

Estudio mineralógico, microtermométrico y aspectos estructurales de la mineralización de topacio imperial de Antônio Pereira, Distrito de Ouro Preto (Minas Gerais) - Brasil

(Mineralogical and microthermometric studies and structural aspects of imperial topaz mineralization in Antônio Pereira, Ouro Preto District (Minas Gerais) - Brazil)

Arol Josue Rojas

Alumno de Maestría, Depart. de Geología, Escola de Minas de la Universidad Federal de Ouro Preto
DEGEO/EM/UFOP. E-Mail: arol@degeo.ufop.br

Rosa Maria da Silveira Bello

Dra., Instituto de Geociencias, Universidad de São Paulo. E-Mail: rosabell@usp.br

Issamu Endo

Dr., Prof., DEGEO/EM/UFOP. E-mail: issamu@degeo.ufop.br

Antonio Luciano Gandini

Dr., Prof., DEGEO/EM/UFOP. E-mail: gandini@degeo.ufop.br

Resumen

Las ocurrencias de topacio imperial de la mina de Antônio Pereira, Ouro Preto, MG, están asociadas a rocas carbonáticas metamórficas del Supergrupo Minas. La densidad del topacio varió desde 3,46 hasta 3,58. Los parámetros de celda unitaria son: 4,658 a 4,663 Å (a₀), 8,823 a 8,832 Å (b₀), 8,382 a 8,389 Å (c₀) y 344,65 a 345,46 Å³ (V). Los índices de refracción son: 1,622 a 1,630 (nX), 1,624 a 1,632 (nY), 1,633 a 1,640 (nZ) y 0,008 a 0,011 (B). Esas propiedades están coherentes con los bajos tenores de flúor obtenidos (16,48%/17,05% en peso). La espectroscopia en el infrarrojo y la microtermometría mostraron que las inclusiones fluidas representativas de los fluidos mineralizantes son formadas por H₂O (con Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺) y CO₂ ± CH₄. Las condiciones mínimas de atrapamiento de las inclusiones primarias fueron de 290/320°C y 2.349/2.497bar. Las inclusiones pseudosecundarias fueron aprisionadas en menores temperaturas, con presiones variables, sugiriendo atrapamiento durante procesos de deformación que presentan alternancia local en las condiciones de compresión. La microtermometría conjuntamente con los análisis estructurales y los tenores de flúor indicaron que las vetas con topacio fueron formadas a partir de fluidos hidrotermales originados durante el evento tectónico-metamórfico de edad Brasiliana.

Palabras clave: Topacio imperial, Ouro Preto, inclusiones fluidas.

Abstract

The occurrences of imperial topaz in the Antonio Pereira mine, Ouro Preto, Minas Gerais, are associated with the metamorphic carbonate rocks of the Minas Supergroup. The crystals have densities varying from 3.46 to 3.58. The parameters of the unitary cells obtained were: 4.658 to 4.663 Å (a₀), 8.823 to 8.832 Å (b₀), 8.382 to 8.389 Å (c₀), and 344.65 to 345.46 Å³ (V). The refraction indices presented the following variations: 1.622 to 1.630 (nX), 1.624 to 1.632 (nY), 1.633 to 1.640 (nZ), and 0.008 to 0.011 (B). These properties are coherent with the low fluorine contents obtained (16,48%/17,05wt%). Infrared spectroscopy and microthermometry showed that the fluid inclusions, which represent the mineralizing fluids, are formed by H₂O (with Ca²⁺, Mg²⁺ and Na⁺), and CO₂ ± CH₄. The minimal trapping T-P conditions of 290/320°C and 2,349/2,497bar were obtained for the primary fluid inclusions. The pseudo-secondary fluid inclusions were trapped at conditions of lower temperatures and variable pressures, during the deformation process under local alternating states of stress. The microthermometric studies, the structural analysis and the fluorine contents suggest that the mineralized veins were formed from hydrothermal fluids originated during the Brasiliano tectono-metamorphic event.

Keywords: Imperial topaz, Ouro Preto, fluid inclusions.

1. Introducción

En la Región de Ouro Preto existe, un gran número de ocurrencias de topacio imperial, entre las cuales podemos citar Boa Vista, Bocaina, Capão do Lana, Caxambu, JJC, Rodrigo Silva y Vermelhão, situadas en el Sinclinal Dom Bosco, y Antônio Pereira, constituyendo el único depósito localizado en el Anticlinal de Mariana (Figura 1), siendo esta última objeto del presente estudio.

La mina de topacio imperial del Distrito de Antônio Pereira se encuentra ubicada en la porción centro-sur del Estado de Minas Gerais aproximadamente a 106km de Belo Horizonte y a 7km al noreste de la ciudad de Ouro Preto. El acceso a la mina puede ser por las carreteras BR-356 hasta llegar al Municipio Mariana y la MG-129 hasta el Distrito de Antônio Pereira.

El topacio imperial ocurre generalmente en vetas centimétricas a decimétricas tanto cuarzosas como carbonáticas en mármoles dolomíticos de la Formación Gandarela y también en cuarcitas ferruginosas de la Formación Cercadinho que pertenecen al Supergrupo Minas. Estas vetas pueden contener además, mica, cuarzo, dolomita, rutilo y florencita $\{CeAl_3[(OH)_6(PO_4)_2]\}$ (Gandini 1994).

A lo largo del tiempo se han realizado innumerables estudios de carácter geológico en las ocurrencias de topacio imperial de la Región de Ouro Preto, aunque la mina de Antônio Pereira posee pocos datos publicados. Esos estudios apuntan para fluidos de origen metamórfico asociados a actividades magmáticas, siendo atribuidos a partir de evidencias indirectas edades distintas para la mineralización. De acuerdo con Pires et al. (1983) la mineralización de topacio fue originada en el evento *Transamazônico* (entre 2,26 y 2,11Ga), durante metamorfismo regional; Ferreira (1991), Gandini (1994) y Bello et al. (1996) sugieren que los fluidos mineralizantes serían provenientes de procesos hidrotermales asociados a la actividad volcánica ácida de probable edad meso-

cenozoica; Morteani et al. (2002) consideran la cristalización del topacio relacionada a fluidos metamórficos ricos en flúor originados en el *Brasiliano* (1.1 a 0.45Ga), edad también sugerida por Almeida (2004).

Las consideraciones mencionadas muestran la necesidad de estudios adicionales en la mina de Antônio Pereira, con el objetivo de caracterizar mineralógica y químicamente el topacio imperial de esa área, bien como esclarecer aspectos referentes a la génesis de la mineralización por medio de la integración de los resultados obtenidos por la microtermometría de las inclusiones fluidas con aquellos provenientes del análisis estructural de la región.

2. Aspectos estructurales de la mineralización

Las relaciones estructurales demuestran que las vetas que contienen el topacio imperial están asociadas a un sistema de fracturas de extensión relacionadas a los pliegues suaves de direcciones axiales N-S y E-W, así como a boudines. Ambas secciones estructurales fueron originadas durante la orogénesis de edad Brasiliana que afectó la región del Cuadrilátero Ferrífero, las cuales ya fueron caracterizadas y reconocidas por Endo (1988, 1997) y Chemale Jr. et al. (1994).

Las direcciones principales de las fracturas de extensión son N-S y E-W cuyos buzamientos varían entre 60° a 80°. Los ejes de los boudines poseen direcciones N-S y E-W. Adicionalmente estas mineralizaciones pueden ser cogenéticas a la última generación de las vetas auríferas de esta región bien como las ocurrencias de barita, cinabrio y fluorita entre otros minerales post-magmáticos del evento Brasiliano descritos tanto en la región de Antônio Pereira como en otras regiones del Cuadrilátero Ferrífero [Chauvet et al. 2001, Ribeiro-Kwitko & Oliveira 2004, Endo et al. 2007, Endo et al. (em preparação)].

3. Materiales y métodos

En la pesquisa fueron aplicados métodos químicos y mineralógicos, además de un estudio estructural detallado.

Fue estudiada la densidad relativa, de veinte cristales de topacio imperial, utilizando una Balanza Analítica BEL_{ENGINEERING} (Laboratorio de Geoquímica Ambiental - LGQA - DEGEO/EM/UFOP).

Se determinaron los tenores de flúor y los parámetros de celda unitaria de veinte cristales, utilizando un Difractómetro de Rayos X, *Shimadzu*, modelo XRD-6000 (Departamento de Química - DEQUI/ICEB/UFOP). Los registros fueron realizados con un conteo de 1.000cps, velocidad del goniómetro de 0,5°/min e intervalo de barrido de ángulos de 20° a 70°. En cada muestra fue adicionado aproximadamente 10% de NaCl como padrón. Para el cálculo de los tenores de flúor se utilizó el método propuesto por Ribbe & Rosenberg (1971), a partir de la ecuación: $\%F = 155,6 - 35,7(\Delta_{021})$, donde $\Delta_{021} = (2\theta_{NaCl200} - 2\theta_{topacio021})$.

Adicionalmente fueron tomados en cada muestra los valores de los índices de refracción utilizando un Refractómetro Gemológico *Topcon* para sólidos (Laboratorio de Gemología - DEGEO/EM/UFOP).

Se realizaron análisis térmico diferenciales (ATD/TG) a diez cristales, con un equipo *TA Instruments*, modelo SDT 2960 *Simultaneous* DTA-TGA (Laboratorio de Análisis Térmicas - DEQUI/ICEB/UFOP).

Se caracterizaron diez cristales de topacio imperial mediante espectroscopia infrarroja de absorción por transformada de Fourier (FTIR). Los espectros se obtuvieron a partir de pastillas realizadas de KBr (Bromuro de Potasio). Los registros fueron obtenidos en la zona correspondiente entre los 4.000 y 500cm⁻¹, por medio de un espectrómetro *Spectrum GX* de *Perkin Elmer* (Laboratorio de Física de Superficies de

la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes, Mérida-Venezuela).

Los estudios microtermométricos de las inclusiones fluidas fueron realizados en los laboratorios del Instituto de Geociencias de la Universidad de São Paulo (IGc/USP) y el laboratorio del DEGEO/EM/UFOP, utilizando platinas de enfriamiento/calentamiento CHAIXMECA, modelo MTM85. Para obtener los parámetros físico-químicos de los fluidos presentes en la mineralización, a través de los datos microtermométricos, fueron utilizadas las ecuaciones de estado de los programas *CLATHRATES* (Bakker 1997) y *FLUIDS 1* (Bakker 2003). Estos análisis fueron realizados con el objetivo de determinar las composiciones, densidades y salinidades de los fluidos presentes durante la formación del topacio y las variaciones en las condiciones de temperatura y presión reinantes durante

varias etapas de cristalización. Esos aspectos, junto a los demás datos mineralógicos y estructurales contribuyen a una mejor comprensión de la génesis de la mineralización.

4. Resultados y discusiones

Los datos de densidad relativa, parámetros de celda unitaria e índices de refracción fueron obtenidos con el objetivo de caracterizar mineralógicamente el topacio imperial de la Región de Ouro Preto. También tienen importancia por presentar relaciones con los tenores de flúor y oxidrilo.

Los tenores de flúor se registraron entre 16,48% y 17,05%. De acuerdo con la literatura la razón OH/F⁻ del topacio, está fuertemente relacionada con las propiedades mineralógicas, como por

ejemplo, densidad relativa, índices de refracción, parámetros de celda unitaria etc. Según Rosenberg (1967), Ribbe & Rosenberg (1971) y Deer et al. (1992), cuanto mayor es el porcentaje de flúor, mayor será el valor de la densidad y menores los índices de refracción y el parámetro b_0 de la celda unitaria. El topacio imperial de la Región de Ouro Preto presenta una mayor sustitución de F⁻ por oxidrilo, si se compara con valores descritos en la literatura de cristales de otras localidades (Petricorena, 1989; Deer et al., 1992; Gandini, 1994), sugiriendo cristalización en un ambiente hidrotermal, de acuerdo con Barton (1982).

Las densidades relativas de 17 muestras estudiadas variaron principalmente de 3,46 a 3,53, habiendo 2 valores mayores (3,56 y 3,58). Observándose que la mayoría de los valores se sitúan sobre o abajo de la curva de Deer et al. (1982), en el diagrama

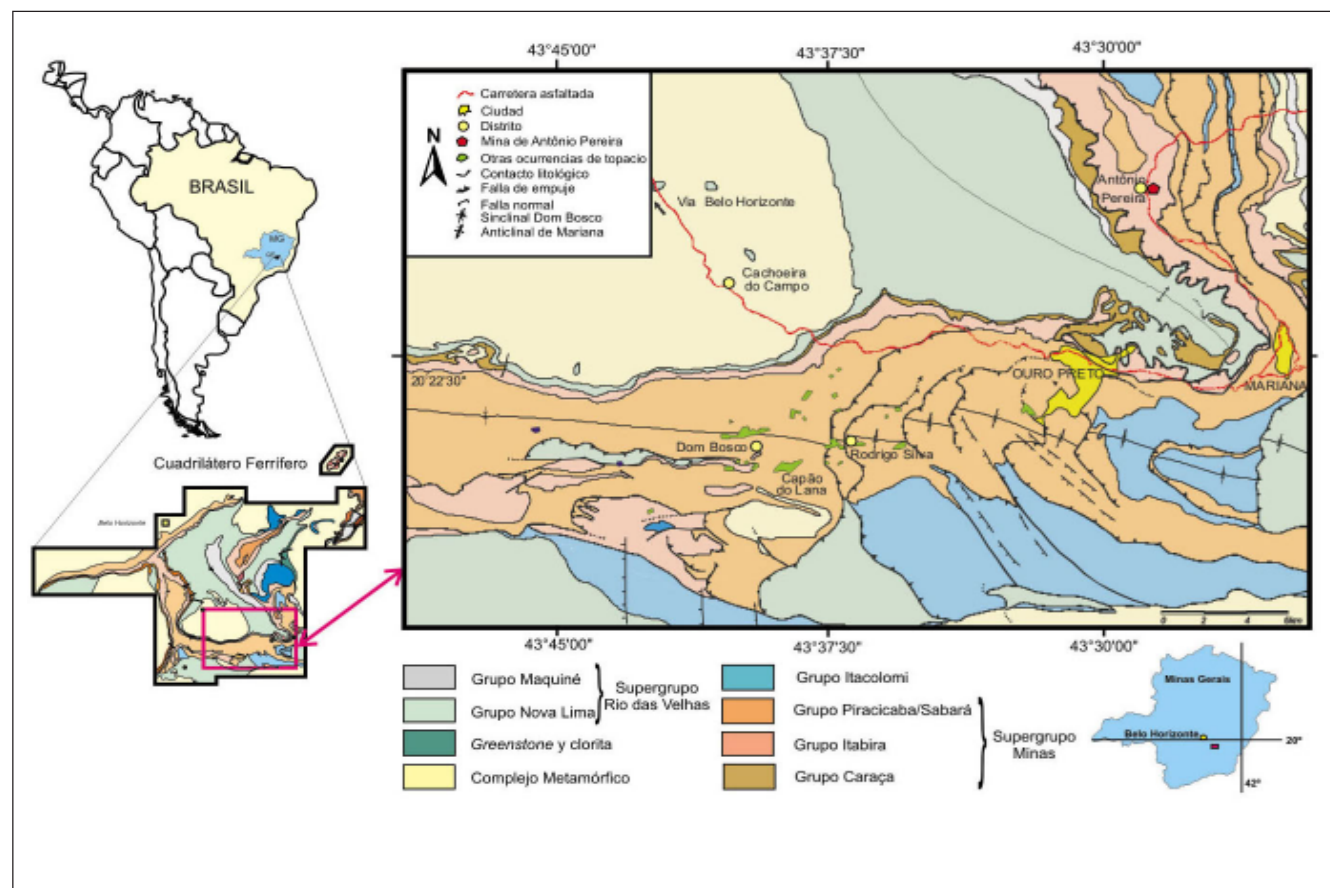


Figura 1 - Mapa geológico de la Región de Ouro Preto, con presencia de las principales minas de topacio imperial, ubicadas a lo largo del Sinclinal Dom Bosco y Anticlinal de Mariana (modificado de Almeida 2004).

densidad relativa vs. porcentaje molecular de OH/(OH+F), algunos de los mayores resultados están por encima de la misma. Así, a pesar de que la relación entre los valores de d y OH/(OH+F), presentada por Deer et al. (1982), no fue perfectamente establecida, la mayoría de las muestras estudiadas poseen valores bajos de porcentaje en flúor y densidades, estando de acuerdo con las consideraciones de esos autores. Los valores discrepantes son probablemente debidos a impurezas y microfracturas en los cristales.

Los parámetros de celda unitaria del topacio estudiado variaron de 4,658 a 4,663Å para a_0 , de 8,823 a 8,832Å para b_0 , y 8,382 a 8,389Å para c_0 ; el volumen de celda unitaria varió de 344,65 a 345,46Å³ (Rojas et al. 2007). Estos valores son compatibles con los obtenidos para cristales de topacio ricos en OH relacionados por Barton (1982). Para cristales de topacio ricos en flúor ese autor presenta valores de 4,6475 a 4,6465 (a_0), 8,7897 (b_0) y 8,3920 a 8,3918 (c_0) y un volumen de celda unitaria variando de 342,81 a 342,71Å³.

Los índices de refracción fueron de 1,622 a 1,630 para nX, entre 1,624 a 1,632 para nY, y 1,633 a 1,640 para nZ; la birrefringencia varió entre 0,008 y 0,011. Estos datos también se presentan de manera compatible con la razón OH/F⁻. De acuerdo con Deer et al. (1982), los índices de refracción de cristales de topacio con menores razones OH/F⁻, por ejemplo, con 17,24 a 20,37% de flúor, presentan una variación sistemática de 1,606 a 1,634 (nX), 1,609 a 1,637 (nY) y 1,616 a 1,644 (nZ).

A partir de los resultados obtenidos en los análisis térmico diferenciales fue posible observar la primera pérdida endotérmica de masa entre 4,7 a 5,3% a una temperatura entre los 1.209 y 1.231°C (curva DTG) y una segunda pérdida significativa de masa de 10,5 a 17% entre los 1.261 y 1.357°C (curva DTG). El primer pico corresponde a la pérdida del grupo de oxidrilo y el segundo a la pérdida de flúor (Figura 2), como fue observado en estudios anteriores en la región de Ouro Preto (da Costa et al. 2000).

A través de la espectroscopia infrarroja de absorción por transformada de Fourier (FTIR) se observaron picos a 3.640cm⁻¹ atribuido al estiramiento del grupo oxidrilo, a 3.414cm⁻¹ que se refiere al estiramiento del H₂O, a 2.352cm⁻¹ que es indicativo de la presencia de CO₂, mientras que el pico de absorción a 3.000cm⁻¹ indica posiblemente la presencia de CH₄ y el pico a 1.620cm⁻¹ corresponde a la deformación del H₂O (Rojas et al. 2007). Estos resultados son pertinentes en la caracterización de los fluidos mineralizantes.

A partir de un lote de cuarenta cristales, fueron confeccionadas dos laminas de cada muestra, siendo que solamente seis cristales presentaron inclusiones fluidas, estudiando de este modo 82 inclusiones de origen primaria y pseudosecundaria. A través de los datos microtermométricos de esas inclusiones fue posible determinar las características físico-químicas del fluido mineralizante, además de relacionar las variaciones de temperatura y presión de cristalización del topacio.

Las inclusiones fluidas primarias, distribuidas aleatoriamente en el interior

de los cristales, y las pseudosecundarias, dispuestas en fracturas intragranulares, poseen contornos regulares y alargados estando compuestas por soluciones acuosas salinas y CO₂, siendo bifásicas o trifásicas a temperatura ambiente. El CO₂ ocurre prácticamente puro (Tf_{CO2} -56,8 a -56,6°C), en cuanto que en algunas muestras las ThCO₂ y las densidades de ese componente, presentan ciertas variaciones. Las Te se sitúan de modo general, entre -45 y -70°C, indicando sistemas acuosos complejos con Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ siendo los menores valores indicativos de metaestabilidad (Davis et al. 1990) o de la presencia de otros iones en solución. Temperaturas eutécticas distintas son también observadas en ciertas muestras, indicando variaciones composicionales locales. Diferencias en los valores de salinidad son contempladas tanto en las inclusiones presentes en cada cristal, como en aquellas de muestras distintas. De un modo general, las salinidades varían desde el equivalente a 9,6% en peso de NaCl hasta próximas a 0, siendo obtenidas mediante las Tf_{Cl} situadas entre 4,6 e ~11°C. Las Th_{total} también presentaron variaciones dependiendo de

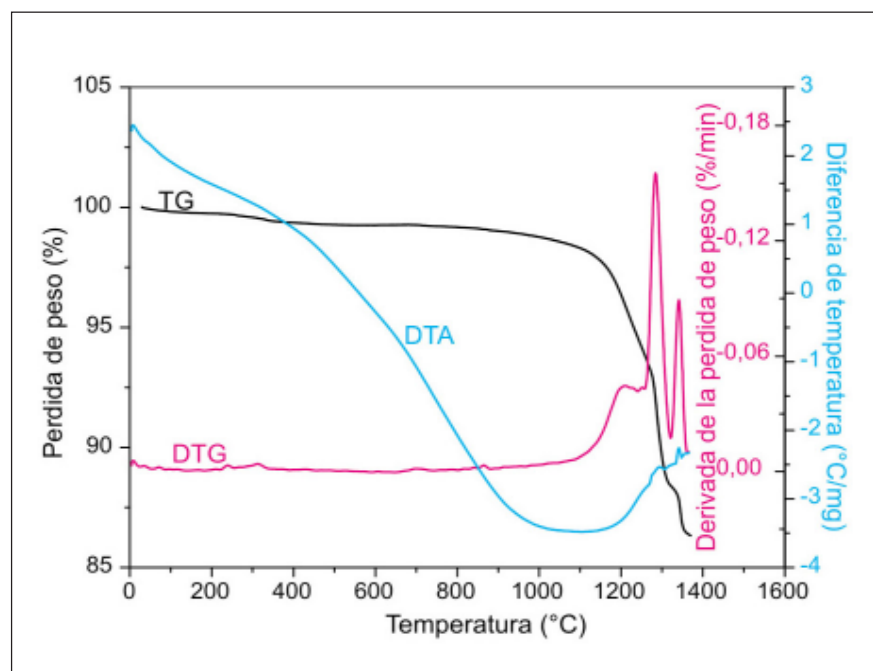


Figura 2 - Curva termogravimétrica para un cristal de topacio imperial de Antônio Pereira.

las muestras, siendo que en las inclusiones primarias los valores se sitúan, principalmente entre 290 y 320°C, siendo inferiores en las pseudosecundarias. Los datos de las temperaturas de homogenización total obtenidos se encuentran en los histogramas de la Figura 3.

Utilizando el *software FLUIDS 1* (Bakker 2003) fueron construidas las isocoras representativas de las inclusiones de las muestras estudiadas, y determinadas las presiones, considerando las Th_{total} en cada caso (Figura 4). Observándose que las presiones determinadas para las inclusiones pseudosecundarias pueden presentar valores superiores o inferiores a los de las primarias. Estos datos pueden ser explicados por el hecho de que la mineralización de topacio y el atrapamiento de las inclusiones esta condicionado a secciones estructurales que involucraron episodios de deformación presentando alternancia local en las condiciones de compresión, originados durante el evento tectónico-metamórfico de edad Brasiliana (Endo et al. 2007), que a su vez implica en un aumento y disminución de la presión de los fluidos. Debe ser resaltado que a

pesar de la gran probabilidad de ocurrencia de inmiscibilidad de fluidos en las zonas de dilatación y de la existencia de ciertas evidencias en ese sentido en las inclusiones estudiadas, ese proceso no puede ser definitivamente comprobado a partir de los parámetros obtenidos por la microtermometría, una vez que modificaciones y reequilibrios posteriores, resultado de las variaciones de presión, pueden haber modificado sus características originales.

Las temperaturas y presiones determinadas para las inclusiones primarias (290 - 320°C / 2.349 - 2.497bar) y pseudosecundarias (220 - 295°C / 1.995 - 3.205bar) son comparables a los valores obtenidos por Gandini (1994) y Bello et al. (1996) en inclusiones fluidas de cristales de topacio de Capão do Lana (280 - 310°C / 2.000 - 2.400bar), Caxambu (270 - 310°C / 1.900 - 2.700bar) y Boa Vista (230 - 320°C / 1.800 - 3.000bar) e inferiores a las condiciones de T-P (Almeida 2004) referentes a las minas de Vermelho (367 - 410°C / 4.760 - 5.090bar) y JJC (408 - 412°C / 4.670 - 5.410bar). Además, las temperaturas obtenidas son compatibles con los datos geotermométricos de carbonatos (con

media de 296,0°C) y cloritas (con media de 319,4°C) pertenecientes a las vetas hidrotermales de la región de Antônio Pereira (Ribeiro-Kwitko & Oliveira 2004).

5. Consideraciones finales

Los datos obtenidos del porcentaje de flúor, de un modo general, están de acuerdo con los estudios realizados por Rosenberg (1967), Ribbe & Rosenberg (1971) y Deer et al. (1982), que relacionan el aumento del tenor de flúor del topacio con el aumento en los valores de la densidad y la disminución de los valores en los índices de refracción y del parámetro b_0 de la celda unitaria. Las relaciones OH/F⁻ obtenidas indican un aumento en oxidrilo para los cristales estudiados, común en cristalización en ambientes hidrotermales, los cuales también presentan menores densidades relativas y mayores valores en los índices de refracción y en el parámetro b_0 , cuando son comparados con los datos de cristales de topacio ricos en flúor existentes en la literatura.

La termogravimetría sugiere que el inicio de la transformación del topacio

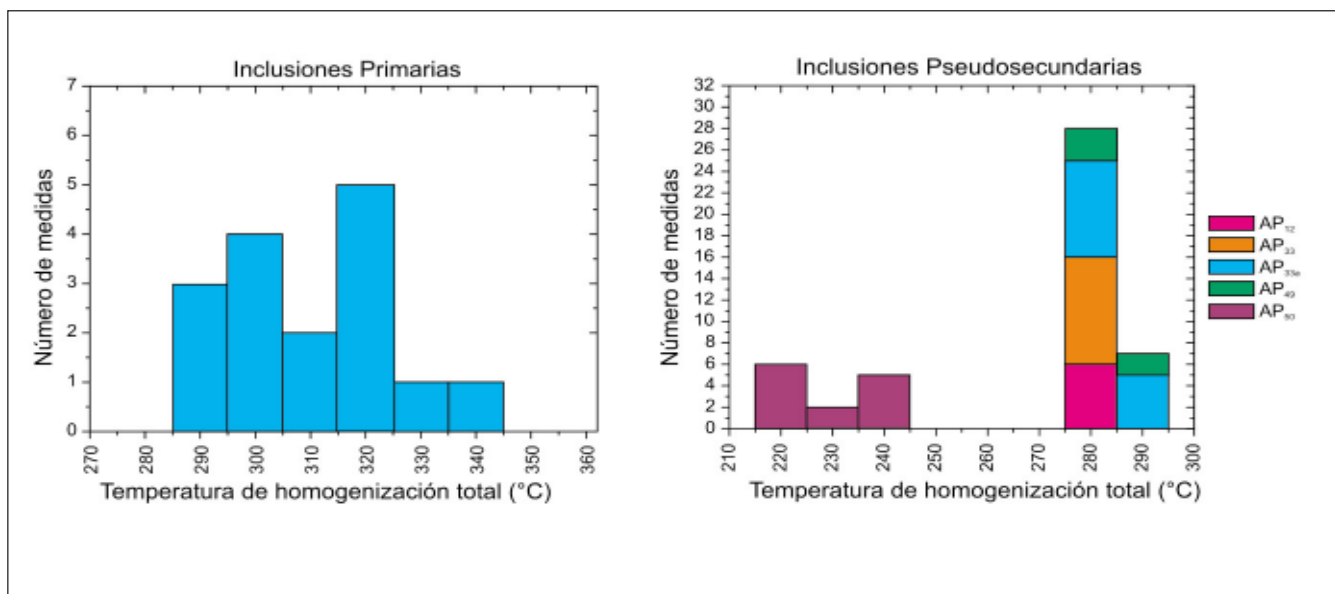


Figura 3 - Histogramas de las temperaturas de homogenización total de las inclusiones fluidas presentes en cristales de topacio imperial de Antônio Pereira.

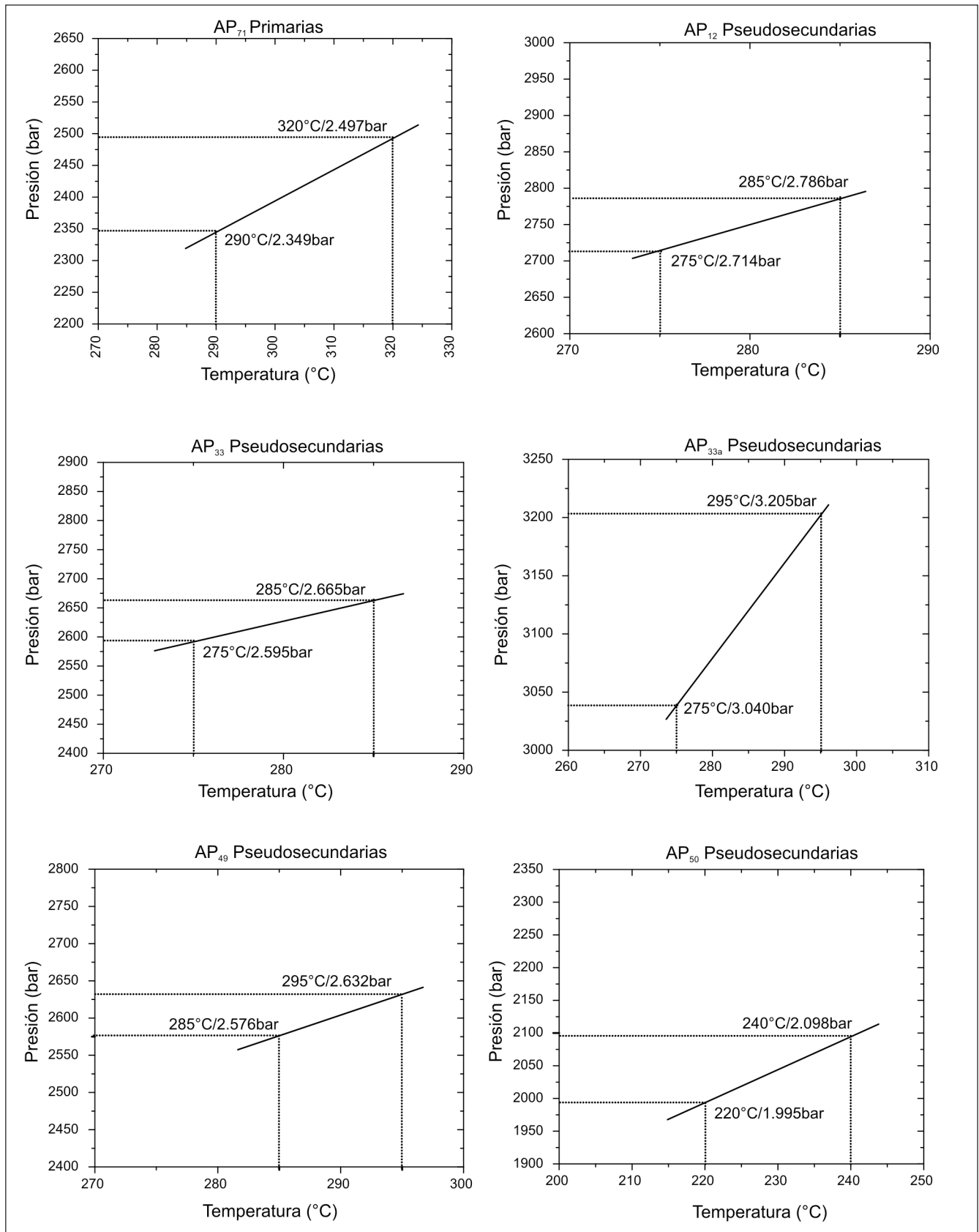


Figura 4 - Isocoras de las inclusiones fluidas primarias y pseudosecondarias, determinadas a partir de las ecuaciones propuestas por Anderko & Pitzer (1993a y b) y Duan et al. (1995), consideradas en el Programa ISOC de Bakker (2003).

para mulita ($\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$) ocurrió a una temperatura aproximada a los 1.000°C .

Por medio de la espectroscopia infrarroja de absorción por transformada de Fourier (FTIR), se pudo constatar la presencia de algunos componentes como: H_2O , CO_2 y CH_4 que se encuentran en las inclusiones fluidas.

El análisis estructural de las vetas que contienen el topacio imperial indica una íntima relación con los pliegues de direcciones axiales N-S y E-W de edades Brasilianas, formadas a lo largo de las direcciones de fracturas de extensión localizadas en torno de los pliegues y boudines.

Los estudios microtermométricos permitieron caracterizar las composiciones y densidades de los fluidos que originaron la mineralización, bien como los rangos de variación de presiones y temperaturas mínimas de atrapamiento de las inclusiones primarias y pseudosecundarias y, consecuentemente, de la cristalización del topacio. Los resultados demuestran que las inclusiones pseudosecundarias fueron atrapadas a menores temperaturas con relación a las primarias, pero en condiciones de presión bastante variables. Esos datos y su comparación con los obtenidos en otras minas de la región demuestran que la mineralización está condicionada a deformaciones que involucraron episodios de compresión y alivio de presión, lo que también es indicado por los datos estructurales.

De acuerdo con Barton (1982), la cantidad de OH⁻ del topacio coexistente con otra fase aluminosa aumenta con la disminución de la temperatura de cristalización. Consecuentemente, los bajos tenores de flúor obtenidos para los cristales de topacio de la mina de Antônio Pereira son coherentes con las temperaturas relativamente bajas determinadas para su cristalización a partir de un evento hidrotermal, siendo los resultados consistentes con las condiciones discutidas por Barton (1982).

La integración de los análisis estructurales con los estudios mineralógicos y microtermométricos

permitió de ese modo sugerir que las vetas contentivas de topacio imperial fueron formadas a partir de fluidos hidrotermales originados durante el evento tectono-metamórfico de edad Brasiliana. Esos fluidos compuestos por CO_2 ($\pm\text{CH}_4$) y soluciones acuosas salinas, contentivas de Ca, Mg y Na, cuyos registros se encuentran en las inclusiones atrapadas, probablemente fueron originados a partir de reacciones metamórficas de descarbonatación y deshidratación que ocurrieron, durante ese evento en las rocas encajantes. El CO_2 , por reacciones de descarbonatación y las soluciones acuosas con flúor, por la quiebra de los filosilicatos presentes en los mármoles y esquistos circundantes.

6. Agradecimientos

El autor agradece a la Secretaria Ejecutiva de Desarrollo Integral (SEDI) de la Organización de Estados Americanos (OEA), por la beca concedida para realizar estudios de Maestría en la Universidad Federal de Ouro Preto. A los Profesores Dr. Pedro Hoffmann y Lic. Alirio Lobo del Laboratorio de Física de Superficies de la Facultad de Ciencias de la Universidad de los Andes (ULA-Mérida) por la realización de los análisis de FTIR. Al Profesor Dr. Geraldo Magela da Costa y Profesora Dra. Katia Monteiro Novack del Departamento de Química del Instituto de Ciencias Exactas y Biológicas de la Universidad Federal de Ouro Preto por la ayuda en los análisis de Difracción de Rayos X y Termogravimetría respectivamente.

7. Referencias bibliográficas

ALMEIDA, A.C.S. *Estudos químico-mineralógicos e microtermométricos do topázio imperial das minas do Vermelho e JJC, Ouro Preto, Minas Gerais*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, 2004. 117 p. (Dissertação de Mestrado).

- ANDERKO, A., PITZER, K.S. Equation of state representation of phase equilibria and volumetric properties of the system $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ above 573 K. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 57, p. 1657-1680, 1993a.
- ANDERKO, A., PITZER, K.S. Phase equilibria and volumetric properties of the systems $\text{KCl-H}_2\text{O}$ and $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$ above 573 K: equation of state representation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 57, p. 4885-4897, 1993b.
- BAKKER, R.J. Clathrates: Computer programs to calculate fluid inclusion V-X properties using clathrate melting temperatures. *Computers & Geosciences*, v. 23, n. 1, p. 1-18, 1997.
- BAKKER, R.J. Package Fluids 1: Computer programs for analysis of fluid inclusion data and for modeling bulk fluid properties. *Chemical Geology*, v. 194, p. 3-23, 2003.
- BARTON, M.D. The thermodynamic properties of topaz solid solutions and some petrologic applications. *American Mineralogist*, v. 67, p. 956-974, 1982.
- BELLO, R.M.S., FUZIKAWA, K., GANDINI, A.L., VALARELLI, J.V., SVISERO, D.P. Fluid inclusion microthermometry of imperial topaz from Capão do Lana deposit, Ouro Preto, Minas Gerais State, Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 68, n.1, p. 91-102, 1996.
- CHAUVET, A., PIANTONE, P., BARBANSON, L., NEHLIG, P., PEDROLETTI, I. Gold deposit formation during collapse tectonics: Structural, mineralogical, geochronological, and fluid inclusion constraints in the Ouro Preto gold mines, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Economic Geology*, n.96, p. 25-48, 2001.
- CHEMALE Jr. F., ROSIÈRE, C.A., ENDO, I. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, n. 65, p.25-54, 1994.
- DA COSTA, M.G., SABIONI, A.C.S., FERREIRA, C.M. Imperial Topaz from Ouro Preto, Brazil: chemical character and thermal behaviour. *Journal of Gemmology*, v. 273, p. 133-138, 2000.
- DAVIS, D.W., LOWENSTEIN, T.K., SPENCER, R.J. melting behaviour of fluid inclusions in laboratory-grown halite crystals in the systems $\text{NaCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-KCl-H}_2\text{O}$, $\text{NaCl-MgCl}_2\text{-H}_2\text{O}$ and $\text{NaCl-CaCl}_2\text{-H}_2\text{O}$. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 54, p. 591-601, 1990.

- DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J. (2. ed.) *An introduction to the rock-forming minerals*. Hong Kong: Longman Scientific & Technical, 1992. 696p.
- DEER, W.A., HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J. (2. ed.) *Rock-forming minerals: orthosilicates*. London: Longman, 1982. 919p. (v. 1A).
- DUAN, Z., MOLLER, N., WEARE, J.H. Equations of state for the NaCl-H₂O-CO₂ system: prediction of phase equilibria and volumetric properties. *Geoquímica et Cosmochimica Acta*, v. 59, p. 2869-2882, 1995.
- ENDO, I. *Análise estrutural qualitativa do minério de ferro e encaixantes da mina de Timbopeba - Borda Leste do Quadrilátero Ferrífero, Mariana, MG*. Ouro Preto: Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Geologia, 1988. 130 p. (Dissertação de Mestrado).
- ENDO, I. *Regimes tectônicos do arqueano e proterozóico no interior da placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e áreas adjacentes, Minas Gerais*. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 1997. 243 p. (Tese de Doutorado).
- ENDO, I., GANDINI, A.L., ROJAS, A.J., BELLO, R.M.S. Controle estrutural estratigráfico da mineralização do topázio imperial no Quadrilátero Ferrífero, MG. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS e SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 14/10. *Anais...* Diamantina: SBG, 2007. p. 122.
- FERREIRA, C.M. Topázio de Ouro Preto, Minas Gerais. In: SCHOBENHAUS, C., QUEIROZ, E.T. de, COELHO, C.E.S. *Principais depósitos minerais do Brasil*. Brasília, DNPM/CPRM. v. 4, p. 303-308, 1991.
- GANDINI, A.L. *Mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais*. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 1994. 212 p. (Dissertação de Mestrado).
- MORTEANI, G., BELLO, R.M.S., GANDINI, A.L., PREINFALK, C. P. T. X conditions of crystallization of Imperial Topaz from Ouro Preto (Minas Gerais, Brazil): Fluid inclusions, oxygen isotope thermometry and phase relations. *Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen*, n. 82, p. 455-466, 2002.
- PETRICORENA, M.B. *Gemas, tratado de gemologia*. Zaragoza: Ediciones Aguaviva, 1989. 441 p.
- PIRES, F.R.M., FREITAS, C.O., PALERMO, N., SARCIÁ, M.N.G. Geologia e gênese dos depósitos de topázio do Distrito de Ouro Preto - Minas Gerais. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DE MINAS GERAIS, 2. *Anais...* Belo Horizonte, SBG, 1983. v. 3, p. 283-296.
- RIBBE, P.H., ROSENBERG, P.E. Optical and X-ray determinative methods for fluorine in topaz. *American Mineralogist*, v. 56, n. 9/10, p. 1812-1821, 1971.
- RIBEIRO-KWITKO, R., OLIVEIRA, C. G. de. O depósito aurífero de Antônio Pereira, Quadrilátero Ferrífero, condições P-T e natureza dos fluidos mineralizadores. *RBG - Revista Brasileira de Geociências*, v. 34, n. 1, p. 117-126, 2004.
- ROJAS, A.J., ENDO, I., BELLO, R.M.S., HOFFMANN, P.E., LOBO, J.A., DA COSTA, G.M., NOVACK, K.M., GANDINI, A.L. Dados químicos e mineralógicos do topázio imperial de Antônio Pereira, Ouro Preto, MG. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOQUÍMICA, 11. *CD ROM*. Atibaia: SBGq, 2007.
- ROSENBERG, P.E. Variation in the unit-cell dimensions of topaz and their significance. *American Mineralogist*, v. 52, n. 11/12, p. 1890-1895, 1967.

Artigo recebido em 28/02/2008 e aprovado em 10/10/2008.

A REM tem novo endereço:

**Rua Carlos Walter Marinho Campos, 57
Bairro: Vila Itacolomy
35400-000 - Ouro Preto - MG**

www.rem.com.br