



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOLÓGICA



Jorge Gabriel Martins Gomes Júnior

Caracterização de Inclusões Fluidas em Berilos de Minas Gerais por Petrografia e Espectroscopia Raman

Ouro Preto

2026

Jorge Gabriel Martins Gomes Júnior

Caracterização de Inclusões Fluidas em Berilos de Minas Gerais por Petrografia e Espectroscopia Raman

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo.

Orientadora: Dra. Flávia Compassi da Costa.

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G633c Gomes Júnior, Jorge Gabriel Martins.

Caracterização de inclusões fluidas em berilos de Minas Gerais por petrografia e espectroscopia Raman. [manuscrito] / Jorge Gabriel Martins Gomes Júnior. - 2026.

98 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Flávia Compassi da Costa.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .

1. Mineralogia. 2. Petrologia. 3. Berilo. 4. Raman, Espectroscopia de. 5. Pegmatitos. 6. Microscopia óptica. I. Costa, Flávia Compassi da. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 549.646

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Jorge Gabriel Martins Gomes Júnior

Caracterização de Inclusões Fluidas em Berilos de Minas Gerais por Petrografia e Espectroscopia Raman

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Geológica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Geólogo

Aprovada em 31 de julho de 2026

Membros da banca

Dra. Flávia Compassi da Costa - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Maria Eugênia Silva de Souza - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Daniela Teixeira de Carvalho - Universidade Federal do Espírito Santo

Flávia Compassi da Costa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 05/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Flavia Compassi da Costa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 05/08/2026, às 00:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1152677** e o código CRC **7D4CEFB6**.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me conceder força, sabedoria e serenidade em cada etapa desta trajetória, e por tornar possível a concretização deste sonho.

À minha família, pelo amor incondicional, pela presença constante e pelas orações que me sustentaram nos momentos de dificuldade. Agradeço, de forma especial, à minha mãe, Sônia Rodrigues, por seu amor incondicional, dedicação incansável e por ser minha maior fonte de inspiração e fortaleza ao longo de toda a vida. Ao meu pai, Jorge Gomes, pelos ensinamentos, pelo exemplo de perseverança e pelo apoio constante em cada desafio enfrentado.

À minha namorada, Geovanna Ferreira, por caminhar ao meu lado durante esta jornada, oferecendo incentivo, compreensão, carinho e apoio nos momentos mais difíceis. Sua presença foi fundamental para que eu mantivesse a motivação e a confiança necessárias para alcançar este objetivo.

À minha irmã, Karina Gomes, pelo companheirismo, amizade e por sempre acreditar em meu potencial. Ao meu cunhado, Luciano Sacramento, pelo apoio, incentivo e pelas palavras de encorajamento ao longo desta caminhada.

Aos docentes e servidores da Universidade Federal de Ouro Preto, em especial da Escola de Minas, pela dedicação, paciência e comprometimento com o ensino e a formação de seus estudantes. Sou profundamente grato pelos conhecimentos transmitidos e pelas oportunidades vividas durante a graduação.

E a todos que, de alguma forma, estiveram ao meu lado nessa caminhada, oferecendo palavras de incentivo, gestos de apoio e demonstrações de amizade. Cada contribuição foi essencial para que este trabalho se tornasse realidade.

.

RESUMO

O estudo de inclusões em minerais pegmatíticos constitui uma importante ferramenta para a compreensão dos processos associados à formação e evolução de sistemas mineralizantes. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo caracterizar inclusões e microfeições internas observadas em cristais de berilo provenientes das lavras Ferreirinha I, Golconda I, Olho de Gato e São Domingos, localizadas no Distrito Pegmatítico de Governador Valadares, Campo Pegmatítico de Marilac, Província Pegmatítica Oriental do Brasil, associado ao Orógeno Araçuai. Para isso, foram realizadas análises petrográficas em microscopia óptica e análises por espectroscopia Raman em amostras selecionadas. A microscopia óptica permitiu identificar inclusões fluidas monofásicas, inclusões com aspecto bifásico, possíveis inclusões sólidas, cavidades irregulares, microfraturas e microdescontinuidades internas, com variações de forma, tamanho, contraste óptico, distribuição espacial e grau de definição dos contornos. As lavras analisadas apresentaram diferenças texturais importantes: Ferreirinha I destacou-se pela maior diversidade de inclusões fluidas e possíveis inclusões sólidas; Golconda I apresentou cavidades irregulares e feições associadas a descontinuidades internas; Olho de Gato foi marcada pela predominância de possíveis inclusões sólidas; e São Domingos apresentou ampla variedade de inclusões alongadas, prismáticas, aciculares, subtabulares e arredondadas a subarredondadas. As análises Raman, realizadas em amostras das lavras Ferreirinha I e São Domingos, registraram bandas em diferentes regiões da faixa espectral investigada, com sinais próximos de 700 cm^{-1} , entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} , além de bandas em alta frequência próximas de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} em parte dos espectros. Essas respostas vibracionais podem estar relacionadas a contribuições das inclusões, de possíveis fases minerais, de grupos OH ou água estrutural/molecular e/ou do berilo hospedeiro adjacente, sendo necessária comparação com espectros de referência para identificação composicional definitiva. Os resultados indicam significativa variabilidade morfológica, textural e espectral entre as feições analisadas, sugerindo diferentes condições de aprisionamento, preservação e possível modificação das inclusões nos cristais de berilo. A integração entre microscopia óptica e espectroscopia Raman mostrou-se eficiente para a caracterização qualitativa das inclusões estudadas, contribuindo para a interpretação das feições internas preservadas em berilos do Campo Pegmatítico de Marilac.

Palavras-chave: inclusões fluidas; berilo; espectroscopia Raman; pegmatitos; microscopia óptica.

ABSTRACT

The study of inclusions in pegmatitic minerals is an important tool for understanding processes related to the formation and evolution of mineralizing systems. In this context, the present work aimed to characterize inclusions and internal microfeatures observed in beryl crystals from the Ferreirinha I, Golconda I, Olho de Gato and São Domingos mines, located in the Governador Valadares Pegmatitic District, Marilac Pegmatitic Field, Eastern Brazilian Pegmatitic Province, associated with the Araçuaí Orogen. For this purpose, petrographic analyses by optical microscopy and Raman spectroscopy analyses on selected samples were carried out. Optical microscopy allowed the identification of monophasic fluid inclusions, inclusions with a biphasic appearance, possible solid inclusions, irregular cavities, microfractures and internal microdiscontinuities, showing variations in shape, size, optical contrast, spatial distribution and degree of contour definition. The analyzed mines showed important textural differences: Ferreirinha I stood out for the greater diversity of fluid inclusions and possible solid inclusions; Golconda I showed irregular cavities and features associated with internal discontinuities; Olho de Gato was marked by the predominance of possible solid inclusions; and São Domingos showed a wide variety of elongated, prismatic, acicular, subtabular and rounded to subrounded inclusions. Raman analyses, performed on samples from the Ferreirinha I and São Domingos mines, recorded bands in different regions of the investigated spectral range, with signals near 700 cm^{-1} , between approximately 1000 and 1100 cm^{-1} , as well as high-frequency bands near 2900 cm^{-1} and 3600 cm^{-1} in part of the spectra. These vibrational responses may be related to contributions from the inclusions, possible mineral phases, OH groups or structural/molecular water and/or the adjacent beryl host, requiring comparison with reference spectra for definitive compositional identification. The results indicate significant morphological, textural and spectral variability among the analyzed features, suggesting different conditions of trapping, preservation and possible modification of inclusions in beryl crystals. The integration of optical microscopy and Raman spectroscopy proved to be efficient for the qualitative characterization of the studied inclusions, contributing to the interpretation of internal features preserved in beryls from the Marilac Pegmatitic Field.

Keywords: fluid inclusions; beryl; Raman spectroscopy; pegmatites; optical microscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Localização das lavras Golconda I, Ferreirinha I, Olho-de-Gato e São Domingos, na região de Governador Valadares (MG).	4
Figura 2 - Amostras de berilo das lavras Golconda I, Ferreirinha I, Olho-de-Gato e São Domingos.	5
Figura 3 - Exemplo de pseudo-inclusão gerada por resina epóxi durante a preparação de amostras para análise de inclusões fluidas.	6
Figura 4 - Exemplo de variedade de inclusões fluídas observadas em único campo de visão em quartzo.	7
Figura 5 - Mapa geológico simplificado do Orógeno Araçuaí, destacando os principais domínios litológicos.	10
Figura 6 - Esquema representando a distribuição típica de inclusões primárias, pseudosecundárias e secundárias em um cristal.	15
Figura 7 - Microscópio petrográfico Olympus BX41 utilizado nas análises das inclusões fluidas.	18
Figura 8 - Inclusão sólida protogenética associada a cavidades alongadas e microfraturas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.	19
Figura 9 - Inclusões sólidas subarredondadas a irregulares, cavidades alongadas e microfeições dispersas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.	20
Figura 10 - Inclusões fluidas alinhadas, cavidades alongadas e inclusão maior de morfologia irregular observadas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.	21
Figura 11 - Inclusões bifásicas (L-S), microcavidades dispersas e outras feições internas observadas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.	23
Figura 12 - Inclusão fluida bifásica (L+S) de morfologia lenticular observada em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.	24
Figura 13 - Inclusões fluidas, cavidades alongadas, microfraturas e feições irregulares observadas em cristal de berilo da amostra Golconda I.	26
Figura 14 - Inclusões fluidas, cavidades irregulares e feições alongadas observadas em cristal de berilo da amostra Golconda I.	28
Figura 15 - Associação entre inclusão fluida e inclusão sólida observada em cristal de berilo da amostra Golconda I.	29
Figura 16 - Inclusão sólida acastanhada associada a descontinuidade interna em cristal de berilo da amostra Golconda I.	31

Figura 17 - Cavidades irregulares, feições alongadas e microdescontinuidades internas observadas em cristal de berilo da amostra Golconda I.	32
Figura 18 – Inclusão sólida protogenética com coloração acastanhada associada a zona de heterogeneidade interna em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.	35
Figura 19 - Inclusão sólida irregular, de coloração amarelada a castanho-clara, observada em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.	36
Figura 20 - Inclusão sólida euédrica a subeuédrica observada em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.....	38
Figura 21 - Inclusão sólida azul-escura associada a faixa interna heterogênea em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.	39
Figura 22 - Inclusão sólida de coloração esverdeada a amarelada observada em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.	40
Figura 23 - Inclusão alongada a lenticular observada em cristal de berilo da amostra São Domingos	42
Figura 24 - Inclusão sólida alongada a subtabular e cavidades irregulares observadas em cristal de berilo da amostra São Domingos.....	44
Figura 25 - Inclusão sólida acicular observada em cristal de berilo da amostra São Domingos.	45
Figura 26 – Canais estruturais prismáticos a subretangulares observados em cristal de berilo da amostra São Domingos.....	47
Figura 27 - Inclusões arredondadas a subarredondadas, cavidades irregulares e microdescontinuidades observadas em cristal de berilo da amostra São Domingos.....	48
Figura 28 - Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I – Amostra 01.....	52
Figura 29 - Espectro Raman obtido para inclusão da amostra Ferreirinha I – Amostra 01.	52
Figura 30 - Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I – Amostra 02.	54
Figura 31 - Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra Ferreirinha I – Amostra 02...	54
Figura 32 – Região da inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I – Amostra 03.	56
Figura 33 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra Ferreirinha I – Amostra 03..	56
Figura 34 – Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos – Amostra 01.	59

Figura 35 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra São Domingos – Amostra 01.	59
Figura 36 – Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos – Amostra 02.	61
Figura 37 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra São Domingos – Amostra 02.	61
Figura 38 – Região da inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos – Amostra 03.	63
Figura 39 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra São Domingos – Amostra 03.	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese das principais inclusões e microfeições observadas nos cristais de berilo das lavras estudadas.	65
Tabela 2 – Modelo interpretativo preliminar para a formação, preservação e modificação das inclusões nos berilos estudados.	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Justificativa	2
1.2	Objetivo	3
1.2.1	Objetivos específicos.....	3
1.3	Localização	3
2	METODOLOGIA.....	5
2.1	Amostras e Petrografia das Inclusões	5
2.2	Espectroscopia Raman.....	7
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1	Orógeno Araçuaí.....	9
3.1.1.	Localização e limites geotectônicos	10
3.1.2.	Evolução tectono-magmática	11
3.1.3.	Litologia e unidades estratigráficas	11
3.2	Província Pegmatítica Oriental do Brasil.....	12
3.2.1.	Área de estudo: Governador Valadares e região	12
3.3	Inclusões Fluidas.....	13
3.3.1.	Tipos de inclusões fluidas	13
3.3.2.	Classificação genética das inclusões sólidas	14
3.3.3.	Classificação temporal das inclusões fluidas	14
3.3.4.	Assembleias de inclusões fluidas	16
4	RESULTADOS	17
4.1	Petrografia.....	17
4.1.1.	Ferreirinha I.....	18
4.1.2.	Golconda I	25
4.1.3.	Olho de Gato.....	34
4.1.4.	São Domingos	41

4.2	Espectroscopia Raman.....	50
4.2.1.	Ferreirinha I.....	51
4.2.2.	São Domingos	58
5	DISCUSSÃO.....	66
5.1	Ferreirinha I	67
5.2	Golconda I.....	69
5.3	Olho de Gato.....	72
5.4	São Domingos.....	74
5.5	Modelo interpretativo para a formação e modificação das inclusões nos berilos estudados	77
6	CONCLUSÃO.....	81
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

Inclusões fluidas são porções microscópicas de fluido aprisionadas no interior de minerais durante seu crescimento ou em estágios posteriores de sua formação. Essas microcavidades podem conter líquidos, gases ou fases sólidas, refletindo as condições físico-químicas presentes no momento do aprisionamento. Por esse motivo, as inclusões fluidas são consideradas importantes ferramentas na investigação de processos geológicos, sendo amplamente utilizadas na reconstrução de trajetórias de temperatura, pressão e composição dos fluidos envolvidos em diferentes ambientes geológicos (Alderton, 2020).

A caracterização de inclusões fluidas em minerais transparentes é fundamental para a compreensão de processos associados à formação de corpos ígneos, metamórficos e mineralizações. No caso do berilo, mineral típico de ambientes pegmatíticos, essas inclusões podem fornecer informações sobre os estágios finais da cristalização magmática, bem como sobre processos hidrotermais pós-magmáticos (Ashworth et al., 2018).

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar as inclusões observadas em cristais de berilo provenientes de pegmatitos de Minas Gerais, inseridos no contexto geológico da Província Pegmatítica Oriental do Brasil e associados ao Orógeno Araçuaí. Essa unidade geotectônica do sudeste brasileiro destaca-se por abrigar diversos corpos pegmatíticos mineralizados, os quais apresentam importância científica e econômica. A escolha dessa área de estudo justifica-se por sua relevância no entendimento da evolução tectono-magmática neoproterozoica e da gênese de depósitos pegmatíticos (Pedrosa-Soares et al., 2007; Dharmapriya et al., 2024).

As análises realizadas neste trabalho abrangeram métodos ópticos e espectroscópicos aplicados à caracterização das inclusões. Inicialmente, as amostras de berilo foram analisadas em microscópio petrográfico, com o objetivo de descrever suas características morfológicas e texturais. Posteriormente, amostras selecionadas foram submetidas à espectroscopia Raman, visando complementar a caracterização das inclusões e possibilitar inferências composicionais a partir das bandas espectrais obtidas.

Dessa forma, o estudo contribui para a ampliação do conhecimento sobre os processos que controlam a evolução de sistemas pegmatíticos e fornece dados relevantes para a interpretação da história geológica registrada nos cristais de berilo. A caracterização das inclusões nesses minerais oferece subsídios para discussões sobre a evolução dos fluidos

associados aos pegmatitos estudados, bem como para o reconhecimento do potencial científico dessas ocorrências.

1.1 Justificativa

Apesar da importância dos pegmatitos de Minas Gerais no contexto da Província Pegmatítica Oriental Brasileira e do Orógeno Araçuá, ainda há necessidade de estudos voltados à caracterização detalhada das inclusões preservadas em minerais pegmatíticos, especialmente em cristais de berilo. As inclusões fluidas podem registrar informações relevantes sobre os fluidos envolvidos na cristalização mineral e em processos pós-magmáticos, constituindo importantes ferramentas para a interpretação da evolução físico-química de sistemas geológicos (Roedder, 1984; Frezzotti et al., 2012; Alderton, 2020).

Nesse contexto, o berilo apresenta relevância por ocorrer com frequência em pegmatitos graníticos e por poder preservar inclusões associadas a diferentes estágios de evolução dos fluidos residuais. A caracterização dessas feições pode contribuir para a compreensão dos processos petrogenéticos relacionados à formação e evolução dos pegmatitos, especialmente em províncias marcadas por grande diversidade mineralógica e potencial econômico, como aquelas associadas ao Orógeno Araçuá (Pedrosa-Soares et al., 2007; Pedrosa-Soares et al., 2011; Ashworth et al., 2018).

A utilização integrada da microscopia óptica e da espectroscopia Raman permite uma abordagem qualitativa eficiente para a descrição morfológica, textural e composicional das inclusões. A microscopia petrográfica possibilita reconhecer formas, distribuição, relações texturais e associações com microfraturas ou zonas de alteração, enquanto a espectroscopia Raman contribui para a identificação de fases minerais, grupos funcionais e possíveis componentes fluidos presentes nas inclusões analisadas (Frezzotti et al., 2012; Pestilho; Monteiro, 2017; Alderton, 2020).

Dessa forma, a relevância deste trabalho está na geração de dados petrográficos e espectroscópicos sobre inclusões em berilos de diferentes ocorrências pegmatíticas de Minas Gerais. Esses dados podem auxiliar na interpretação da evolução dos fluidos associados aos pegmatitos estudados, além de contribuir para o avanço de estudos mineralógicos aplicados a sistemas pegmatíticos e à caracterização de minerais de interesse científico, gemológico e econômico.

1.2 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo geral caracterizar inclusões e microfeições internas observadas em cristais de berilo provenientes das lavras Golconda I, Ferreirinha I, Olho de Gato e São Domingos, localizadas no Distrito Pegmatítico de Governador Valadares, pertencente ao Campo Pegmatítico de Marilac, inserido na Província Pegmatítica Oriental do Brasil e associado ao Orógeno Araçuaí.

1.2.1 Objetivos específicos

Essa pesquisa apresenta os seguintes objetivos específicos:

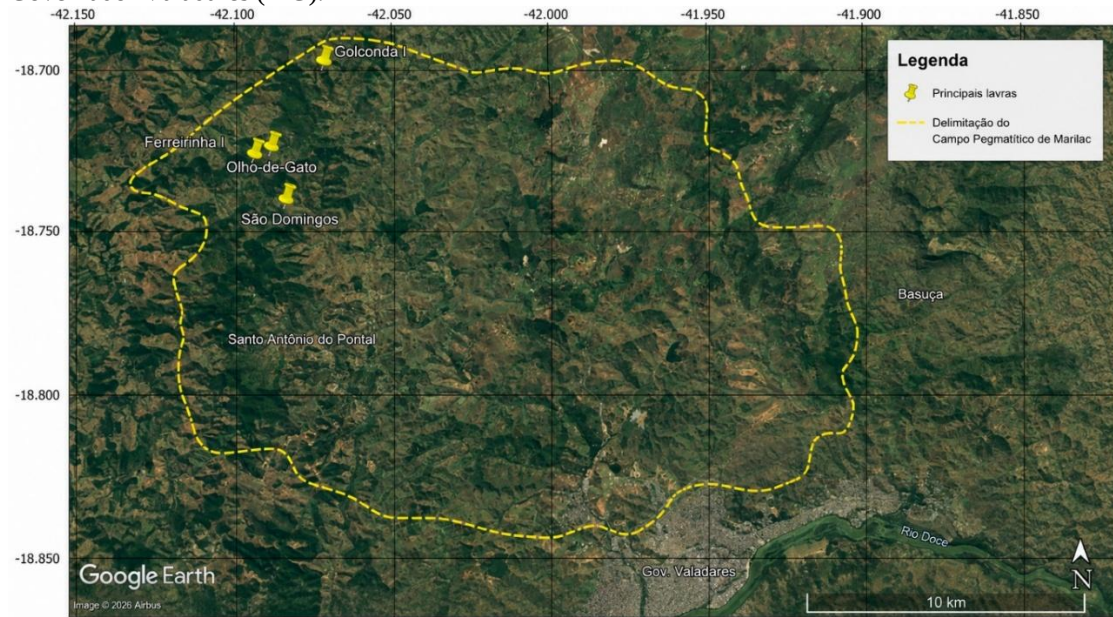
- a) descrever, por meio de microscopia óptica, as inclusões e microfeições internas presentes nos cristais de berilo, considerando sua morfologia, textura, distribuição espacial e relação com cavidades, microfraturas e microdescontinuidades;
- b) reconhecer diferentes tipos de inclusões observadas nos berilos, incluindo inclusões fluidas monofásicas, inclusões com aspecto bifásico, possíveis inclusões sólidas e cavidades internas;
- c) avaliar qualitativamente, por espectroscopia Raman, a resposta vibracional de inclusões e microfeições selecionadas nas amostras Ferreirinha I e São Domingos;
- d) integrar os dados petrográficos e espectroscópicos para discutir a possível relação das inclusões com processos de cristalização, aprisionamento de fases sólidas ou fluidas e modificações posteriores nos cristais de berilo.

1.3 Localização

As amostras de berilo estudadas neste trabalho são provenientes de pegmatitos situados na porção leste do estado de Minas Gerais, próximo ao município de Governador Valadares, como indicado na Figura 1. O acesso à área de coleta ocorre por meio de estradas vicinais a partir da BR-259, tendo como principal referência o município de Marilac.

A área de estudo está inserida no Campo Pegmatítico de Marilac, pertencente ao Distrito Pegmatítico de Governador Valadares, no contexto da Província Pegmatítica Oriental do Brasil, associada ao Orógeno Araçuaí.

Figura 1 - Localização das lavras Golconda I, Ferreirinha I, Olho-de-Gato e São Domingos, na região de Governador Valadares (MG).



Fonte: Próprio Autor (2025).

2 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em etapas sucessivas, que compreenderam a seleção das amostras de berilo previamente preparadas, a descrição petrográfica das inclusões, a aquisição de imagens em microscópio petrográfico e a análise complementar por espectroscopia Raman.

2.1 Amostras e Petrografia das Inclusões

Neste trabalho, foram analisadas quatro amostras de berilo previamente preparadas na forma de seção bipolarizada, provenientes das lavras Golconda I, Ferreirinha I, Olho-de-Gato e São Domingos, situadas no Campo Pegmatítico Marilac, conforme apresentado na Figura 2. As seções bipolizadas apresentavam espessura entre 100 e 200 μm , permitindo a observação em luz transmitida e refletida.

Figura 2 - Amostras de berilo das lavras Golconda I, Ferreirinha I, Olho-de-Gato e São Domingos.



Fonte: Próprio Autor (2025).

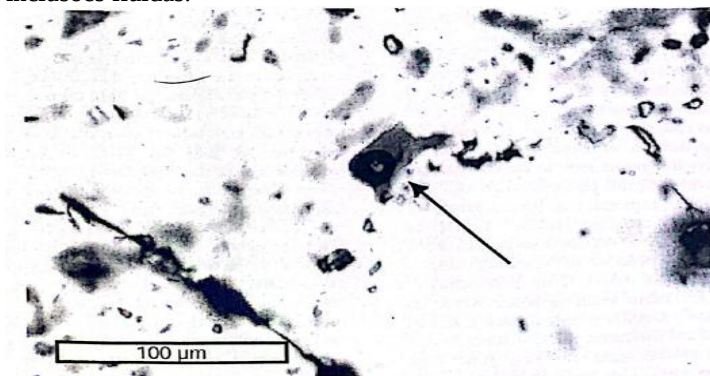
O uso de seções bipolizadas é adequado ao estudo de inclusões em minerais transparentes, pois permite a observação das feições internas dos cristais sem a utilização de lamínula,

preservando, tanto quanto possível, a integridade das inclusões presentes nas amostras. Esse tipo de preparação favorece a análise petrográfica de inclusões fluidas e sólidas, possibilitando o reconhecimento de suas características morfológicas, texturais e de distribuição no mineral hospedeiro (Goldstein, 2001; Pestilho; Monteiro, 2017).

As amostras foram analisadas em microscópio petrográfico, utilizando luz transmitida e refletida, com aumento de 40x. A análise teve como finalidade, identificar e descrever as inclusões presentes nos cristais de berilo, considerando características como morfologia, tamanho relativo, distribuição, relações texturais com a matriz mineral e associação com microfraturas ou zonas de alteração. Também foram observadas possíveis variações no número de fases presentes nas inclusões, quando identificáveis por microscopia óptica (Goldstein, 2001).

Durante a análise petrográfica, foram considerados possíveis artefatos relacionados à preparação prévia das amostras, como pseudo-inclusões associadas à infiltração de resina epóxi em microfraturas. A Figura 3, exemplifica esse tipo de feição artificial, conforme Goldstein (2001), ressaltando a importância de diferenciá-las das inclusões naturais.

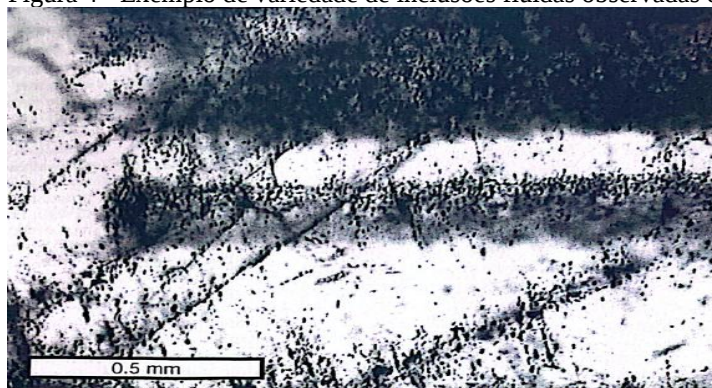
Figura 3 - Exemplo de pseudo-inclusão gerada por resina epóxi durante a preparação de amostras para análise de inclusões fluidas.



Fonte: Goldstein (2001).

A Figura 4 apresenta um exemplo de diferentes tipos de inclusões fluidas observadas em um único campo de visão em cristal de quartzo, conforme Goldstein (2001), sendo utilizada como referência metodológica para a descrição morfológica e textural das inclusões observadas nos cristais de berilo.

Figura 4 - Exemplo de variedade de inclusões fluídas observadas em único campo de visão em quartzo.



Fonte: Goldstein (2001).

2.2 Espectroscopia Raman

Como etapa complementar à caracterização petrográfica, foram realizadas análises por espectroscopia Raman em amostras selecionadas. Essa técnica foi empregada, com o objetivo de auxiliar na identificação qualitativa de fases presentes nas inclusões, especialmente fases sólidas, grupos funcionais e possíveis componentes moleculares associados aos fluidos aprisionados.

As análises foram conduzidas no Departamento de Física da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), utilizando equipamento de espectroscopia Raman. Foi utilizado laser com comprimento de onda de 514 nm, grade de difração de 600 linhas/mm, potência de 2 mW, objetiva de 50x e tempo de aquisição de 5 s. A seleção dos pontos analisados foi orientada pelas observações petrográficas prévias, priorizando inclusões representativas quanto à morfologia, textura, distribuição e associação com feições internas dos cristais de berilo.

Foram analisados, sempre que possível, diferentes domínios das inclusões, incluindo fase líquida, fase vapor ou bolha, fases sólidas internas e regiões próximas às paredes das cavidades. Também foram obtidos espectros do berilo hospedeiro adjacente, utilizados como controle para auxiliar na distinção entre bandas associadas às inclusões e bandas provenientes da matriz mineral.

As aquisições espectrais foram realizadas em janelas adequadas à identificação de fases minerais e componentes moleculares. A região entre 100 e 1200 cm^{-1} foi utilizada para a caracterização de fases minerais, como carbonatos, sulfatos, fosfatos e silicatos. A região entre 2000 e 3800 cm^{-1} foi empregada para investigar possíveis componentes voláteis e grupos hidroxila, incluindo bandas associadas a CO_2 , CH_4 , H_2O molecular e grupos OH.

A potência do laser foi mantida em nível reduzido, visando minimizar efeitos térmicos e possíveis danos às inclusões, como alteração do tamanho da bolha, surgimento de microfraturas, escurecimento ou decrepitação. Após as análises, os espectros obtidos foram organizados, catalogados e interpretados de forma integrada aos dados petrográficos, contribuindo para a caracterização qualitativa das inclusões analisadas.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Orógeno Araçuaí

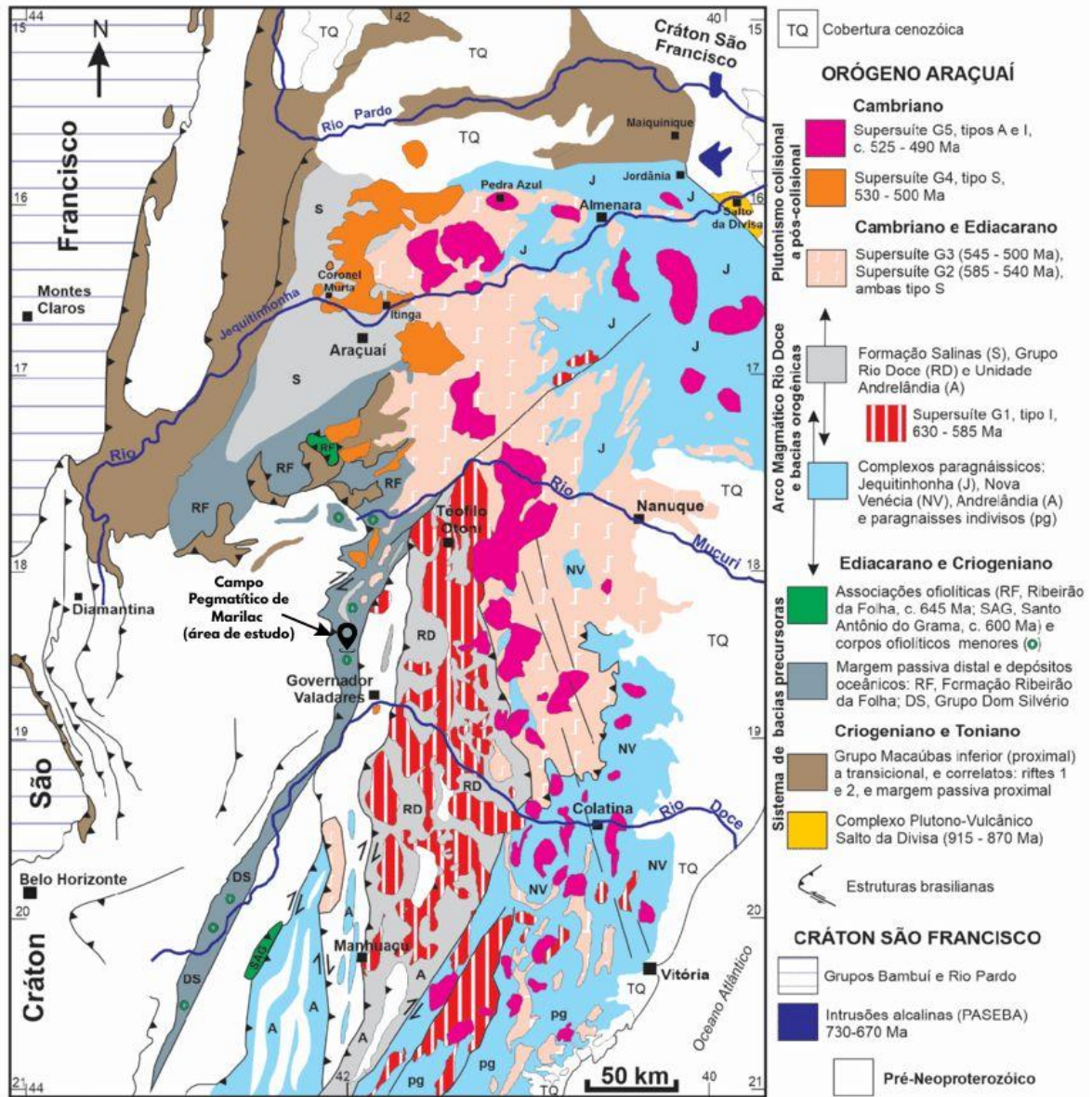
O Orógeno Araçuaí é uma unidade geotectônica localizada no sudeste do Brasil, estendendo-se pelos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e sul da Bahia. Limita-se a oeste com o Cráton do São Francisco e, a Leste, com a Faixa de Dobramentos Serra do Espinhaço e a Margem Continental Brasileira. Trata-se de um orógeno neoproterozoico a cambriano, formado durante os eventos da orogênese Brasileira, entre aproximadamente 630 e 490 milhões de anos atrás (Pedrosa-Soares et al., 2007; 2011).

Essa unidade corresponde a uma cadeia montanhosa que resultou da colisão entre os crátons São Francisco e Congo, compondo o sistema orogênico Araçuaí–Congo Ocidental. Seu desenvolvimento geológico está associado a um contexto de orógeno confinado, onde os limites tectônicos são definidos por zonas de cisalhamento e contatos tectono-magmáticos bem caracterizados (Pedrosa-Soares et al., 2007; 2011).

A região do orógeno apresenta significativa diversidade litológica, com registro de unidades metassedimentares e metavulcânicas associadas ao Grupo Macaúbas, bem como intrusões graníticas do Grupo Rio Doce e diversas fases de magmatismo tardi-colisional a pós-colisional. Uma das feições marcantes da porção central do orógeno é a ocorrência de extensos campos pegmatíticos, formados principalmente durante os estágios tardios da evolução magmática da região. Esses pegmatitos, em geral, estão associados aos granitos do tipo S e hospedam minerais de interesse gemológico e econômico, como quartzo, feldspato, espodumênio, turmalinas e, particularmente, berilo (Dharmapriya et al., 2024; Černý; Ercit, 2005).

A Figura 5 apresenta o mapa geológico regional, destacando a distribuição das principais unidades litológicas e a configuração estrutural do Orógeno Araçuaí.

Figura 5 - Mapa geológico simplificado do Orógeno Araçuai, destacando os principais domínios litológicos.



Fonte: Adaptado de Pedrosa-Soares e Silva (2022).

3.1.1. Localização e limites geotectônicos

O Orógeno Araçuai é uma unidade geotectônica situada no sudeste do Brasil, abrangendo parte dos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e sul da Bahia. Ele está posicionado na borda leste do Cráton do São Francisco e constitui o setor sul-americano do sistema Araçuai–Congo Ocidental. Essa estrutura compartilha relação geodinâmica com o Orógeno da Faixa Lufiliana (na atual África) e corresponde a um orógeno intracontinental

desenvolvido durante os eventos da orogênese Brasileira, entre aproximadamente 630 e 490 Ma (Pedrosa-Soares et al., 2007; 2011).

Seus limites geotectônicos principais incluem, a oeste, a Zona de Cisalhamento Rio Pardo e o Cráton do São Francisco, enquanto a Leste é delimitada pela Margem Continental Brasileira e pelas sequências metassedimentares da Faixa Costeira. Internamente, apresenta uma série de zonas de empurrão, domínios migmatíticos e falhas transcorrentes crustais, com importante registro de processos de subducção, colisão continental e colapso crustal.

3.1.2. *Evolução tectono-magmática*

A evolução do Orógeno Araçuaí é classificada em quatro estágios principais:

- a) estágio pré-colisional (630–580 Ma): corresponde à abertura da Bacia Macaúbas, ao desenvolvimento de sistemas de rifte e ao acúmulo de sedimentos em ambiente de margem continental passiva;
- b) estágio sin-colisional (580–560 Ma): caracterizado pela colisão dos crátons São Francisco e Congo, resultando em metamorfismo regional, migmatização e transporte tectônico;
- c) estágio tardi-colisional (560–530 Ma): inclui fusão parcial crustal com intrusão de granitos peraluminosos tipo S (Suíte G4);
- d) estágio pós-colisional (530–490 Ma): marcado pelo colapso extensional da crosta espessada e pela instalação de granitos do tipo A e corpos pegmatíticos mineralizados (Pedrosa-Soares et al., 2011; Dharmapriya et al., 2024).

Essa evolução orogênica gerou um médio empilhamento crustal, com espessamento significativo e reativação de falhas crustais profundas, criando um ambiente propício à formação de corpos pegmatíticos enriquecidos em elementos incompatíveis, água e outros voláteis.

3.1.3. *Litologia e unidades estratigráficas*

A composição litológica do Orógeno Araçuaí é dominada por duas grandes unidades: o Grupo Macaúbas e o Grupo Rio Doce. O Grupo Macaúbas é interpretado como uma sequência sedimentar e vulcanossedimentar que registra os diferentes estágios da evolução de uma margem passiva, com sedimentos derivados da erosão do Cráton do São Francisco. Já o Grupo Rio Doce representa um arco magmático continental, composto por ortognaisses, metassedimentos e metatonalitos (Pedrosa-Soares et al., 2007).

Durante os estágios finais da evolução tardi-colisional e início da fase pós-colisional, ocorreram intensos eventos de anatexia crustal, responsáveis pela geração dos granitos tipo S

altamente diferenciados, que originaram os pegmatitos mineralizados. Tais granitos estão organizados em até cinco gerações (G1 a G5), das quais a G4 é a mais intimamente relacionada à formação da Província Pegmatítica Oriental do Brasil (Pedrosa-Soares et al., 2011).

3.2 Província Pegmatítica Oriental do Brasil

A Província Pegmatítica Oriental do Brasil é uma das maiores províncias do tipo LCT (lítio, cério, tântalo) do mundo. Essa província se desenvolveu a partir da diferenciação extrema dos granitos peraluminosos durante o resfriamento do orógeno, gerando uma diversidade mineralógica significativa. Os pegmatitos são comumente encaixados em ortognaisses, micaxistos e metassedimentos do Grupo Macaúbas, com zonamento interno bem preservado e ocorrências notáveis de minerais industriais, gemológicos e portadores de elementos raros (Dharmapriya et al., 2024; Černý; Ercit, 2005).

Os pegmatitos da província incluem minerais como espodumênio, turmalina, lepidolita, columbita-tantalita, feldspatos, quartzo e berilo. Estes minerais estão distribuídos em zonas internas do corpo pegmatítico, que podem apresentar ambientes propícios à formação e preservação de inclusões fluidas.

3.2.1. Área de estudo: Governador Valadares e região

As amostras analisadas neste trabalho foram coletadas em pegmatitos situados na região de Governador Valadares e Conselheiro Pena, no leste do estado de Minas Gerais. Essa é uma das regiões mais representativas da Província Pegmatítica Oriental do Brasil, com registros de corpos pegmatíticos mineralizados e relevante histórico de extração de minerais industriais e gemológicos (Bello et al., 2000; Newman Carvalho et al., 2007).

Esses pegmatitos são compostos por minerais transparentes de boa qualidade, como berilo, quartzo e feldspato, que favorecem a ocorrência e a preservação de inclusões fluidas. Além disso, o posicionamento geológico dessas ocorrências em relação aos granitos tipo S da Suíte G4 sugere forte relação genética entre os processos de fusão crustal e a mineralização observada na região.

3.3 Inclusões Fluidas

As inclusões fluidas são microcavidades preenchidas com fases líquidas, gasosas ou sólidas, aprisionadas durante o crescimento, recristalização ou por processos pós-formacionais nos minerais hospedeiros. Essas pequenas porções de fluido constituem um dos registros mais diretos das condições físico-químicas dos sistemas geológicos antigos, fornecendo informações valiosas sobre a origem, a evolução e os processos que atuaram nas rochas ao longo do tempo (Goldstein, 2001).

A presença de inclusões fluidas em minerais transparentes, como o berilo, possibilita inferências sobre a composição dos fluidos, as temperaturas e pressões de aprisionamento e os eventos de modificação subsequentes. A análise detalhada dessas inclusões é uma ferramenta essencial para a reconstrução de ambientes de formação mineral, incluindo sistemas ígneos, metamórficos e hidrotermais.

3.3.1. Tipos de inclusões fluidas

As inclusões fluídas podem ser classificadas de acordo com as fases que elas contêm à temperatura ambiente. Essa tipologia é fundamental, pois permite uma primeira avaliação das características físico-químicas do fluido aprisionado. Conforme descrito por Goldstein (2001), as inclusões podem conter uma ou mais fases, sendo as mais comuns:

- a) inclusões monofásicas: apresentam apenas uma fase à temperatura ambiente. Podem ser apenas líquidas ou apenas gasosas. As inclusões monofásicas líquidas são comuns em ambientes de baixa temperatura ou em inclusões secundárias, enquanto as monofásicas gasosas geralmente indicam aprisionamento em condições de alta temperatura e baixa pressão;
- b) inclusões bifásicas: são as mais frequentes em estudos geológicos. Frequentemente apresentam uma fase líquida e uma fase vapor, como nas inclusões aquosas típicas. Entretanto, em determinados sistemas, especialmente aqueles ricos em CO₂, as duas fases podem corresponder a líquidos imiscíveis, como uma fase aquosa e outra carbônica. A proporção entre as fases é um indicativo importante das condições de formação da inclusão;
- c) inclusões trifásicas: apresentam três fases, que podem corresponder, por exemplo, a duas fases fluidas e uma fase sólida, ou ainda a uma fase líquida aquosa, uma fase líquida rica em CO₂ e uma fase vapor rica em CO₂, dependendo da composição e das condições de aprisionamento do fluido;
- d) inclusões polifásicas: contém mais de três fases, podendo incluir múltiplas fases líquidas, sólidas e gasosas. Essas inclusões são típicas de ambientes com fluidos salinos complexos ou de inclusões que sofreram processos pós-formacionais, como a decrepitação e o reequilíbrio (Goldstein, 2001).

A identificação dessas fases, aliada à observação do comportamento das inclusões durante os experimentos de aquecimento e resfriamento, permite inferir dados importantes sobre a composição e a evolução do sistema fluido.

3.3.2. *Classificação genética das inclusões sólidas*

As inclusões sólidas também podem ser classificadas de acordo com sua relação temporal com o crescimento do cristal hospedeiro. Essa classificação permite compreender se o mineral incluído foi incorporado antes, durante ou após a cristalização do hospedeiro, fornecendo informações importantes sobre a evolução do sistema mineralizante. As inclusões sólidas são classificadas em três grupos principais (Gübelin, 1988):

- a) protogenéticas: correspondem a minerais que já existiam antes da formação do cristal hospedeiro e que foram englobados durante seu crescimento. Essas inclusões representam fases minerais preexistentes ao processo de cristalização do hospedeiro e podem preservar informações sobre eventos geológicos anteriores;
- b) singenéticas: são aquelas que se formaram simultaneamente ao cristal hospedeiro, durante o mesmo evento de cristalização. Nesse caso, inclusão e hospedeiro compartilham condições semelhantes de formação, sendo comuns cristais bem desenvolvidos e em equilíbrio com a matriz;
- c) epigenéticas: formam-se após a cristalização do cristal hospedeiro, geralmente associadas ao preenchimento de fraturas, processos de alteração mineral ou recristalização tardia. Essas inclusões registram eventos posteriores ao crescimento do mineral hospedeiro.

3.3.3. *Classificação temporal das inclusões fluidas*

A classificação das inclusões fluidas quanto à sua origem temporal baseia-se quando o fluido foi aprisionado, em relação ao processo de crescimento ou modificação do cristal hospedeiro. Segundo Goldstein (2001), as inclusões são tradicionalmente classificadas em três grupos principais:

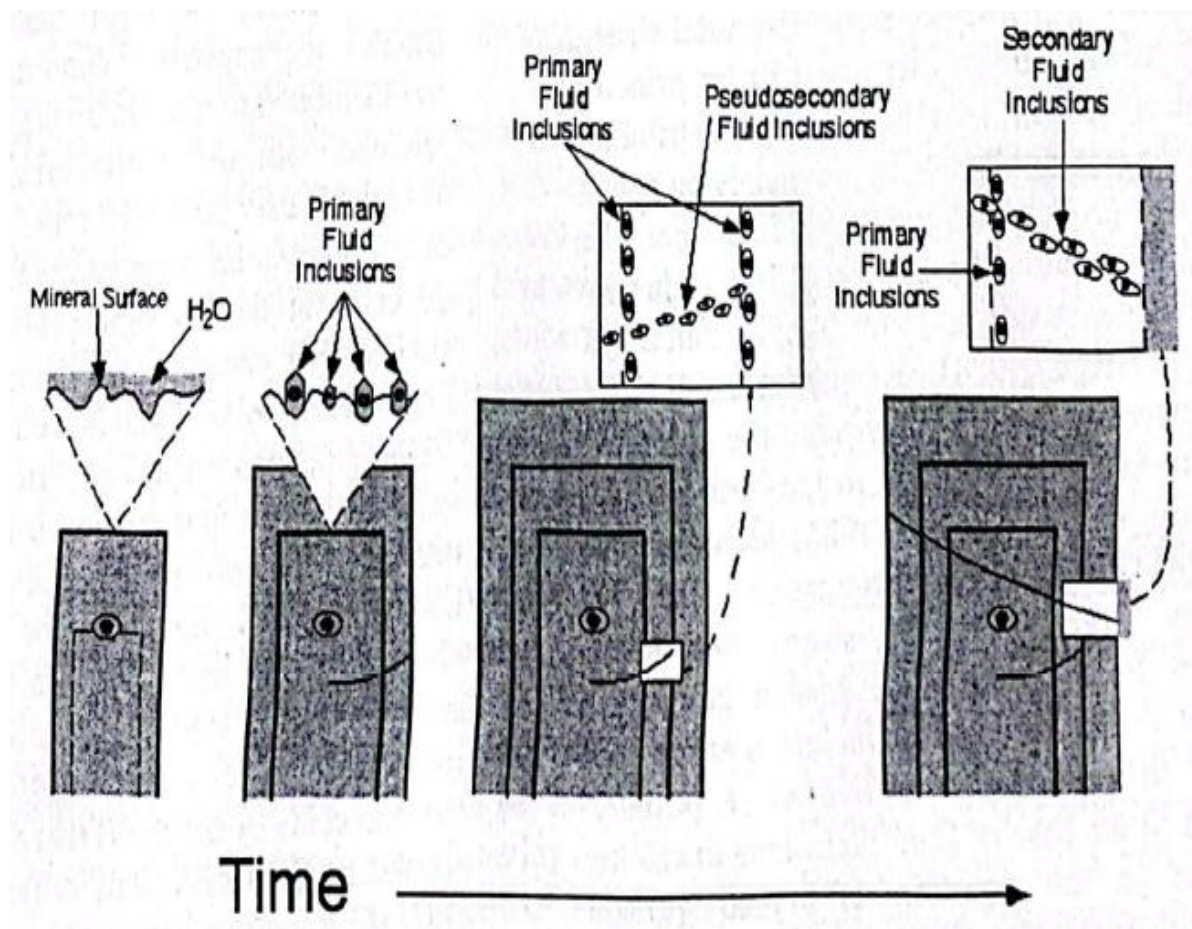
- a) inclusões primárias: formadas durante o crescimento inicial do cristal. Essas inclusões são contemporâneas à cristalização e, por isso, estão associadas diretamente ao fluido responsável pela formação do mineral. Normalmente, encontram-se dispostas isoladamente ou alinhadas paralelamente às faces de crescimento cristalino;
- b) inclusões pseudosecundárias: aprisionadas durante o crescimento de fissuras internas enquanto o cristal ainda estava em processo de formação. Essas inclusões são comuns em zonas de crescimento rápido ou em cristais que sofreram episódios de fraturamento e posterior cicatrização enquanto ainda estavam no ambiente de formação;

- c) inclusões secundárias: formadas após a cristalização do mineral hospedeiro, geralmente ao longo de planos de fraturas ou fissuras de cicatrização. São facilmente identificáveis pela sua disposição alinhada em planos de fraturas tardios. As inclusões secundárias podem registrar eventos hidrotermais ou de alteração pós-formacional, refletindo fluidos diferentes daqueles que originaram o mineral (Goldstein, 2001).

Além dessa classificação básica, é importante ressaltar que em muitos casos o reconhecimento da natureza temporal das inclusões requer análise detalhada, especialmente quando os cristais passaram por múltiplos eventos de deformação, recristalização ou reequilíbrio termal (Goldstein, 2001).

A Figura 6 apresenta um esquema ilustrativo mostrando a disposição típica das inclusões primárias, pseudosecundárias e secundárias em um cristal, facilitando a compreensão das diferentes fases de aprisionamento dos fluidos.

Figura 6 - Esquema representando a distribuição típica de inclusões primárias, pseudosecundárias e secundárias em um cristal.



Fonte: Goldstein (2001).

3.3.4. *Assembleias de inclusões fluidas*

O conceito de assembleia de inclusões fluidas refere-se ao conjunto de inclusões que compartilham características petrográficas semelhantes e que, por isso, são interpretadas como tendo sido aprisionadas no mesmo evento geológico. Segundo Goldstein (2001), uma assembleia é composta por inclusões que apresentam as seguintes similaridades:

- a) aparência petrográfica comum: mesmas características morfológicas, proporção de fases, tamanho e forma das inclusões.
- b) mesma posição espacial: inclusões localizadas na mesma zona do cristal ou em trajetórias paralelas, indicando crescimento ou fraturamento simultâneo.
- c) mesma composição de fases: presença de fases fluidas e sólidas semelhantes, com comportamento termal comparável durante os experimentos de aquecimento/resfriamento.

A identificação de assembleias de inclusões é fundamental para a correta interpretação da história de aprisionamento dos fluidos. Análises feitas em diferentes assembleias dentro de um mesmo cristal permitem distinguir eventos magmáticos, hidrotermais e metamórficos sucessivos que afetaram o mineral ao longo de sua história geológica.

Além disso, Goldstein (2001) destaca que, em sistemas complexos como os pegmatitos, a identificação e separação das assembleias de inclusões fluidas contribuem para o reconhecimento de diferentes pulsos de fluidos durante a evolução do sistema, desde os estágios magmáticos até os hidrotermais tardios.

4 RESULTADOS

Os resultados obtidos neste estudo são apresentados a seguir, organizados de acordo com as etapas metodológicas previamente descritas. Inicialmente, são expostas as observações petrográficas realizadas em microscopia óptica, com ênfase na morfologia, distribuição espacial, relações texturais e número de fases reconhecíveis nas inclusões fluidas observadas nos cristais de berilo analisados. Em seguida, são descritos os resultados obtidos por espectroscopia Raman, utilizado para auxiliar na identificação qualitativa das fases presentes nas inclusões selecionadas e contribuir para sua caracterização composicional.

4.1 Petrografia

A análise petrográfica das amostras de berilo foi realizada em microscópio Olympus BX41 (figura 7), utilizando aumentos de 40x. As fotomicrografias foram registradas utilizando um smartphone Redmi Note 13 Pro. Durante a aquisição das fotomicrografias, não foi utilizado líquido de imersão, sendo todas as observações realizadas a seco.

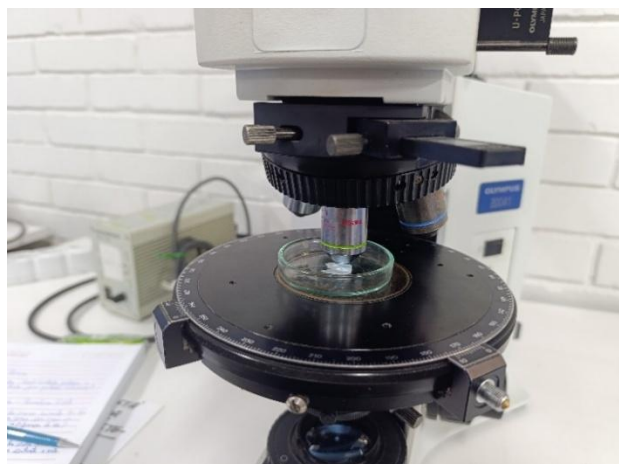
Os aumentos empregados possibilitaram a identificação de microcavidades contendo fases internas em parte das amostras analisadas, bem como a distinção de feições associadas a fraturas, zonas de alteração e variações texturais internas nos cristais de berilo. Em determinados casos, entretanto, a ausência de inclusões visíveis pode estar relacionada à real escassez dessas estruturas quanto às limitações inerentes ao campo visual, à profundidade das inclusões e à resolução óptica sob os aumentos utilizados. Dessa forma, as interpretações petrográficas foram realizadas de maneira cautelosa, considerando as limitações da técnica e da escala de observação.

A seguir, são apresentados os resultados petrográficos individualmente para cada amostra analisada.

Figura 7 - Microscópio petrográfico Olympus BX41 utilizado nas análises das inclusões fluidas.



Fonte: Microscope Central (2025).



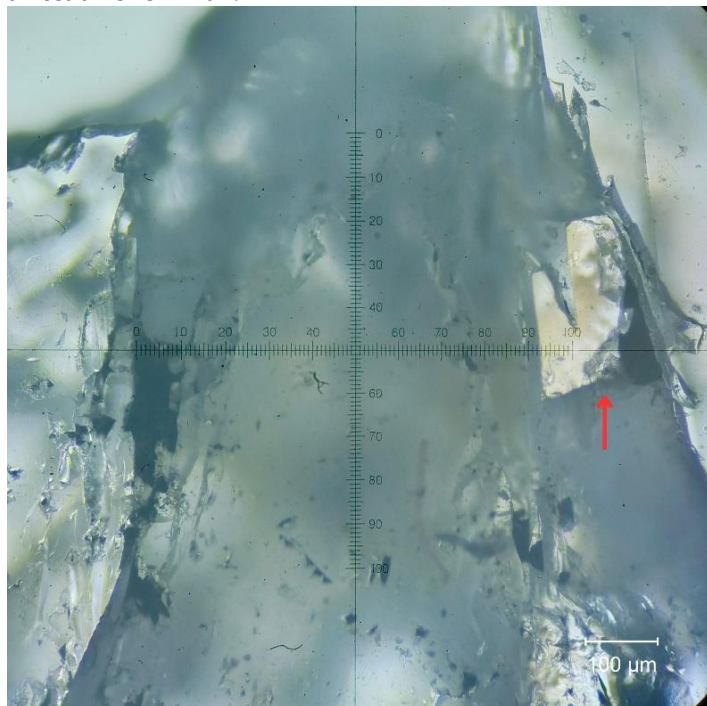
Fonte: Elaboração própria (2026).

4.1.1. *Ferreirinha I*

Na amostra *Ferreirinha I*, foram observadas inclusões com ampla variação morfológica, dimensional e óptica, hospedadas em cristais de berilo. As feições identificadas incluem inclusões fluidas monofásicas (líquidas), inclusões com aspecto bifásico, cavidades alongadas e irregulares, além de uma inclusão sólida. As inclusões ocorrem de forma isolada, dispersa, localmente agrupada ou alinhada, associando-se, em alguns campos, a microfraturas, microdescontinuidades e heterogeneidades internas do cristal hospedeiro.

Considerando os campos analisados, as inclusões apresentam dimensões variando de inferiores a 5 μm até aproximadamente 25 μm , com morfologias arredondadas, subarredondadas, lenticulares, alongadas e irregulares. Algumas cavidades exibem aspecto translúcido e homogêneo, sem bolha de vapor visível, enquanto outras apresentam domínio interno mais escuro e região periférica translúcida, caracterizando aspecto bifásico à temperatura ambiente. A seguir, são descritas individualmente as principais feições observadas nas Figuras 8 a 12.

Figura 8 - Inclusão sólida protogenética associada a cavidades alongadas e microfraturas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 8, observa-se um campo de visão petrográfico de um cristal de berilo da amostra Ferreirinha I, caracterizado pela presença de uma inclusão sólida, indicada pela seta vermelha, além de fraturas intragranulares e transgranulares, cavidades alongadas e pequenas inclusões dispersas no interior do cristal hospedeiro.

A feição indicada apresenta morfologia irregular, contornos relativamente bem definidos e elevado contraste óptico em relação ao berilo hospedeiro. Sob luz transmitida, exibe coloração clara a levemente amarelada e dimensão estimada entre 20 e 25 μm , com base na escala apresentada na fotomicrografia.

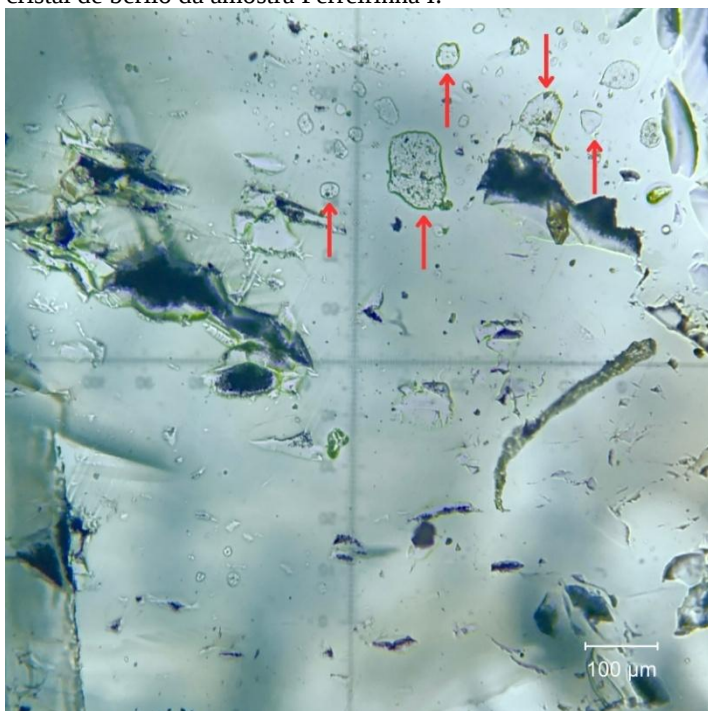
Ao redor da inclusão principal, observam-se cavidades alongadas e irregulares, algumas com contornos sinuosos e orientação preferencial aproximadamente vertical a subvertical. Essas cavidades apresentam contraste óptico variável e ocorrem próximas a microfraturas intragranulares do cristal. Também são registradas pequenas inclusões e microcavidades dispersas, em geral com dimensões inferiores a 10 μm , distribuídas principalmente nas regiões central e direita do campo observado.

Nos quadrantes à esquerda da fotomicrografia, ocorrem feições escuras e irregulares, com contornos pouco definidos e contraste óptico elevado em relação à matriz de berilo. Essas feições diferem da inclusão principal pela maior irregularidade morfológica e pelo aspecto

menos individualizado, sendo descritas como cavidades ou heterogeneidades internas de difícil classificação apenas por microscopia óptica.

O campo observado reúne, portanto, uma inclusão sólida de maior dimensão, cavidades alongadas, microfraturas e pequenas inclusões dispersas no cristal de berilo da amostra Ferreirinha I. As feições apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

Figura 9 - Inclusões sólidas subarredondadas a irregulares, cavidades alongadas e microfeições dispersas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 9, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Ferreirinha I contendo inclusões sólidas de diferentes tamanhos e morfologias, além de cavidades alongadas, microdescontinuidades e pequenas microfeições dispersas na matriz cristalina.

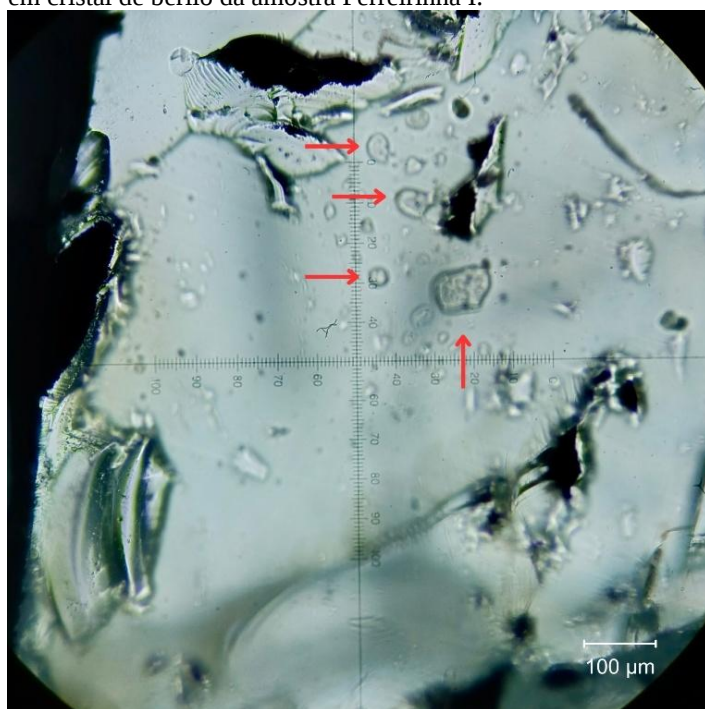
As inclusões indicadas pelas setas vermelhas apresentam morfologias predominantemente subarredondadas a irregulares, com contornos relativamente definidos e dimensões estimadas, em geral, entre 5 e 15 μm . Parte dessas inclusões exibe aspecto rugoso e translúcido a levemente turvo, sem bolha de vapor claramente visível, sendo interpretadas como inclusões sólidas.

Na porção central da fotomicrografia, destaca-se uma inclusão de maior dimensão, com morfologia irregular a subarredondada, bordas mais espessas e interior heterogêneo. Essa feição apresenta contraste óptico mais evidente em relação às inclusões menores ao redor, permitindo sua individualização na matriz cristalina. Próximo a essa inclusão maior, ocorrem pequenas cavidades arredondadas e subarredondadas, distribuídas de forma dispersa.

Também são observadas cavidades alongadas e feições irregulares distribuídas principalmente nas porções esquerda, central e inferior direita da fotomicrografia. Algumas dessas cavidades apresentam contornos sinuosos, orientação variável e contraste óptico moderado a elevado. Além disso, observam-se micrólitos e microcavidades dispersos por praticamente todo o campo de visão, geralmente com dimensões inferiores a 5 μm .

O campo observado reúne inclusões sólidas, micrólitos, cavidades alongadas, microcavidades dispersas e outras feições internas no cristal de berilo da amostra Ferreirinha I. Essas estruturas apresentam variações de morfologia, dimensão, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

Figura 10 - Inclusões fluidas alinhadas, cavidades alongadas e inclusão maior de morfologia irregular observadas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 10, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Ferreirinha I contendo inclusões fluidas alinhadas, cavidades alongadas, microfraturas e heterogeneidades internas distribuídas na matriz cristalina.

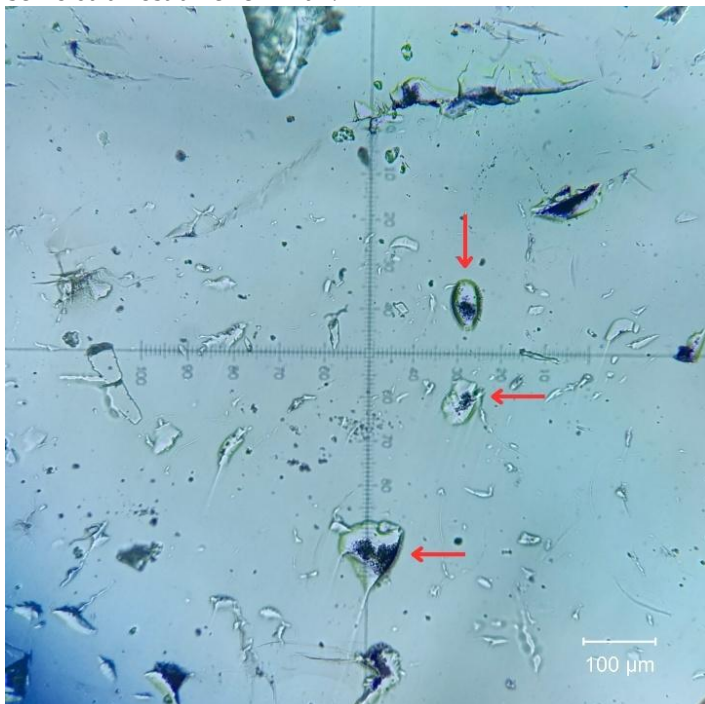
As inclusões indicadas pelas setas vermelhas apresentam morfologia arredondada a subarredondada, contornos relativamente definidos e dimensões estimadas entre 5 e 10 μm . Essas inclusões ocorrem de forma alinhada ao longo de uma faixa interna do cristal hospedeiro, caracterizando uma distribuição linear. As cavidades menores apresentam aspecto translúcido e homogêneo, sem bolha de vapor claramente visível, sendo descritas como inclusões fluidas monofásicas à temperatura ambiente.

Na porção inferior da área destacada, observa-se uma inclusão de maior dimensão, com aproximadamente 15 a 20 μm , morfologia irregular a subpoligonal, contornos mais espessos e interior heterogêneo. Essa feição apresenta contraste óptico mais elevado em relação às inclusões menores, permitindo sua individualização no campo observado.

Além das inclusões destacadas, a fotomicrografia apresenta cavidades alongadas e feições irregulares distribuídas principalmente nas porções central, inferior e esquerda do campo. Algumas dessas cavidades exibem geometria lenticular a alongada, contornos sinuosos e orientação variável. Também são observadas pequenas inclusões e microcavidades dispersas no entorno das feições principais, geralmente com dimensões inferiores a 5 μm .

O campo observado reúne inclusões fluidas monofásicas pequenas, dispostas de forma alinhada, uma inclusão maior de morfologia irregular, cavidades alongadas e microdescontinuidades internas no cristal de berilo da amostra Ferreirinha I. As feições apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

Figura 11 -Inclusões bifásicas (L-S), microcavidades dispersas e outras feições internas observadas em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 11, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Ferreirinha I contendo inclusões bifásicas (L-S), pequenas cavidades dispersas e microdescontinuidades internas distribuídas na matriz cristalina.

As inclusões indicadas pelas setas vermelhas apresentam morfologia ovalada a subarredondada, contornos relativamente definidos e dimensões estimadas entre 5 e 15 μm . As cavidades exibem uma região periférica translúcida e um domínio interno mais escuro, caracterizando aspecto bifásico à temperatura ambiente. Como não há registro da mobilidade da bolha, essa classificação é feita com cautela, com base apenas nas fases visíveis em microscopia óptica.

Além das inclusões destacadas, observam-se pequenas cavidades arredondadas a irregulares distribuídas no entorno das feições principais. Essas cavidades possuem dimensões geralmente inferiores a 5 μm , baixo a moderado contraste óptico e aspecto predominantemente translúcido, sendo descritas como pequenas inclusões ou microcavidades de difícil classificação quanto ao número de fases visíveis.

As inclusões principais ocorrem de forma dispersa na matriz cristalina, sem alinhamento linear evidente no campo observado. Algumas apresentam geometria mais regular, enquanto outras exibem leve assimetria ou contornos irregulares. Também são observadas

microdescontinuidades e cavidades alongadas discretas nas proximidades das inclusões destacadas.

O campo observado reúne inclusões fluidas com aspecto bifásico, pequenas cavidades dispersas e feições internas irregulares no cristal de berilo da amostra Ferreirinha I. As inclusões apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico e grau de definição dos contornos.

Figura 12 - Inclusão fluida bifásica (L+S) de morfologia lenticular observada em cristal de berilo da amostra Ferreirinha I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 12, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Ferreirinha I contendo uma cavidade de inclusão bifásica (L-S) principal, indicada pela seta vermelha, além de cavidades alongadas, microfraturas e heterogeneidades internas distribuídas na matriz cristalina.

A inclusão destacada apresenta morfologia lenticular a alongada, contornos relativamente definidos e dimensão estimada entre 15 e 20 μm . A cavidade exibe uma região periférica translúcida e um domínio interno mais escuro, caracterizando aspecto bifásico à temperatura ambiente. Como não há registro da mobilidade da bolha, essa classificação é feita de forma cautelosa, com base apenas nas fases visíveis em microscopia óptica.

Além da inclusão principal, observam-se cavidades alongadas e irregulares distribuídas principalmente nas porções central, inferior e direita do campo observado. Essas cavidades apresentam contornos sinuosos, orientação variável e contraste óptico moderado a elevado em relação ao berilo hospedeiro. Algumas delas exibem geometria lenticular ou canalicular, semelhante à inclusão destacada, porém com menor definição interna.

Na região inferior da fotomicrografia, ocorrem feições irregulares de maior dimensão, com bordas pouco definidas e aspecto heterogêneo. Essas feições estão associadas a zonas de maior concentração de cavidades e microdescontinuidades internas. Também são observadas pequenas inclusões ou microcavidades dispersas, geralmente inferiores a 5 μm , distribuídas ao redor das feições principais.

No campo observado, a Figura 12 reúne uma inclusão bifásica (L-S), cavidades alongadas, microcavidades dispersas, feições irregulares e microfraturas no cristal de berilo da amostra Ferreirinha I. As feições apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

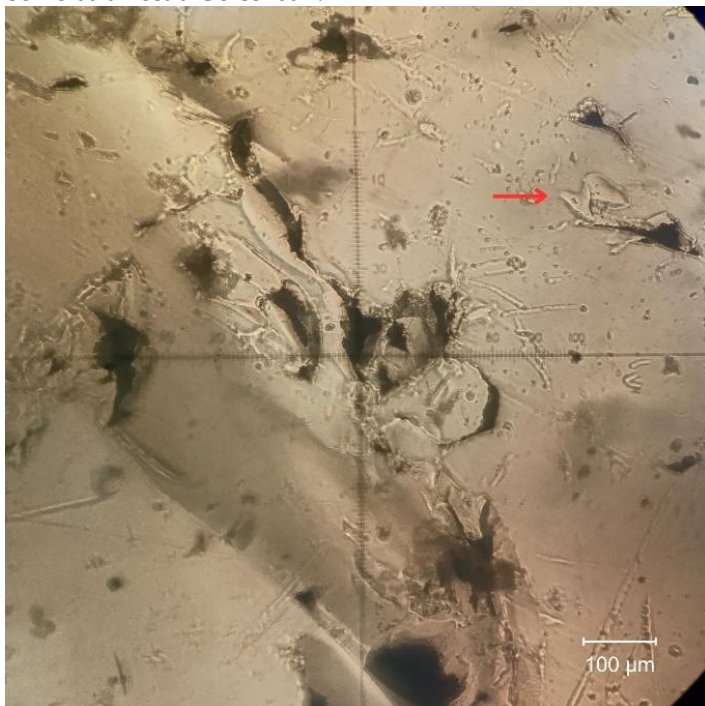
4.1.2. *Golconda I*

As Figuras 13 a 17 apresentam as principais inclusões e feições internas observadas em cristais de berilo da amostra Golconda I. Nos campos analisados, foram identificadas inclusões fluidas monofásicas a possivelmente bifásicas, possíveis inclusões sólidas, cavidades alongadas, feições irregulares e microdescontinuidades distribuídas na matriz cristalina.

As inclusões apresentam ampla variação morfológica, incluindo formas arredondadas, subarredondadas, lenticulares, canaliculares e irregulares. As dimensões variam desde microcavidades inferiores a 5 μm até cavidades maiores, superiores a 30 μm . Em alguns campos, as inclusões ocorrem de forma dispersa, enquanto em outros apresentam ordenamento, agrupamento ou estão próximas a descontinuidades internas e cavidades alongadas.

Considerando os campos observados, a amostra Golconda I apresenta elevada heterogeneidade textural, marcada pela coexistência de inclusões fluidas translúcidas, possíveis inclusões sólidas acastanhadas, cavidades de contornos sinuosos e microfraturas. As descrições a seguir apresentam, de forma individualizada, as principais feições observadas nas Figuras 13 a 17, priorizando seus aspectos morfológicos, ópticos e espaciais.

Figura 13 - Inclusões fluidas, cavidades alongadas, microfraturas e feições irregulares observadas em cristal de berilo da amostra Golconda I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 13, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Golconda I caracterizado por elevada heterogeneidade interna, com presença de inclusões fluidas, cavidades alongadas, microfraturas e feições irregulares distribuídas na matriz cristalina.

A inclusão destacada pela seta vermelha apresenta morfologia alongada a irregular, contornos parcialmente definidos e dimensão estimada entre 10 e 15 μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia. A cavidade exhibe aspecto predominantemente translúcido, com discreto contraste interno. Como não é possível individualizar com segurança a presença de bolha de vapor, a inclusão é descrita como monofásica a possivelmente bifásica à temperatura ambiente.

Além da inclusão destacada, observam-se numerosas cavidades e inclusões menores distribuídas ao longo do campo observado. Essas feições apresentam morfologias arredondadas, subarredondadas, alongadas e irregulares, com dimensões geralmente inferiores a 10 μm . Parte dessas inclusões possui aspecto translúcido e homogêneo, sem bolha de vapor visível, sendo compatível com inclusões fluidas monofásicas em microscopia óptica.

Na porção central e centro-esquerda da fotomicrografia, ocorrem cavidades alongadas e feições irregulares de maior dimensão, algumas com geometria lenticular a canalicular e

contornos sinuosos. Essas cavidades apresentam contraste óptico variável e ocorrem próximas a microdescontinuidades internas do cristal hospedeiro. Em alguns trechos, as cavidades parecem acompanhar faixas de maior fragilidade interna, embora a relação genética dessas feições não possa ser definida apenas pela fotomicrografia.

Na região inferior do campo observado, são registradas feições escuras e irregulares, com contornos pouco definidos e contraste óptico elevado em relação à matriz de berilo. Essas feições podem corresponder a cavidades, microfraturas ou zonas internas de difícil individualização óptica. Também são observadas pequenas inclusões dispersas ao redor dessas áreas, indicando variação textural dentro do cristal.

Na porção superior e superior direita da fotomicrografia, a matriz de berilo apresenta pequenas cavidades isoladas e dispersas, algumas com morfologia subarredondada e outras com contornos irregulares. Essas feições possuem baixo a moderado contraste óptico e dimensões reduzidas, dificultando a identificação precisa do número de fases internas.

Em conjunto, a Figura 13 evidencia uma associação de inclusões fluidas pequenas, cavidades alongadas, feições irregulares e microfraturas no cristal de berilo da amostra Golconda I. As feições observadas apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico e distribuição espacial, com predomínio de morfologias alongadas, irregulares e subarredondadas. A classificação das inclusões foi realizada de forma cautelosa, com base nas fases visíveis em luz transmitida.

Figura 14 - Inclusões fluidas, cavidades irregulares e feições alongadas observadas em cristal de berilo da amostra Golconda I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 14, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Golconda I caracterizado pela presença de inclusões fluidas, cavidades irregulares, feições alongadas e microdescontinuidades distribuídas na matriz cristalina.

A inclusão indicada pela seta vermelha apresenta morfologia arredondada a subarredondada, contornos relativamente definidos e dimensão estimada entre 10 e 15 μm . A cavidade exibe aspecto predominantemente translúcido, sem bolha de vapor claramente visível, sendo descrita como inclusão fluida monofásica à temperatura ambiente. Ao redor dessa inclusão, observam-se pequenas cavidades dispersas, de dimensões reduzidas, geralmente inferiores a 5 μm . Abaixo da inclusão destacada também são observadas pequenas feições alongadas a tubulares, distribuídas de forma esparsa no cristal hospedeiro e apresentando contraste óptico semelhante ao das demais cavidades presentes no campo observado.

Na porção superior da fotomicrografia, ocorrem feições alongadas e irregulares, algumas com aspecto lenticular a canalicular, contornos sinuosos e contraste óptico elevado em relação ao berilo hospedeiro. Essas feições apresentam orientação preferencial aproximadamente horizontal a sub-horizontal em alguns trechos, ocorrendo próximas a microfraturas e descontinuidades internas do cristal.

Na porção direita do campo observado, destaca-se uma cavidade maior, de morfologia irregular a subarredondada, com contornos bem marcados e interior heterogêneo. Essa feição apresenta bordas mais espessas e contraste óptico variável, diferindo das inclusões menores pela dimensão e pela complexidade interna.

Nas regiões central e inferior da fotomicrografia, são observadas numerosas inclusões pequenas e cavidades discretas, distribuídas de forma dispersa na matriz cristalina. Essas feições apresentam morfologias arredondadas, subarredondadas e irregulares, com baixo a moderado contraste óptico. Também são observadas microfraturas finas e feições lineares discretas que atravessam parte do campo observado.

Em conjunto, a Figura 14 evidencia uma associação de inclusões fluidas pequenas, cavidades alongadas, feições irregulares de maior dimensão e microdescontinuidades internas no cristal de berilo da amostra Golconda I. As feições observadas apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico e distribuição espacial, com predomínio de morfologias arredondadas, alongadas e irregulares.

Figura 15 - Associação entre inclusão fluida e inclusão sólida observada em cristal de berilo da amostra Golconda I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 15, observam-se duas feições principais hospedadas no cristal de berilo da amostra Golconda I, indicadas pelas setas vermelhas, além de pequenas inclusões, cavidades alongadas e microdescontinuidades distribuídas na matriz cristalina.

A primeira feição, localizada na região central da fotomicrografia, corresponde a uma inclusão fluida de morfologia arredondada a subarredondada, com contornos relativamente definidos e dimensão estimada entre 10 e 12 μm . A cavidade apresenta aspecto predominantemente translúcido e homogêneo, sem bolha de vapor ou fase sólida claramente visível, sendo descrita como inclusão fluida monofásica à temperatura ambiente.

A segunda feição, localizada na porção superior direita da fotomicrografia, corresponde a uma inclusão sólida. Essa feição apresenta coloração castanha a castanho-alaranjada, morfologia irregular, contornos pouco regulares e contraste óptico elevado em relação ao berilo hospedeiro. Sua dimensão é estimada entre 15 e 20 μm . A inclusão encontra-se aparentemente encapsulada pelo cristal hospedeiro, apresentando características compatíveis com uma inclusão sólida protogenética. A morfologia irregular observada pode estar relacionada ao plano de corte da seção delgada, não representando necessariamente sua geometria tridimensional original. Diferentemente da inclusão fluida descrita anteriormente, essa feição apresenta aspecto mais opaco e heterogêneo, não sendo possível reconhecer fase fluida dominante apenas por microscopia óptica. Sua identificação mineralógica depende de confirmação por técnica complementar, como espectroscopia Raman.

Além das feições destacadas, a fotomicrografia apresenta numerosas inclusões pequenas e cavidades dispersas, com dimensões geralmente inferiores a 10 μm . Essas feições possuem morfologias arredondadas, subarredondadas, alongadas e irregulares, com baixo a moderado contraste óptico. Parte delas apresenta aspecto translúcido, compatível com inclusões fluidas monofásicas em luz transmitida.

Na porção esquerda e inferior do campo observado, ocorrem cavidades alongadas e feições irregulares de maior dimensão, algumas com geometria lenticular a canalicular e contornos sinuosos. Também são observadas pequenas feições escuras e microdescontinuidades internas distribuídas na matriz cristalina.

Considerando o campo analisado, a Figura 15 evidencia a coexistência espacial de uma inclusão fluida monofásica, uma inclusão sólida acastanhada, cavidades alongadas e microfeições dispersas no cristal de berilo da amostra Golconda I. As feições observadas apresentam variação de forma, tamanho, cor, contraste óptico e grau de definição dos contornos.

Figura 16 - Inclusão sólida acastanhada associada a descontinuidade interna em cristal de berilo da amostra Golconda I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 16, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Golconda I contendo uma inclusão sólida, indicada pela seta vermelha, além de cavidades menores, microdescontinuidades e feições irregulares distribuídas na matriz cristalina.

A inclusão destacada apresenta morfologia irregular a subarredondada, contornos relativamente definidos e coloração castanha a castanho-amarelada. A feição possui dimensão estimada entre 15 e 20 μm e destaca-se da matriz de berilo pelo contraste óptico elevado e pelo aspecto interno heterogêneo. A inclusão encontra-se totalmente encapsulada pelo cristal hospedeiro, apresentando relações texturais compatíveis com seu aprisionamento durante o desenvolvimento do cristal. Diferentemente das inclusões fluidas translúcidas observadas em outras regiões da amostra, essa feição apresenta menor transparência óptica e aspecto mais granular, sendo descrita como uma inclusão sólida.

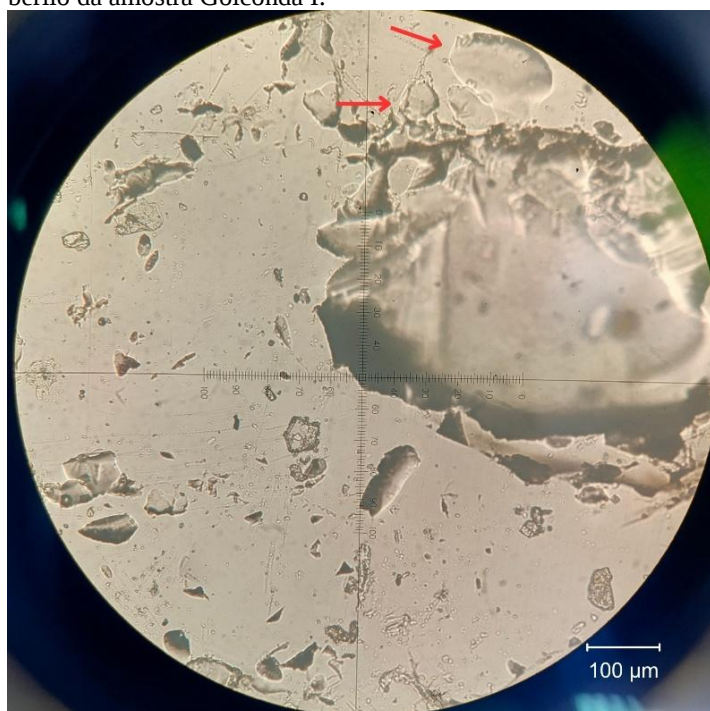
A inclusão ocorre próxima a uma descontinuidade interna de orientação aproximadamente sub-horizontal, visível no campo observado. Essa relação espacial indica associação entre a feição destacada e uma zona de heterogeneidade interna do cristal hospedeiro, embora a origem dessa associação não possa ser definida apenas com base na fotomicrografia.

Além da inclusão principal, observam-se pequenas cavidades e inclusões dispersas, principalmente nas regiões central e inferior direita da fotomicrografia. Essas feições apresentam dimensões geralmente inferiores a 10 μm , morfologias arredondadas, subarredondadas e irregulares, e contraste óptico variável. Algumas cavidades menores exibem aspecto translúcido, compatível com inclusões fluidas monofásicas em luz transmitida.

Na porção superior e à direita do campo observado, também ocorrem feições irregulares de maior dimensão, com contornos sinuosos e contraste óptico moderado a elevado. Essas feições se distribuem próximas a microfraturas e descontinuidades internas, compondo uma região texturalmente heterogênea no cristal de berilo.

Considerando o campo analisado, a Figura 16 evidencia a presença de uma inclusão sólida acastanhada, associada espacialmente a uma descontinuidade interna, além de cavidades menores, inclusões fluidas discretas e microfeições irregulares. As feições observadas apresentam variação de tamanho, forma, cor, contraste óptico e grau de definição dos contornos.

Figura 17 - Cavidades irregulares, feições alongadas e microdescontinuidades internas observadas em cristal de berilo da amostra Golconda I.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 17, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Golconda I caracterizado por elevada heterogeneidade interna, com presença de cavidades

irregulares, feições alongadas, microfraturas e microdescontinuidades distribuídas na matriz cristalina.

Na porção superior direita da fotomicrografia, destaca-se uma cavidade de maior dimensão, indicada pela seta vermelha, com morfologia irregular a subarredondada, contornos parcialmente definidos e aspecto predominantemente translúcido. Essa feição apresenta dimensão superior a 30 μm e interior heterogêneo, com variações de contraste óptico em relação à matriz de berilo. A borda da cavidade é irregular, com trechos sinuosos e descontinuidades próximas.

Na região central superior, próxima à segunda seta vermelha, observa-se outra feição irregular de menor dimensão, associada a pequenas cavidades e microdescontinuidades internas. Essa feição apresenta contornos pouco regulares, contraste óptico moderado e morfologia alongada a irregular. Próxima a essa feição observa-se uma pequena inclusão de coloração avermelhada, distinguindo-se da matriz cristalina pelo contraste óptico e pela coloração mais intensa. Em seu entorno, ocorrem pequenas inclusões e cavidades dispersas, com dimensões geralmente inferiores a 10 μm .

Além das feições destacadas, a fotomicrografia apresenta numerosas cavidades menores distribuídas ao longo do campo observado. Essas cavidades possuem morfologias variadas, incluindo formas arredondadas, subarredondadas, alongadas, lenticulares e irregulares. Algumas exibem aspecto translúcido e homogêneo, sem bolha de vapor claramente visível, sendo compatíveis com inclusões fluidas monofásicas em luz transmitida. Outras apresentam contraste óptico mais elevado e contornos menos definidos, dificultando a individualização precisa das fases internas.

Na porção central e inferior da fotomicrografia, observam-se feições irregulares de maior dimensão, algumas com bordas sinuosas e interior heterogêneo. Também são registradas microfraturas e descontinuidades finas, com orientação variável, além de pequenas cavidades dispersas na matriz cristalina. Em alguns setores, as cavidades parecem ocorrer próximas umas das outras, formando agrupamentos locais.

Considerando o campo analisado, a Figura 17 evidencia uma associação de cavidades irregulares, inclusões fluidas pequenas, feições alongadas, microfraturas e microdescontinuidades internas no cristal de berilo da amostra Golconda I. As feições observadas apresentam ampla variação de forma, tamanho, contraste óptico e grau de definição dos contornos, com predomínio de morfologias irregulares, alongadas e subarredondadas.

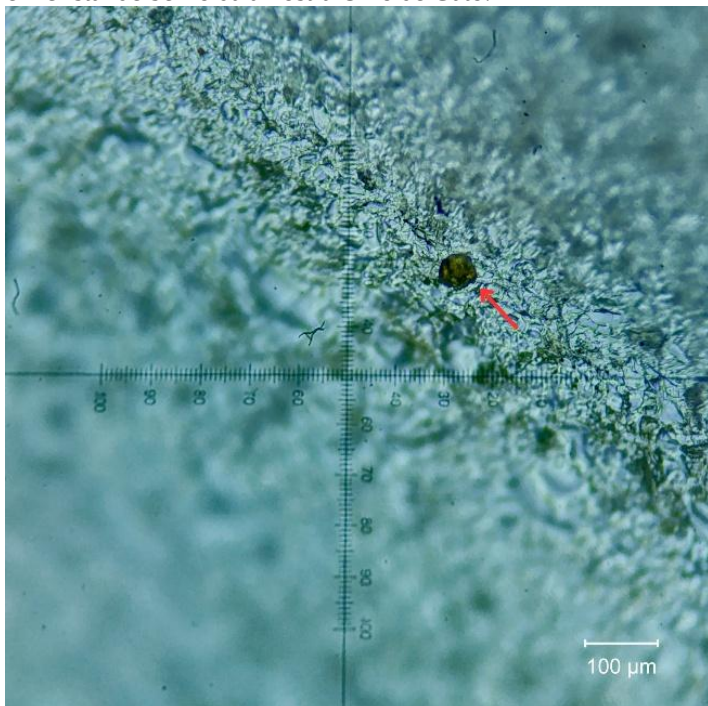
4.1.3. *Olho de Gato*

As Figuras 18 a 22 apresentam as principais feições internas observadas em cristais de berilo provenientes da lavra Olho de Gato. As amostras analisadas apresentam boa transparência sob luz transmitida, o que permitiu a observação das inclusões e microfeições internas sob aumento de 40x. O mineral hospedeiro mostra-se predominantemente incolor a levemente esverdeado, com domínios relativamente homogêneos, embora ocorram faixas internas heterogêneas, microdescontinuidades, pequenas cavidades e partículas dispersas.

Nos campos analisados, foram identificadas possíveis inclusões sólidas com diferentes colorações, incluindo tons castanho-amarelados, azul-escuros e esverdeados a amarelados. Essas feições apresentam morfologias variadas, desde formas subarredondadas e irregulares até hábitos euédricos a subeuédricos, com dimensões estimadas entre aproximadamente 8 e 20 μm . Em alguns casos, as inclusões ocorrem de forma isolada em regiões relativamente homogêneas do berilo; em outros, estão associadas espacialmente a faixas de maior heterogeneidade textural, microdescontinuidades e pequenas cavidades.

As feições observadas apresentam variações de forma, cor, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos. Algumas inclusões destacam-se pelo aspecto mais opaco e pelo contraste elevado em relação à matriz cristalina, enquanto outras exibem domínios parcialmente translúcidos e variações internas de tonalidade. A seguir, são descritas individualmente as principais feições observadas nas Figuras 18 a 22, priorizando os aspectos morfológicos, ópticos e espaciais reconhecidos por microscopia petrográfica.

Figura 18 – Inclusão sólida protogenética com coloração acastanhada associada a zona de heterogeneidade interna em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 18, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Olho de Gato marcado por uma faixa interna de elevada heterogeneidade textural, na qual ocorrem pequenas cavidades, microdescontinuidades, feições irregulares e variações locais de contraste óptico.

A feição indicada pela seta vermelha corresponde a uma inclusão sólida hospedada no berilo. Essa inclusão apresenta morfologia subarredondada a levemente irregular, contornos relativamente definidos e coloração castanha a castanho-amarelada. Sua dimensão é estimada entre 15 e 20 μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia. A feição destaca-se da matriz cristalina pelo contraste óptico elevado e pelo aspecto mais escuro em relação às cavidades translúcidas observadas no entorno.

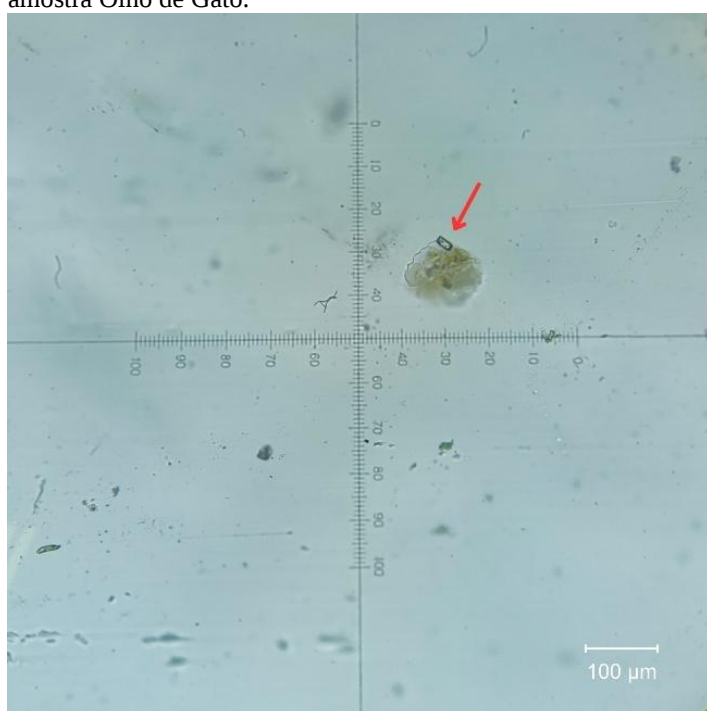
A inclusão sólida ocorre em uma região texturalmente heterogênea, caracterizada por domínios de aspecto irregular, pequenas cavidades dispersas e microdescontinuidades internas. Ao redor da feição principal, observam-se variações de cor e contraste no cristal hospedeiro, além de microfeições alongadas e irregulares de difícil individualização óptica.

Diferentemente das inclusões fluidas translúcidas descritas em outras amostras, a feição destacada apresenta menor transparência óptica e aspecto mais opaco, sendo descrita como inclusão sólida. Entretanto, sua identificação mineralógica não pode ser definida apenas por

microscopia óptica, sendo necessária confirmação por técnica complementar, como espectroscopia Raman.

A Figura 18 evidencia a presença de uma inclusão sólida acastanhada associada espacialmente a uma zona interna heterogênea do cristal de berilo da amostra Olho de Gato. As feições observadas apresentam variação de forma, cor, contraste óptico e grau de definição dos contornos.

Figura 19 - Inclusão sólida irregular, de coloração amarelada a castanho-clara, observada em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 19, observa-se uma inclusão sólida hospedada no cristal de berilo da amostra Olho de Gato, indicada pela seta vermelha. A feição apresenta morfologia irregular a subarredondada, contornos parcialmente lobados e coloração amarelada a castanho-clara. Sua dimensão é estimada entre 15 e 20 μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia.

A inclusão destaca-se da matriz cristalina pelo contraste óptico moderado a elevado e pelo aspecto interno heterogêneo. Em luz transmitida, são observadas variações internas de cor e transparência, sugerindo a presença de domínios ópticos distintos dentro da feição. Não é possível, entretanto, definir sua composição mineralógica apenas por microscopia óptica, sendo necessária confirmação por técnica complementar, como espectroscopia Raman.

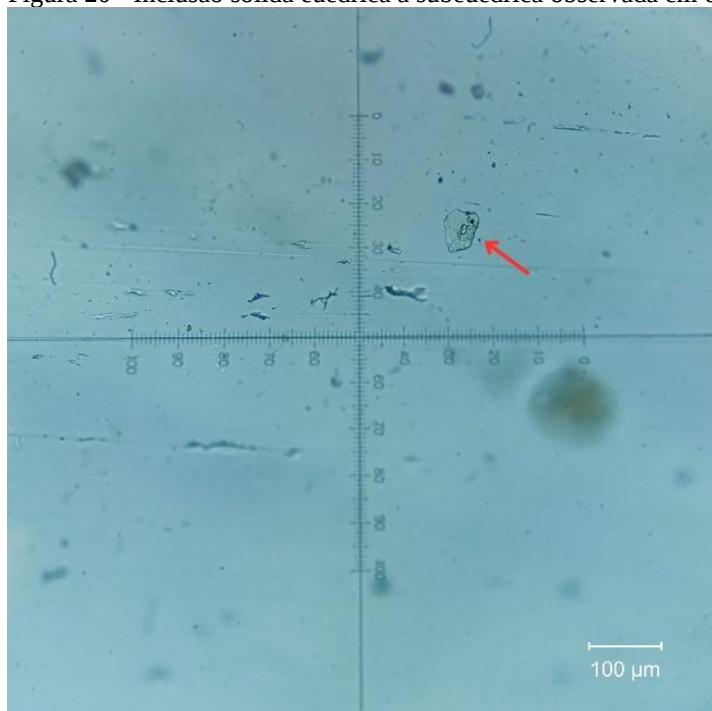
Na porção superior da inclusão, observa-se uma pequena feição alongada ou prolongamento irregular, em contato com a estrutura principal. Essa característica contribui para o aspecto assimétrico da inclusão e diferencia a feição das inclusões fluidas mais regulares observadas em outras imagens.

A região ao redor da inclusão apresenta matriz relativamente mais homogênea quando comparada a outros campos petrográficos da mesma amostra, com menor densidade aparente de microfraturas, cavidades alongadas e inclusões dispersas. Ainda assim, são observadas pequenas cavidades e microfeições pontuais distribuídas no campo, geralmente com baixo contraste óptico e dimensões reduzidas.

Além das feições anteriormente descritas, observam-se pequenas cavidades dispersas no campo de visão, algumas das quais apresentam morfologia compatível com cavidades do tipo *melt inclusion*. Essas feições podem estar relacionadas ao aprisionamento de pequenas porções de material fundido durante o crescimento do cristal hospedeiro, preservando informações sobre as condições de cristalização do sistema. Entretanto, sua identificação baseia-se exclusivamente em observações por microscopia óptica, não sendo possível confirmar sua natureza sem análises complementares.

A Figura 19 mostra, portanto, uma inclusão sólida isolada, de morfologia irregular a subarredondada, inserida em uma matriz de berilo relativamente homogênea. A feição apresenta variação interna de cor, contornos lobados e contraste óptico distinto em relação ao cristal hospedeiro.

Figura 20 - Inclusão sólida euédrica a subeuédrica observada em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 20, observa-se uma inclusão sólida hospedada no cristal de berilo da amostra Olho de Gato, indicada pela seta vermelha. A feição apresenta morfologia euédrica a subeuédrica, com contornos relativamente retos, geometria poligonal e limites bem definidos em relação à matriz cristalina. Sua dimensão é estimada entre 10 e 12 μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia.

A inclusão sólida apresenta aspecto translúcido a levemente amarelado, com contraste óptico moderado em relação ao berilo hospedeiro. Em seu interior, observa-se um pequeno domínio mais escuro próximo à porção superior da feição, indicando heterogeneidade óptica interna. Essa característica diferencia a inclusão das cavidades fluidas mais homogêneas e arredondadas observadas em outros campos petrográficos.

A inclusão ocorre em uma região relativamente homogênea do cristal, sem associação direta com zonas densamente fraturadas ou com agrupamentos expressivos de cavidades. No entorno da feição, observam-se pequenas microcavidades, feições alongadas discretas e microdescontinuidades esparsas, com baixo contraste óptico e dimensões reduzidas.

A fotomicrografia também apresenta uma feição difusa e amarelada no quadrante inferior direita do campo observado, com contornos pouco definidos e aspecto desfocado, não sendo possível individualizá-la com segurança como inclusão. Pequenas cavidades e pontos

escuros dispersos ocorrem ao longo da matriz, mas em menor densidade quando comparados a outros campos da amostra Olho de Gato.

A Figura 20 evidencia, portanto, a inclusão sólida de hábito euédrico a subeuédrico, inserida em uma matriz de berilo relativamente homogênea. A feição apresenta geometria poligonal, contornos definidos, leve coloração amarelada e discreta heterogeneidade interna.

Figura 21 - Inclusão sólida azul-escura associada a faixa interna heterogênea em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 21, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra Olho de Gato caracterizado por uma faixa interna de elevada heterogeneidade textural, marcada por microdescontinuidades, cavidades pequenas, feições alongadas e variações locais de contraste óptico.

A feição indicada pela seta vermelha corresponde a uma inclusão sólida hospedada no berilo. Essa inclusão apresenta coloração azul-escura intensa, morfologia irregular a subangular, contornos parcialmente definidos e contraste óptico elevado em relação à matriz cristalina adjacente. Sua dimensão é estimada entre 8 e 12 μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia.

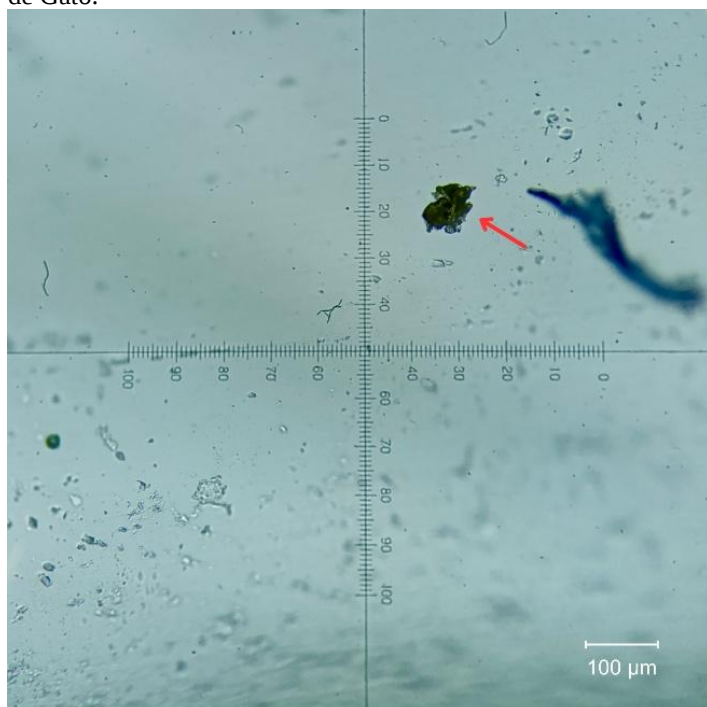
A inclusão sólida ocorre no interior de uma faixa texturalmente heterogênea, onde são observadas pequenas cavidades, microfeições irregulares e domínios com diferentes graus de

transparência. A região adjacente à inclusão apresenta aspecto fragmentado a irregular, com variações de cor e contraste que dificultam a individualização precisa das feições menores apenas por microscopia óptica.

Além da inclusão destacada, a fotomicrografia apresenta pequenas cavidades e inclusões dispersas ao longo da faixa heterogênea, algumas com morfologia alongada ou irregular. Também são observadas microdescontinuidades internas com orientação aproximadamente vertical a subvertical, acompanhando a zona onde a inclusão principal está inserida.

A Figura 21 evidencia uma inclusão sólida azul-escura associada espacialmente a uma faixa interna heterogênea do cristal de berilo da amostra Olho de Gato. As feições observadas apresentam variação de cor, forma, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

Figura 22 - Inclusão sólida de coloração esverdeada a amarelada observada em cristal de berilo da amostra Olho de Gato.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 22, observa-se uma inclusão sólida hospedada no cristal de berilo da amostra Olho de Gato, indicada pela seta vermelha. A feição apresenta morfologia irregular a subangular, contornos parcialmente definidos e coloração esverdeada a amarelada. Sua dimensão é estimada entre 10 e 12 μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia.

A inclusão sólida destaca-se da matriz cristalina pelo contraste óptico elevado e pelo aspecto interno heterogêneo. Em luz transmitida, são observadas variações internas de tonalidade, com domínios mais escuros e regiões parcialmente translúcidas. Essas características diferenciam a feição das inclusões fluidas translúcidas e homogêneas observadas em outros campos petrográficos.

A região adjacente à inclusão apresenta pequenas cavidades e microfeições dispersas, em geral com dimensões reduzidas e baixo contraste óptico. Também se observa, à direita da inclusão principal, uma feição alongada azulada, de contornos difusos, cuja natureza não pode ser definida com segurança apenas pela fotomicrografia. Na porção inferior esquerda do campo, ocorrem pequenas cavidades e pontos dispersos na matriz do berilo.

Assim a Figura 22 evidencia uma inclusão sólida esverdeada a amarelada, com morfologia irregular, variação interna de cor e contraste óptico distinto em relação ao cristal hospedeiro. A identificação mineralógica da feição não pode ser estabelecida apenas por microscopia óptica, sendo necessária confirmação por técnica complementar, como espectroscopia Raman.

4.1.4. *São Domingos*

As amostras de berilo provenientes da lavra São Domingos apresentam boa transparência sob luz transmitida, favorecendo a observação de inclusões e microfeições internas sob aumento de 40x. O mineral hospedeiro mostra-se predominantemente incolor a levemente esverdeado, com domínios relativamente homogêneos. Entretanto, também são observadas microfraturas dispersas, descontinuidades internas, cavidades irregulares e pequenas irregularidades ópticas, responsáveis por variações locais de contraste.

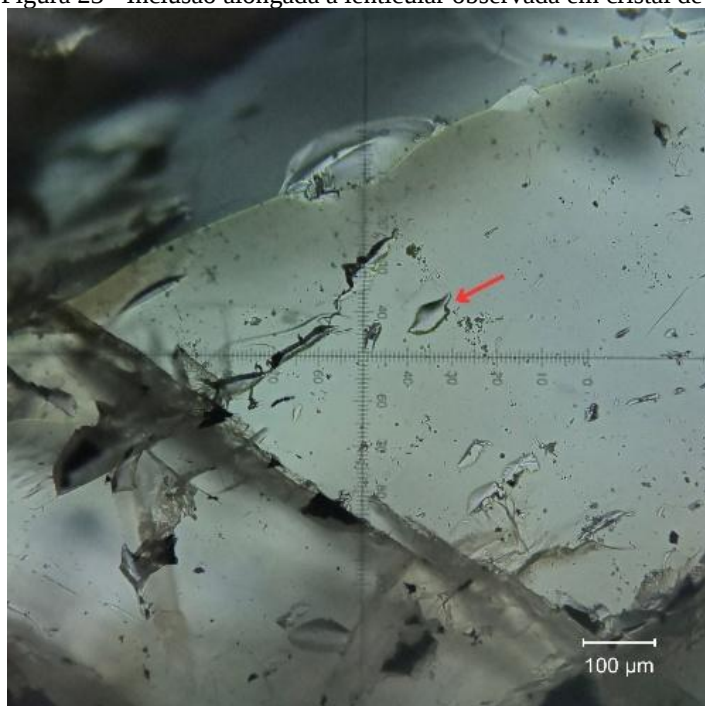
A observação das estruturas destacadas foi realizada por meio de varredura focal ao longo das lâminas, permitindo avaliar, sempre que possível, sua posição relativa em relação ao cristal hospedeiro e diferenciá-las de feições associadas ao plano de polimento da amostra. Nos campos analisados, as inclusões e cavidades ocorrem de forma esparsa a localmente agrupada, com distribuição variável no interior do cristal.

As Figuras 23 a 27 apresentam as principais feições observadas nas amostras provenientes da lavra São Domingos. Foram identificadas inclusões alongadas, lenticulares, subtabulares, aciculares, prismáticas e arredondadas a subarredondadas, além de cavidades irregulares, microcavidades dispersas e microdescontinuidades internas. As feições apresentam

dimensões variáveis, desde microcavidades inferiores a 5 μm até inclusões alongadas com cerca de 35 μm , com diferentes graus de transparência, contraste óptico e definição dos contornos.

Entre as feições descritas, destacam-se possíveis inclusões sólidas de hábito alongado, subtabular, acicular e prismático, além de inclusões arredondadas a subarredondadas com aspecto fluido monofásico ou de difícil classificação quanto ao número de fases visíveis. A seguir, são apresentadas as descrições individuais das principais feições observadas nas Figuras 23 a 27, priorizando seus aspectos morfológicos, ópticos e espaciais reconhecidos por microscopia petrográfica.

Figura 23 - Inclusão alongada a lenticular observada em cristal de berilo da amostra São Domingos



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 23, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra São Domingos marcado por heterogeneidade interna, com presença de inclusões alongadas, cavidades irregulares, microfraturas, microdescontinuidades e pequenas inclusões dispersas na matriz cristalina.

A feição indicada pela seta vermelha corresponde a uma inclusão alongada a lenticular, com contornos relativamente definidos e aspecto translúcido sob luz transmitida. A inclusão apresenta morfologia elipsoidal a levemente irregular, com dimensão estimada entre 10 e 12

μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia. Não é possível reconhecer, com segurança, bolha de vapor ou fase sólida interna, sendo mais adequado descrevê-la como uma inclusão/cavidade alongada de natureza indeterminada com base apenas na microscopia óptica.

Próximo à inclusão destacada, observam-se pequenas cavidades e inclusões dispersas, de dimensões geralmente inferiores a $5\ \mu\text{m}$, com morfologias arredondadas, subarredondadas e irregulares. Essas feições apresentam baixo a moderado contraste óptico e ocorrem de forma esparsa na matriz do berilo.

Na porção central e inferior direita da fotomicrografia, ocorrem cavidades alongadas e feições lenticulares, algumas com contornos mais definidos e aspecto translúcido. Essas cavidades apresentam dimensões variadas, em geral entre 10 e $30\ \mu\text{m}$, e morfologias alongadas, elipsoidais ou irregulares. Algumas delas se encontram próximas a microdescontinuidades internas e fraturas discretas.

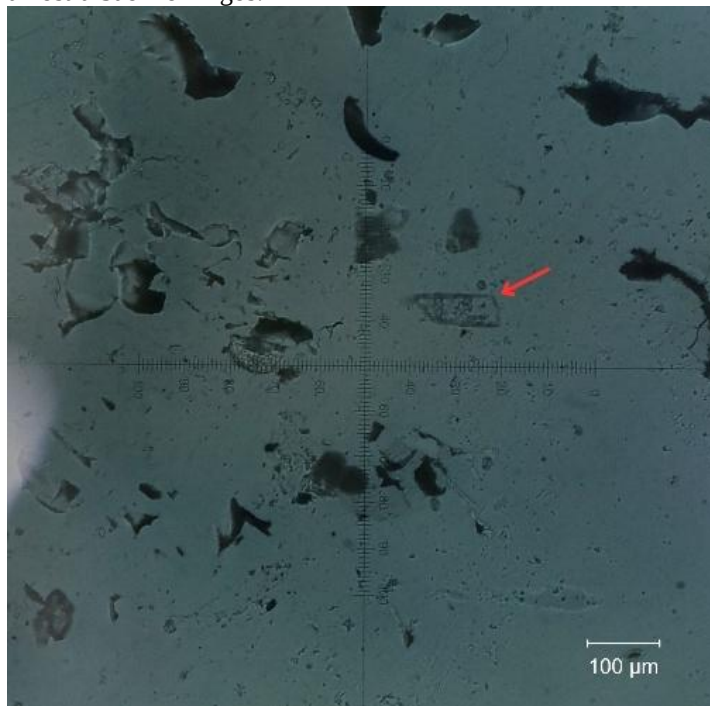
Na porção inferior esquerda e ao longo da faixa escura diagonal que atravessa o campo, são observadas fraturas transgranulares de maior dimensão, com contraste óptico elevado e contornos sinuosos. Essas feições diferem das inclusões menores pelo tamanho, pela forma mais complexa e pelo aspecto heterogêneo, podendo representar cavidades ou descontinuidades internas de difícil individualização óptica.

Na região superior e superior direita do campo, há numerosas microfeições pontuais, pontos escuros e pequenas cavidades dispersas. Essas feições apresentam dimensões muito reduzidas, geralmente inferiores a $5\ \mu\text{m}$, e baixo grau de definição, dificultando a classificação quanto ao número de fases visíveis.

Também são observadas fraturas e microdescontinuidades com orientação variável, algumas atravessando o campo de forma oblíqua. Essas estruturas ocorrem associadas a cavidades alongadas e a regiões de maior contraste óptico, contribuindo para a heterogeneidade interna observada no cristal hospedeiro.

Desse modo, a Figura 23 evidencia, portanto, um conjunto de inclusões e cavidades com ampla variação morfológica, incluindo formas lenticulares, alongadas, subarredondadas e irregulares. As feições observadas variam quanto ao tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos, com destaque para a inclusão alongada indicada pela seta vermelha e para as cavidades associadas a microfraturas e descontinuidades internas do cristal de berilo da amostra São Domingos.

Figura 24 - Inclusão sólida alongada a subtabular e cavidades irregulares observadas em cristal de berilo da amostra São Domingos.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 24, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra São Domingos caracterizado pela presença de uma inclusão sólida alongada a subtabular, além de cavidades irregulares, microdescontinuidades e pequenas inclusões dispersas na matriz cristalina.

A feição indicada pela seta vermelha corresponde a uma inclusão sólida, com morfologia alongada a subtabular, contornos relativamente definidos e aspecto translúcido sob luz transmitida. Sua dimensão é estimada entre 20 e 22 μm , considerando a escala apresentada na fotomicrografia. A inclusão apresenta geometria mais regular que as cavidades irregulares presentes no entorno, com limites parcialmente contínuos e discreta variação interna de tonalidade e transparência.

No interior da feição destacada, observam-se pequenas diferenças de contraste óptico, com domínios ligeiramente mais claros e mais escuros ao longo da inclusão. Essas variações indicam heterogeneidade óptica interna, embora não permitam definir a composição mineralógica ou a presença de fases distintas apenas por microscopia óptica.

Além da inclusão principal, o campo observado apresenta numerosas fissuras intragranulares, distribuídas principalmente nas porções superior, esquerda, central e inferior da fotomicrografia. Essas feições apresentam tamanhos variados, contornos sinuosos e

contraste óptico elevado em relação à matriz de berilo. Algumas cavidades possuem morfologia alongada ou lenticular, enquanto outras apresentam formas mais irregulares e fragmentadas.

Na região central e inferior do campo, observam-se pequenos pontos escuros e microcavidades dispersas, com dimensões geralmente inferiores a 5 μm . Essas microfeições ocorrem de forma esparsa a localmente agrupada e apresentam baixo grau de definição, dificultando a classificação quanto ao número de fases visíveis.

Também são observadas microdescontinuidades finas e feições lineares discretas atravessando parte da matriz cristalina. Em alguns setores, as cavidades maiores ocorrem próximas a essas descontinuidades, compondo uma região de maior heterogeneidade interna no cristal hospedeiro.

No campo observado, destaca-se a ocorrência de uma inclusão sólida alongada a subtabular, acompanhada por cavidades irregulares, microcavidades dispersas e microdescontinuidades internas. As feições apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

Figura 25 - Inclusão sólida acicular observada em cristal de berilo da amostra São Domingos.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 25, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra São Domingos caracterizado por uma inclusão sólida acicular, indicada pela seta vermelha, além de

descontinuidades internas, faixas de maior contraste óptico e pequenas microfeições dispersas na matriz cristalina.

A feição destacada apresenta morfologia acicular a prismática alongada, com contornos bem definidos e orientação aproximadamente horizontal no campo observado. A inclusão possui comprimento estimado de aproximadamente 35 μm e espessura reduzida em relação ao seu eixo maior. Uma das extremidades apresenta leve afinamento, enquanto a outra possui terminação mais reta a subarredondada. A geometria alongada e os limites nítidos diferenciam essa feição das cavidades irregulares e microdescontinuidades presentes no entorno.

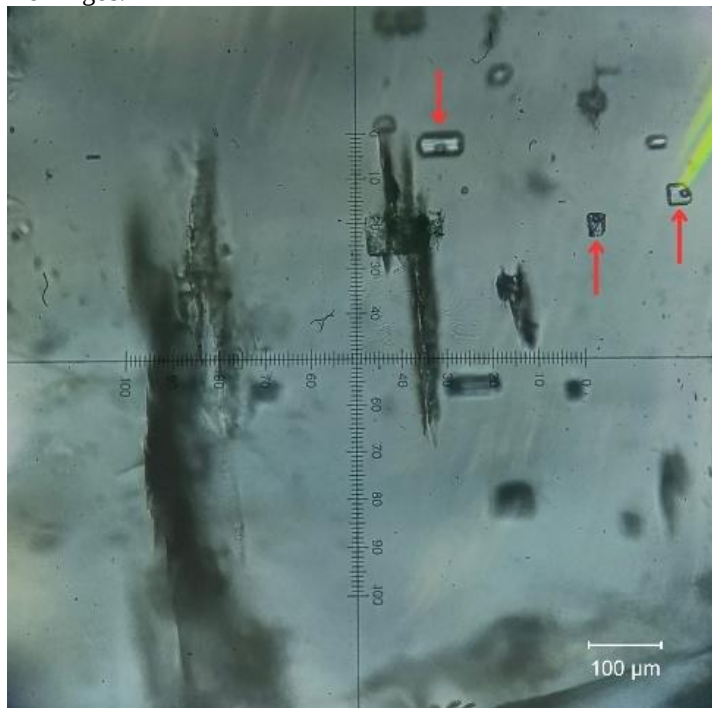
A inclusão sólida apresenta contraste óptico elevado sob luz transmitida, com aspecto translúcido a parcialmente opaco. No interior da feição, observa-se uma pequena região arredondada mais escura, próxima à porção central da inclusão. Essa característica indica heterogeneidade óptica interna, mas não permite definir, apenas por microscopia óptica, se corresponde a microcavidade, domínio mineral distinto ou variação de espessura/foco.

No entorno da inclusão principal, a matriz de berilo apresenta aspecto relativamente translúcido, com pequenas microfeições pontuais e discretas cavidades dispersas. Essas feições possuem dimensões muito reduzidas, geralmente inferiores a 5 μm , baixo contraste óptico e distribuição esparsa, dificultando sua classificação quanto ao número de fases visíveis.

Na porção esquerda e central da fotomicrografia, observam-se faixas escuras e descontinuidades internas de maior dimensão, com orientação aproximadamente vertical a subvertical. Essas regiões apresentam contraste óptico elevado e limites difusos a irregulares, diferenciando-se da inclusão acicular destacada pela seta. Na porção inferior central, também ocorrem domínios texturalmente heterogêneos, com pequenas cavidades e variações locais de contraste.

O campo observado reúne, portanto, uma inclusão sólida acicular bem definida, microfeições pontuais dispersas, cavidades discretas e descontinuidades internas no cristal de berilo da amostra São Domingos. As feições apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

Figura 26 – Canais estruturais prismáticos a subretangulares observados em cristal de berilo da amostra São Domingos.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 26, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra São Domingos contendo possíveis canais estruturais prismáticos a subretangulares, além de cavidades menores, feições escuras alongadas e descontinuidades internas distribuídas na matriz cristalina.

As feições indicadas pelas setas vermelhas apresentam morfologia predominantemente prismática, subretangular a subquadrangular, com contornos relativamente definidos e dimensões estimadas entre 5 e 12 μm . Essas feições destacam-se da matriz de berilo pelo contraste óptico moderado a elevado e pela geometria mais regular em comparação com as cavidades irregulares presentes no entorno. A geometria prismática a subretangular, associada ao seu padrão de ocorrência, é compatível com canais estruturais característicos do berilo, e não com inclusões sólidas individualizadas.

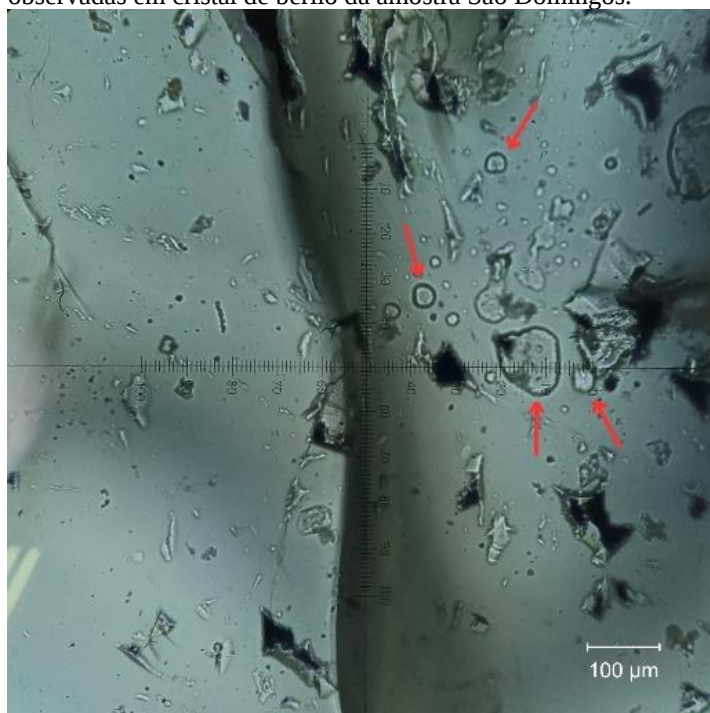
A feição destacada na porção superior central da fotomicrografia apresenta forma subretangular, limites bem definidos e aspecto translúcido a levemente escuro. Na porção direita do campo, observam-se duas feições menores indicadas pelas setas, uma com morfologia subquadrangular a irregular e outra com formato prismático curto, ambas com contraste óptico mais elevado em relação ao berilo hospedeiro. Essas feições diferem das microcavidades dispersas pela forma mais definida e pelo maior destaque óptico.

Além das feições indicadas, são observadas outras cavidades pequenas e microfeições dispersas ao longo do campo, algumas arredondadas a subarredondadas e outras alongadas. Essas feições possuem dimensões geralmente inferiores a 5 μm , baixo a moderado contraste óptico e distribuição esparsa na matriz cristalina, dificultando a individualização do número de fases visíveis.

Na região central da fotomicrografia, ocorrem feições escuras alongadas e irregulares, associadas a descontinuidades internas aproximadamente verticais a subverticais. Essas estruturas apresentam contornos difusos a sinuosos e contraste óptico elevado, diferenciando-se dos possíveis canais estruturais prismáticos indicados pelas setas. Na porção esquerda do campo, também se observa uma faixa mais escura e alongada, com limites pouco definidos e aspecto heterogêneo.

O campo petrográfico reúne, portanto, possíveis canais estruturais prismáticos a subretangulares, microcavidades dispersas, feições escuras alongadas e descontinuidades internas no cristal de berilo da amostra São Domingos. As feições observadas apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

Figura 27 - Inclusões arredondadas a subarredondadas, cavidades irregulares e microdescontinuidades observadas em cristal de berilo da amostra São Domingos.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Na Figura 27, observa-se um campo petrográfico do cristal de berilo da amostra São Domingos contendo inclusões arredondadas a subarredondadas, cavidades irregulares, feições alongadas e microdescontinuidades distribuídas na matriz cristalina.

As inclusões indicadas pelas setas vermelhas apresentam morfologia predominantemente arredondada a subarredondada, contornos relativamente definidos e dimensões estimadas entre 5 e 20 μm . Algumas dessas inclusões exibem aspecto translúcido e homogêneo, sem bolha de vapor ou fase sólida claramente visível, sendo descritas como inclusões fluidas monofásicas à temperatura ambiente. Outras apresentam bordas mais espessas, centro parcialmente translúcido e contraste óptico mais elevado, dificultando a individualização precisa das fases internas apenas por microscopia óptica.

Na região central direita da fotomicrografia, observa-se um agrupamento de inclusões pequenas, com formas arredondadas a subarredondadas, distribuídas próximas a cavidades maiores e feições irregulares. Essas inclusões apresentam tamanhos variados, geralmente entre 5 e 15 μm , e ocorrem de forma dispersa a localmente agrupada.

Na porção inferior direita do campo, destacam-se cavidades maiores de morfologia irregular a subarredondada, algumas com contornos sinuosos e interior heterogêneo. Essas feições apresentam contraste óptico moderado a elevado e diferem das inclusões menores pela maior dimensão, pela borda mais irregular e pelo aspecto interno menos homogêneo.

Também são observadas cavidades alongadas e feições lenticulares distribuídas ao longo da matriz cristalina, especialmente nas porções superior, central e inferior da fotomicrografia. Algumas dessas cavidades apresentam orientação variável e contornos parcialmente definidos. Além disso, há microfeições pontuais, pontos escuros e pequenas cavidades dispersas em praticamente todo o campo observado, geralmente com dimensões inferiores a 5 μm .

Na porção central esquerda, observa-se uma faixa escura alongada, de orientação aproximadamente vertical, que atravessa parte do campo observado. Essa feição apresenta limites difusos e contraste óptico elevado, distinguindo-se das inclusões arredondadas destacadas pelas setas. Nas regiões próximas a essa faixa, ocorrem pequenas cavidades e microdescontinuidades internas.

O conjunto observado é marcado pela presença de inclusões arredondadas a subarredondadas, cavidades irregulares, microcavidades dispersas e feições alongadas no cristal de berilo da amostra São Domingos. As feições apresentam variação de forma, tamanho, contraste óptico, transparência e grau de definição dos contornos.

4.2 Espectroscopia Raman

A seleção das amostras submetidas à espectroscopia Raman foi realizada com base nas observações obtidas durante a etapa de microscopia óptica. Foram priorizadas inclusões e microfeições que apresentaram melhor definição morfológica, maior contraste óptico e dimensões adequadas para a aquisição pontual dos espectros Raman. Dessa forma, foram selecionadas amostras provenientes das lavras Ferreirinha I e São Domingos, por apresentarem feições mais favoráveis à análise espectroscópica.

Além da qualidade visual das inclusões, foram considerados aspectos como nitidez dos contornos, acessibilidade do ponto de análise, contraste em relação ao berilo hospedeiro e menor interferência de irregularidades superficiais ou zonas muito heterogêneas. Algumas feições observadas durante a microscopia óptica não foram selecionadas para análise Raman devido ao tamanho reduzido, baixa definição óptica, proximidade com fraturas ou cavidades irregulares, ou pela possibilidade de o sinal espectral ser dominado pelo mineral hospedeiro adjacente.

Os espectros Raman obtidos apresentaram comportamentos distintos entre as amostras analisadas. Em alguns casos, foram observados picos estreitos e bem definidos, com melhor relação sinal-ruído; em outros, ocorreram bandas mais largas, maior variação do fundo espectral e menor definição dos sinais Raman. Essa variação pode estar relacionada à natureza micrométrica das feições analisadas, à contribuição do berilo hospedeiro, à sobreposição de sinais e à presença de fluorescência residual.

O tratamento dos dados espectrais foi realizado no software Orange™, por meio de correção de linha de base, suavização por filtro Savitzky-Golay e normalização vetorial. Esses procedimentos foram aplicados com o objetivo de reduzir interferências associadas ao ruído instrumental e ao fundo espectral, além de favorecer a visualização das principais bandas Raman.

As análises permitiram reconhecer bandas Raman em diferentes regiões da faixa espectral investigada, com destaque para sinais em baixas e médias frequências, especialmente próximos de 700 cm^{-1} e entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} , além de bandas em alta frequência próximas de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} em alguns espectros. A interpretação composicional dessas bandas foi tratada de forma preliminar, sendo necessária a comparação com espectros Raman de referência e a integração com os dados petrográficos.

Os resultados obtidos para as amostras selecionadas são apresentados a seguir, de forma individualizada para as lavras Ferreirinha I e São Domingos, priorizando a descrição dos pontos analisados, a qualidade dos espectros, a posição aproximada das bandas Raman e suas possíveis contribuições espectrais.

4.2.1. *Ferreirinha I*

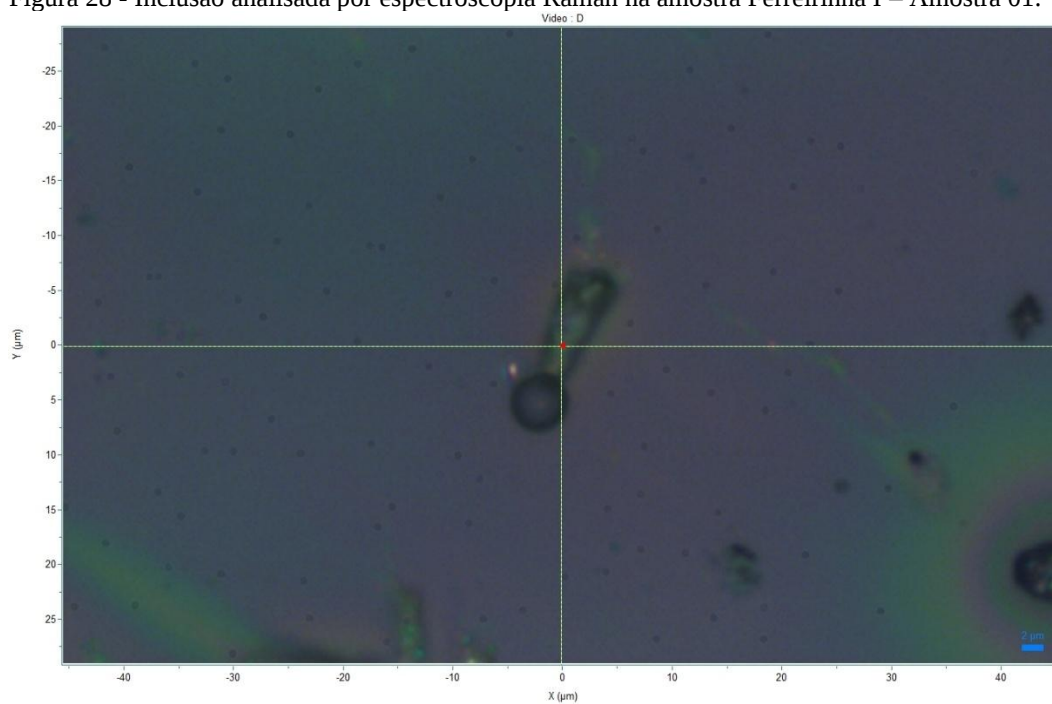
As Figuras 28 a 33 apresentam as regiões analisadas por espectroscopia Raman e os respectivos espectros obtidos para três pontos selecionados na amostra Ferreirinha I. As análises foram realizadas com o objetivo de caracterizar qualitativamente a resposta espectral de inclusões e microfeições hospedadas em cristais de berilo, buscando reconhecer as principais bandas Raman e avaliar possíveis contribuições da inclusão analisada e do mineral hospedeiro adjacente.

Os espectros obtidos para a amostra Ferreirinha I apresentaram comportamentos distintos entre si, especialmente quanto à intensidade dos sinais, definição dos picos Raman, presença de fundo espectral e relação sinal-ruído. As amostras 01 e 02 apresentaram picos mais estreitos e bem individualizados, com bandas intensas próximas de 700 cm^{-1} , entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} , além de sinais em alta frequência próximos de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} . Em contraste, a amostra 03 apresentou bandas mais largas, maior variação do fundo espectral e menor definição dos picos, com destaque para sinais entre aproximadamente 450 e 650 cm^{-1} , bandas amplas entre cerca de 1200 e 2200 cm^{-1} e uma banda intensa próxima de 2900 cm^{-1} .

A variação observada entre os espectros pode estar relacionada a diferenças na natureza das feições analisadas, à contribuição do berilo hospedeiro, ao pequeno volume amostrado pelo laser e à presença de fluorescência residual ou sobreposição de sinais. Por esse motivo, as atribuições composicionais foram tratadas de forma preliminar, sendo necessária a comparação com espectros Raman de referência para a identificação segura das fases presentes.

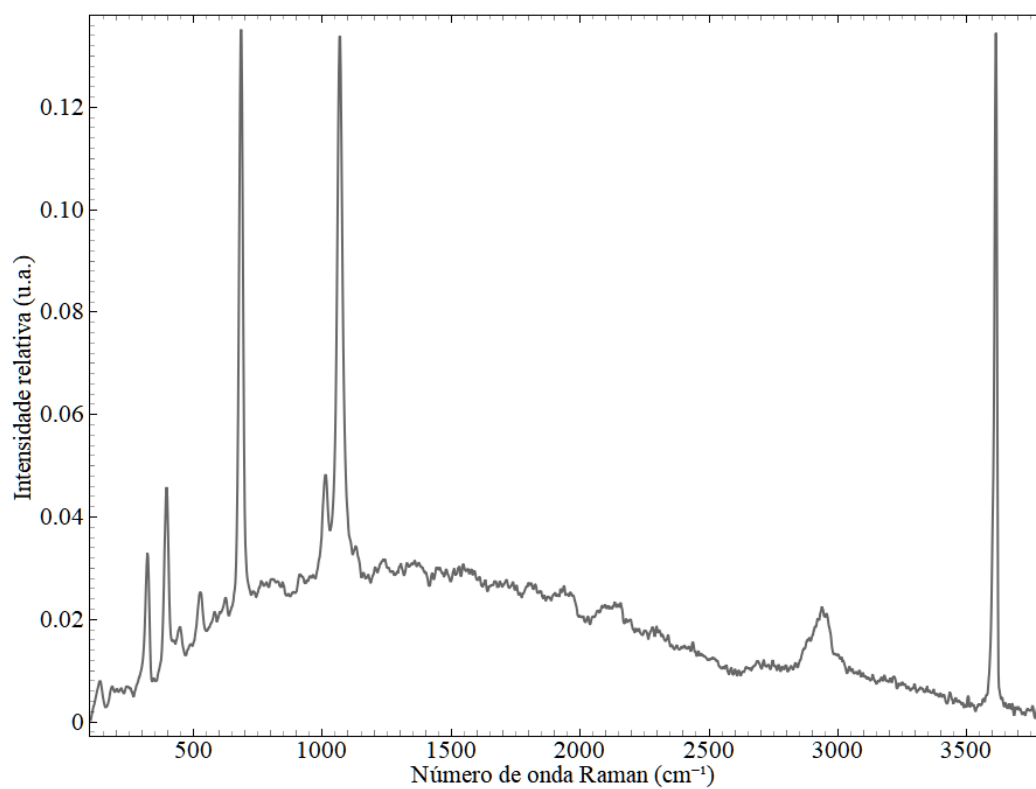
As figuras a seguir apresentam os espectros considerados mais representativos da amostra Ferreirinha I. A descrição dos resultados prioriza a posição aproximada das bandas, a qualidade do sinal, a presença de fundo espectral e a relação entre o ponto analisado e as feições observadas em microscopia óptica.

Figura 28 - Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I – Amostra 01.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 29 - Espectro Raman obtido para inclusão da amostra Ferreirinha I – Amostra 01.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 28 e 29 apresentam, respectivamente, a inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I — Amostra 01 — e o espectro obtido para o ponto selecionado. Na Figura 28, observa-se uma feição micrométrica de morfologia arredondada a subarredondada, posicionada próxima ao centro do campo de análise, com o ponto de aquisição Raman marcado pelo cruzamento dos eixos. A feição apresenta contraste óptico em relação à matriz do berilo e ocorre próxima a uma cavidade ou microfeição alongada.

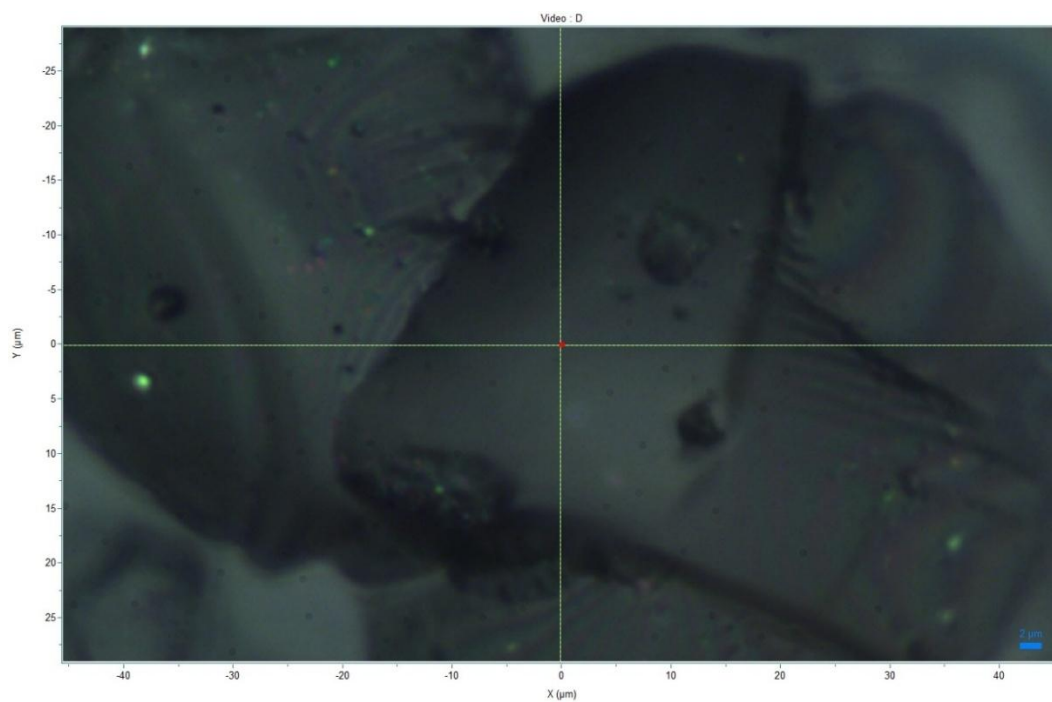
O espectro Raman obtido para essa inclusão apresenta picos bem definidos ao longo da faixa espectral analisada, com sinais mais intensos em baixas e médias frequências, especialmente nas regiões próximas de 700 cm^{-1} e entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} . Também são observados picos de menor intensidade em frequências mais baixas, abaixo de 500 cm^{-1} , além de variações no sinal entre aproximadamente 1200 e 2200 cm^{-1} .

Na região de alta frequência, o espectro apresenta uma banda de menor intensidade próxima de 2900 cm^{-1} e um pico intenso próximo de 3600 cm^{-1} . Esses sinais indicam a presença de bandas Raman relevantes nessa porção do espectro, podendo estar associados a vibrações de grupos OH, água estrutural ou molecular, ou contribuições do mineral hospedeiro e da inclusão analisada. No entanto, essa atribuição deve ser considerada preliminar, uma vez que a identificação composicional requer comparação com espectros de referência.

O espectro apresenta boa relação sinal-ruído e permite a individualização das principais bandas Raman, embora haja variação do fundo espectral em parte da faixa analisada. Como o ponto Raman foi posicionado sobre uma feição micrométrica hospedada no berilo, é possível que o sinal obtido inclua contribuições tanto da inclusão quanto do mineral hospedeiro adjacente, devido ao pequeno tamanho da feição e ao volume amostrado pelo laser.

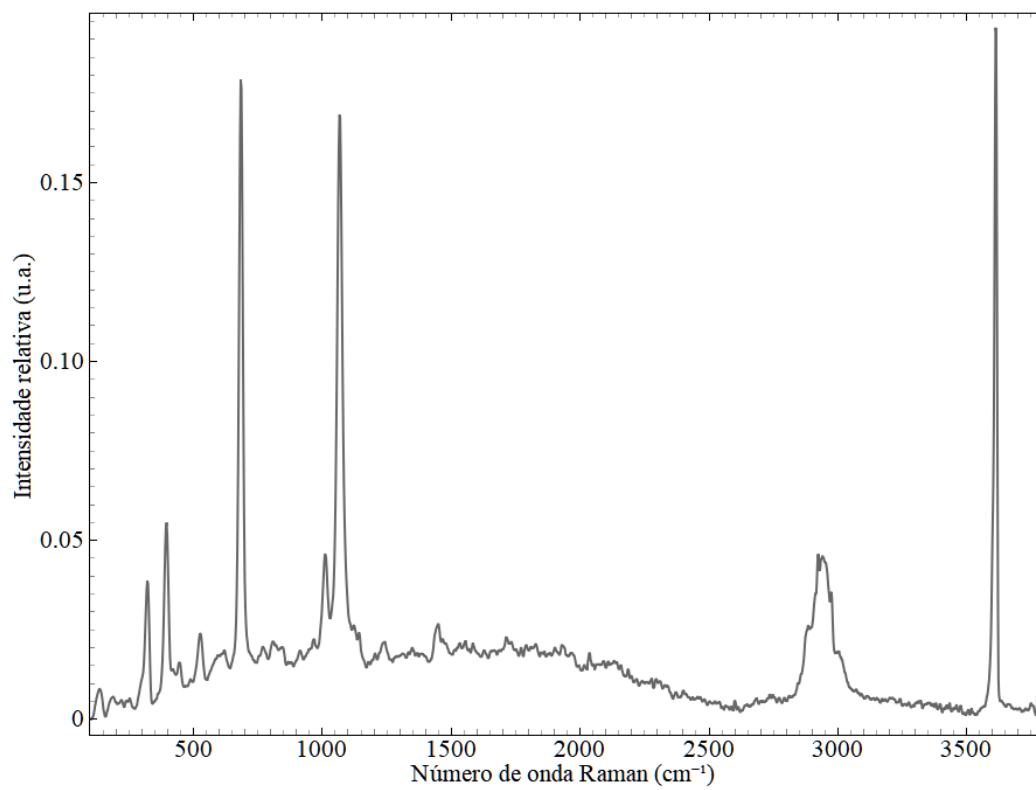
Dessa forma, os resultados obtidos para a amostra Ferreirinha I — Amostra 01 — indicam a presença de bandas Raman bem definidas na região analisada, com destaque para os sinais próximos de 700 cm^{-1} , 1000 – 1100 cm^{-1} , 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} . A interpretação composicional dessas bandas deve ser realizada de forma integrada aos dados petrográficos e à comparação com espectros Raman de referência.

Figura 30 - Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I – Amostra 02.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 31 - Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra Ferreirinha I – Amostra 02.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 30 e 31 apresentam, respectivamente, a região analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I — Amostra 02 — e o espectro obtido para o ponto selecionado. Na Figura 30, observa-se o ponto de aquisição Raman posicionado em uma região interna do cristal de berilo marcada por cavidades, feições irregulares e variações locais de contraste óptico. A área analisada apresenta aspecto heterogêneo, com cavidades próximas ao ponto de aquisição e domínios de diferentes graus de transparência.

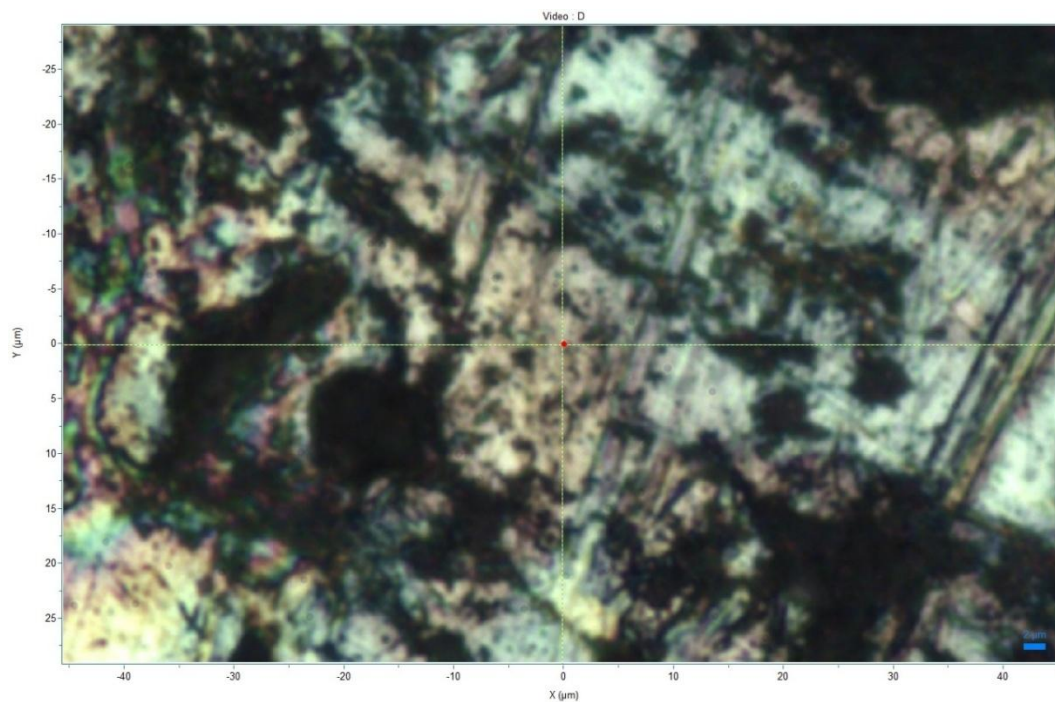
O espectro Raman obtido para a amostra 02 apresenta boa definição das principais bandas, com picos estreitos e bem individualizados ao longo da faixa espectral analisada. Em comparação com outros espectros obtidos para a lavra Ferreirinha I, observa-se menor interferência de fluorescência de fundo e melhor relação sinal-ruído, favorecendo a identificação dos principais sinais Raman.

As bandas mais intensas ocorrem principalmente em baixas e médias frequências, com destaque para picos próximos de 700 cm^{-1} e na região entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} . Também são observados picos de menor intensidade abaixo de 500 cm^{-1} e sinais discretos entre cerca de 1200 e 2000 cm^{-1} . Esses picos indicam a presença de modos vibracionais bem definidos na região analisada, embora sua atribuição mineralógica dependa de comparação com espectros de referência.

Na região de alta frequência, observa-se uma banda bem marcada próxima de 2900 cm^{-1} e um pico intenso próximo de 3600 cm^{-1} . Esses sinais podem estar associados a vibrações envolvendo grupos OH, água estrutural ou molecular, ou ainda contribuições combinadas da inclusão e do mineral hospedeiro. No entanto, essa interpretação deve ser tratada como preliminar, pois o ponto analisado está localizado em uma região micrométrica e o sinal Raman pode incluir contribuição do berilo adjacente.

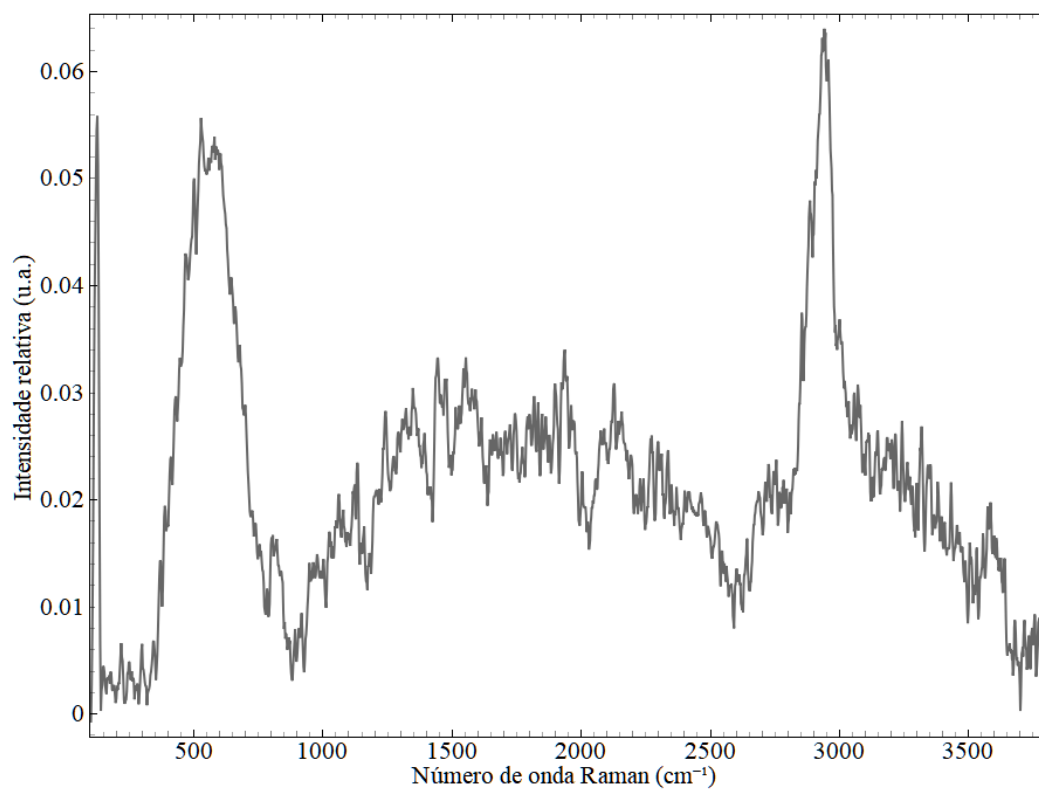
A Figura 31 mostra, portanto, um espectro com boa definição espectral, picos estreitos e menor influência de fluorescência de fundo em relação a outros pontos analisados. Os resultados indicam bandas Raman relevantes nas regiões próximas de 700 cm^{-1} , 1000 – 1100 cm^{-1} , 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} , cuja interpretação composicional deve ser realizada de forma integrada à petrografia e à comparação com espectros Raman de referência.

Figura 32 – Região da inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I – Amostra 03.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 33 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra Ferreirinha I – Amostra 03.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 32 e 33 apresentam, respectivamente, a região analisada por espectroscopia Raman na amostra Ferreirinha I — Amostra 03 — e o espectro obtido para o ponto selecionado. Na Figura 32, observa-se uma região texturalmente heterogênea do cristal de berilo, marcada por feições irregulares, domínios de contraste óptico elevado e variações locais de transparência. O ponto de aquisição Raman está posicionado em uma área com forte heterogeneidade visual, o que pode influenciar a resposta espectral obtida.

O espectro Raman da amostra 03 apresenta comportamento distinto em relação aos espectros das amostras 01 e 02 da mesma lavra. Observam-se bandas mais largas, maior variação do fundo espectral e menor definição dos picos Raman. Apesar dessa menor resolução, o espectro apresenta sinais reconhecíveis em diferentes regiões da faixa analisada.

Na região de menores números de onda, destaca-se um conjunto de bandas relativamente intensas entre aproximadamente 450 e 650 cm^{-1} . Entre cerca de 1200 e 2200 cm^{-1} , o espectro mostra bandas amplas e irregulares, com variações contínuas de intensidade. Esse comportamento indica uma resposta Raman menos individualizada, possivelmente influenciada por fluorescência residual, sobreposição de sinais ou contribuição de diferentes domínios presentes na área analisada.

Na região de alta frequência, observa-se uma banda intensa e relativamente larga próxima de 2900 cm^{-1} . Essa banda representa uma das feições mais marcantes do espectro da amostra 03. Não se observa, entretanto, um pico estreito e intenso próximo de 3600 cm^{-1} semelhante ao registrado nos espectros das amostras 01 e 02. A ausência ou baixa definição desse sinal diferencia a resposta espectral da amostra 03 em relação aos demais pontos analisados na lavra Ferreirinha I.

Devido à presença de bandas largas, maior ruído relativo e fundo espectral irregular, a interpretação composicional da amostra 03 deve ser tratada de forma preliminar. O espectro indica uma resposta Raman associada a uma região heterogênea do cristal de berilo, mas não permite, isoladamente, definir com segurança a composição mineralógica da inclusão ou das feições analisadas. Assim, os dados da amostra 03 devem ser interpretados de forma integrada às observações petrográficas e à comparação com espectros Raman de referência.

4.2.2. São Domingos

As Figuras 34 a 39 apresentam as regiões analisadas por espectroscopia Raman e os respectivos espectros obtidos para três pontos selecionados em cristais de berilo da lavra São Domingos. As análises foram realizadas com o objetivo de caracterizar qualitativamente a resposta espectral de inclusões e microfeições internas observadas por microscopia óptica, considerando a posição aproximada das bandas Raman, a definição dos picos, a relação sinal-ruído e a possível contribuição do mineral hospedeiro adjacente.

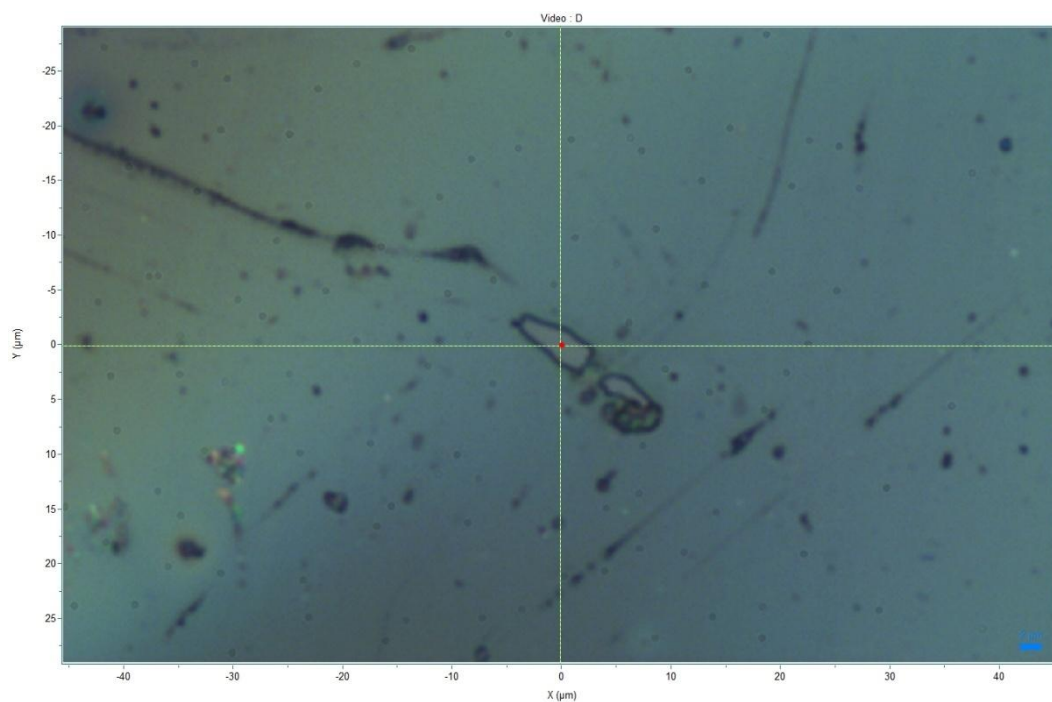
Os espectros obtidos para a lavra São Domingos apresentaram comportamentos distintos entre si. A amostra 01 exibiu um espectro relativamente simples, com número reduzido de bandas bem individualizadas e destaque para um pico estreito e intenso próximo de 3600 cm^{-1} . As amostras 02 e 03, por sua vez, apresentaram maior número de bandas reconhecíveis, especialmente na região entre aproximadamente 300 e 1200 cm^{-1} , com picos intensos próximos de 700 cm^{-1} e entre 1000 e 1100 cm^{-1} . Nesses espectros, também foram observados sinais em alta frequência, com banda próxima de 2900 cm^{-1} e pico intenso próximo de 3600 cm^{-1} .

As diferenças observadas entre os espectros incluem variações na intensidade relativa das bandas, largura dos picos, definição espectral e comportamento do fundo. Essas variações podem estar relacionadas à natureza das feições analisadas, à sobreposição de sinais entre inclusão e berilo hospedeiro, ao volume micrométrico amostrado pelo laser e à presença de fundo espectral ou fluorescência residual. Por esse motivo, as atribuições composicionais foram tratadas de forma preliminar.

A região próxima de 3600 cm^{-1} pode estar associada a vibrações relacionadas a grupos OH ou água estrutural/molecular, enquanto a banda próxima de 2900 cm^{-1} representa uma feição adicional relevante nos espectros das amostras 02 e 03. Entretanto, a confirmação da natureza dessas bandas requer comparação com espectros Raman de referência e integração com as observações petrográficas.

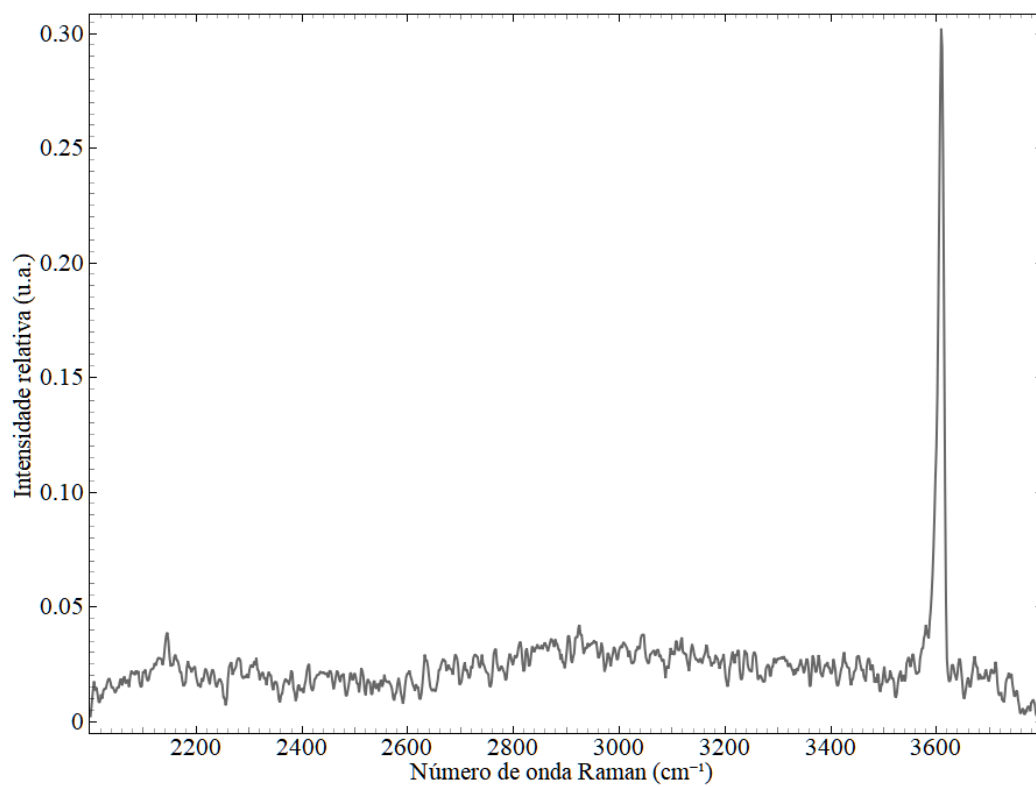
Os espectros selecionados para a lavra São Domingos permitiram reconhecer respostas Raman distintas entre os pontos analisados, com destaque para sinais em baixas e médias frequências, além de bandas em alta frequência próximas de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} . As descrições a seguir apresentam os resultados de forma individualizada, priorizando a posição das bandas, a qualidade do sinal e a relação entre o ponto analisado e as feições observadas em microscopia óptica.

Figura 34 – Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos – Amostra 01.



Fonte/: Elaboração própria (2026).

Figura 35 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra São Domingos – Amostra 01.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 34 e 35 apresentam, respectivamente, a inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos — Amostra 01 — e o espectro obtido para o ponto selecionado. Na Figura 34, observa-se o ponto de aquisição Raman posicionado sobre uma feição micrométrica localizada em uma região com pequenas inclusões, microcavidades, feições alongadas e microdescontinuidades dispersas na matriz do berilo.

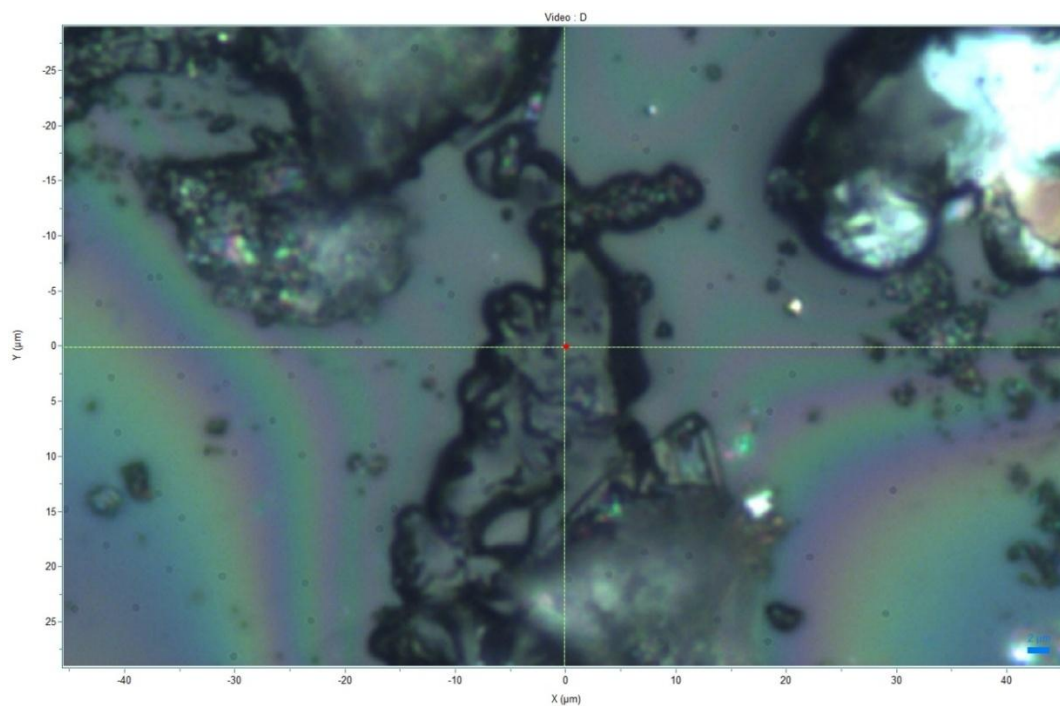
O espectro Raman obtido para a amostra São Domingos — Amostra 01 apresenta comportamento relativamente simples em comparação aos espectros da lavra Ferreirinha I, com número reduzido de bandas bem individualizadas na faixa espectral apresentada. O sinal mais evidente corresponde a um pico estreito e intenso próximo de 3600 cm^{-1} , que se destaca claramente em relação ao fundo espectral.

Além do pico principal próximo de 3600 cm^{-1} , observa-se variação discreta da intensidade entre aproximadamente 2800 e 3200 cm^{-1} , sem formação de bandas estreitas bem definidas nessa região. O espectro também apresenta fundo relativamente irregular e sinais de baixa intensidade ao longo da faixa entre cerca de 2100 e 3500 cm^{-1} .

A região próxima de 3600 cm^{-1} pode estar associada a vibrações relacionadas a grupos OH ou água estrutural/molecular, mas essa atribuição deve ser considerada preliminar. Como o ponto analisado corresponde a uma feição micrométrica hospedada no berilo, o sinal Raman obtido pode incluir contribuição tanto da inclusão quanto do mineral hospedeiro adjacente.

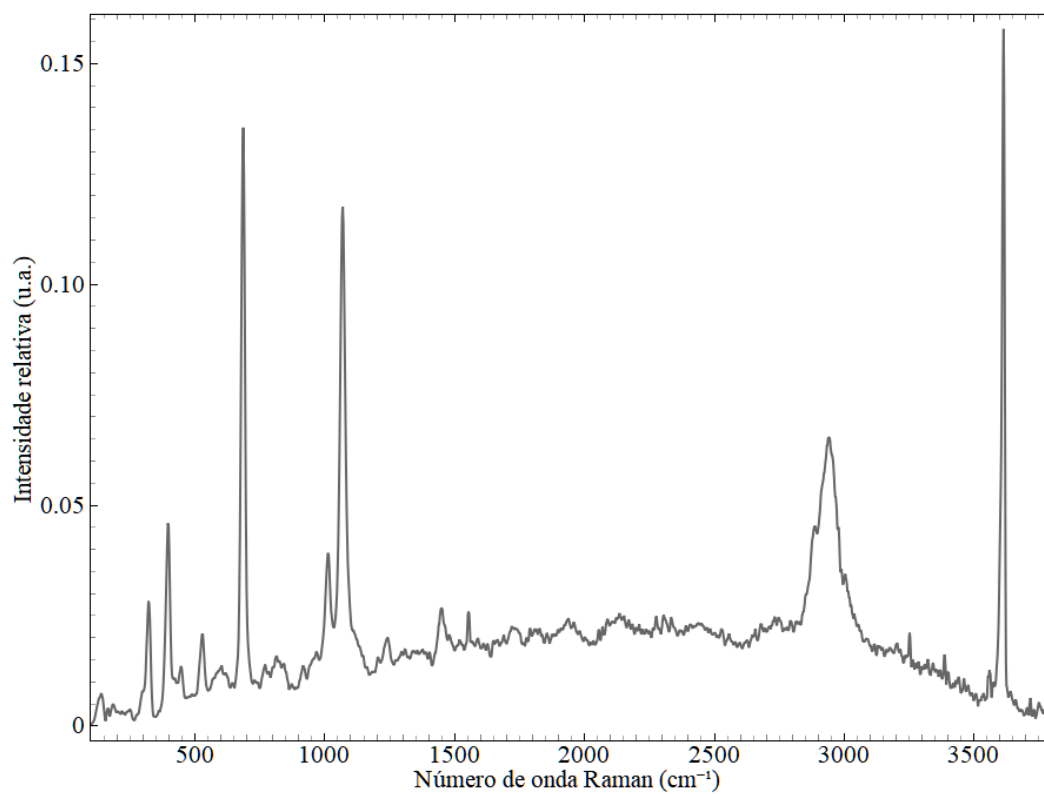
A ausência de bandas minerais bem definidas na faixa espectral apresentada limita a identificação composicional apenas com base neste espectro. Assim, os resultados da amostra São Domingos — Amostra 01 indicam a presença de um sinal Raman dominante em alta frequência, próximo de 3600 cm^{-1} , cuja interpretação deve ser realizada de forma integrada às observações petrográficas e à comparação com espectros Raman de referência.

Figura 36 – Inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos – Amostra 02.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 37 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra São Domingos – Amostra 02.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 36 e 37 apresentam, respectivamente, a região analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos — Amostra 02 — e o espectro obtido para o ponto selecionado. Na Figura 36, observa-se o ponto de aquisição Raman posicionado em uma região texturalmente heterogênea do cristal de berilo, marcada por cavidades irregulares, microdescontinuidades, feições escuras e domínios com diferentes graus de transparência.

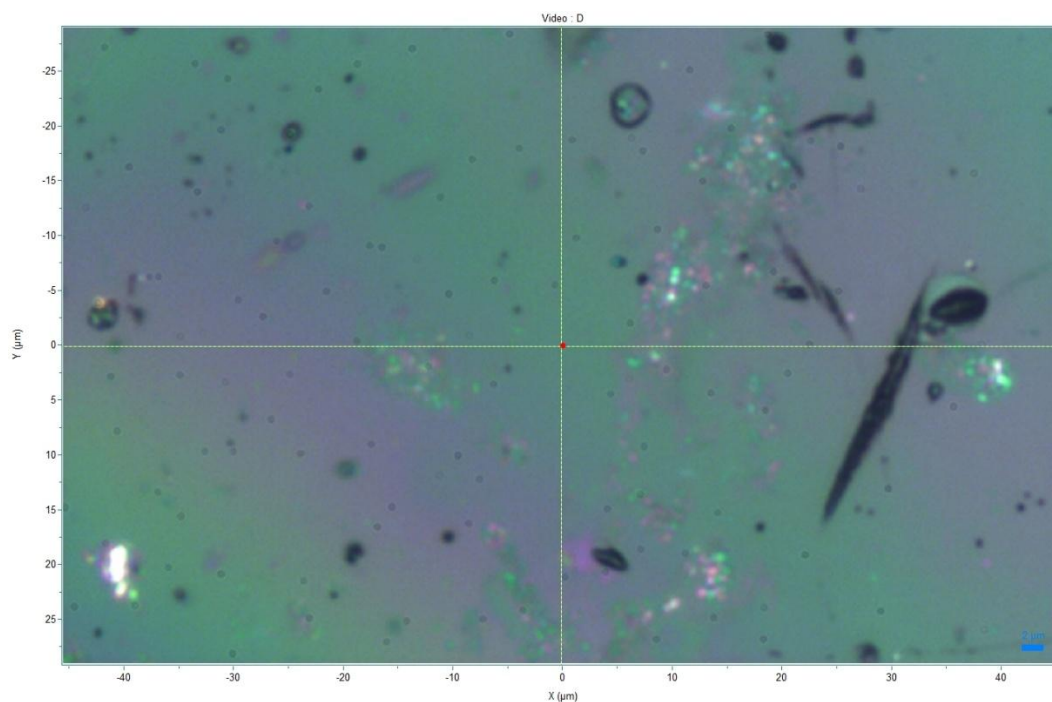
O espectro Raman obtido para a amostra São Domingos — Amostra 02 apresenta maior número de bandas bem definidas em comparação ao espectro da amostra São Domingos — Amostra 01. Observam-se picos estreitos e intensos principalmente na região entre aproximadamente 300 e 1200 cm^{-1} , além de sinais adicionais em regiões de maior número de onda.

Na região de baixas e médias frequências, destacam-se bandas intensas próximas de 700 cm^{-1} e entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} , além de picos de menor intensidade abaixo de 500 cm^{-1} . Essas bandas indicam a presença de modos vibracionais bem individualizados na região analisada, podendo estar relacionadas a fases minerais presentes na inclusão, ao mineral hospedeiro ou à sobreposição de sinais entre ambos. A atribuição mineralógica específica, entretanto, depende de comparação com espectros Raman de referência.

Entre aproximadamente 1200 e 2500 cm^{-1} , o espectro apresenta sinais de menor intensidade e variações no fundo espectral. Na região de alta frequência, observa-se uma banda bem marcada próxima de 2900 cm^{-1} e um pico estreito e intenso próximo de 3600 cm^{-1} . A região próxima de 3600 cm^{-1} pode estar associada a vibrações relacionadas a grupos OH ou água estrutural/molecular, enquanto a banda próxima de 2900 cm^{-1} representa uma feição adicional relevante do espectro. Essas atribuições devem ser consideradas preliminares, pois o ponto analisado corresponde a uma feição micrométrica hospedada no berilo e pode incluir contribuição do mineral hospedeiro adjacente.

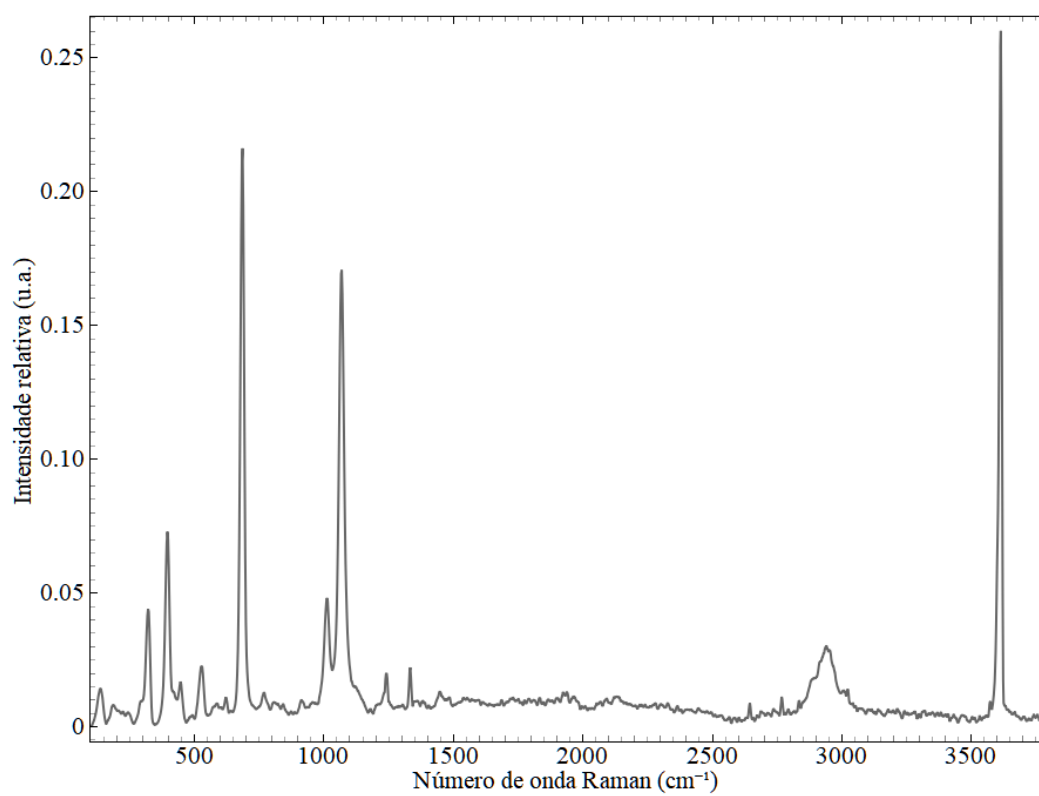
A Figura 37 mostra, portanto, um espectro com boa definição espectral, presença de picos estreitos e sinais distribuídos em diferentes regiões da faixa analisada. Em relação à amostra São Domingos — Amostra 01, a amostra 02 apresentou resposta Raman mais complexa, com maior número de bandas individualizadas. A interpretação composicional desses sinais deve ser realizada de forma integrada às observações petrográficas e à comparação com espectros de referência.

Figura 38 – Região da inclusão analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos – Amostra 03.



Fonte: Elaboração própria (2026).

Figura 39 – Espectro Raman obtido para a inclusão da amostra São Domingos – Amostra 03.



Fonte: Elaboração própria (2026).

As Figuras 38 e 39 apresentam, respectivamente, a região analisada por espectroscopia Raman na amostra São Domingos — Amostra 03 — e o espectro obtido para o ponto selecionado. Na Figura 38, observa-se o ponto de aquisição Raman posicionado em uma região do cristal de berilo com pequenas inclusões, microcavidades, feições alongadas e pontos de maior contraste óptico distribuídos na matriz cristalina. Também são observadas áreas com variações locais de transparência e contraste, próximas ao ponto analisado.

O espectro Raman obtido para a amostra São Domingos — Amostra 03 apresenta boa definição das principais bandas, com picos estreitos e bem individualizados ao longo da faixa espectral analisada. Em comparação com a amostra São Domingos — Amostra 01, o espectro apresenta maior número de bandas reconhecíveis, especialmente nas regiões de baixa e média frequência.

Na região entre aproximadamente 300 e 1200 cm^{-1} , observam-se picos intensos e bem definidos, com destaque para sinais próximos de 300–500 cm^{-1} , próximo de 700 cm^{-1} e entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} . Esses sinais indicam a presença de modos vibracionais bem marcados na região analisada, podendo estar relacionados à inclusão, ao berilo hospedeiro ou à sobreposição de contribuições entre ambos. A atribuição mineralógica específica dessas bandas, entretanto, depende de comparação com espectros Raman de referência.

Entre aproximadamente 1200 e 2500 cm^{-1} , o espectro apresenta sinais de baixa intensidade e discreta variação do fundo espectral. Na região de alta frequência, observa-se uma banda de menor intensidade próxima de 2900 cm^{-1} e um pico estreito e intenso próximo de 3600 cm^{-1} . A região próxima de 3600 cm^{-1} pode estar associada a vibrações relacionadas a grupos OH ou água estrutural/molecular, mas essa interpretação deve ser considerada preliminar, sobretudo pela possibilidade de contribuição do mineral hospedeiro adjacente.

A Figura 39 mostra, portanto, um espectro com boa relação sinal-ruído, picos bem definidos e sinais distribuídos em diferentes regiões da faixa analisada. Os resultados da amostra São Domingos — Amostra 03 indicam resposta Raman bem marcada, com bandas próximas de 300–500 cm^{-1} , 700 cm^{-1} , 1000–1100 cm^{-1} , 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} . A interpretação composicional dessas bandas deve ser realizada de forma integrada às observações petrográficas e à comparação com espectros Raman de referência.

Com o objetivo de sintetizar os principais resultados obtidos por microscopia óptica e espectroscopia Raman, a Tabela 1 apresenta um resumo comparativo das feições observadas nas lavras estudadas. A tabela reúne as principais inclusões e microfeições identificadas, suas

morfologias predominantes, relações texturais e a indicação das amostras selecionadas para análise Raman.

Tabela 1 – Síntese das principais inclusões e microfeições observadas nos cristais de berilo das lavras estudadas.

Lavra	Principais observadas em microscopia óptica	feições em	Morfologia predominante	Relação observada	textural	Análise Raman
Ferreirinha I	Inclusões fluidas monofásicas, inclusões com aspecto bifásico, possíveis inclusões sólidas, cavidades alongadas, microfraturas e microdescontinuidades		Arredondada, subarredondada, lenticular, alongada, irregular e prismática a irregular	Algumas inclusões ocorrem associadas a microfraturas, cavidades alongadas e descontinuidades internas		Realizada em três pontos selecionados; espectros com bandas próximas de 700 cm ⁻¹ , 1000–1100 cm ⁻¹ , 2900 cm ⁻¹ e 3600 cm ⁻¹ em parte das análises
Golconda I	Inclusões fluidas monofásicas a possivelmente bifásicas, possíveis inclusões sólidas acastanhadas, cavidades irregulares, feições alongadas e microfraturas		Arredondada, subarredondada, alongada, lenticular, irregular e subarredondada a irregular	Feições frequentemente associadas a cavidades irregulares, microfraturas e descontinuidades internas		Não realizada
Olho de Gato	Predomínio de possíveis inclusões sólidas com diferentes cores, pequenas cavidades e microdescontinuidades		Subarredondada, irregular, euédrica, subeuédrica e subangular	Algumas inclusões ocorrem associadas a faixas internas heterogêneas; outras aparecem em domínios mais homogêneos do berilo		Não realizada
São Domingos	Possíveis inclusões sólidas, inclusões/cavidades alongadas, inclusões arredondadas a subarredondadas, cavidades irregulares, microfraturas e microdescontinuidades		Alongada, lenticular, subtabular, acicular, prismática, subretangular, arredondada e subarredondada	Feições ocorrem de forma dispersa ou associadas a cavidades, faixas internas e microdescontinuidades		Realizada em três pontos selecionados; espectros com bandas entre 300–1200 cm ⁻¹ e sinais próximos de 2900 cm ⁻¹ e 3600 cm ⁻¹ em parte das análises

Fonte: Elaboração própria (2026).

5 DISCUSSÃO

A integração entre os resultados obtidos por microscopia óptica e espectroscopia Raman permitiu uma interpretação mais consistente das inclusões observadas nos cristais de berilo analisados. Enquanto a microscopia óptica possibilitou a caracterização morfológica, textural e espacial das inclusões, a espectroscopia Raman contribuiu para a identificação qualitativa de assinaturas vibracionais associadas a fases fluidas, minerais silicáticas, grupos hidroxila e água molecular. Essa abordagem integrada é fundamental no estudo de inclusões em minerais transparentes, uma vez que a morfologia observada ao microscópio nem sempre permite determinar, de forma isolada, a composição das fases aprisionadas.

De acordo com Goldstein (2001), a análise petrográfica constitui a primeira etapa essencial no estudo de inclusões fluidas, pois permite reconhecer relações texturais, número de fases, forma, distribuição e associação com fraturas ou zonas de crescimento do cristal hospedeiro. No presente estudo, essa etapa permitiu distinguir feições compatíveis com inclusões fluidas, inclusões sólidas, cavidades reequilibradas e estruturas associadas a microfraturas. No entanto, a interpretação petrográfica apresenta limitações quando aplicada isoladamente, especialmente em inclusões muito pequenas, monofásicas ou com elevado grau de alteração. Nesse contexto, a espectroscopia Raman complementou a análise óptica ao fornecer informações qualitativas sobre as fases presentes nas inclusões, conforme destacado por Frezzotti et al. (2012), que ressaltam a aplicação dessa técnica na identificação não destrutiva de compostos moleculares e minerais em inclusões microscópicas.

Os resultados obtidos demonstram que as amostras analisadas apresentam comportamentos distintos entre as lavras estudadas. As amostras Ferreirinha I e São Domingos foram selecionadas para espectroscopia Raman por apresentarem feições mais representativas, melhor definição morfológica e maior potencial interpretativo. Já as amostras Golconda I e Olho de Gato foram discutidas principalmente com base na microscopia óptica, uma vez que as feições selecionadas nessas lavras apresentaram limitações quanto à resposta espectral, preservação ou adequação para análise pontual por Raman.

As diferenças observadas entre as lavras podem ser interpretadas no contexto da evolução tectono-magmática do Orógeno Araçuai. Os pegmatitos do Campo Pegmatítico de Marilac estão associados aos granitos tipo S da Supersuíte G4, formados durante a transição entre os estágios tardi-colisional e pós-colisional, período caracterizado pela evolução de magmas altamente diferenciados e pela concentração progressiva de fluidos residuais. Nesse

contexto, a diversidade de inclusões fluidas, cavidades, microfraturas e possíveis fases minerais observadas nos cristais de berilo é compatível com diferentes estágios de aprisionamento, circulação e reequilíbrio de fluidos durante a cristalização e evolução dos corpos pegmatíticos.

5.1 Ferreirinha I

A amostra Ferreirinha I apresentou uma ampla diversidade de inclusões e microfeições internas observadas por microscopia óptica, conforme apresentado nas Figuras 8 a 12. Foram reconhecidas inclusões fluidas monofásicas, inclusões com aspecto bifásico, cavidades alongadas, microfraturas, microdescontinuidades e uma inclusão sólida. Essa variedade morfológica sugere que o cristal de berilo preserva registros de diferentes momentos de aprisionamento, modificação ou redistribuição de fluidos e fases minerais ao longo de sua evolução.

Na Figura 8, a inclusão sólida de morfologia prismática a irregular, coloração clara a levemente amarelada e contraste óptico elevado ocorre associada a cavidades alongadas, microfraturas e pequenas inclusões dispersas. Essa associação permite discutir a possibilidade de atuação de fluidos capazes de modificar ou preencher microcavidades internas do cristal. Embora a identificação como carbonato não possa ser confirmada apenas por microscopia óptica, a feição apresenta características compatíveis com uma fase mineral distinta da matriz do berilo, sendo necessário integrar essa observação aos dados Raman e a espectros de referência.

As Figuras 9 e 10 mostram inclusões fluidas subarredondadas a irregulares, além de cavidades alongadas e microdescontinuidades internas. Na Figura 10, a distribuição alinhada de inclusões menores sugere possível relação com planos internos de fraqueza ou microfraturas parcialmente cicatrizadas. Segundo Goldstein (2001), inclusões secundárias podem ocorrer ao longo de fraturas cicatrizadas, enquanto inclusões pseudosecundárias podem estar associadas a fraturas formadas durante o crescimento do cristal. Dessa forma, as inclusões alinhadas observadas em Ferreirinha I podem ser discutidas como possíveis registros de eventos posteriores ou contemporâneos ao crescimento do berilo, embora a classificação temporal exata exija cautela.

Nas Figuras 11 e 12, as inclusões com região periférica translúcida e domínio interno escuro foram descritas como inclusões com aspecto bifásico. Essas feições podem indicar a presença de mais de uma fase visível à temperatura ambiente, possivelmente relacionada a

líquido e vapor. Entretanto, como a mobilidade da bolha não foi documentada, a interpretação como inclusão bifásica deve ser mantida como preliminar. Ainda assim, a presença de domínios internos escuros reforça a possibilidade de que parte das inclusões de Ferreirinha I preserve componentes fluidos aprisionados.

Os resultados Raman das Figuras 28 a 33 complementam a interpretação petrográfica. Nas amostras Ferreirinha I — Amostras 01 e 02, os espectros apresentaram picos bem definidos próximos de 700 cm^{-1} , entre 1000 e 1100 cm^{-1} , além de sinais em alta frequência próximos de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} . Os sinais próximos de 3600 cm^{-1} podem estar relacionados a vibrações envolvendo grupos OH ou água estrutural/molecular, enquanto as bandas entre 700 e 1100 cm^{-1} podem refletir contribuições de fases minerais presentes na inclusão, do berilo hospedeiro ou da sobreposição entre ambos.

A amostra Ferreirinha I — Amostra 03 apresentou comportamento Raman distinto, com bandas mais largas, fundo espectral irregular e menor definição dos picos. Essa resposta pode estar associada à maior heterogeneidade da região analisada, à contribuição do hospedeiro ou à presença de sinais sobrepostos. Embora a microscopia óptica tenha identificado uma inclusão sólida clara a amarelada, a interpretação de uma fase carbonática deve ser considerada preliminar até comparação com espectros Raman de referência.

Assim, a integração entre as Figuras 8 a 12 e os espectros Raman das Figuras 28 a 33 sugere que a amostra Ferreirinha I registra uma associação entre inclusões fluidas, cavidades internas, possíveis fases sólidas e microdescontinuidades. Essa associação é compatível com um histórico de cristalização seguido por modificações internas relacionadas à circulação ou redistribuição de fluidos em microfraturas e cavidades. No entanto, a definição de origem primária, secundária ou pseudosecundária deve ser tratada com cautela, pois depende da integração entre relações texturais, resposta Raman e comparação com dados da literatura.

No contexto da evolução tectono-magmática do Orógeno Araçuaí, a abundância de inclusões fluidas, cavidades e microfraturas observada na amostra Ferreirinha I sugere que o cristal preserva registros de diferentes episódios de aprisionamento e circulação de fluidos durante sua evolução. Esse conjunto de feições é compatível com a cristalização de pegmatitos altamente diferenciados associados à Supersuíte G4, formados durante a transição entre os estágios tardi-colisional e pós-colisional, nos quais a evolução dos fluidos residuais desempenha papel importante na formação e modificação das feições internas do berilo.

5.2 Golconda I

A amostra Golconda I apresentou, por microscopia óptica, um conjunto expressivo de inclusões, cavidades e microfeições internas associadas a microfraturas, descontinuidades e zonas texturalmente heterogêneas do cristal de berilo, conforme observado nas Figuras 13 a 17. Embora essa amostra não tenha sido selecionada para análise Raman, sua interpretação petrográfica é relevante para compreender a variabilidade morfológica das inclusões nos berilos estudados e para comparar seus padrões texturais com aqueles observados nas demais lavras.

Na Figura 13, a inclusão alongada e irregular ocorre em uma região marcada por microfraturas, cavidades alongadas e heterogeneidades internas. Essa associação espacial sugere que parte das inclusões presentes em Golconda I pode estar relacionada a planos internos de fragilidade do cristal hospedeiro. De acordo com Goldstein (2001), inclusões associadas a fraturas ou descontinuidades podem registrar eventos posteriores ao crescimento do mineral, especialmente quando ocorrem ao longo de fraturas cicatrizadas ou trilhas internas. Contudo, a classificação temporal dessas inclusões deve ser feita com cautela, pois a forma isoladamente não é suficiente para definir se uma inclusão é primária, secundária ou pseudosecundária.

A Figura 14 mostra um campo petrográfico caracterizado por inclusões fluidas, cavidades irregulares, feições alongadas e microdescontinuidades. A inclusão arredondada indicada pela seta foi descrita como monofásica à temperatura ambiente, enquanto as cavidades maiores e alongadas ao redor apresentam contornos sinuosos e interior heterogêneo. Essa associação pode indicar modificação interna do cristal por fluidos que circularam ou foram redistribuídos ao longo de microdomínios frágeis. Assim, embora no capítulo de Resultados essas feições tenham sido descritas apenas de forma morfológica, na Discussão elas podem ser interpretadas como possíveis registros de eventos pós-cristalização ou de reabertura/modificação de cavidades internas.

Na Figura 15, observa-se a coexistência espacial de uma inclusão fluida monofásica e uma inclusão sólida acastanhada. Essa associação é importante porque sugere a presença, em um mesmo domínio cristalino, de feições com naturezas ópticas distintas: uma cavidade translúcida, compatível com inclusão fluida, e uma feição mais opaca, com coloração castanho-alaranjada e aspecto heterogêneo, compatível com fase mineral incluída. Em sistemas pegmatíticos, inclusões fluidas podem conter fases sólidas ou ocorrer associadas a minerais aprisionados, especialmente em estágios de evolução de fluidos residuais. No entanto, sem

dados Raman ou composicionais para essa amostra, a natureza mineralógica da inclusão sólida permanece indeterminada.

A Figura 16 reforça essa interpretação ao apresentar uma inclusão sólida acastanhada associada espacialmente a uma descontinuidade interna sub-horizontal. A coloração castanho-amarelada, o contraste óptico elevado e o aspecto granular diferenciam essa feição das inclusões fluidas translúcidas observadas em outros campos. Essa associação com uma descontinuidade pode indicar que a inclusão sólida foi preservada ou concentrada em uma zona estruturalmente favorável dentro do berilo. Segundo Goldstein (2001), cristais fraturados, deformados ou recristalizados podem aprisionar inclusões após o crescimento mineral, e a interpretação desse tipo de feição depende da avaliação das relações texturais entre inclusão, fratura e mineral hospedeiro.

A Figura 17 representa o campo mais heterogêneo da amostra Golconda I, com cavidades irregulares de maior dimensão, microfraturas, feições alongadas, microdescontinuidades e pequenas inclusões dispersas. A cavidade maior observada na porção superior direita apresenta bordas sinuosas e interior heterogêneo, características que podem ser discutidas como possíveis evidências de modificação morfológica após o aprisionamento inicial. Processos como reequilíbrio, dissolução localizada, redistribuição de fluidos ou modificação de cavidades ao longo de microfraturas podem gerar feições irregulares e redes internas complexas. Entretanto, essas interpretações devem ser mantidas como hipóteses texturais, pois a fotomicrografia isolada não permite confirmar o processo responsável.

A presença de inclusões e cavidades associadas a microfraturas em Golconda I é compatível com descrições clássicas de inclusões secundárias e pseudosecundárias. Segundo Goldstein (2001), inclusões secundárias são formadas após o crescimento cristalino, normalmente ao longo de fraturas cicatrizadas, enquanto inclusões pseudosecundárias possuem origem semelhante, mas são aprisionadas antes da conclusão do crescimento do mineral hospedeiro. No caso da amostra Golconda I, a ocorrência de inclusões alongadas, cavidades irregulares e feições associadas a descontinuidades permite sugerir possível origem secundária ou pseudosecundária para parte das feições observadas. No entanto, como não há evidência clara de relação com zonas de crescimento ou terminação sistemática de trilhas em limites internos do cristal, parte das inclusões deve permanecer classificada como de origem indeterminada.

Essa cautela é importante porque Bodnar (2003) e Goldstein (2001) ressaltam que a classificação temporal das inclusões fluidas pode ser ambígua quando os critérios petrográficos

não estão claramente preservados. A forma da inclusão, por si só, não deve ser usada como critério definitivo para definir sua origem. Assim, as formas arredondadas, alongadas, lenticulares ou irregulares observadas em Golconda I devem ser interpretadas em conjunto com sua distribuição, associação com fraturas, relação com cavidades e contexto textural do cristal hospedeiro.

A ausência de dados Raman para a amostra Golconda I limita a identificação composicional das inclusões e possíveis fases sólidas. Ainda assim, os padrões texturais observados podem ser comparados com os resultados obtidos para Ferreirinha I e São Domingos, nas quais os espectros Raman indicaram bandas em regiões compatíveis com possíveis contribuições de grupos OH, água estrutural ou molecular, além de sinais relacionados a fases minerais ou ao próprio berilo hospedeiro. Essa comparação sugere que as feições observadas em Golconda I também podem estar associadas a componentes fluidos e/ou minerais, mas essa interpretação permanece preliminar pela ausência de confirmação espectroscópica.

Estudos prévios em berilos do Campo Pegmatítico de Marilac indicam que inclusões fluidas em berilo podem ser primárias e pseudosecundárias, predominantemente aquosas, e podem ocorrer também ao longo de fraturas cicatrizadas internas ao cristal hospedeiro. Bello et al. (2000) descreveram inclusões fluidas em berilo do Pegmatito Ipê, situado no mesmo contexto regional, com predominância de inclusões bifásicas aquosas de baixa salinidade, além de inclusões distribuídas em fraturas cicatrizadas, interpretadas como pseudosecundárias. Esse dado regional reforça a possibilidade de que algumas feições de Golconda I estejam relacionadas a fluidos aquosos aprisionados ou redistribuídos durante a evolução do sistema pegmatítico.

Dessa forma, a amostra Golconda I representa um domínio petrográfico marcado por elevada heterogeneidade textural, com inclusões fluidas monofásicas a possivelmente bifásicas, possíveis inclusões sólidas acastanhadas, cavidades irregulares, microfraturas e microdescontinuidades internas. A associação dessas feições com zonas de fragilidade do cristal permite discutir a atuação de processos pós-cristalização, como circulação ou redistribuição de fluidos ao longo de microfraturas, modificação de cavidades internas e possível precipitação de fases minerais em microdomínios do berilo. No entanto, por não haver dados Raman para essa lavra, a discussão de Golconda I permanece essencialmente textural e petrográfica, sendo necessária a aplicação de técnicas complementares para confirmação composicional das inclusões e fases associadas.

5.3 Olho de Gato

As amostras provenientes da lavra Olho de Gato apresentaram comportamento distinto em relação às demais lavras analisadas, caracterizando-se pela menor abundância de inclusões fluidas visíveis e pela predominância de possíveis inclusões sólidas. Conforme observado nas Figuras 18 a 22, essas feições apresentam diferentes geometrias, incluindo formas subarredondadas, irregulares, euédricas, subeuédricas e subangulares, além de variações expressivas de cor, contraste óptico e grau de definição dos contornos.

Na Figura 18, a inclusão sólida acastanhada ocorre associada a uma zona interna heterogênea do cristal de berilo, marcada por microdescontinuidades, pequenas cavidades e variações locais de contraste óptico. Essa associação espacial sugere que a feição pode estar relacionada a um domínio interno de maior fragilidade ou modificação textural. Embora, nos resultados, essa região tenha sido descrita apenas como zona heterogênea, na discussão é possível considerar que ela possa representar uma área afetada por processos pós-cristalização, como circulação localizada de fluidos ou reorganização interna de cavidades e microfeições.

A Figura 19 apresenta uma inclusão sólida de coloração amarelada a castanho-clara, com morfologia irregular a subarredondada e contornos parcialmente lobados. Diferentemente da feição observada na Figura 18, essa inclusão ocorre em uma matriz de berilo relativamente homogênea, com menor densidade aparente de microfraturas e cavidades. Essa relação sugere que nem todas as possíveis inclusões sólidas da lavra Olho de Gato estão diretamente associadas a zonas fraturadas ou heterogêneas. Algumas podem representar fases minerais aprisionadas durante o crescimento do cristal ou preservadas em domínios menos modificados do berilo.

Na Figura 20, observa-se uma inclusão sólida euédrica a subeuédrica, com geometria poligonal, contornos definidos e discreta heterogeneidade interna. Essa morfologia mais regular pode indicar uma fase mineral cristalina preservada no interior do berilo, diferindo das feições mais irregulares observadas nas Figuras 18, 19, 21 e 22. A preservação de contornos relativamente retos e limites bem definidos pode sugerir menor modificação morfológica após a incorporação da inclusão ao cristal hospedeiro. No entanto, a composição mineralógica dessa feição não pode ser definida apenas por microscopia óptica.

A Figura 21 mostra uma inclusão sólida azul-escura associada a uma faixa interna heterogênea. O contraste óptico elevado, a coloração intensa e a associação com microdescontinuidades indicam que essa feição possui propriedades ópticas distintas da matriz de berilo e ocorre em um domínio estruturalmente diferenciado do cristal. Essa relação espacial

pode ser discutida como evidência de concentração de inclusões ou precipitação de fases minerais em zonas internas preferenciais, embora essa interpretação permaneça preliminar pela ausência de dados composicionais.

Na Figura 22, a inclusão sólida de coloração esverdeada a amarelada apresenta morfologia irregular a subangular, variação interna de tonalidade e contraste óptico elevado. A presença de pequenas cavidades e microfeições ao redor da inclusão reforça o caráter heterogêneo do campo observado. A coloração diferenciada pode indicar composição distinta da matriz do berilo, mas não permite inferir elementos específicos ou composição mineralógica sem análises complementares, como Raman ou MEV-EDS.

Em conjunto, as Figuras 18 a 22 indicam que a lavra Olho de Gato é marcada pela predominância de possíveis inclusões sólidas, com menor frequência de inclusões fluidas claramente reconhecíveis em microscopia óptica. Essa característica diferencia a amostra das lavras Ferreirinha I, Golconda I e São Domingos, nas quais foram descritas cavidades fluidas, inclusões com aspecto bifásico e maior diversidade de microcavidades. Em Olho de Gato, a variação de cor, forma e contraste óptico das inclusões sugere a presença de fases com diferentes propriedades ópticas e possivelmente diferentes composições, embora essa hipótese dependa de confirmação analítica.

Segundo Goldstein (2001), a interpretação de inclusões em minerais hospedeiros deve considerar sua morfologia, distribuição espacial, relação com fraturas, associação com zonas internas e contexto textural. No caso da lavra Olho de Gato, a associação de algumas possíveis inclusões sólidas com faixas heterogêneas e microdescontinuidades permite discutir a atuação de processos posteriores ao crescimento do cristal, como circulação localizada de fluidos, modificação de microcavidades ou precipitação de fases minerais em domínios internos do berilo. Entretanto, a ocorrência de inclusões mais isoladas e com contornos regulares, como nas Figuras 19 e 20, também permite considerar a possibilidade de aprisionamento durante estágios mais precoces de crescimento cristalino.

Dessa forma, mesmo sem análises Raman, a lavra Olho de Gato apresenta feições petrográficas relevantes para a compreensão da variabilidade textural das inclusões nos berilos estudados. A predominância de possíveis inclusões sólidas, a diversidade de cores e morfologias e a associação de algumas feições com zonas internas heterogêneas indicam que o cristal hospedeiro preserva registros de diferentes condições de aprisionamento ou modificação interna. Contudo, a interpretação composicional e genética dessas inclusões permanece limitada

pela ausência de dados espectroscópicos, sendo recomendável a aplicação futura de Raman, MEV-EDS ou outras técnicas microanalíticas.

5.4 São Domingos

A amostra São Domingos apresentou comportamento distinto em relação à Ferreirinha I e às demais lavras analisadas, principalmente pela diversidade morfológica das inclusões e microfeições internas observadas em microscopia óptica. Conforme apresentado nas Figuras 23 a 27, foram reconhecidas inclusões alongadas, lenticulares, subtabulares, aciculares, prismáticas, subretangulares e arredondadas a subarredondadas, além de cavidades irregulares, microcavidades dispersas, microfraturas e microdescontinuidades internas. Essa variedade indica que o cristal de berilo preserva diferentes tipos de feições, incluindo possíveis inclusões sólidas e cavidades de natureza fluida ou indeterminada.

Na Figura 23, observa-se uma inclusão alongada a lenticular associada a um campo com cavidades irregulares, microfraturas e descontinuidades internas. A morfologia alongada e o aspecto translúcido da feição sugerem que ela pode corresponder a uma cavidade interna ou inclusão fluida alongada, embora a ausência de bolha visível ou de fases internas claramente individualizadas limite sua classificação. Essa feição evidencia a dificuldade de diferenciar, apenas por microscopia óptica, inclusões fluidas monofásicas, cavidades vazias ou microfeições internas de natureza indeterminada.

A Figura 24 mostra uma inclusão sólida alongada a subtabular, com contornos relativamente definidos e discreta heterogeneidade interna. Essa geometria mais regular permite interpretá-la como uma fase mineral incluída no berilo, diferenciando-a das cavidades irregulares presentes no entorno. De acordo com Goldstein (2001), inclusões sólidas podem ser aprisionadas durante o crescimento do mineral hospedeiro ou associar-se a eventos posteriores de fraturamento, preenchimento e selamento de cavidades. No caso de São Domingos, a associação da feição com cavidades menores e microdescontinuidades sugere que sua origem pode estar relacionada tanto ao crescimento do berilo quanto a processos posteriores de modificação interna.

A Figura 25 apresenta uma inclusão sólida acicular a prismática alongada, com contornos bem definidos e orientação preferencial. Essa morfologia é particularmente relevante, pois sugere hábito cristalino próprio, compatível com uma fase mineral incluída no berilo. Em pegmatitos graníticos, a cristalização simultânea ou sucessiva de fases minerais

acessórias é comum, especialmente em sistemas enriquecidos em voláteis e elementos incompatíveis. Nesse contexto, a presença de possíveis inclusões sólidas aciculares ou prismáticas em São Domingos é coerente com a complexidade mineralógica esperada para ambientes pegmatíticos, conforme discutido por Černý e Ercit (2005) e Dharmapriya et al. (2024).

Na Figura 26, o conjunto de possíveis inclusões sólidas prismáticas a subretangulares reforça a interpretação de que parte das feições observadas em São Domingos pode corresponder a fases minerais preservadas no interior do berilo. Essas inclusões apresentam contornos relativamente definidos e contraste óptico moderado a elevado, diferindo das microcavidades dispersas e das feições irregulares do entorno. A ocorrência de várias feições prismáticas no mesmo campo pode indicar aprisionamento de fases minerais durante o crescimento do berilo ou preservação de inclusões em microdomínios específicos do cristal hospedeiro.

A Figura 27, por outro lado, mostra inclusões arredondadas a subarredondadas, cavidades irregulares e microdescontinuidades internas. Algumas dessas feições apresentam aspecto translúcido e homogêneo, sem bolha de vapor ou fase sólida claramente visível, sendo compatíveis com inclusões fluidas monofásicas à temperatura ambiente. Outras apresentam bordas mais espessas, centro parcialmente translúcido e contraste óptico mais elevado, dificultando a classificação quanto ao número de fases. Essa população de inclusões arredondadas indica que, embora São Domingos apresente muitas possíveis inclusões sólidas, também há cavidades que podem estar relacionadas a componentes fluidos preservados no cristal.

Os espectros Raman obtidos para São Domingos, apresentados nas Figuras 34 a 39, complementam a interpretação petrográfica. A amostra São Domingos — Amostra 01, representada pelas Figuras 34 e 35, apresentou espectro relativamente simples, com número reduzido de bandas bem individualizadas e destaque para um pico estreito e intenso próximo de 3600 cm^{-1} . Esse sinal pode estar relacionado a vibrações envolvendo grupos OH ou água estrutural/molecular, mas essa interpretação deve ser considerada preliminar, pois o ponto analisado corresponde a uma feição micrométrica hospedada no berilo e pode incluir contribuição do mineral hospedeiro adjacente.

A importância da amostra São Domingos — Amostra 01 está no fato de que, mesmo em uma região onde a microscopia óptica não evidenciou claramente uma inclusão bifásica com bolha ou menisco, o espectro Raman registrou um sinal expressivo em alta frequência. Isso

reforça a relevância da espectroscopia Raman como técnica complementar à petrografia, especialmente no estudo de inclusões pequenas, monofásicas ou de difícil classificação óptica. Conforme discutido por Frezzotti et al. (2012), a espectroscopia Raman permite investigar fases moleculares e minerais em inclusões microscópicas de forma não destrutiva, contribuindo para a caracterização de feições que nem sempre são diagnósticas ao microscópio.

As amostras São Domingos — Amostras 02 e 03, apresentadas nas Figuras 36 a 39, exibiram espectros mais complexos, com picos bem definidos entre aproximadamente 300 e 1200 cm^{-1} , além de bandas próximas de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} . Os sinais próximos de 700 cm^{-1} e entre 1000 e 1100 cm^{-1} indicam a presença de modos vibracionais bem marcados na região analisada, podendo estar relacionados a fases minerais presentes na inclusão, ao berilo hospedeiro ou à sobreposição de contribuições entre ambos. Já o pico próximo de 3600 cm^{-1} pode estar associado a grupos OH ou água estrutural/molecular, enquanto a banda próxima de 2900 cm^{-1} representa uma feição adicional relevante nesses espectros.

A comparação entre microscopia óptica e Raman sugere que a lavra São Domingos preserva tanto possíveis fases sólidas incluídas quanto feições associadas a componentes fluidos ou hidratados. As possíveis inclusões sólidas aciculares, prismáticas e subtabulares descritas nas Figuras 24, 25 e 26 podem estar relacionadas aos sinais Raman de baixas e médias frequências observados nas Figuras 37 e 39. Por sua vez, as inclusões arredondadas e cavidades descritas na Figura 27 podem estar associadas a feições fluidas ou cavidades internas, cuja resposta espectral pode contribuir para os sinais em alta frequência próximos de 3600 cm^{-1} . No entanto, essa correlação deve ser tratada como preliminar, pois os pontos Raman analisados representam volumes micrométricos e podem registrar contribuições combinadas da inclusão e do berilo hospedeiro.

Em termos interpretativos, a variedade de morfologias observadas em São Domingos pode refletir diferentes condições de aprisionamento e preservação das inclusões durante a evolução do cristal de berilo. As feições prismáticas, aciculares e subtabulares podem representar fases minerais aprisionadas durante o crescimento do berilo ou durante estágios de cristalização de minerais acessórios no pegmatito. Já as cavidades arredondadas, lenticulares e irregulares podem estar relacionadas a fluidos aprisionados, microcavidades modificadas ou feições formadas ao longo de descontinuidades internas. Essa interpretação é coerente com a evolução de pegmatitos graníticos, nos quais os estágios finais de cristalização são marcados pela concentração de fluidos residuais, voláteis e elementos incompatíveis, favorecendo a formação de inclusões fluidas e sólidas em minerais hospedeiros.

Assim, São Domingos apresenta um registro distinto de Ferreirinha I. Enquanto Ferreirinha I mostra maior abundância de inclusões fluidas morfológicamente reconhecíveis, inclusões com aspecto bifásico e cavidades associadas a microfraturas, São Domingos se destaca pela presença de possíveis inclusões sólidas com morfologias aciculares, prismáticas, subtabulares e subretangulares, além de espectros Raman com sinais bem definidos em diferentes regiões da faixa analisada. Essa diferença sugere variações locais nas condições de cristalização, aprisionamento e preservação das inclusões nos cristais de berilo estudados.

Dessa forma, a integração entre as Figuras 23 a 27 e os espectros Raman das Figuras 34 a 39 indica que a lavra São Domingos preserva um conjunto heterogêneo de inclusões e microfeições internas, possivelmente relacionado à coexistência de fases minerais incluídas, cavidades internas e componentes associados a OH/H₂O. Contudo, a identificação mineralógica e composicional definitiva dessas feições depende da comparação com espectros Raman de referência e, preferencialmente, da integração com técnicas complementares, como MEV-EDS ou outras análises microquímicas.

No contexto da evolução tectono-magmática do Orógeno Araçuai, a coexistência de possíveis fases minerais, cavidades, canais estruturais característicos do berilo e feições associadas a componentes fluidos sugere que diferentes processos atuaram durante a evolução desse cristal. Essa diversidade é compatível com a complexidade dos sistemas pegmatíticos associados à Supersuíte G4, nos quais sucessivos episódios de cristalização e circulação de fluidos podem produzir registros petrográficos distintos dentro de um mesmo corpo pegmatítico.

5.5 Modelo interpretativo para a formação e modificação das inclusões nos berilos estudados

A partir da integração entre os dados petrográficos e espectroscópicos obtidos neste trabalho, é possível propor um modelo interpretativo preliminar para a formação, preservação e modificação das inclusões presentes nos cristais de berilo das lavras estudadas. Esse modelo considera que as inclusões observadas não representam um único evento homogêneo, mas sim registros de diferentes momentos da evolução dos sistemas pegmatíticos, envolvendo o crescimento do berilo, o aprisionamento de fases sólidas e fluidas, e possíveis modificações posteriores relacionadas à circulação ou redistribuição de fluidos em microfraturas e descontinuidades internas.

No primeiro estágio interpretativo, relacionado ao crescimento dos cristais de berilo no sistema pegmatítico, teriam sido aprisionadas fases sólidas e pequenas porções de fluido residual. Esse estágio pode estar representado por inclusões mais isoladas, com contornos relativamente regulares e morfologias euédricas, subeuédricas, prismáticas, aciculares ou subtabulares, como observado principalmente nas lavras Olho de Gato e São Domingos. As feições descritas nas Figuras 19 e 20, em Olho de Gato, e nas Figuras 24, 25 e 26, em São Domingos, exemplificam esse conjunto de possíveis inclusões sólidas com geometria mais definida, que podem corresponder a minerais acessórios ou fases incorporadas durante a cristalização do berilo.

Em um segundo estágio, associado à evolução tardia do sistema pegmatítico, fluidos residuais enriquecidos em voláteis podem ter permanecido ativos durante ou após a cristalização do berilo, favorecendo a formação de inclusões fluidas, cavidades internas e microfeições associadas ao hospedeiro. Esse estágio pode estar representado pelas inclusões arredondadas, subarredondadas, lenticulares e com aspecto bifásico observadas especialmente em Ferreirinha I, nas Figuras 9, 10, 11 e 12, bem como por algumas cavidades arredondadas a subarredondadas descritas em São Domingos, especialmente na Figura 27. Os espectros Raman obtidos para Ferreirinha I e São Domingos, apresentados nas Figuras 28 a 39, registraram sinais em alta frequência próximos de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} em parte das análises, os quais podem estar relacionados a contribuições de grupos OH, água estrutural/molecular e/ou do berilo hospedeiro. Essa resposta espectral reforça a possibilidade de participação de componentes hidratados em parte das feições analisadas, embora a atribuição composicional permaneça preliminar.

No terceiro estágio interpretativo, processos posteriores ao crescimento do berilo podem ter promovido a reabertura, modificação, redistribuição ou selamento de microfraturas e cavidades internas. Esse estágio é sugerido pela presença de inclusões alinhadas, cavidades alongadas, feições irregulares, microfraturas e microdescontinuidades observadas principalmente em Ferreirinha I e Golconda I. Em Ferreirinha I, as Figuras 8, 10 e 12 mostram cavidades alongadas e inclusões associadas a microdescontinuidades internas. Em Golconda I, as Figuras 13 a 17 evidenciam cavidades irregulares, feições alongadas e possíveis inclusões sólidas associadas a domínios texturalmente heterogêneos. Essas relações sugerem que parte das inclusões pode ter origem secundária ou pseudosecundária, conforme os critérios petrográficos discutidos por Goldstein (2001), embora a classificação temporal deva ser

mantida com cautela quando as relações com zonas de crescimento ou fraturas cicatrizadas não são completamente evidentes.

O quarto aspecto considerado no modelo refere-se à preservação diferencial das inclusões entre as lavras. Ferreirinha I representa o domínio com maior diversidade de inclusões fluidas, inclusões com aspecto bifásico, possíveis inclusões sólidas e resposta Raman variável entre os pontos analisados. São Domingos destaca-se pela diversidade de possíveis inclusões sólidas e por espectros Raman com bandas bem definidas em diferentes regiões da faixa analisada. Golconda I apresenta forte heterogeneidade textural, com cavidades irregulares e feições associadas a microfraturas, embora sem confirmação espectroscópica. Olho de Gato, por sua vez, é marcada pela predominância de possíveis inclusões sólidas com variações expressivas de cor, forma e contraste óptico, mas também sem dados Raman que permitam confirmar sua composição.

Dessa forma, o modelo interpretativo proposto considera que as inclusões nos berilos estudados resultam da combinação entre: I) aprisionamento de fases sólidas e pequenas porções de fluido durante o crescimento cristalino; II) participação de fluidos residuais durante a evolução tardia do pegmatito; III) modificação posterior de cavidades e microfraturas por processos de circulação, redistribuição ou selamento de fluidos; e IV) preservação diferencial dessas feições em cada lavra. Esse modelo não estabelece uma sequência evolutiva definitiva para todas as inclusões analisadas, mas organiza as principais evidências petrográficas e espectroscópicas obtidas neste trabalho (Tabela 2).

A interpretação proposta reforça que a microscopia óptica e a espectroscopia Raman desempenham papéis complementares na caracterização das inclusões em berilo. A petrografia permitiu reconhecer padrões morfológicos, relações texturais e possíveis associações com microfraturas e descontinuidades, enquanto o Raman contribuiu para avaliar qualitativamente a resposta vibracional de inclusões e microfeições selecionadas. Entretanto, a confirmação da composição das fases presentes e da sequência evolutiva proposta depende da comparação sistemática com espectros Raman de referência e da aplicação de técnicas complementares, como microtermometria, MEV-EDS e análises microquímicas pontuais.

Tabela 2 – Modelo interpretativo preliminar para a formação, preservação e modificação das inclusões nos berilos estudados.

Estágio interpretativo	Processo proposto	Feições associadas	Lavras mais representativas	Evidências principais	Grau de confiança
Estágio 1	Crescimento do berilo e aprisionamento inicial de fases sólidas ou pequenas porções de fluido	Inclusões euédricas, subeuédricas, prismáticas, aciculares, subtabulares e isoladas	Olho de Gato e São Domingos	Figuras 19, 20, 24, 25 e 26	Moderado
Estágio 2	Participação de fluidos residuais durante a evolução tardia do pegmatito	Inclusões arredondadas, subarredondadas, lenticulares, monofásicas e com aspecto bifásico	Ferreirinha I e São Domingos	Figuras 9, 10, 11, 12 e 27; sinais Raman próximos de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} em parte dos espectros	Moderado
Estágio 3	Modificação, reabertura ou selamento de microfraturas e cavidades internas	Inclusões alinhadas, cavidades alongadas, microfraturas, microdescontinuidades e feições irregulares	Ferreirinha I e Golconda I	Figuras 8, 10, 12, 13, 14, 15, 16 e 17	Moderado a baixo
Estágio 4	Preservação diferencial das inclusões entre as lavras	Variação na abundância, morfologia, contraste óptico e resposta Raman das inclusões	Todas as lavras	Diferenças texturais e espectrais entre Ferreira I, Golconda I, Olho de Gato e São Domingos	Moderado

Fonte: Elaboração própria (2026).

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo caracterizar inclusões presentes em cristais de berilo provenientes das lavras Golconda I, Ferreirinha I, Olho de Gato e São Domingos, inseridas no Campo Pegmatítico de Marilac, associado à Província Pegmatítica Oriental do Brasil e ao Orógeno Araçuaí. Para isso, foram integradas observações em microscopia óptica e análises por espectroscopia Raman, com foco na descrição morfológica, textural e espectral das inclusões e microfeições internas observadas.

As análises petrográficas permitiram reconhecer diferentes tipos de feições nos cristais de berilo, incluindo inclusões fluidas monofásicas, inclusões com aspecto bifásico, possíveis inclusões sólidas, cavidades irregulares, microfraturas e microdescontinuidades internas. A variação observada entre as lavras evidencia que os berilos estudados preservam registros distintos de aprisionamento, preservação e possível modificação de inclusões ao longo da evolução dos sistemas pegmatíticos.

Entre as lavras analisadas, Ferreirinha I destacou-se pela maior diversidade de inclusões fluidas e possíveis inclusões sólidas, além de apresentar respostas Raman distintas entre os pontos analisados. São Domingos apresentou maior diversidade de feições internas, incluindo possíveis fases minerais, canais estruturais característicos do berilo e cavidades associadas a componentes fluidos e espectros Raman com bandas bem definidas em diferentes regiões da faixa espectral investigada. Já Golconda I e Olho de Gato contribuíram principalmente para a interpretação petrográfica, evidenciando a variabilidade morfológica e textural das inclusões nos berilos estudados.

Os espectros Raman obtidos para Ferreirinha I e São Domingos apresentaram sinais em baixas, médias e altas frequências, com bandas relevantes próximas de 700 cm^{-1} , entre aproximadamente 1000 e 1100 cm^{-1} , além de sinais próximos de 2900 cm^{-1} e 3600 cm^{-1} em parte das análises. Essas bandas indicam respostas vibracionais importantes nos pontos analisados, podendo estar relacionadas a contribuições das inclusões, de possíveis fases minerais, de grupos OH ou água estrutural/molecular e/ou do próprio berilo hospedeiro. Entretanto, a atribuição composicional dessas bandas deve ser considerada preliminar, dependendo de comparação com espectros Raman de referência.

A integração entre microscopia óptica e espectroscopia Raman mostrou-se fundamental para a caracterização das inclusões estudadas. A microscopia forneceu a base morfológica e textural para reconhecer e selecionar as feições analisadas, enquanto o Raman permitiu avaliar

qualitativamente suas respostas espectrais. Essa combinação demonstrou que feições semelhantes em microscopia podem apresentar comportamentos espectrais distintos, reforçando a importância do uso complementar das técnicas.

De modo geral, os resultados indicam que os cristais de berilo estudados preservam registros variados da evolução dos pegmatitos do Campo Pegmatítico de Marilac. As feições observadas podem estar relacionadas tanto ao crescimento cristalino e ao aprisionamento de fases sólidas ou fluidas quanto a processos posteriores, como circulação de fluidos, modificação de cavidades internas e selamento de microfraturas. No entanto, a confirmação da origem e da composição das inclusões requer análises complementares.

Dessa forma, os objetivos propostos foram alcançados, uma vez que foi possível descrever as inclusões e microfeições internas presentes nos berilos, reconhecer diferenças texturais entre as lavras estudadas e complementar a caracterização de parte das amostras por espectroscopia Raman. Como continuidade, recomenda-se a comparação sistemática dos espectros obtidos com bancos de dados Raman, além da aplicação de técnicas como MEV-EDS, microtermometria e análises microquímicas, a fim de aprofundar a identificação composicional das inclusões e a interpretação da evolução dos fluidos associados aos pegmatitos estudados.

REFERÊNCIAS

ALDERTON, D. H. M. *Fluid inclusions*. In: WHITE, W. M. (ed.). *Encyclopedia of Geology*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2020. p. 294–299. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102908-4.00048-5>. Acesso em: 19 maio 2025.

ASHWORTH, T. et al. Characterization of fluid inclusions from mineralized pegmatites of the Damara Belt, Namibia: insight into late-stage fluid evolution and implications for mineralization. *Ore Geology Reviews*, v. 95, p. 869–885, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.03.003>. Acesso em: 19 maio 2025.

BELLO, Rosa Maria da Silveira et al. Caracterização das inclusões fluidas de berilo do pegmatito Ipê, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 30, n. 2, p. 258–261, 2000.

BELLO, R. M. S. et al. Caracterização mineralógica e composição química das inclusões fluidas de berilo do pegmatito Ipê, município de Governador Valadares, Minas Gerais. *Geonomos*, v. 8, n. 1, p. 31–37, 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v8i1.197>. Acesso em: 19 maio 2025.

BODNAR, R. J. Introduction to aqueous-electrolyte fluid inclusions. In: SAMSON, I.; ANDERSON, A.; MARSHALL, D. (Eds.). *Fluid Inclusions: Analysis and Interpretation*. Mineralogical Association of Canada, Short Course Series, v. 32, p. 81–99, 2003.

ČERNÝ, P.; ERCIT, T. S. The classification of granitic pegmatites revisited. *The Canadian Mineralogist*, v. 43, n. 6, p. 2005–2026, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/gscanmin.43.6.2005>. Acesso em: 19 maio 2025.

DHARMAPRIYA, P. L. et al. Genesis, classification, tectonic setting and economic potential of global granitic pegmatites: A review. *Ore Geology Reviews*, v. 167, 105656, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105656>. Acesso em: 19 maio 2025.

FREZZOTTI, M. L. et al. Raman spectroscopy for fluid inclusion analysis. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 112, p. 1–20, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.009>. Acesso em: 19 maio 2025.

GOLDSTEIN, R. H. Petrographic analysis of fluid inclusions. New York: Mineralogical Society of America, 2001.

GOLDSTEIN, Robert H.; REYNOLDS, Terry J. Systematics of fluid inclusions in diagenetic minerals. Tulsa: SEPM (Society for Sedimentary Geology), 1994.

GÜBELIN, E. J. *Internal World of Gemstones*. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1988.

MICROSCOPE CENTRAL. *Olympus BX41-P Polarizing Light Microscope*. Disponível em: <https://microscopecentral.com/products/olympus-bx41-p-polarizing-light-microscope>. Acesso em 02 de março 2026.

NEWMAN CARVALHO, A. M. et al. Dados cristaloquímicos dos berilos dos pegmatitos Ipê, Ferreirinha, Escondido e Jonas Lima, Governador Valadares, MG. *Geociências (São Paulo)*, v. 26, n. 2, p. 213–224, 2007. Disponível em: <https://revistas.pucsp.br/index.php/geociencias/article/view/1536>. Acesso em: 19 maio 2025.

PEDROSA-SOARES, A. C. et al. Geologia econômica de minerais da alta tecnologia (grafita e lítio) no Sul da Bahia, Nordeste de Minas Gerais e Província Borborema: roteiro de campo. Curso promovido pela ADIMB – Agência para o Desenvolvimento e Inovação do Setor Mineral, 19–28 ago. 2022. 30 p.

PEDROSA-SOARES, A. C. et al. Orógeno Araçuaí: síntese do conhecimento 30 anos após Almeida (1977). In: PINTO, C. P.; BRITO NEVES, B. B. (org.). *Noventa anos da Sociedade Brasileira de Geologia*. São Paulo: SBG, 2007. p. 67–88. Disponível em: https://sbgeo.org.br/pub90anos/Artigos/07_Aracua%C3%AD.pdf. Acesso em: 19 maio 2025.

PEDROSA-SOARES, A. C. et al. Late Neoproterozoic–Cambrian granitic magmatism in the Araçuaí orogen (Brazil), the Eastern Brazilian Pegmatite Province and related mineral resources. *Geoscience Frontiers*, v. 2, n. 2, p. 189–204, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.01.002>. Acesso em: 19 maio 2025.

PESTILHO, R. A.; MONTEIRO, M. A. M. Uma revisão dos fundamentos do estudo de inclusões fluidas aquosas e de petróleo. *Petro & Química*, v. 39, n. 469, p. 30–41, 2017. Disponível em: <https://www.petroleoenergia.com.br/inclusoes-fluidas/>. Acesso em: 19 maio 2025.

ROEDDER, Edwin. Fluid inclusions. Washington: Mineralogical Society of America, 1984.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO. Guia de normalização para apresentação de trabalhos acadêmicos da UFOP. Ouro Preto: UFOP, 2023.h