,0035	1,81E-05	0,00211	0,039973	0,000412	0,006909	0,0002701	0,000175324	0,00041944	1,47E-05	6,46E-05	5,42E-05	4,32E-05
ESP 5.3	0,004607042	0,01946	0,000115	0,010807	0,197374	0,002081	0,037904	0,0014847	0,000827086	0,00203774	6,68E-05	0,000364	0,000246	0,000224
ESP 5.4	0,001954749	0,00824	4,92E-05	0,004567	0,083437	0,000881	0,016035	0,0006315	0,000341254	0,00086471	2,85E-05	0,000155	0,000105	9,53E-05
ESP 5.5	0,012692919	0,0574	0,00031	0,029694	0,553318	0,005863	0,108858	0,0040955	0,002362047	0,00569228	0,000179	0,000997	0,000658	0,000619

\* todos resultados estão expressos em ppm

**Continuação Tabela 11.** Resumo do limite de detecção das amostras analisadas no LA-ICP-MS de acordo com os elementos estudados.

Amostras	Li	Na	Mg	K	Ca	Mn	Fe	Cu	Zn	As	Sr	Sb	Ba	Pb
<b>ESP 6.1</b>	0,000444949	0,00202	1,55E-05	0,00102	0,018856	0,000202	0,003368	0,0001553	7,78354E-05	0,00017463	4,08E-06	4,34E-05	2,1E-05	2,33E-05
<b>ESP 6.2</b>	0,008778153	0,04023	0,000338	0,021849	0,398315	0,004257	0,069939	0,0028517	0,001895315	0,00341176	8,17E-05	0,000867	0,000421	0,000437
<b>ESP 6.3</b>	0,016668574	0,0742	0,000502	0,038252	0,723769	0,007747	0,130019	0,0056974	0,003310877	0,00619606	0,000147	0,001603	0,000758	0,000859
<b>ESP 6.4</b>	0,001698233	0,00785	6,03E-05	0,00422	0,078394	0,00083	0,013872	0,0005494	0,000368934	0,00064814	1,59E-05	0,00017	8,19E-05	9,41E-05
<b>ESP 6.5</b>	0,013852924	0,06193	0,000428	0,032045	0,610946	0,006454	0,109343	0,0047791	0,002821033	0,00512607	0,000126	0,001357	0,000647	0,000732
<b>ESP 6.6</b>	0,022118398	0,10268	0,000837	0,055669	1,020752	0,011003	0,185432	0,0073038	0,004770945	0,00864029	0,000202	0,002177	0,001038	0,001198
<b>ESP 6.7</b>	0,011255623	0,05034	0,000433	0,027617	0,509906	0,005433	0,093358	0,0036302	0,00233486	0,00423506	9,67E-05	0,001058	0,000498	0,000586
<b>ESP 6.8</b>	0,019068756	0,08597	0,000663	0,046306	0,856634	0,009177	0,153376	0,0060523	0,004054433	0,00714082	0,000175	0,001866	0,000899	0,001034
<b>ESP 7.1</b>	0,001357866	0,00622	6,94E-05	0,003061	0,059181	0,000775	0,010596	0,000482	0,000251423	0,00041044	1,46E-05	0,000108	0,000106	6,41E-05
<b>ESP 7.2</b>	0,005843191	0,02833	0,00024	0,013811	0,256963	0,003407	0,04868	0,0019272	0,001534496	0,00169126	5,79E-05	0,000447	0,00042	0,000256
<b>ESP 7.3</b>	0,009990173	0,04849	0,0004	0,02393	0,441303	0,005902	0,0817	0,0033878	0,002305383	0,00280511	0,000118	0,000712	0,000608	0,00052
<b>ESP 7.4</b>	0,005389306	0,02552	0,000226	0,013142	0,24276	0,003275	0,045562	0,0018884	0,001298011	0,00156	6,65E-05	0,000391	0,000343	0,000284
ESP 7.5	0,007179899	0,03528	0,000296	0,017456	0,317957	0,004153	0,059748	0,0023643	0,001701483	0,00206244	8,72E-05	0,000525	0,000449	0,000384
ESP 7.6	0,011237713	0,0535	0,000518	0,026038	0,491906	0,006586	0,096174	0,0038829	0,00288849	0,00323316	0,000109	0,000865	0,000789	0,000511
<b>ESP 8.1</b>	0,00159858	0,0083	7,48E-05	0,003792	0,073814	0,000773	0,014348	0,0005421	0,000315586	0,00059862	2,52E-05	0,000161	0,000146	8,64E-05
<b>ESP 8.2</b>	0,002548918	0,01307	0,000127	0,005957	0,117781	0,001244	0,022383	0,0008275	0,000482414	0,00096409	3,84E-05	0,000248	0,000298	0,000143
<b>ESP 8.3</b>	0,014501776	0,07619	0,000667	0,03362	0,660976	0,007141	0,128913	0,0047613	0,0028039	0,00552404	0,000209	0,001389	0,001703	0,000832
<b>ESP 8.4</b>	0,011205943	0,0588	0,000525	0,025824	0,51703	0,005431	0,098898	0,0037099	0,002192922	0,00426473	0,000159	0,001073	0,001233	0,00064
<b>HEM 9.1</b>	0,009839779	0,0496	0,000505	0,027172	0,486263	0,006119	0,084334	0,0038301	0,002773302	0,00378118	0,000137	0,000826	0,001388	0,000614
<b>HEM 9.2</b>	0,018396488	0,09928	0,000955	0,052135	0,941341	0,011888	0,163245	0,0072483	0,005171351	0,00738274	0,000259	0,001565	0,002628	0,001164
<b>HEM 9.3</b>	0,010639323	0,0594	0,000566	0,03056	0,56999	0,007152	0,099089	0,004291	0,002967043	0,00443887	0,000153	0,000928	0,001559	0,00069

\* todos resultados estão expressos em ppm

**Tabela 12.** Concentrações em ppm das inclusões fluidas analisadas no LA-ICP-MS normalizadas de acordo com a salinidade equivalente de NaCl.

<b>Amostras</b>	<b>Li</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Sr</b>	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>Pb</b>
<b>ESP 1.1</b>	-	4263,51	768,80	8908,45	-	5074,87	-	699,07	149,75	27,21	416,16	66,10	37,39
<b>ESP 1.2</b>	213,60	34366,98	7,60	4610,90	2980,62	116,48	0,00	0,00	735,98	163,55	20,69	2,25	2,19
<b>ESP 1.3</b>	272,55	17252,41	1444,49	9980,02	8044,44	5423,76	169,19	541,16	805,53	66,80	537,19	81,08	90,62
<b>ESP 1.4</b>	186,71	17877,25	1357,09	16517,40	6390,71	3101,68	427,41	943,97	335,01	66,13	346,87	27,43	109,24
<b>ESP 1.5</b>	110,10	11140,79	1713,26	16793,86	11266,66	3602,78	443,78	1264,09	107,23	475,62	139,12	43,17	186,20
ESP 1.6	84,84	9381,29	1073,82	19611,10	13510,82	2857,98	903,00	682,12	47,04	44,76	105,23	53,36	120,52
ESP 1.7	144,95	14179,25	1361,79	20193,87	7165,01	4656,23	371,32	529,63	106,83	100,69	274,80	62,49	150,44
ESP 1.8	71,29	13736,05	894,78	24722,88	7379,10	1723,89	587,03	2222,66	49,13	35,45	185,36	35,83	124,70
ESP 1.9	119,28	16122,14	1153,79	17248,03	8562,26	2330,51	981,20	1184,90	62,40	66,28	241,49	66,11	178,71
<b>ESP 2.1</b>	-	18285,16	1896,55	9207,01	9985,32	3466,91	202,21	391,61	-	14,10	82,46	58,40	128,35
<b>ESP 2.2</b>	-	10859,95	2094,65	15798,41	11852,01	4225,62	595,59	573,44	67,96	42,64	141,30	121,78	111,11
<b>ESP 2.3</b>	-	10832,30	4690,46	16213,29	8590,82	3025,52	212,72	355,35	-	53,19	40,91	235,07	54,68
ESP 2.4	-	7985,45	1553,17	10635,46	15472,51	7582,75	187,36	362,14	-	87,88	18,93	1285,04	49,16
ESP 2.5	-	13324,20	5132,06	14783,22	-	11598,75	260,79	657,74	-	26,02	102,70	30,69	107,52
ESP 2.6	74,09	16002,88	955,80	21211,02	7599,03	2645,77	537,14	519,43	-	23,54	35,33	87,95	54,69
ESP 2.7	255,68	20451,20	1588,39	18992,25	-	6748,64	719,18	815,34	-	44,94	51,16	201,74	99,30
ESP 2.8	173,96	16026,88	1401,33	16893,72	6446,83	5568,33	635,48	718,21	-	38,34	27,86	182,33	83,33
ESP 2.9	336,20	16794,13	1664,14	18528,00	-	11127,84	346,53	773,99	-	34,08	86,82	193,31	131,79
ESP 2.10	135,00	20443,86	1224,38	18819,82	4547,33	2366,98	595,43	442,63	-	105,92	28,55	34,97	58,07

\* todos resultados estão expressos em ppm

**Continuação Tabela 12.** Concentrações em ppm das inclusões fluidas analisadas no LA-ICP-MS normalizadas de acordo com a salinidade equivalente de NaCl.

<b>Amostras</b>	<b>Li</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Sr</b>	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>Pb</b>
<b>ESP 3.1</b>	-	6977,84	808,39	1411,88	28112,49	945,97	222,67	467,34	23,20	47,91	53,42	19,75	35,87
<b>ESP 3.2</b>	-	5720,08	747,63	6944,74	21994,90	5436,77	1958,50	1163,70	106,49	14,70	319,42	91,80	159,54
<b>ESP 3.3</b>	22,74	33162,02	157,24	709,56	7098,69	792,75	22,58	87,59	11,21	5,44	30,90	53,65	11,57
<b>ESP 3.4</b>	654,43	20891,99	1072,63	9837,81	-	12692,86	375,11	938,99	240,56	80,86	399,44	212,23	120,93
<b>ESP 3.5</b>	771,93	21941,53	1152,12	12009,30	-	9656,18	291,22	379,73	170,12	42,71	595,81	455,87	81,33
ESP 3.6	137,76	7832,70	1367,94	3442,99	23534,40	2817,27	405,11	517,31	-	46,44	56,81	138,05	42,90
ESP 3.7	20,33	18975,80	227,75	25769,46	6790,28	374,92	114,29	127,18	-	13,46	16,21	4,69	8,87
<b>ESP 4.1</b>	-	5555,13	3490,35	16510,10	10856,61	5714,77	336,91	351,60	-	19,61	46,96	653,55	27,49
<b>ESP 4.2</b>	-	6854,68	2214,00	13836,64	15466,67	2858,22	244,31	301,00	55,22	16,37	35,23	98,95	31,06
<b>ESP 4.3</b>	-	6496,32	1442,10	19640,67	11657,62	2688,80	2273,26	3356,80	47,29	18,95	69,02	86,11	144,92
<b>ESP 4.4</b>	-	9488,75	2998,71	15447,53	9622,39	4616,93	223,39	407,88	84,57	20,84	134,80	134,83	39,47
ESP 4.5	-	3987,50	435,87	2576,16	28902,01	67,70	48,86	235,75	-	5,43	0,00	15,32	7,21
<b>ESP 5.1</b>	-	6593,84	179,39	1090,05	39506,57	161,12	85,60	19,77	6,53	39,44	5,00	5,21	4,88
ESP 5.2	-	6113,58	180,24	1072,55	39951,55	141,17	86,88	19,63	3,71	36,30	3,36	5,21	4,73
ESP 5.3	67,60	10731,11	570,73	19356,94	11390,18	1411,48	341,38	390,80	40,39	14,92	51,46	48,95	28,02
ESP 5.4	62,43	20619,51	885,55	4884,02	9544,07	1964,18	72,57	55,95	59,12	10,87	29,04	142,67	15,89
ESP 5.5	54,51	3029,68	1202,22	4977,23	-	1862,90	88,22	39981,58	-	8,33	6,12	90,32	7,19

\* todos resultados estão expressos em ppm

**Continuação Tabela 12.** Concentrações em ppm das inclusões fluidas analisadas no LA-ICP-MS normalizadas de acordo com a salinidade equivalente de NaCl.

<b>Amostras</b>	<b>Li</b>	<b>Na</b>	<b>Mg</b>	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Mn</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>As</b>	<b>Sr</b>	<b>Sb</b>	<b>Ba</b>	<b>Pb</b>
<b>ESP 6.1</b>	-	26808,80	291,98	14227,78	2772,85	536,08	59,67	445,57	13,33	21,55	19,15	13,39	11,95
<b>ESP 6.2</b>	-	8874,39	1278,22	14234,59	16836,97	3579,91	225,81	950,70	-	60,48	103,54	120,65	116,08
<b>ESP 6.3</b>	-	12641,50	1930,42	19928,37	-	11207,12	369,76	6827,17	141,54	44,04	525,26	155,76	235,46
<b>ESP 6.4</b>	-	29889,43	450,79	10949,79	-	2218,99	192,96	710,27	27,84	13,90	133,31	24,76	42,53
<b>ESP 6.5</b>	-	14010,16	4352,61	15647,00	-	10674,56	253,20	2978,04	0,00	77,57	323,28	140,59	210,28
<b>ESP 6.6</b>	-	11980,04	2698,16	10757,45	-	15762,90	332,04	3269,62	179,58	76,66	634,70	299,37	213,22
<b>ESP 6.7</b>	-	16480,13	2611,38	16490,93	-	10982,10	356,87	2756,27	99,77	75,18	533,85	97,98	177,20
<b>ESP 6.8</b>	-	13827,16	2645,79	8424,72	-	15820,77	289,88	3183,20	-	58,07	431,15	127,88	208,42
<b>ESP 7.1</b>	305,42	27644,71	173,29	11712,61	7487,32	359,13	81,16	154,70	1878,26	163,41	145,23	32,48	30,63
<b>ESP 7.2</b>	78,41	13302,07	1697,27	15408,67	14566,29	2793,43	707,54	1683,08	140,45	79,03	308,09	146,61	448,68
<b>ESP 7.3</b>	170,14	13374,54	1124,36	21304,92	11422,98	3810,26	415,38	1447,14	253,20	61,74	742,48	86,20	207,39
<b>ESP 7.4</b>	76,93	11160,35	1155,72	17401,51	17372,81	2209,87	380,46	1095,61	76,24	44,61	263,82	70,70	120,00
ESP 7.5	79,19	9792,90	482,27	24353,86	15752,37	2664,21	610,26	1026,02	68,92	22,15	185,45	224,78	127,85
ESP 7.6	291,01	21787,30	1244,91	17203,50	-	11147,44	311,93	2016,22	183,93	45,76	726,58	130,90	377,33
<b>ESP 8.1</b>	-	27538,44	2012,29	5698,33	3551,44	2203,41	66,42	1920,46	30,50	41,61	28,56	99,69	26,43
<b>ESP 8.2</b>	-	18629,53	1976,07	5638,15	12606,25	1995,82	108,48	169,18	38,39	16,90	14,72	193,54	14,53
<b>ESP 8.3</b>	-	14707,15	4692,47	17762,38	-	8165,32	257,80	1402,21	-	21,04	92,21	202,20	102,73
<b>ESP 8.4</b>	362,11	11672,68	7052,31	14073,68	-	7780,09	335,06	1096,83	81,32	41,95	70,85	170,47	41,93
<b>HEM 9.1</b>	-	9076,65	8340,18	21766,57	19877,67	7217,13	1232,45	1583,17	443,51	104,57	106,03	493,81	463,40
<b>HEM 9.2</b>	-	8547,16	4949,39	22175,99	20645,01	15510,32	463,87	896,45	172,74	73,49	103,25	316,49	322,10
<b>HEM 9.3</b>	130,29	8531,16	6142,66	27001,02	24686,14	3395,70	512,67	763,48	234,97	218,92	111,90	153,53	255,32

\* todos resultados estão expressos em ppm

**ANEXO D – Dados da Microtermometria das Inclusões Fluidas em  
Hematita, Especularita e Quartzo**

**Tabela 13.** Dados microtermométricos da hematita tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol Molar (cm <sup>3</sup> /mol)
HB2	1	-30,3	-6,9	243,2	L	0,1	10,355	1,977	0,034	469	475	0,905	21,43
HB2	2	-33,8	-12,6	179,9	L	0,1	16,519	3,386	0,057	527	631	1,003	20,26
HB2	3	-37,9	-13,1	146,4	L	0,1	16,977	3,499	0,059	532	644	1,032	19,77
HB2	4	-37,2	-13,2	240,0	L	0,1	17,067	3,521	0,06	533	647	0,958	21,33
HB2	5	-37,8	-15,6	225,7	L	0,1	19,108	4,042	0,068	557	709	0,984	21,11
HB2	6	-34,9	-12,2	232,4	L	0,1	16,145	3,295	0,056	523	621	0,959	21,15
HB2	7	-37,7	-12,9	227,4	L	0,1	16,795	3,454	0,059	530	639	0,967	21,09
HB2	8	-42,2	-14,9	222,6	L	0,1	18,535	3,893	0,066	550	690	0,982	21,05
HB2	9	-38,9	-12,2	223,3	L	0,1	16,145	3,295	0,056	523	621	0,966	20,98
HB2	10	-34,2	-12,6	228,3	L	0,1	16,519	3,386	0,057	527	631	0,965	21,06
HB2	11	-35,2	-14,0	232,4	L	0,1	17,772	3,698	0,062	541	667	0,969	21,17
HB2	12	-39,8	-13,3	227,6	L	0,1	17,156	3,544	0,06	534	649	0,969	21,08

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.



**Tabela 14.** Dados microtermométricos da especularita tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Molar <sub>(l)</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)
EM1	1	-26,4	-6,7	245,1	L	0,1	10,101	1,923	0,033	467	468	0,901	21,48
EM1	2	-28,0	-8	253,5	L	0,1	11,702	2,268	0,039	481	508	0,905	21,64
EM1	3	-29,0	-6,7	248,2	L	0,1	10,101	1,923	0,033	467	468	0,897	21,57
EM1	4	-27,8	-7,3	239,8	L	0,2	10,855	2,084	0,036	474	487	0,913	21,33
EM1	5	-27,0	-6,3	244,7	L	0,1	9,583	1,814	0,032	462	456	0,896	21,54
EM1	6	-29,1	-9,4	243,6	L	0,2	13,298	2,624	0,045	496	547	0,928	21,37
EF1	7	-27,3	-7,3	244,2	L	0,1	10,855	2,084	0,036	474	487	0,908	21,44
EF1	8	-28,7	-8,3	243,7	L	0,1	12,055	2,345	0,041	484	517	0,918	21,42
EF1	9	-28,1	-6,4	246,9	L	0,1	9,714	1,841	0,032	463	459	0,895	21,57
EF1	10	-26,4	-5,6	245,8	L	0,1	8,649	1,62	0,028	454	432	0,887	21,59
EF1	11	-26,4	-3,1	243,3	L	0,1	5,012	0,903	0,016	420	340	0,855	21,83
EF1	12	-28,3	-2,6	244,7	L	0,1	4,232	0,756	0,013	413	320	0,845	21,95
EF1	13	-27,0	-3,7	228,6	L	0,1	5,926	1,078	0,019	429	363	0,882	21,29
EF1	14	-27,2	-7,6	247,5	L	0,1	11,222	2,163	0,038	477	496	0,908	21,54
EF1	15	-27,9	-9,2	242,4	L	0,1	13,078	2,574	0,044	494	542	0,928	21,34
EF1	16	-28,1	-6,8	196,4	L	0,1	10,228	1,95	0,034	468	472	0,949	20,44
EF1	17	-29,2	-7,2	199,8	L	0,1	10,731	2,057	0,036	473	484	0,949	20,51
EF1	18	-28,7	-6,9	200,4	L	0,1	10,355	1,977	0,034	469	475	0,946	20,5

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.

**Tabela 15.** Dados microtermométricos do quartzo tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Molar <sub>(l)</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)
QP1	1	-26,2	-6,7	234,7	L	0,1	10,101	1,923	0,033	467	468	0,912	21,22
QP1	2	-27,4	-6,0	156,8	L	0,1	9,188	1,731	0,03	459	446	0,973	19,77
QP1	3	-29,8	-7,2	238,4	L	0,1	10,731	2,057	0,036	473	484	0,913	21,33
QP1	4	-22,1	-5,5	240,4	L	0,1	8,513	1,592	0,028	453	429	0,892	21,47
QP1	5	-22,1	-7,2	161,2	L	0,1	10,731	2,057	0,036	473	484	0,979	19,89
QP1	6	-26,0	-7,0	234,5	L	0,1	10,481	2,003	0,035	470	478	0,915	21,24
QP1	7	-25,3	-5,4	175,9	L	0,1	8,375	1,564	0,027	451	425	0,953	20,05
QP1	8	-26,1	-6,0	162,7	L	0,1	9,188	1,731	0,03	459	446	0,968	19,86
QP1	9	-25,1	-6,2	168,3	L	0,1	9,452	1,786	0,031	461	452	0,966	19,95
QP1	10	-25,3	-6,6	261,8	L	0,1	9,973	1,895	0,033	466	465	0,88	21,98
QP1	11	-26,2	-7,2	154,9	L	0,1	10,731	2,057	0,036	473	484	0,983	19,8
QP1	12	-25,1	-5,4	302,9	L	0,1	8,375	1,564	0,027	451	425	0,805	23,73
QP1	13	-25,7	-3,1	318,2	L	0,1	5,012	0,903	0,016	420	340	0,729	25,6
QP1	14	-26,4	-6,2	385,1	L	0,1	9,452	1,786	0,031	461	452	0,666	28,92
QP1	15	-25,1	-6,2	377,4	L	0,1	9,452	1,786	0,031	461	452	0,683	28,2
QP1	16	-26,6	-6,2	296,8	L	0,1	9,452	1,786	0,031	461	452	0,828	23,27
QP1	17	-28,5	-11,4	300,8	L	0,1	15,374	3,109	0,053	515	600	0,886	22,74
QP1	18	-27,1	-8,4	376,4	L	0,1	12,171	2,371	0,041	485	519	0,735	26,78
QP1	19	-27,7	-9,8	315,9	L	0,1	13,732	2,724	0,047	500	558	0,851	23,39

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.

**Continuação Tabela 15.** Dados microtermométricos do quartzo tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Molar <sub>(l)</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)
QP1	20	-26,5	-5,7	322,4	L	0,1	8,785	1,648	0,029	455	436	0,778	24,65
QP1	21	-26,9	-6,4	327,9	L	0,1	9,714	1,841	0,032	463	459	0,782	24,68
QP1	22	-28,1	-8,2	342,5	L	0,1	11,938	2,32	0,04	483	514	0,79	24,85
QP1	23	-28,7	-1,8	329,3	L	0,1	2,956	0,521	0,009	401	288	0,67	27,43
QP1	24	-25,7	-11	295,2	L	0,1	14,977	3,014	0,052	512	590	0,889	22,63
QP1	25	-27,1	-8,7	383,9	L	0,1	12,516	2,448	0,042	489	528	0,727	27,13
QP1	26	-26,1	-9,9	402,0	L	0,1	13,839	2,748	0,047	501	561	0,716	27,83
QP1	27	-26,9	-6,1	309,7	L	0,1	9,32	1,759	0,031	460	449	0,807	23,88
QP1	28	-26,1	-6,8	299,7	L	0,1	10,228	1,95	0,034	468	472	0,833	23,27
QP1	29	-25,8	-5,9	310,3	L	0,1	9,054	1,703	0,03	458	442	0,802	23,97
QP1	30	-29,6	-6,5	310,9	L	0,1	9,844	1,868	0,033	465	462	0,812	23,84
QP1	31	-28,1	-12,9	376,7	L	0,1	16,795	3,454	0,059	530	639	0,804	25,36
QP1	32	-27,9	-13,2	318,7	L	0,1	17,067	3,521	0,06	533	647	0,882	23,19
QP1	33	-27,9	-11,9	299,6	L	0,1	15,86	3,225	0,055	520	613	0,892	22,69
QP1	34	-26,8	-11,1	304,1	L	0,1	15,077	3,038	0,052	513	593	0,88	22,87
QP1	35	-26,7	-0,1	310,0	L	0,1	0,166	0,028	0,001	376	221	0,667	27,08
QP1	36	-26,1	-1,8	328,9	L	0,1	2,956	0,521	0,009	401	288	0,671	27,39
QP1	37	-	-10,0	326,8	L	0,2	13,945	2,773	0,048	502	564	0,839	23,78
QP1	38	-	-9,7	258,5	L	0,2	13,624	2,699	0,046	499	555	0,916	21,69

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.

**Continuação Tabela 15.** Dados microtermométricos do quartzo tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Molar <sub>(l)</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)
QP1	39	-	-6,3	415,1	L	0,2	9,583	1,814	0,032	462	456	0,598	32,29
QP1	40	-	-11,1	299,3	L	0,2	15,077	3,038	0,052	513	593	0,885	22,73
QP1	41	-	-11,7	327,5	L	0,2	15,667	3,179	0,054	518	608	0,857	23,56
QP1	42	-	-12,5	293,4	L	0,2	16,427	3,363	0,057	526	629	0,903	22,49
QP1	43	-	-11,0	202,4	L	0,2	14,977	3,014	0,052	512	590	0,976	20,62
QP1	44	-	-6,8	299,3	L	0,2	10,228	1,95	0,034	468	472	0,834	23,26
QP1	45	-	-7,2	329,1	L	0,2	10,731	2,057	0,036	473	484	0,795	24,5
QP1	46	-	-5,9	311,6	L	0,2	9,054	1,703	0,03	458	442	0,8	24,03
QP1	47	-	-7,8	314,7	L	0,2	11,464	2,215	0,038	479	502	0,826	23,66
QP1	48	-	-11,9	306,9	L	0,2	15,86	3,225	0,055	520	613	0,884	22,9
QP1	49	-	-9,3	299,2	L	0,2	13,189	2,599	0,045	495	545	0,867	22,88
QP1	50	-	-12,4	309,7	L	0,2	16,333	3,34	0,057	525	626	0,885	22,96
QP1	51	-	-12,9	323,0	L	0,2	16,795	3,454	0,059	530	639	0,874	23,34
QP2	52	-	-11,4	137,7	L	0,2	15,374	3,109	0,053	515	600	1,026	19,65
QP2	53	-	-6,2	136,4	L	0,2	9,452	1,786	0,031	461	452	0,988	19,5
QP2	54	-30,0	-6,8	128,8	L	0,2	10,228	1,95	0,034	468	472	0,998	19,44
QP2	55	-31,3	-7,2	130,4	L	0,15	10,731	2,057	0,036	473	484	1	19,48
QP2	56	-35,4	-11,5	132,1	L	0,1	15,473	3,132	0,053	516	603	1,031	19,56
QP2	57	-28,7	-6,8	138,5	L	0,1	10,228	1,95	0,034	468	472	0,991	19,56

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.

**Continuação Tabela 15.** Dados microtermométricos do quartzo tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Molar <sub>(l)</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)
QP2	58	-31,4	-7,1	148,9	L	0,1	10,606	2,03	0,035	471	481	0,987	19,69
QP2	59	-	-9,4	140,9	L	0,15	13,298	2,624	0,045	496	547	1,009	19,65
QP2	60	-	-7,2	136,8	L	0,15	10,731	2,057	0,036	473	484	0,996	19,56
QP2	61	-	-6,7	132,6	L	0,15	10,101	1,923	0,033	467	468	0,994	19,46
QC15	62	-29,6	-9,6	185,7	L	0,2	13,516	2,674	0,046	498	553	0,979	20,3
QC15	63	-27,9	-9,7	216	L	0,2	13,624	2,699	0,046	499	555	0,955	20,8
QC15	64	-26,7	-9,7	181,1	L	0,2	13,624	2,699	0,046	499	555	0,983	20,22
QC15	65	-28,1	-9,4	192,4	L	0,2	13,298	2,624	0,045	496	547	0,972	20,4
QC15	66	-26,8	-11,1	194,4	L	0,2	15,077	3,038	0,052	513	593	0,982	20,48
QC15	67	-27,9	-10,8	221,6	L	0,2	14,775	2,966	0,051	510	585	0,959	20,94
QC15	68	-26,1	-11,9	271,6	L	0,1	15,86	3,225	0,055	520	613	0,921	21,97
QC15	69	-	-9,8	275,7	L	0,1	13,732	2,724	0,047	500	558	0,899	22,15
QC15	70	-	-10,3	230,7	L	0,2	14,26	2,846	0,049	505	572	0,947	21,11
QC15	71	-	-9,8	240,2	L	0,2	13,732	2,724	0,047	500	558	0,935	21,3
QC15	72	-	-9,4	181,2	L	0,2	13,298	2,624	0,045	496	547	0,981	20,22
QC15	73	-	-10,1	218,3	L	0,2	14,051	2,797	0,048	503	566	0,956	20,87
QC15	74	-	-12,1	254,7	L	0,1	16,051	3,272	0,056	522	618	0,938	21,61
QC15	75	-	-14,1	243,6	L	0,2	17,859	3,72	0,063	542	670	0,961	21,41
QC15	76	-	-9,7	228,2	L	0,1	13,624	2,699	0,046	499	555	0,945	21,03

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.

**Continuação Tabela 15.** Dados microtermométricos do quartzo tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Molar <sub>(l)</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)
QC15	77	-	-9,6	198,2	L	0,1	13,516	2,674	0,046	498	553	0,969	20,51
QC15	78	-	-11,1	195,9	L	0,15	15,077	3,038	0,052	513	593	0,981	20,5
QC15	79	-	-12,7	241	L	0,2	16,612	3,409	0,058	528	634	0,955	21,33
QC15	80	-	-9,4	207,1	L	0,15	13,298	2,624	0,045	496	547	0,961	20,65
QC15	81	-	-11,1	213,6	L	0,1	15,077	3,038	0,052	513	593	0,967	20,8
QC15	82	-	-10	230,5	L	0,1	13,945	2,773	0,048	502	564	0,945	21,11
QPT3	83	-32,1	-13,8	100,7	L	0,1	17,598	3,654	0,062	539	662	1,073	19,12
QPT3	84	-32,1	-14,3	112,3	L	0,2	18,03	3,764	0,063	544	675	1,068	19,25
QPT3	85	-30,9	-13,9	181,8	L	0,1	17,686	3,676	0,062	540	664	1,01	20,33
QPT3	86	-29,3	-14	107,3	L	0,15	17,772	3,698	0,062	541	667	1,07	19,19
QPT3	87	-28,1	-14,1	105,7	L	0,2	17,859	3,72	0,063	542	670	1,072	19,18
QPT3	88	-29,3	-13,5	327,9	L	0,1	17,334	3,588	0,061	536	654	0,874	23,44
QPT3	89	-31,4	-14,7	352,9	L	0,2	18,368	3,85	0,065	548	685	0,854	24,17
QPT3	90	-32,0	-13,9	323,3	L	0,15	17,686	3,676	0,062	540	664	0,882	23,27
QPT3	91	-40,2	-13,8	329,1	L	0,15	17,598	3,654	0,062	539	662	0,875	23,46
QPT3	92	-36,4	-14	394,7	L	0,1	17,772	3,698	0,062	541	667	0,791	25,94
QPT3	93	-34,3	-15,1	387,4	L	0,1	18,701	3,936	0,066	552	695	0,813	25,43
QPT3	94	-38,2	-14	388,9	L	0,1	17,772	3,698	0,062	541	667	0,8	25,67
QPT3	95	-29,1	-13,7	358,1	L	0,1	17,511	3,632	0,061	538	659	0,839	24,42

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.

**Continuação Tabela 15.** Dados microtermométricos do quartzo tratados no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

Amostra	IF	Te (°C)	Tf (°C)	Th (°C)	Th to	Vol Vap (%)	% equiv. NaCl (p/p)	M NaCl (mol/Kg)	X NaCl	Tc (°C)	Pc (bar)	d <sub>(l)</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Vol. Molar <sub>(l)</sub> (cm <sup>3</sup> /mol)
QPT3	96	-33,2	-14,3	104,2	L	0,2	18,03	3,764	0,063	544	675	1.075	19,13
QPT3	97	-36,4	-14,2	342,4	L	0,2	17,945	3,742	0,063	543	672	0,862	23,84
QPT3	98	-30,9	-14	118,7	L	0,1	17,772	3,698	0,062	541	667	1,06	19,36
QPT3	99	-29,6	-14,1	124,3	L	0,2	17,859	3,72	0,063	542	670	1.056	19,46
QPT4	100	-23,9	-11	121,2	L	0,1	14,977	3,014	0,052	512	590	1.035	19,45
QPT4	101	-28,4	-10,3	118	L	0,1	14,26	2,846	0,049	505	572	1.031	19,39
QPT4	102	-23,4	-10,8	321,7	L	0,1	14,775	2,966	0,051	510	585	0,855	23,47
QPT4	103	-27,9	-11,3	398,7	L	0,1	15,276	3,085	0,053	514	598	0,747	26,99
QPT4	104	-28,3	-10,5	337,7	L	0,1	14,468	2,894	0,05	507	577	0,831	24,13
QPT4	105	-27,1	-10,1	318,2	L	0,1	14,051	2,797	0,048	503	566	0,852	23,43
QPT4	106	-28,4	-7,2	322,4	L	0,1	10,731	2,057	0,036	473	484	0,805	24,17
QPT4	107	-29,9	-10,8	320,1	L	0,1	14,775	2,966	0,051	510	585	0,857	23,42
QPT4	108	-28,7	-9,4	122,2	L	0,1	13,298	2,624	0,045	496	547	1.022	19,42
QPT4	109	-27,5	-11,1	115,9	L	0,1	15,077	3,038	0,052	513	593	1.039	19,36
QPT4	110	-27,0	-10,7	117,1	L	0,1	14,673	2,942	0,05	509	582	1.035	19,36

Te = temperatura eutética; Tf = temperatura de fusão do gelo; Th = temperatura de homogeneização para líquido (L) ou vapor (V); Vol. Vap. = volume da fase vapor; M = molalidade; X = fração molar; Tc = temperatura crítica; Pc = pressão crítica; d<sub>(l)</sub> = densidade da fase líquida; Vol. Molar<sub>(l)</sub> = volume molar da fase líquida.

**Tabela 16.** Dados de pressão e temperatura de formação da hematita obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra HB2					
	IF 1	IF 2	IF 3	IF 4	IF 5	IF 6
(Th <sub>total</sub> )	21 (243,2°C)	7 (179,9°C)	3 (146,4°C)	20 (240,0°C)	15 (225,7°C)	17 (232,4°C)
200	-	402	1196	-	-	-
300	834	2366	3420	960	1269	1099
400	2267	4331	5645	2528	2956	2700
500	3699	6295	7870	4095	4643	4301
600	5131	8259	10095	5662	6331	5902
700	6563	10224	12320	7230	8018	7502
800	7995	12188	14545	8797	9706	9103
900	9427	14152	16770	10364	11393	10704
1000	10859	16117	18994	11931	13080	12305

T (°C)	P (bar) / Amostra HB2					
	IF 7	IF 8	IF 9	IF 10	IF 11	IF 12
(Th <sub>total</sub> )	15 (227,4°C)	14 (222,6°C)	14 (223,3°C)	16 (228,3°C)	17 (232,4°C)	15 (227,6°C)
200	-	-	-	-	-	-
300	1208	1330	1287	1187	1116	1208
400	2852	3030	2946	2820	2742	2856
500	4495	4731	4606	4453	4368	4504
600	6138	6431	6265	6087	5994	6151
700	7782	8131	7924	7720	7620	7799
800	9425	9832	9584	9353	9246	9447
900	11069	11532	11243	10986	10872	11095
1000	12712	13232	12902	12619	12498	12742

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.



**Tabela 17.** Dados de pressão e temperatura de formação da especularita obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra EM1					
	IF 1	IF 2	IF 3	IF 4	IF 5	IF 6
(Th <sub>total</sub> )	22 (245,1°C)	26 (253,5°C)	24 (248,2°C)	20 (239,8°C)	22 (244,7°C)	21 (243,6°C)
200	-	-	-	-	-	-
300	800	676	749	899	802	857
400	2217	2072	2148	2360	2212	2339
500	3634	3469	3548	3820	3622	3822
600	5051	4866	4947	5281	5033	5304
700	6467	6263	6347	6741	6443	6786
800	7884	7659	7746	8202	7853	8269
900	9301	9056	9146	9663	9263	9751
1000	10718	10453	10545	11123	10674	11233

T (°C)	P (bar) / Amostra EF1					
	IF 7	IF 8	IF 9	IF 10	IF 11	IF 12
(Th <sub>total</sub> )	22 (244,2°C)	22 (243,7°C)	23 (246,9°C)	22 (245,8°C)	21 (243,3°C)	22 (244,7°C)
200	-	-	-	-	-	-
300	823	844	766	775	788	762
400	2258	2303	2167	2163	2141	2101
500	3693	3763	3567	3552	3494	3439
600	5128	5222	4967	4941	4847	4778
700	6564	6682	6367	6329	6200	6116
800	7999	8141	7767	7718	7553	7455
900	9434	9601	9167	9106	8906	8793
1000	10869	11061	10568	10495	10258	10132

T (°C)	P (bar) / Amostra EF1					
	IF 13	IF 14	IF 15	IF 16	IF 17	IF 18
(Th <sub>total</sub> )	16 (228,6°C)	23 (247,5°C)	21 (242,4°C)	9 (196,4°C)	9 (199,8°C)	9 (200,4°C)
200	-	-	-	70	12	-
300	1045	770	877	1778	1711	1688
400	2487	2193	2362	3486	3409	3374
500	3928	3616	3848	5193	5108	5060
600	5369	5038	5333	6901	6806	6746
700	6811	6461	6819	8608	8505	8432
800	8252	7884	8305	10316	10203	10117
900	9694	9307	9790	12023	11902	11803
1000	11135	10729	11276	13731	13600	13489

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

**Tabela 18.** Dados de pressão e temperatura de formação do quartzo obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 1	IF 2	IF 3	IF 4	IF 5	IF 6
(Th <sub>total</sub> )	18 (234,7°C)	4 (156,8°C)	29 (238,4°C)	20 (240,4°C)	5 (161,2°C)	18 (234,5°C)
200		836			761	
300	982	2763	953	864	2709	990
400	2458	4690	2453	2280	4657	2475
500	3934	6617	3953	3696	6605	3959
600	5410	8543	5453	5113	8553	5443
700	6887	10470	6953	6529	10501	6928
800	8363	12397	8453	7945	12450	8412
900	9839	14324	9953	9361	14398	9896
1000	11315	16251	11453	10777	16346	11381

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 7	IF 8	IF 9	IF 10	IF 11	IF 12
(Th <sub>total</sub> )	7 (175,9°C)	5 (162,7°C)	6 (168,3°C)	31 (154,9°C)	4 (154,9°C)	63 (302,9°C)
200	437	710	596		902	
300	2222	2599	2459	536	2892	
400	4006	4489	4321	1858	4883	1115
500	5791	6378	6183	3180	6873	2197
600	7575	8268	8046	4502	8864	3280
700	9360	10157	9908	5824	10854	4363
800	11144	12047	11770	7147	12845	5446
900	12929	13936	13633	8469	14835	6529
1000	14713	15826	15495	9791	16826	7612

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 13	IF 14	IF 15	IF 16	IF 17	IF 18
(Th <sub>total</sub> )	78 (318,2°C)	163 (385,1°C)	152 (377,4°C)	57 (296,8°C)	61 (300,8°C)	151 (376,4°C)
200						
300				93		
400	850	270	322	1223	1245	341
500	1795	987	1072	2353	2438	1144
600	2739	1705	1822	3483	3631	1948
700	3683	2422	2573	4613	4824	2751
800	4628	3139	3323	5743	6017	3555
900	5572	3857	4074	6873	7210	4358
1000	6516	4574	4824	8003	8403	5162

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

**Continuação Tabela 18.** Dados de pressão e temperatura de formação do quartzo obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 19	IF 20	IF 21	IF 22	IF 23	IF 24
(Th <sub>total</sub> )	76 (315,9°C)	82 (322,4°C)	89 (327,9°C)	106 (342,5°C)	90 (329,3°C)	56 (295,2°C)
200						
300						114
400	997	852	796	650	674	1332
500	2091	1844	1776	1595	1500	2549
600	3186	2836	2756	2541	2327	3766
700	4280	3828	3737	3486	3153	4983
800	5375	4820	4717	4432	3979	6200
900	6470	5812	5698	5377	4805	7417
1000	7564	6804	6678	6322	5632	8634

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 25	IF 26	IF 27	IF 28	IF 29	IF 30
(Th <sub>total</sub> )	162 (383,9°C)	188 (402,0°C)	69 (309,7°C)	60 (299,7°C)	70 (310,3°C)	70 (310,9°C)
200						
300				63		
400	287		1029	1190	1017	1019
500	1066	902	2092	2317	2073	2084
600	1845	1630	3155	3443	3129	3149
700	2623	2359	4218	4570	4185	4214
800	3402	3087	5281	5696	5241	5279
900	4180	3815	6344	6823	6297	6344
1000	4959	4544	7407	7949	7354	7408

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 31	IF 32	IF 33	IF 34	IF 35	IF 36
(Th <sub>total</sub> )	151 (376,7°C)	78 (318,7°C)	60 (299,6°C)	64 (304,1°C)	69 (310,0°C)	90 (328,9°C)
200						
300			65			
400	351	992	1271	1188	866	679
500	1210	2115	2477	2360	1752	1508
600	2068	3239	3683	3532	2638	2337
700	2927	4363	4889	4704	3524	3166
800	3786	5487	6095	5876	4410	3995
900	4645	6611	7301	7048	5296	4824
1000	5503	7734	8506	8220	6182	5652

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

**Continuação Tabela 18.** Dados de pressão e temperatura de formação do quartzo obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 37	IF 38	IF 39	IF 40	IF 41	IF 42
(Th <sub>total</sub> )	87 (326,8°C)	29 (258,5°C)	208 (415,1°C)	59 (299,3°C)	88 (327,5°C)	54 (293,4°C)
200						
300		610		67		
400	852	2010		1264	859	859
500	1896	3411	716	2461	1922	1922
600	2941	4811	1314	3658	2985	2985
700	3985	6211	1912	4855	4048	4048
800	5030	7611	2509	6052	5111	5111
900	6075	9012	3107	7249	6174	6174
1000	7119	10412	3705	8446	7237	7237

T (°C)	P (bar) / Amostra QP1					
	IF 43	IF 44	IF 45	IF 46	IF 47	IF 48
(Th <sub>total</sub> )	9 (202,4°C)	59 (299,3°C)	90 (329,1°C)	71 (311,6°C)	74 (314,7°C)	66 (306,9°C)
200						
300	1743	67				
400	3520	1195	792	999	986	1153
500	5296	2324	1782	2048	2056	2321
600	7073	3453	2772	3098	3126	3489
700	8850	4581	3762	4148	4195	4657
800	10627	5710	4752	5197	5265	5825
900	12403	6838	5742	6247	6335	6993
1000	14180	7967	6732	7296	7404	8161

T (°C)	P (bar) / Amostra QP2					
	IF 49	IF 50	IF 51	IF 52	IF 53	IF 54
(Th <sub>total</sub> )	59 (299,2°C)	69 (309,7°C)	83 (323,0°C)	3 (137,7°C)	2 (136,4°C)	2 (128,8°C)
200				1410	1318	1533
300	68			3668	3386	3684
400	1240	1116	929	5925	5454	5835
500	2411	2276	2028	8183	7523	7986
600	3582	3436	3127	10441	9591	10137
700	4754	4596	4226	12699	11660	12288
800	5925	5756	5325	14957	13728	14439
900	7096	6915	6425	17215	15797	16590
1000	8268	8075	7524	19473	17865	18741

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

**Continuação Tabela 18.** Dados de pressão e temperatura de formação do quartzo obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra QP2					
	IF 55	IF 56	IF 57	IF 58	IF 59	IF 60
(Th <sub>total</sub> )	2 (130,4°C)	2 (132,1°C)	3 (138,5°C)	3 (148,9°C)	3 (140,9°C)	2 (136,8°C)
200	1505	1567	1285	1039	1288	1339
300	3665	3871	3369	3066	3462	3454
400	5825	6176	5453	5093	5637	5569
500	7985	8480	7537	7120	7811	7684
600	10145	10785	9622	9147	9985	9799
700	12305	13089	11706	11174	12160	11914
800	14465	15394	13790	13201	14334	14028
900	16625	17698	15874	15228	16508	16143
1000	18784	20003	17959	17255	18683	18258

T (°C)	P (bar) / Amostra QC15					
	IF 61	IF 62	IF 63	IF 64	IF 65	IF 66
(Th <sub>total</sub> )	2 (132,6°C)	8(185,7°C)	12 (216,0°C)	7 (181,1°C)	8 (192,4°C)	8 (194,4°C)
200	1431	274		365	145	111
300	3550	2132	1406	2258	1953	1944
400	5670	3991	3066	4151	3761	3777
500	7790	5849	4725	6043	5569	5611
600	9909	7708	6385	7936	7377	7444
700	12029	9566	8044	9829	9184	9278
800	14148	11425	9704	11722	10992	11111
900	16268	13283	11364	13615	12800	12944
1000	18388	15142	13023	15508	14608	14778

T (°C)	P (bar) / Amostra QC15					
	IF 67	IF 68	IF 69	IF 70	IF 71	IF 72
(Th <sub>total</sub> )	14 (221,6°C)	37 (271,6°C)	40 (275,7°C)	16 (230,7°C)	20 (240,2°C)	7 (181,2°C)
200	-	-	-	-	-	361
300	1304	423	357	1110	923	2245
400	2950	1783	1662	2689	2434	4130
500	4596	3142	2966	4267	3944	6014
600	6242	4502	4271	5846	5455	7898
700	7888	5862	5576	7425	6965	9782
800	9534	7221	6880	9003	8476	11666
900	11180	8581	8185	10582	9986	13550
1000	12826	9941	9490	12160	11497	15435

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

**Continuação Tabela 18.** Dados de pressão e temperatura de formação do quartzo obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra QC15					
	IF 73	IF 74	IF 75	IF 76	IF 77	IF 78
(Th <sub>total</sub> )	13 (218,3°C)	27(254,7°C)	21 (243,6°C)	16 (228,2°C)	9 (198,2°C)	9 (195,9°C)
200	-	-			41	84
300	937	689	899	1152	1815	1907
400	2491	2151	2455	2735	3589	3730
500	4045	3612	4011	4317	5363	5553
600	5599	5073	5568	5899	7136	7376
700	7153	6535	7124	7482	8910	9199
800	8707	7996	8681	9064	10684	11022
900	10261	9458	10237	10646	12458	12845
1000	11815	10919	11793	12229	14232	14668

T (°C)	P (bar) / Amostra QC15					
	IF 79	IF 80	IF 81	IF 82	IF 83	IF 84
(Th <sub>total</sub> )	20 (241,0°C)	10 (207,1°C)	12 (213,6°C)	16 (230,5°C)	1 (100,7°C)	1 (112,3°C)
200	-	-	-	-	2593	2210
300	937	1599	1484	1110	5203	4729
400	2491	3309	3188	2684	7814	7248
500	4045	5020	4892	4258	10424	9767
600	5599	6730	6596	5832	13034	12285
700	7153	8440	8299	7406	15645	14804
800	8707	10151	10003	8980	18255	17323
900	10261	11861	11707	10554	20865	19842
1000	11815	13572	13411	12128	23475	22361

T (°C)	P (bar) / Amostra QPT3					
	IF 85	IF 86	IF 87	IF 88	IF 89	IF 90
(Th <sub>total</sub> )	7 (181,8°C)	1 (107,3°C)	1 (105,7°C)	89 (327,9°C)	119 (352,9°C)	83 (323,3°C)
200	366	2371	2426			
300	2336	4928	4998			
400	4306	7485	7570	869	580	933
500	6277	10042	10142	1951	1558	2042
600	8247	12599	12714	3033	2536	3151
700	10218	15156	15286	4115	3515	4260
800	12188	17713	17858	5197	4493	5369
900	14159	20270	20430	6279	5471	6478
1000	16129	22827	23002	7361	6450	7587

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

**Continuação Tabela 18.** Dados de pressão e temperatura de formação do quartzo obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

T (°C)	P (bar) / Amostra QPT3					
	IF 91	IF 92	IF 93	IF 94	IF 95	IF 96
(Th <sub>total</sub> )	90 (329,1°C)	177 (394,7°C)	167 (387,4°C)	169 (388,9°C)	126 (358,1°C)	1 (104,2,9°C)
200						2480
300						5067
400	855	219	273	260	522	7654
500	1935	1019	1111	1082	1467	10241
600	3014	1818	1949	1903	2412	12829
700	4094	2617	2786	2725	3357	15416
800	5173	3417	3624	3546	4302	18003
900	6252	4216	4462	4367	5247	20591
1000	7332	5015	5300	5189	6192	23178

T (°C)	P (bar) / Amostra QPT3					
	IF 97	IF 98	IF 99	IF 100	IF 101	IF 102
(Th <sub>total</sub> )	106 (342,4°C)	1 (118,7°C)	2 (124,3°C)	2 (121,2°C)	1 (118,0°C)	82 (321,7°C)
200	2480	2002	1832	1876	1955	1955
300	5067	4464	4248	4254	4337	4337
400	7654	6925	6665	6633	6719	6719
500	10241	9387	9082	9011	9102	9102
600	12829	11848	11499	11389	11484	11484
700	15416	14310	13916	13768	13866	13866
800	18003	16772	16332	16146	16249	16249
900	20591	19233	18749	18524	18631	18631
1000	23178	21695	21166	20903	21013	21013

T (°C)	P (bar) / Amostra QPT4					
	IF 103	IF 104	IF 105	IF 106	IF 107	IF 108
(Th <sub>total</sub> )	183 (398,7°C)	100 (337,7°C)	78 (318,2°C)	82 (322,4°C)	80 (320,1°C)	2 (122,2°C)
200						1805
300						4122
400	927	723	968	875	949	6439
500	2007	1723	2055	1897	2037	8756
600	3087	2723	3143	2919	3124	11073
700	4167	3723	4230	3941	4212	13390
800	5247	4724	5318	4963	5299	15708
900	6326	5724	6405	5985	6387	18025
1000	7406	6724	7493	7007	7474	20342

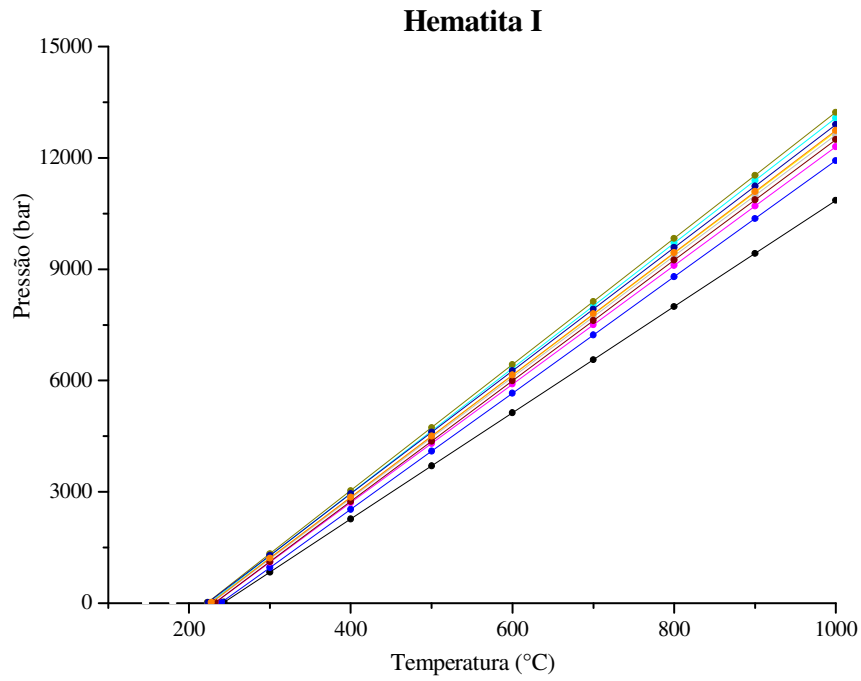
T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

**Continuação Tabela 18.** Dados de pressão e temperatura de formação do quartzo obtidos no programa MacFlinCor para o sistema H<sub>2</sub>O-NaCl-[KCl] (Bodnar & Vityk).

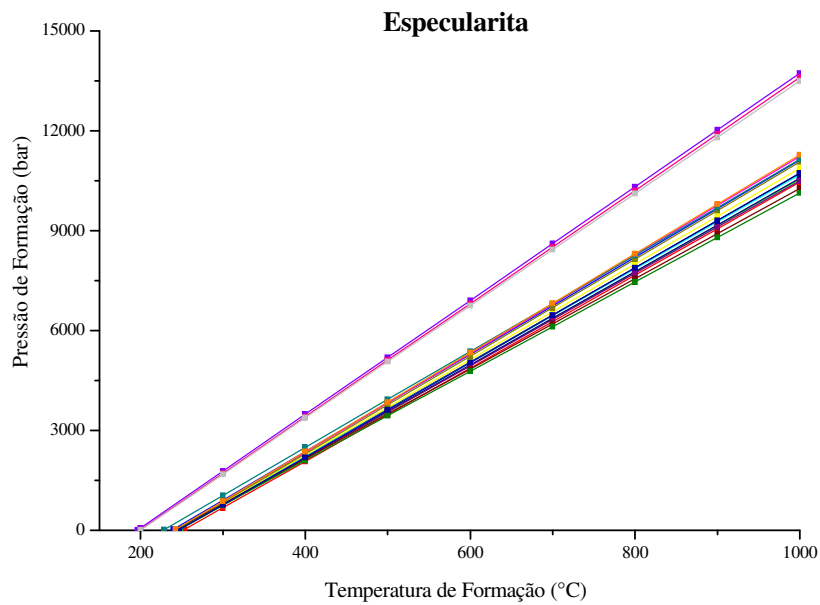
T (°C)	P (bar) / Amostra QPT4	
	IF 109	IF 110
(Th <sub>total</sub> )	1 (115,9°C)	1 (117,1°C)
200	2040	1993
300	4464	4395
400	6888	6798
500	9312	9200
600	11736	11602
700	14160	14005
800	16584	16407
900	19008	18810
1000	21433	21212

T = temperatura; P = pressão; Th<sub>total</sub> = temperatura de homogeneização total.

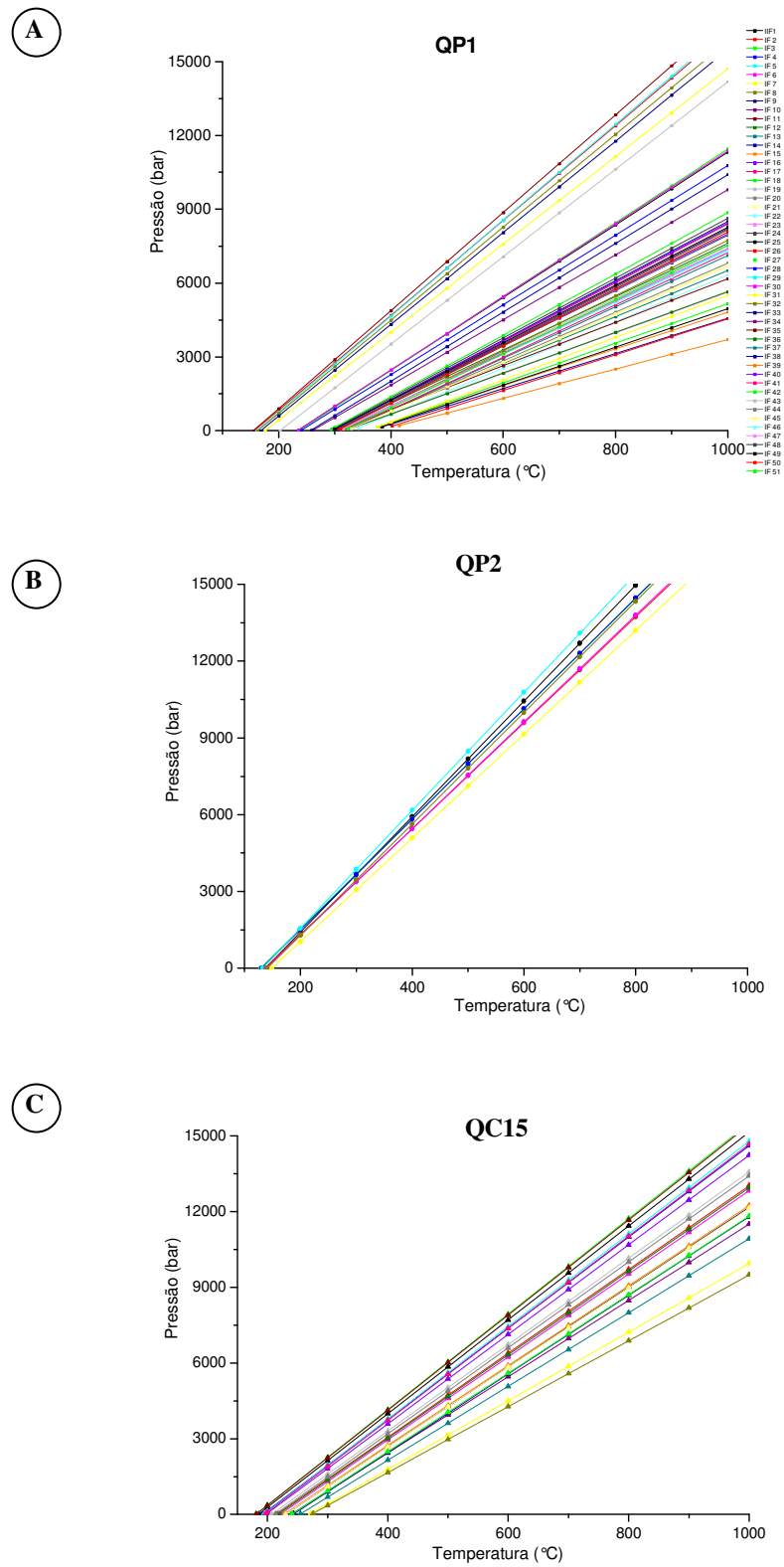




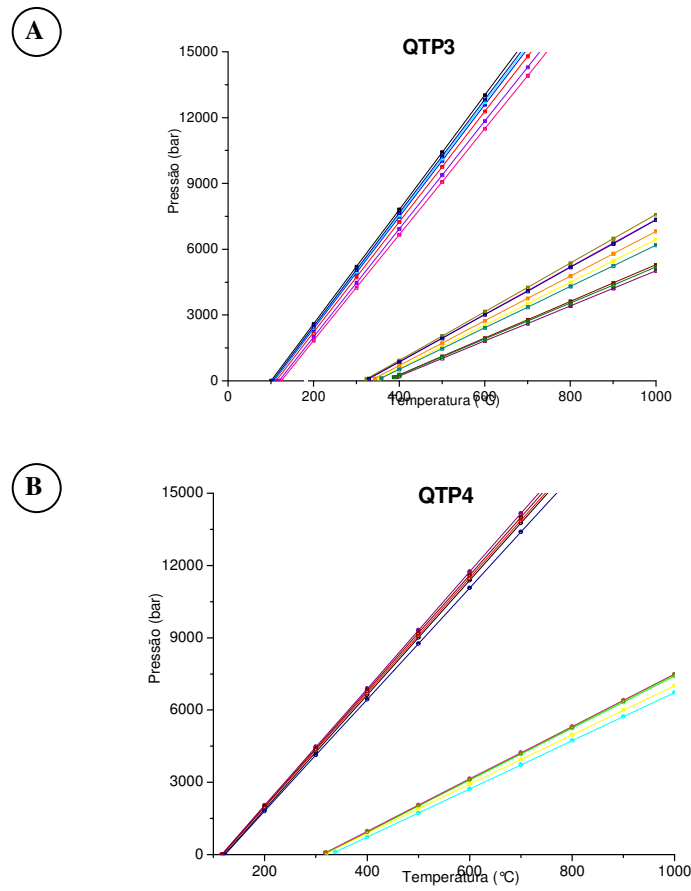
**Figura 1.** Diagrama das isócoras obtidas para a hematita I.



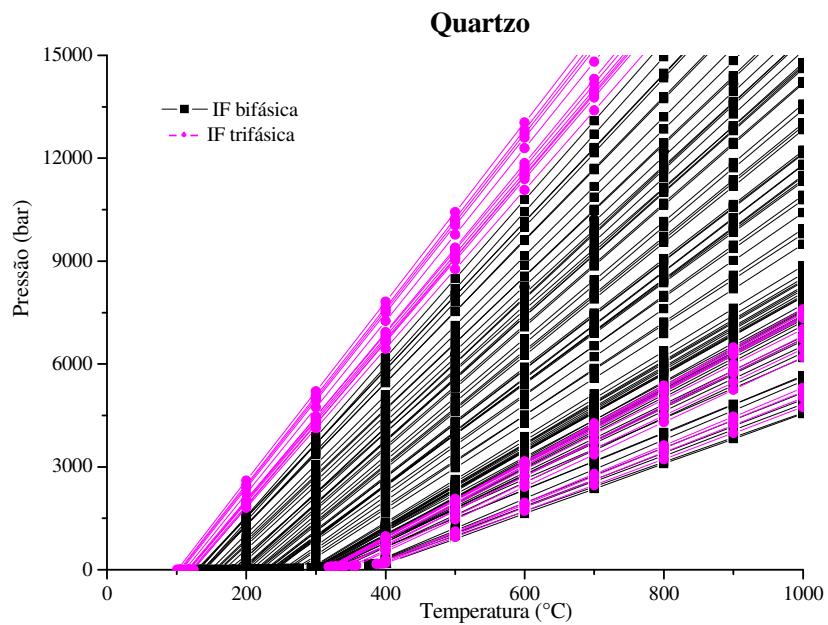
**Figura 2.** Diagrama das isócoras obtidas para a especularita (Hematita III).



**Figura 3.** Diagramas das isócoras para cada grupo de inclusões fluidas bifásicas (L+V) do quartzo para as amostras (A) QP1; (B) QP2; e (C) QC15.



**Figura 4.** Diagramas das isócoras para cada grupo de inclusões fluidas trifásicas (L+V+S) do quartzo para as amostra (A) QTP3 e (B) QTP4.



**Figura 5.** Diagrama de comparação das isócoras entre as IF bifásicas e trifásicas do quartzo.

**ANEXO E – ANÁLISE MAGNETOMÉTRICA E ESPECTROSCOPIA  
MÖSSBAUER**

A presença de magnetita, associada às amostras de Hematita I, II e III, não foi revelada pelos estudos petrográficos, nem pelas microanálises em microsonda eletrônica, uma vez que este último método não diferencia o estado de oxidação do Fe. Como consequência, optou-se pela realização de análises magnetométricas, seguido pela espectroscopia Mössbauer. As análises executadas visaram testar e verificar os dados até então obtidos. A disponibilidade e o fácil acesso aos equipamentos corroboraram para efetivação dessas análises.

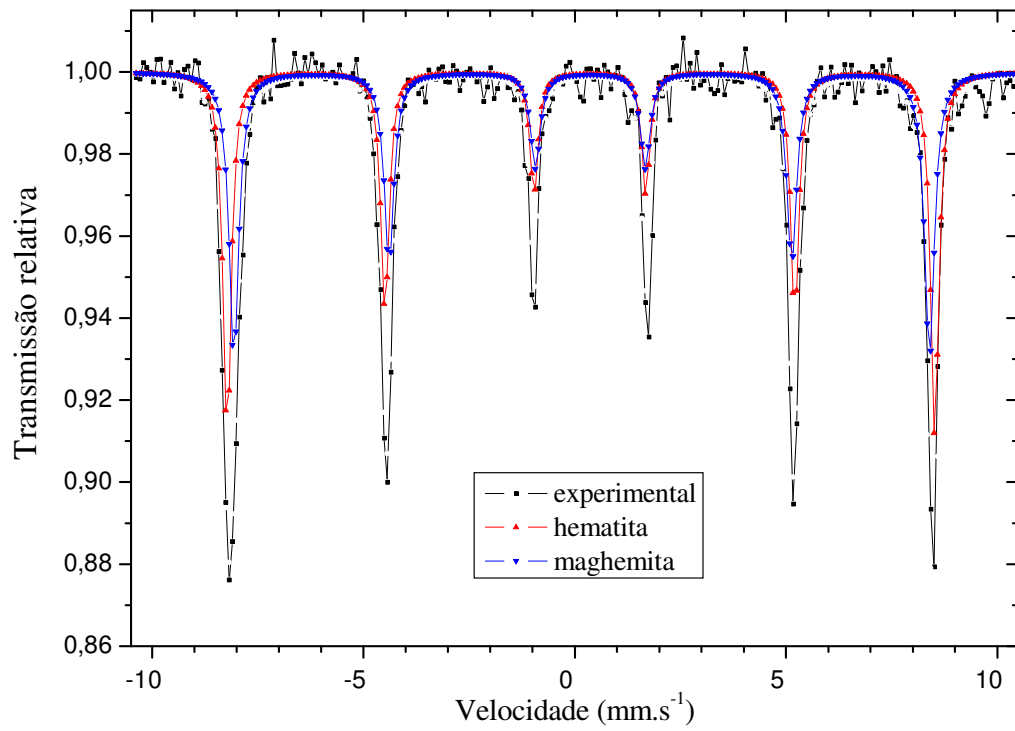
Através da análise magnetométrica por magnetização de saturação ( $13,6 \text{ J T}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ ) e por espectrometria Mössbauer à temperatura ambiente (298 K) (COEY et al, 1992), foi possível verificar a presença de maghemita junto à Hematita I (amostra FSP01-PROF.213,05m) (FIG. 6). Enfatizando o campo hiperfino ( $B_{hf}$ ) obtivemos valores de 51,93T para a hematita e 51,04T para a maghemita (TAB. 19), sendo seus respectivos padrões 51,75T e 45-52T (FABRIS; COEY, 2002).

Essas análises comprovam a ausência de magnetita (valor de referência do  $B_{hf}$  de 46T para o sítio octaédrico,  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  e de 49T para o sítio tetraédrico,  $\text{Fe}^{3+}$ ) concordando com os resultados dos estudos petrográficos. No entanto, a existência de maghemita, que é um mineral intermediário da transição da magnetita à hematita, sugere ser a Hematita I originada a partir de processos secundários de oxidação.

**Tabela 19** - Parâmetros Mössbauer referentes à medida a 298 K para a amostra FSP 01-PROF.213,05m da Serra do Sapo, CMD.

Parâmetros	Hematita	Maghemita
Largura de linha $\Gamma$ ( $\text{mm.s}^{-1}$ )	$0,23 \pm 0,01$	$0,28 \pm 0,01$
Deslocamento isomérico* $\delta$ ( $\text{mm.s}^{-1}$ )	$0,360 \pm 0,002$	$0,375 \pm 0,003$
Deslocamento quadropolar $\varepsilon$ ( $\text{mm.s}^{-1}$ )	$- 0,212 \pm 0,005$	$- 0,206 \pm 0,007$
Campo hiperfino $B_{hf}$ (T)	$51,93 \pm 0,03$	$51, 04 \pm 0,04$

\* deslocamento isomérico relativo ao  $\alpha\text{Fe}$



**Figura 6.** Espectro Mössbauer à temperatura ambiente ajustado da amostra FSP01-PROF.213,05m.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)