



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



MARIANA DA MATA ROSA

CARACTERIZAÇÃO GEMOLÓGICA DO TOPÁZIO IMPERIAL DA REGIÃO DE
OURO PRETO, MINAS GERAIS

Ouro Preto

2026

Mariana da Mata Rosa

Caracterização Gemológica do Topázio Imperial da Região de Ouro Preto

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 Bacharel em Engenharia Geológica

Orientadora: Dra. Cassandra Terra Barbosa

Ouro Preto
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

R788c Rosa, Mariana da Mata.

Caracterização gemológica do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais. [manuscrito] / Mariana da Mata Rosa. - 2026.
52 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Cassandra Terra Barbosa.

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

1. Geologia. 2. Gemologia. 3. Raman, Espectroscopia de. 4.
Mineralogia. 5. Topázio. I. Barbosa, Cassandra Terra. II. Universidade
Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 553.84

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mariana da Mata Rosa

Caracterização gemológica do Topázio Imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais

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

Aprovada em 26 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr^a. Cassandra Terra Barbosa, orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Ricardo Scholz - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Rodson de Abreu Marques - Universidade Federal de Ouro Preto

Dr^a. Cassandra Terra Barbosa, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 09/03/2026



Documento assinado eletronicamente por **Cassandra Terra Barbosa, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/03/2026, às 11:24, 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 **1071356** e o código CRC **CCB40B32**.

Aos meus pais, que por meio de muita correria,
me permitiram caminhar até aqui.

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo realizar análises gemológicas para encontrar possíveis diferenças entre os cristais de topázio imperial de flancos opostos da anticlinal de Mariana. Foram analisadas amostras de Rodrigo Silva, localizado no flanco normal, e de Antônio Pereira no flanco invertido, ambos locais são distritos do município de Ouro Preto, Minas Gerais. Para tal foram realizadas análises de reação a luz UV, anisotropia, pleocroísmo e espectroscopia raman. Na espectroscopia raman foram obtidos espectros com picos de 324 e 418 cm^{-1} , correspondentes à micro inclusões sólidas de hematita e magnetita, respectivamente. No entanto uma amostra de Antônio Pereira (AP A 1), teve como resultado um espectro completamente diferente, com um pico em 388 cm^{-1} , que indica a presença de inclusão de goethita, que por se tratar de um mineral hidratado, indica que a região de Antônio Pereira passou por processos de hidratação específicos, que não foram observados em Rodrigo Silva. Também foram identificadas micro inclusões sólidas de magnetita, goethita e hematita, defeitos estruturais e a obtenção de uma “impressão digital” das amostras de topázio imperial

Palavras chave: gemologia, espectroscopia, mineralogia, topázio

ABSTRACT

The present study aimed to carry out gemological analyses to identify possible differences between imperial topaz crystals from opposite flanks of the Mariana anticline. Samples from Rodrigo Silva, located on the normal flank, and from Antônio Pereira on the overturned flank were analyzed; both locations are districts of the municipality of Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil. For this purpose, analyses of UV light reaction, anisotropy, pleochroism, and Raman spectroscopy were performed. In the Raman spectroscopy analyses, spectra were obtained with peaks at 324 and 418 cm^{-1} , corresponding to solid microinclusions of hematite and magnetite, respectively. However, one sample from Antônio Pereira (AP A 1) showed a completely different spectrum, with a peak at 388 cm^{-1} , indicating the presence of a goethite inclusion. Since goethite is a hydrated mineral, this suggests that the Antônio Pereira region underwent specific hydration processes that were not observed in Rodrigo Silva. Solid microinclusions of magnetite, goethite, and hematite were also identified, as well as structural defects and the acquisition of a “fingerprint” of the imperial topaz samples.

Keywords: gemology, spectroscopy, mineralogy, topaz.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	
1.1 Apresentação.....	9
1.2 Justificativa.....	9
2. OBJETIVOS.....	12
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	
3.1. O estudo do topázio imperial.....	13
3.2. Fundamentos da Espectroscopia Raman e a aplicação na Gemologia.....	16
3.3. Contexto Regional.....	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS	
4.1. Metodologia.....	23
4.1.1. Revisão bibliográfica.....	23
4.1.2. Seleção das amostras.....	23
4.1.3. Descrição das cores e morfologia dos cristais	23
4.1.4. Análise com equipamentos básicos de gemologia.....	25
4.1.5. Espectrometria Raman.....	26
5. RESULTADOS	
5.1. Cor, fluorescência e Pleocroísmo.....	27
5.2. Espectroscopia Raman.....	31
5.2.1. Análise das Amostras de Rodrigo Silva (RS).....	34
5.2.2 Análise das Amostras de Antônio Pereira (AP).....	35
6. DISCUSSÃO.....	40
6.1. Padrão dominante: Assinaturas de Óxidos de Ferro.....	41
6.2. A Singularidade da Amostra AP A 1: Identificação da Goethita.....	42
6.3. Interpretação das Diferenças e Deslocamentos (Shifts).....	42
6.4. Correlações com a Geologia.....	43
7. CONCLUSÕES.....	45

8. REFERÊNCIAS.....	47
---------------------	----

9. ANEXOS.....	51
----------------	----

1. INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O Topázio é um mineral do grupo dos nesossilicatos, cuja composição química geral é $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F,OH})_2$. Entre suas principais características o topázio apresenta brilho vítreo, pertence ao sistema cristalino ortorrômbico e geralmente apresenta hábito prismático. Entre as variedades de topázio, o topázio Imperial se destaca devido à sua atípica coloração e ocorrência restrita. Atualmente ocorre na Sibéria, Zâmbia, Brumado na Bahia e na região de Ouro Preto, em Minas Gerais. (Gandini, 2023)

Na região de Ouro Preto as primeiras jazidas de Topázio Imperial foram descobertas por volta de 1772 na região de Saramenha, atualmente um bairro de Ouro Preto (Gandini, 1994), posteriormente foram descobertas jazidas em outras regiões, nos distritos de Dom Bosco, Cachoeira do Campo, Rodrigo Silva e Antônio Pereira. Na região de Ouro Preto os cristais possuem hábito prismático e apresentam uma ampla variedade de cor variando de amarelo claro ao roxo, passando por tonalidades alaranjadas e avermelhadas. (Gandini, 2023)

É fato que o ambiente geológico de formação é fator determinante na definição de composição química e arranjo atômico dos minerais; portanto, a caracterização gemológica do Topázio imperial, a qual busca investigar as variações químicas que dão origem às cores e o modo de crescimento do cristal, se faz necessária para o melhor entendimento do contexto geológico da região e compreender o porquê ocorre uma grande variabilidade de cores em áreas muito próximas.

Até o presente momento, não existem estudos que relacionem as diferentes cores de topázio imperial aos focos de ocorrência de uma mesma região onde os cristais foram extraídos. Acrescenta-se a isso, a incerteza do local exato da extração da maior parte das amostras que atualmente se encontram em acervos públicos ou particulares e disponíveis para compra. Sendo assim, este trabalho propõe o estudo de cristais de topázio imperial da mina de Rodrigo Silva e do garimpo de Antônio Pereira para buscar elucidar as questões acima. Objetiva-se analisar cristais de origem conhecida, observar, registrar, tabelar, comparar suas propriedades com as amostras de outras regiões e com dados da literatura disponíveis. Deste modo, será

possível o teste da hipótese inicial: Diferentes ocorrências de topázio imperial na mesma região podem exibir diferenças químicas e estruturais, permitindo, assim, diferenciar sua origem?

1.2. Justificativa

Conforme dito anteriormente, o topázio imperial conta com pouquíssimas ocorrências no mundo, atualmente a região de Ouro Preto é uma das poucas localidades do mundo cujas jazidas não estão exauridas.

O topázio imperial de Ouro Preto se destaca por sua qualidade e relativa abundância, já que são encontrados em diferentes regiões do município e cuja extração consegue atender com facilidade as demandas do mercado mundial de gemas e minerais. Além disso, aqui é encontrada uma grande diversidade de cores que não existe em outras partes do mundo. Apesar da extração do topázio imperial acontecer há séculos, os processos que atuaram na sua formação ainda não são bem compreendidos. Ele é frequentemente encontrado em veios ou bolsões juntamente com um material argiloso branco, e todas as ocorrências seguem um lineamento leste-oeste em comum. No entanto, a química mineral responsável por suas cores ainda necessita de mais investigações. Percebe-se que diferentes cores e qualidades ocorrem em determinadas zonas dentro de uma mesma ocorrência, mas ainda não existe uma relação entre o padrão de cores e a sua geologia.

No entanto as mineralizações de topázio imperial selecionadas para o estudo ocorrem em flancos opostos da anticlinal de Mariana, sendo a mineralização de Antônio Pereira no flanco nordeste, com estratigrafia invertida, e a mineralização de Rodrigo Silva ocorre no flanco oposto com estratigrafia normal. Vários autores propuseram que as mineralizações de topázio imperial na região de Ouro Preto se deram por meio de um fluido hidrotermal, que se depositou na Formação Gandarela. Portanto, por se tratar de uma anticlinal com inversão estratigráfica o fluido hidrotermal passou por camadas opostas antes de se depositar, o que pode ter causado pequenas variações nos padrões de crescimento e composição, levando à diferentes características nos cristais de topázio imperial

Sendo assim, este trabalho propõe a caracterização do topázio imperial de diferentes regiões de Ouro Preto, por meio de análises gemológicas não destrutivas, buscando aprofundar o conhecimento sobre a distribuição dessa variedade na região, entender a relação entre a composição química e as características morfológicas dos cristais e contribuir na elucidação dos processos geológicos atuantes nas diferentes ocorrências.

O presente trabalho propõe o uso da espectroscopia Raman para observar e caracterizar possíveis diferenças entre os cristais de topázio das duas regiões. A técnica permite a identificação de defeitos estruturais, inclusões e a determinação da composição química. Por se tratar de uma técnica não destrutiva, a espectroscopia raman, vêm sendo muito empregada na gemologia, no entanto, até o presente momento não se tem estudos que diferenciam os cristais de topázio imperial do flanco normal e do flanco invertido da anticlinal de Mariana usando a técnica.

Os resultados deste estudo trarão importantes contribuições científicas para a geologia da região e também contribuirá com os aspectos históricos e culturais da cidade de Ouro Preto.

2. OBJETIVOS

O principal objetivo deste projeto é caracterizar os cristais de topázio imperial de diferentes regiões no distrito de Ouro Preto com técnicas gemológicas não destrutivas e, após a obtenção dos dados, perceber se há relações entre as suas cores e os dados gerados entre as diferentes regiões, e compará-los com os da literatura. Como mencionado acima, estudos ainda não indicam tais correlações, a incipiência de um banco de dados robusto, a escassez de amostras e a incerteza das origens geográficas dos cristais dificultam esse tipo de investigação. Porém, as pesquisas com esse enfoque são raríssimas, não estando bem estabelecidas tais correlações. Desta maneira, os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. Classificar as cores, formatos e texturas dos cristais de topázio imperial;
- b. Realizar análises qualitativas;
- c. Realizar a análise de espectroscopia Raman
- d. Realizar comparações dos dados gerados através de organogramas (ou outros métodos visuais adequados) e compará-los com os da literatura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. O estudo do Topázio Imperial

O topázio é um mineral da subclasse dos nesossilicatos, é composto por tetraedros de silício e oxigênio unidos por ligações iônicas em uma configuração ortorrômbica, com composição química dada pela fórmula $\text{Al}_2(\text{SiO}_4)(\text{F},\text{OH})_2$. O topázio exibe brilho vítreo e apresenta preferencialmente hábito prismático. Entre as variedades de topázio, o Imperial se destaca devido a coloração atípica e ocorrência restrita. (Gandini, 2023)

O topázio imperial é uma gema de ocorrência rara cuja coloração varia do amarelo claro - laranja - , rosa ao roxo, podendo por vezes assumir leves tons esverdeados. No Brasil, o topázio imperial ocorre apenas na região de Ouro Preto, a qual está inserida no Quadrilátero Ferrífero, uma das províncias minerais de maior destaque no país. A descoberta desta variedade na região de Ouro Preto data do ano de 1768. (Sauer, et. al. 1996)

A primeira ocorrência de Topázio Imperial foi descoberta na Sibéria, portanto as jazidas já se encontram exauridas (Gandini, 1994), os topázios da região são encontrados em bolsões pegmatíticos, e possuem em sua maioria coloração amarelada. (Wise, 1995)

Foram realizados vários estudos a respeito do topázio imperial, um dos pioneiros se trata de Keller, 1983, no qual o autor disserta sobre as diferentes ocorrências de topázio na região de Ouro Preto, com foco na mina do Capão do Lana, próximo ao distrito de Rodrigo Silva. Em seu trabalho o autor aborda aspectos como localização e o histórico da mineração de topázio imperial na região, com destaque para a descoberta da ocorrência em 1768 e a visita do barão Eschwege aos garimpos por volta de 1811. No entanto, no início do século vinte acreditava-se que os depósitos estavam exauridos, mas as minas de Boa Vista e Saramenha voltaram a operar em 1908. Keller também dá destaque para as possíveis causas da mineralização, entre elas: fluido hidrotermal e pegmatito. O autor também aborda a metodologia utilizada para extração dos cristais de topázio imperial, que se iniciava com a remoção do solo com o uso de tratores, seguida de lavagem para remoção do material indesejado e posteriormente a separação manual dos cristais

de topázio, o modo de operação da mina era considerado extremamente moderno para a época.

No ano de 1985, Schumann, elaborou o livro *Gemas do Mundo*, no qual disserta sobre uma série de gemas encontradas pelo mundo, abordando aspectos como: localização das principais jazidas, forma de ocorrência, tipos de lapidação e propriedades diagnósticas dos minerais. A respeito dos topázios, Schumann, abordou as formas mais comuns de lapidação, cuidados que se deve ter durante o processo de lapidação, sobre a possibilidade de se confundir o topázio com minerais como apatita, berilo, crisoberilo e turmalina. O autor também aborda os principais países produtores de topázio, com destaque para Brasil, Sri-Lanka e Birmânia, e também sobre a influência do tratamento térmico na coloração dos cristais de topázio. No entanto, Schumann não deixou nenhuma declaração específica à respeito do topázio imperial em seu trabalho.

Em Gandini, 1994, o autor disserta sobre a mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos dos topázios de Ouro Preto. realizou análises mineralógicas: como difração de raios x, microscopia eletrônica de varredura, catodoluminescência e outras, obtendo como resultado dados de composição química, índice de refração e ângulo 2V. Em relação às inclusões fluidas, Gandini sugere que existem inclusões primárias, que normalmente estão dispostas de forma aleatória ou sobre arestas de crescimento do mineral, e secundárias, formadas após a cristalização do mineral como no caso das fraturas. Quanto à composição química das inclusões fluidas foram encontradas inclusões compostas por água, CO₂ líquido e NaCl. Em relação aos aspectos genéticos, Gandini sugere que os depósitos de topázio imperial foram formados em temperaturas entre 240 e 320 °C e pressões entre 1750 e 3200 kbar.

Em 1995 Michael Wise elaborou uma revisão a respeito da mineralogia dos topázios, abordando aspectos como: localidades de ocorrência, características físicas e químicas, cristalografia e propriedades ópticas. O autor inicia a revisão abordando a origem do nome topázio, que é derivado do grego *topazos*, nome de uma ilha localizada do Mar Vermelho, sendo inicialmente utilizado para descrever vários minerais de coloração verde. Quanto às características do topázio, o autor estabelece que o mineral pertence ao sistema cristalino ortorrômbico, faz parte do grupo dos silicatos e mais especificamente do grupo nesossilicatos e propôs que a

coloração pode variar em função da presença de outros elementos químicos como magnésio, alumínio ou cromo. Wise também aborda as formas de ocorrência em todo o mundo, sendo elas: granitos, pegmatitos, aplitos, ongonitos, topazitos, riolitos e veios. A respeito dos topázios da região de Ouro Preto, o autor propôs que o mineral se desenvolveu devido à uma solução hidrotermal que ascendeu por planos de falha, além de que a coloração alaranjada ou rosada ocorre devido à uma substituição parcial do alumínio por ferro e cromo.

Já no ano de 1996 Sauer e colaboradores realizaram um estudo a respeito da mina do Capão do Lana, localizada no distrito de Rodrigo Silva. Para tal, os autores abordaram características gerais do topázio imperial, além da geologia da região de Ouro Preto. Os autores propõem que as mineralizações de topázio seguem um lineamento leste oeste, do distrito de Antônio Pereira à ocorrência em Lagoa do Neto, no distrito de Miguel Burnier, discorrem sobre a forma de ocorrência do topázio na região, que é em rochas altamente intemperizadas, e debatem a respeito das possíveis causas da mineralização na região, propondo que o hidrotermalismo ocorreu logo após metamorfismo intenso. Sauer e colaboradores também abordaram a forma de operação da mina do Capão do Lana, sendo duas frentes de extração, com o uso de dragas para a remoção dos cristais das partes mais profundas da mina, após a remoção, o material é destinado para a lavagem e posteriormente passa por uma esteira, onde quando era visto o caolim de coloração esbranquiçada, que ocorre junto os cristais de topázio, a esteira parava e os cristais eram retirados manualmente.

No ano de 2005 o Manual Técnico de Gemas estabeleceu parâmetros como: birrefringência, caráter óptico, fluorescência, brilho, transparência, caráter óptico, pleocroísmo, clivagem, fratura e índices de refração do topázio.

Já em 2018 Teodoro Gauzzi elaborou um estudo cristaloquímico a respeito do topázio imperial da região de Ouro Preto. O autor abordou aspectos como características do mineral, além das diversas formas de ocorrência do mineral, ou seja: granitos, riolitos, pegmatitos e greisens, além de aspectos geológicos da região de Ouro Preto. Gauzzi utilizou a catodoluminescência para determinar características das amostras de topázio, para tal foi utilizado um equipamento do tipo JEOL JSM-6510, com detector de catodoluminescência com comprimento de

onda entre 200-800 nanômetros, obtendo como resultado imagens pancromáticas que indicam direção de crescimento e planos de clivagem. O autor também utilizou espectrometria Raman, na qual obteve picos de 243, 272, 291 e 916 cm^{-1} , os picos tinham como assinatura uma deformação simétrica nos anéis de Si-O. Além disso o autor propôs que as mineralizações são de origem hidrotermal, relacionado à orogenia Brasileira, e realizou uma comparação entre as pegadas do topázio imperial de Ouro Preto e topázios de outras regiões, estabelecendo que os topázios de Ouro Preto apresentam maiores concentrações de Ti, V, Cr, Fe, Cu e Zn.

3.2. Fundamentos da Espectroscopia Raman o uso na Gemologia

A espectroscopia é, em essência, o estudo da capacidade que átomos e moléculas possuem de **emitir ou absorver energia** em regiões específicas do espectro eletromagnético (Andrade, 2019). No campo da mineralogia e gemologia, a técnica Raman destaca-se por permitir a obtenção de informações detalhadas sobre a **composição química e a estrutura cristalina** dos materiais de forma rápida e precisa.

O Princípio Físico: O "Efeito Raman"

Diferente de outras técnicas, a espectrometria Raman baseia-se no espalhamento inelástico da luz monocromática (geralmente um laser) ao interagir com a amostra (Queiroz, 2024). Quando o laser incide sobre a gema, a radiação espalhada sofre uma alteração de frequência decorrente da interação com as vibrações das ligações químicas e os **fônons da rede cristalina**, conforme ilustrado pela figura 1 (vibrações da estrutura atômica).

Esse fenômeno gera um espectro único, composto por bandas (picos) que funcionam como uma **"impressão digital" molecular** do mineral analisado. É através dessa assinatura que conseguimos diferenciar minerais visualmente idênticos, mas com estruturas distintas.

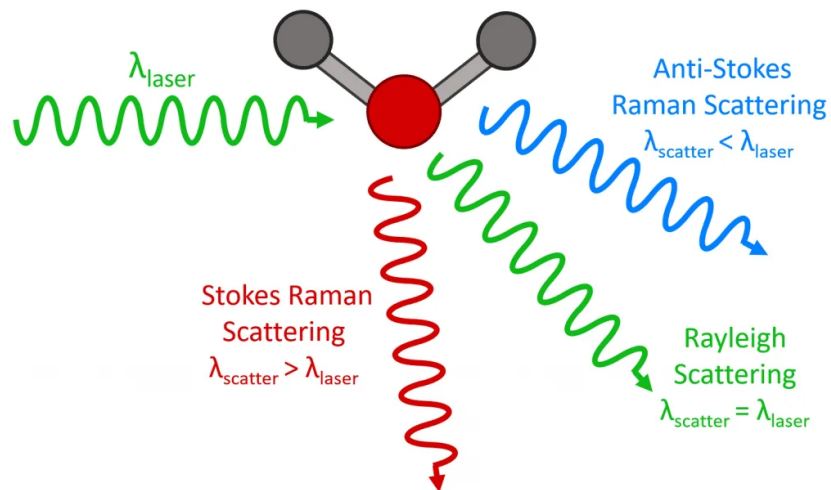


Figura 1: ilustração do efeito raman, o laser ao atingir a molécula pode reagir de três formas diferentes (da esquerda para a direita): espalhamento raman stokes, espalhamento rayleigh ou Espalhamento Raman Anti-Stokes (Edinburgh Instruments, 2015)

Vantagens e Aplicações na Gemologia

A adoção da espectroscopia Raman em laboratórios gemológicos cresceu exponencialmente nas últimas décadas devido às suas características singulares (Bersani & Lottici, 2010):

- **Não Destrutividade:** É uma técnica não invasiva e sem contato, o que a torna ideal para a análise de gemas lapidadas e valiosas, onde qualquer perda de material é inaceitável.
- **Ausência de Preparo:** Ao contrário de outros métodos químicos, o Raman requer um preparo mínimo ou nulo da amostra, permitindo analisar gemas brutas ou lapidadas desde que haja uma face para a incidência do laser.
- **Identificação de Inclusões e Origem:** O uso do micro-Raman (Raman acoplado a um microscópio) permite focar em micro-inclusões sólidas ou fluidas abaixo da superfície do cristal hospedeiro. Essas inclusões funcionam como um "ID" da gema, auxiliando na investigação da sua procedência geográfica e gênese geológica.

- Detecção de Tratamentos: A técnica é eficaz na identificação de preenchimentos de fraturas (como óleos ou resinas em esmeraldas) e outros tratamentos de melhoria de cor ou pureza.

Portabilidade e Inovação: Mapeamento Raman

Atualmente, o desenvolvimento de espectrômetros portáteis revolucionou o acesso às coleções, permitindo a análise de peças montadas em joias, amostras em exposições ou grandes coleções de museus sem a necessidade de remover o objeto de seu ambiente seguro.

Além da análise pontual tradicional, a técnica de mapeamento Raman permite coletar milhares de espectros de forma automatizada sobre uma área da gema (Magaña et al. 2021). Esse mapeamento cria imagens que revelam a distribuição espacial de defeitos, zoneamentos químicos e variações estruturais que passariam despercebidos em uma análise pontual simples, permitindo até a distinção entre espécies minerais diferentes em uma mesma rocha composta.

As bandas espectrais e os deslocamentos Raman continuam sendo objeto de pesquisa avançada, podendo ser integrados a métodos de aprendizado de máquina para classificações mineralógicas cada vez mais específicas e confiáveis.

3.3. Contexto Regional

3.3.1. Contexto Geotectônico

O município de Ouro Preto se encontra inserido na porção sudeste do Quadrilátero Ferrífero, uma província mineral localizada no estado de Minas Gerais que abrange vinte e cinco municípios e é uma das maiores produtoras de minério de ferro no Brasil. O Quadrilátero Ferrífero é composto pelas seguintes unidades litodêmicas/litoestratigráficas, da base para o topo: embasamento cristalino, Supergrupo Rio das Velhas e Supergrupo Minas (Alkmim & Marshak, 1998). Devido ao sistema de Nappes que ocorre na região de Ouro Preto em algumas regiões é possível encontrar a sequência estratigráfica de forma invertida.

O Quadrilátero Ferrífero apresenta uma estruturação altamente complexa, desde Dorr (1969) vários autores têm se dedicado ao estudo estrutural da região. O arcabouço estrutural do Quadrilátero Ferrífero é marcado por dobras de gerações e estilos diferentes associadas a vários eventos tectônicos. (Endo, et. al. 2020)

Dorr (1969) propôs a existência de três eventos. O primeiro evento se trata de um dobramento no Supergrupo Rio das Velhas, prévio à deposição do Supergrupo Minas, o dobramento foi mais intenso na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero. O segundo evento consistiu em uma deformação após a formação do Supergrupo Minas, o fluxo de detritos foi em direção oeste e sudoeste. O terceiro evento se trata da orogenia pós Itacolomi, no qual atuaram forças compressivas.

3.3.2. Contexto Geológico

O embasamento cristalino se trata de um complexo de rochas metamórficas composto por gnaisses e migmatitos de aproximadamente 3,2 giga anos. O Supergrupo Rio das Velhas é composto pelos grupos Nova Lima e Maquiné, respectivamente uma intercalação de rochas sedimentares e vulcânicas, e rochas sedimentares. O Supergrupo Minas é composto pelos grupos Tamanduá, Caraça, Itabira e Piracicaba, respectivamente formados por psamitos e conglomerados, quartzitos e filitos, itabiritos e mármore, quartzitos filitos e xistos (Figura 2).

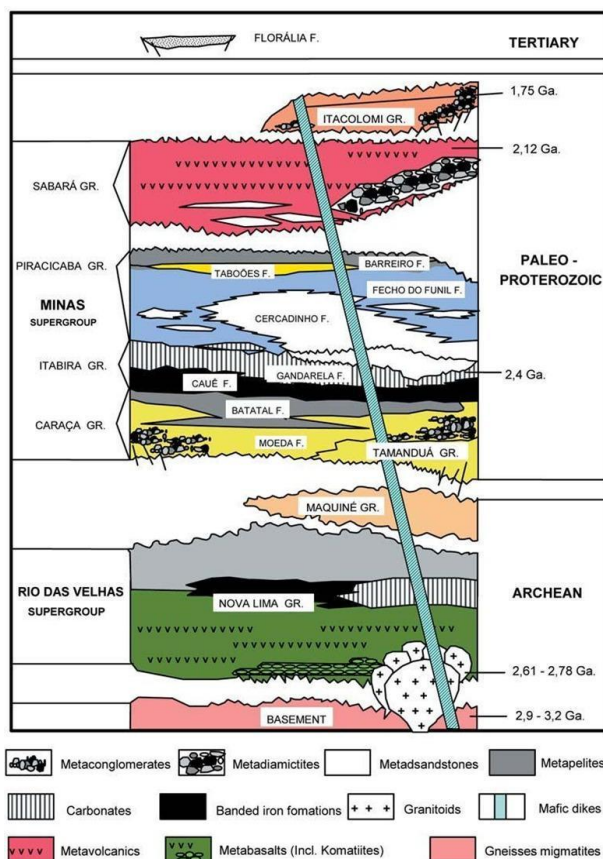


Figura 2: Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. (Modificado de Alkmim & Marshak, 1998)

O Supergrupo Rio das Velhas é formado pelos grupos Nova Lima e Maquiné (Dorr, 1996). O grupo Nova Lima é composto por uma intercalação de rochas sedimentares e vulcânicas, as quais foram submetidas a um intenso processo de hidrotermalismo e deformação cisalhante que resultou na transformação das rochas em filitos e xistos. (Endo, et. al. 2020)

O grupo Maquiné é composto pelas formações Palmital e Casa Forte, respectivamente. A formação Palmital é composta por quartzito sericítico e filito quartzoso com presença de lentes filíticas e ardósianas. Já a formação Casa Forte é composta por quartzito, conglomerado e xisto clorítico. (Dorr, 1969)

O Supergrupo Minas é formado pelos grupos: Tamanduá, Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará. O grupo Tamanduá é a porção basal do Supergrupo Minas,

dividido em duas formações, Cambotas e Morro Grande, é composto por quartzitos, quartzitos ferruginosos, xistos quartzosos e xistos argilosos.

O grupo Caraça é composto pelas formações Moeda e Batatal. A formação Moeda é composta por quartzitos, quartzitos sericíticos, filitos e metaconglomerados, apresentando em média 500 metros de espessura, enquanto a formação Batatal possui em média 700 metros de espessura e é composta por: filitos, formações ferríferas bandadas, metacherts, filitos grafitosos e mármore dolomíticos. (Endo, et. al. 2020)

O grupo Itabira é dividido em formação Cauê e formação Gandarela. A formação Cauê é constituída por itabirito de alto grau metamórfico com pequenas lentes de filito e mármore, o itabirito é composto por quartzo e hematita, com pequenas porções de magnetita em algumas partes. (Dorr, 1969)

A formação Gandarela apresenta composição carbonática, sendo formada por mármore dolomítico, itabirito dolomítico e filito dolomítico (Dorr, 1969).

O grupo Piracicaba é dividido nas formações: Cercadinho, Fecho do Funil, Taboões e Barreiro. A formação Cercadinho é composta por quartzitos ferruginosos, filitos prateados, dolomitos, xistos sericíticos e metaconglomerados. Já a formação Fecho do Funil é constituída por filitos, filitos dolomíticos, metassiltitos e dolomitos. A formação Taboões é composta por ortoquartzitos, e a formação Barreiro é composta por filitos grafitosos, filitos e xistos. (Endo, et. al. 2020)

O grupo Sabará é composto por rochas metavulcânicas, sendo mica clorita xistos, metagrauvacas e subgrauvacas. Já o grupo Itacolomi é constituído majoritariamente por quartzitos. (Dorr, 1969)

3.3.3. A Anticlinal de Mariana

A Anticlinal de Mariana se trata de uma estrutura geológica de escala regional, com orientação NW-SE, se tratando de uma dobra aberta normal com um leve caímento para SE. A anticlinal é dividida em flanco Nordeste e flanco Sul. (Endo et. al. 1992)

No entanto, devido à sua complexidade estrutural, o flanco nordeste da anticlinal de Mariana apresenta estratigrafia invertida. (Endo, et. al. 2020)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Metodologia

A metodologia empregada foi composta por análises não destrutivas, portanto, o trabalho contou com as seguintes etapas:

4.1.1. Revisão bibliográfica:

Pesquisa detalhada e leitura da bibliografia disponível sobre o cores, morfologia, características gemológicas e ocorrência de topázio imperial na região de Ouro Preto, foram utilizados artigos científicos, livros, teses e dissertações.

4.1.2. Seleção das amostras

Foram selecionadas amostras de topázio imperial de duas regiões distintas de Ouro Preto: Antônio Pereira e Rodrigo Silva; priorizando amostras de colorações diferentes entre si e a presença de pelo menos uma superfície lisa, já que as amostras não passariam pelo processo de polimento. Foram selecionadas 29 amostras da primeira localidade e 10 amostras da segunda.

4.1.3. Descrição das cores e morfologia dos cristais:

As amostras coletadas foram separadas quanto à origem. Foram criadas categorias utilizando critérios de cor, dentro dessas seções, houve a separação quanto aos aspectos morfológicos.

Para realizar as análises básicas de gemologia os topázios foram separados quanto à origem: foram selecionadas 29 amostras de Rodrigo Silva (RS) e 10 de Antônio Pereira (AP), as amostras foram novamente separadas em relação à cor dentro do grupo de origem, sendo os grupos RS A, RS B e RS C amostras de

Rodrigo Silva (figura 3) e os grupos AP A, AP B, AP C e AP D de Antonio Pereira (figura 4).

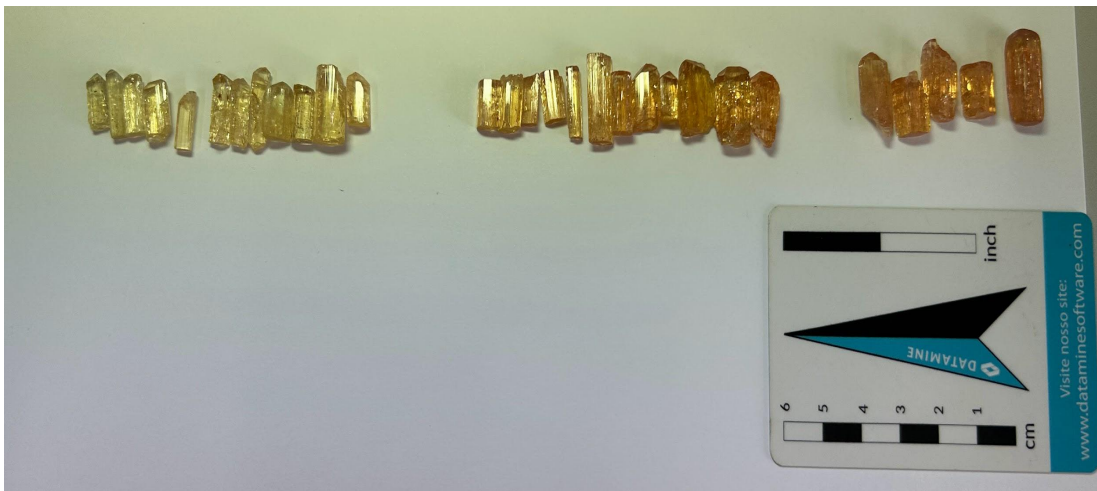


Figura 3: amostras de topázio imperial de Rodrigo Silva



Figura 4: amostras de topázio imperial de Antônio Pereira

As 29 amostras de Rodrigo Silva foram separadas da seguinte forma: 12 amostras do grupo RS A, de coloração amarela clara e esverdeada, 12 do grupo RS B, de coloração amarela forte e 5 amostras do grupo RS C de cor laranja forte. Já as 10 amostras de Antônio Pereira foram separadas da seguinte forma: 1 amostra do grupo AP A, de coloração amarela clara; 3 amostras do grupo AP B, com coloração alaranjada e de ponta terminada verde clara; 3 amostras do grupo AP C de cor laranja média e 3 amostras do grupo AP D de cores variadas, sendo AP D 1 e AP D 2 de cor laranja intensa e AP D 3 de cor roxa.

4.1.4. Análise com equipamentos básicos de gemologia:

O uso dos equipamentos básicos de gemologia permitiu a obtenção de uma série de informações a respeito de algumas propriedades ópticas, como, por exemplo,

a) lupa de mão Zeiss 10x: observação de inclusões

A lupa de mão permite uma pequena ampliação da imagem do mineral em amostras de mão, facilitando a visualização de características internas do mineral, como, por exemplo, zonamento de cores e formas das inclusões.

b) refratômetro de marca não identificada: determinação do índice de refração

O refratômetro trata de um equipamento que mede o índice de refração do mineral, ou seja, a luz ao penetrar na amostra muda de velocidade, e esse índice pode ser medido. O índice de refração pode variar na mesma espécie mineral devido principalmente às mudanças químicas.

c) Luz ultravioleta em cabine escura, do laboratório de mineralogia: reação dos cristais ao ultravioleta longo e curto.

d) Dicroscópio: utilizado para observar o pleocroísmo

Essa propriedade é uma característica exibida por quase todos os minerais, exceto aqueles do sistema cúbico. Trata-se de uma mudança de cor que pode ser observada ao observar diferentes faces do mineral. O pleocroísmo ocorre em função da absorção diferencial da luz em diferentes direções do cristal (minerais

birrefringentes), e o topázio apresenta essa propriedade por pertencer ao sistema cristalino ortorrômbico.

4.1.5. Espectrometria Raman

A seleção de amostras para a espectrometria foi realizada da seguinte forma: foram escolhidas uma amostra de cada grupo, levando em consideração a reação à luz UV. As amostras escolhidas foram: RS A 8, RS B 9, RS C 4, AP A 1, AP B 2, AP C 2 e AP D 3.

O equipamento de espectroscopia raman utilizado pertence ao departamento de Física da UFOP, é um equipamento da marca HORIBA (figura 5) . A objetiva utilizada nas análises foi uma lente com aumento de 50x. A acumulação variou entre 10 e 15 segundos. A maioria dos cristais foram analisados em regiões visualmente sem inclusões na parte central da amostras, e em alguns casos também nas pontas para verificar possíveis diferenças de comportamento.



Figura 5: espectrômetro Raman da marca Horiba (imagem do site da fabricante)

5. RESULTADOS

5.1. Cor, fluorescência e Pleocroísmo

Para cada localidade, as amostras foram separadas usando o critério “cor”, iniciando pelo matiz amarelo claro, evoluindo para tonalidades do amarelo mais intensas, amarelo alaranjado e, por último, amarelo avermelhado. Isso resultou em 3 grupos de Rodrigo Silva e 4 grupos de Antônio Pereira, conforme pode ser visto nas figuras abaixo.

Amostras de Rodrigo Silva (RS) separadas em grupos baseadas em diferenças de cor e tonalidade

Grupo A	Grupo B	Grupo C
RS A 01	RS B 01	RS C 01
RS A 02	RS B 02	RS C 02
RS A 03	RS B 03	RS C 03
RS A 04	RS B 04	RS C 04
RS A 05	RS B 05	RS C 05
RS A 06	RS B 06	
RS A 07	RS B 07	
RS A 08	RS B 08	
RS A 09	RS B 09	
RS A 10	RS B 10	
RS A 11	RS B 11	
RS A 12	RS B 12	

Amostras de Antônio Pereira (AP) separadas em grupos baseadas em diferenças de cor e tonalidade

Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
AP A 01	AP B 01	AP C 01	AP D 01
	AP B 02	AP C 02	AP D 02
	AP B 03	AP C 03	AP D 03

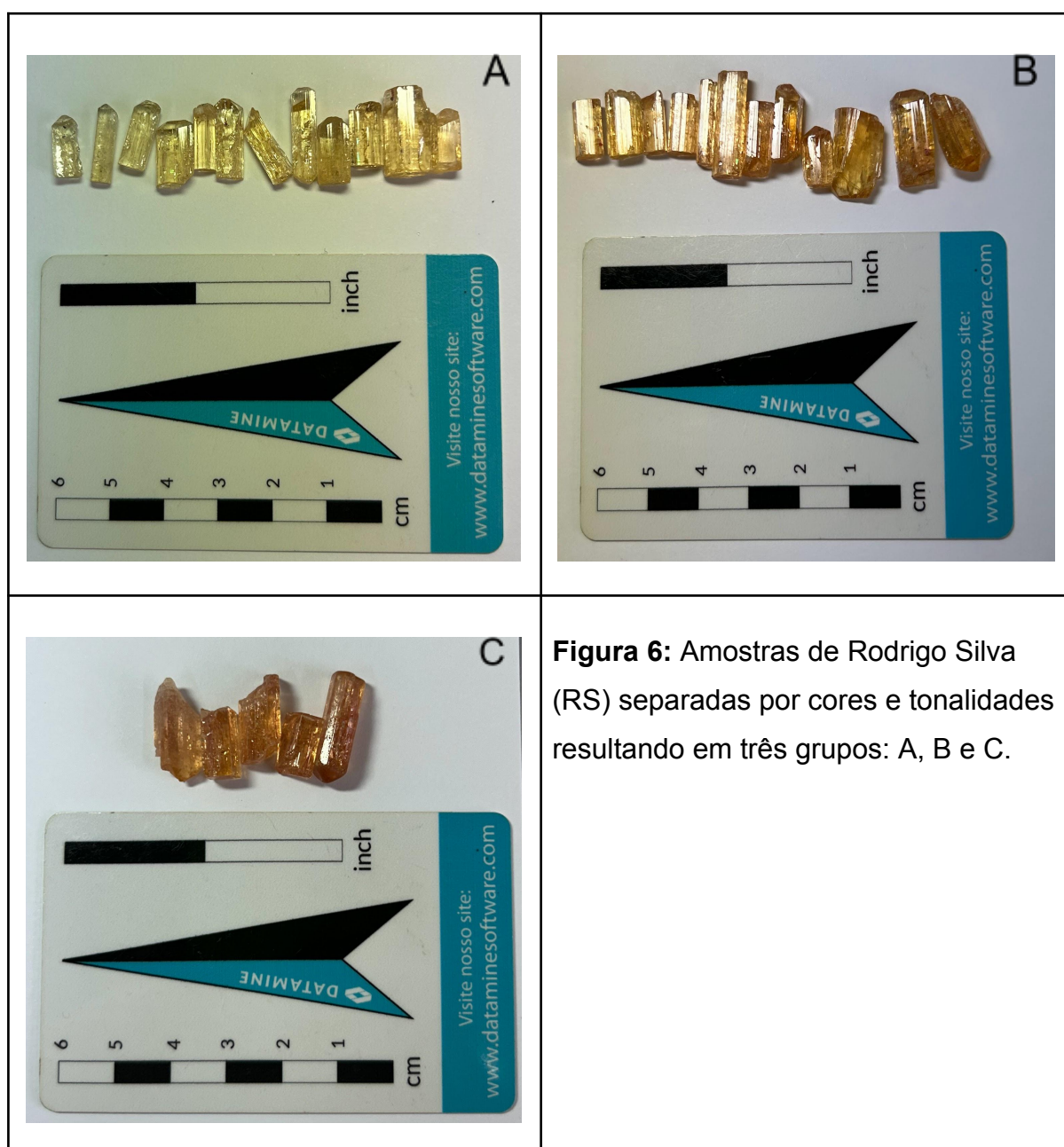


Figura 6: Amostras de Rodrigo Silva (RS) separadas por cores e tonalidades resultando em três grupos: A, B e C.

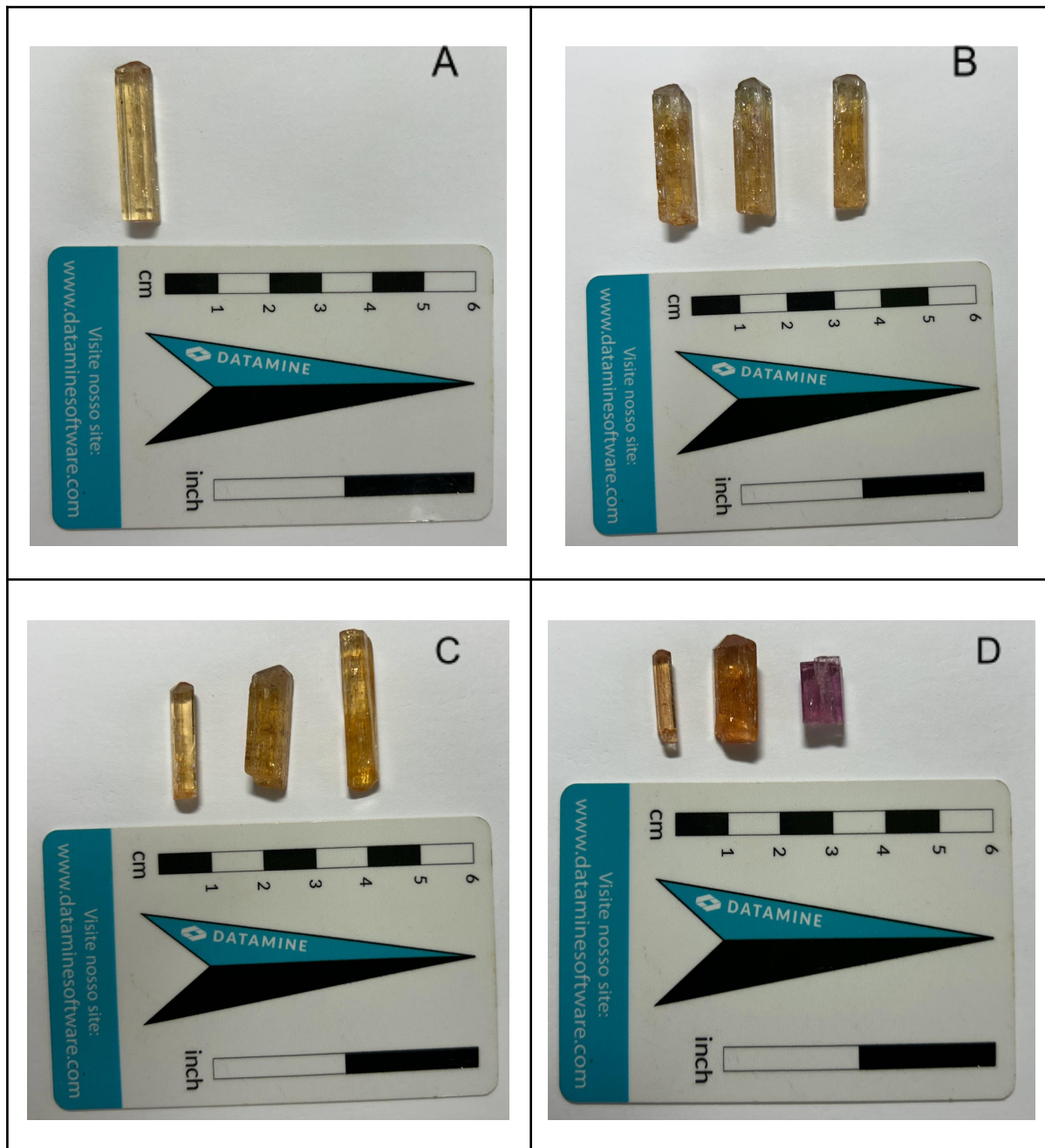


Figura 7: Amostras de Antônio Pereira (AP) separadas por cores e tonalidades resultando em quatro grupos: A, B, C e D.

Os cristais de Rodrigo Silva variaram em cores amarelo e alaranjado, com tonalidades variando entre clara e intensa. As dimensões variaram de 0,3 a 2,5 cm, com pesos entre 0,55 a 2,53 gramas. Inclusões visíveis foram observadas em 13 das amostras e 16 eram cristais limpos, ou seja, sem inclusões visíveis.

Em relação às amostras de Antônio Pereira, os cristais variaram em cores amarelo, alaranjado, verde e roxo, com tonalidades variando entre clara à muito saturada e intensa. As dimensões variaram entre 0,3 a 3 cm, com pesos entre 0,51 a 3,22 gramas. Das 10 amostras analisadas, 8 apresentaram inclusões visíveis a olho nu e 2 eram cristais limpos. Os cristais tiveram suas características tabeladas, as tabelas obtidas podem ser observadas em anexo (tabela 1 e 2).

As amostras das duas localidades foram submetidas a uma análise em polariscópio para observar se eram isotrópicas ou anisotrópicas. Todas as amostras, das duas localidades, são anisotrópicas, foi um resultado esperado, pois o topázio pertence ao sistema cristalino ortorrômbico. Os resultados podem ser vistos com maior detalhe nas tabelas 3 e 4 em anexo.

O pleocroísmo foi observado por meio do dicroscópio. No grupo RS A, 7 das 12 amostras apresentaram um pleocroísmo muito sutil, que não pode ser observado no dicroscópio, no entanto, todas as outras 5 amostras de Rodrigo Silva tiveram pleocroísmo mais intenso. Quanto às amostras de Antônio Pereira, todas apresentaram pleocroísmo mais intenso e podem ser registradas. Os resultados podem ser observados com maior detalhe nas tabelas 5 e 6 em anexo.

Os cristais de topázio imperial passaram por uma análise de reação à luz UV de comprimento curto e longo. As reações foram classificadas em leves, moderadas e intensas e também tiveram a cor de reação observada e tabelada. As amostras de Rodrigo Silva apresentaram predominantemente reação leve à luz UV curta, com coloração variando entre amarelo e verde. Quanto à luz UV longa, todos os cristais apresentaram reação intensa, com cor de reação variando entre amarelo, verde e laranja. (figura 8)

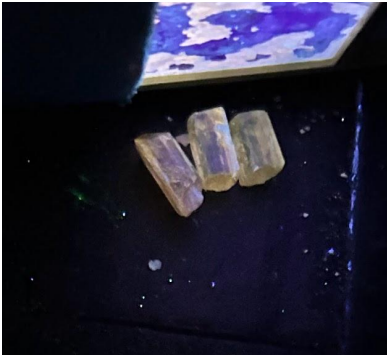
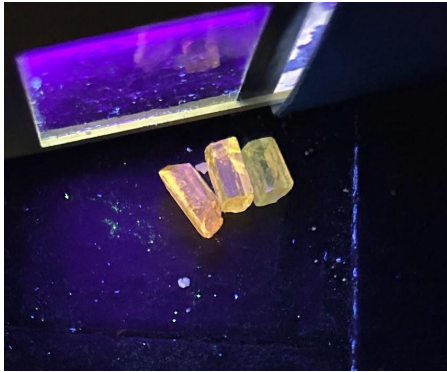
 reação das amostras RS A 4, 5 e 6 ao UV curto	 reação das amostras RS A 4, 5 e 6 ao UV longo
 reação das amostras RS B 1, 2 e 3 ao UV curto	 reação das amostras RS B 1, 2 e 3 ao UV longo

Figura 8: reação das amostras de topázio à luz UV

Já os cristais de Antônio Pereira apresentaram predominantemente reação leve ao UV curto, com coloração variando entre verde, amarelo e laranja. Quanto ao UV longo a maior parte dos cristais apresentou reação intensa, com cores variando entre amarelo e laranja. Um cristal que foi exceção foi a amostra AP D 3, que não apresentou reação alguma quando excitada pela radiação UV.

5.2. Espectroscopia Raman

A caracterização mineralógica foi realizada via espectroscopia Raman, ela funciona como uma "impressão digital" molecular dos materiais. Quando incidimos um laser sobre o mineral, a luz interage com as vibrações das ligações químicas, e a radiação espalhada nos revela a estrutura cristalina e a composição da amostra.

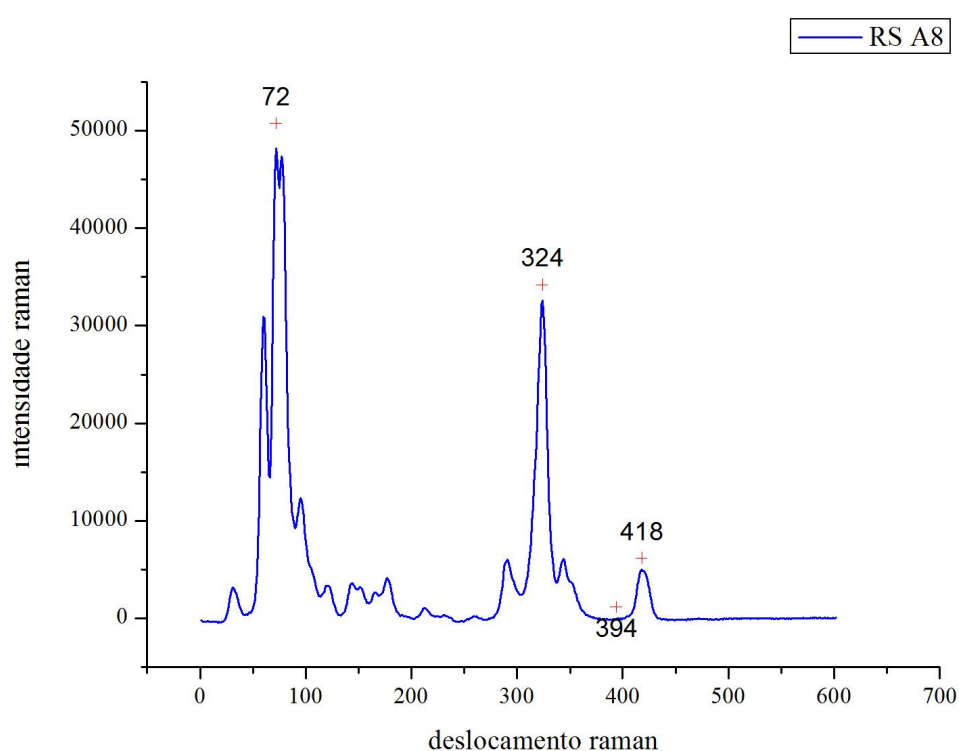


Figura 9: espectro da amostra RS A 8

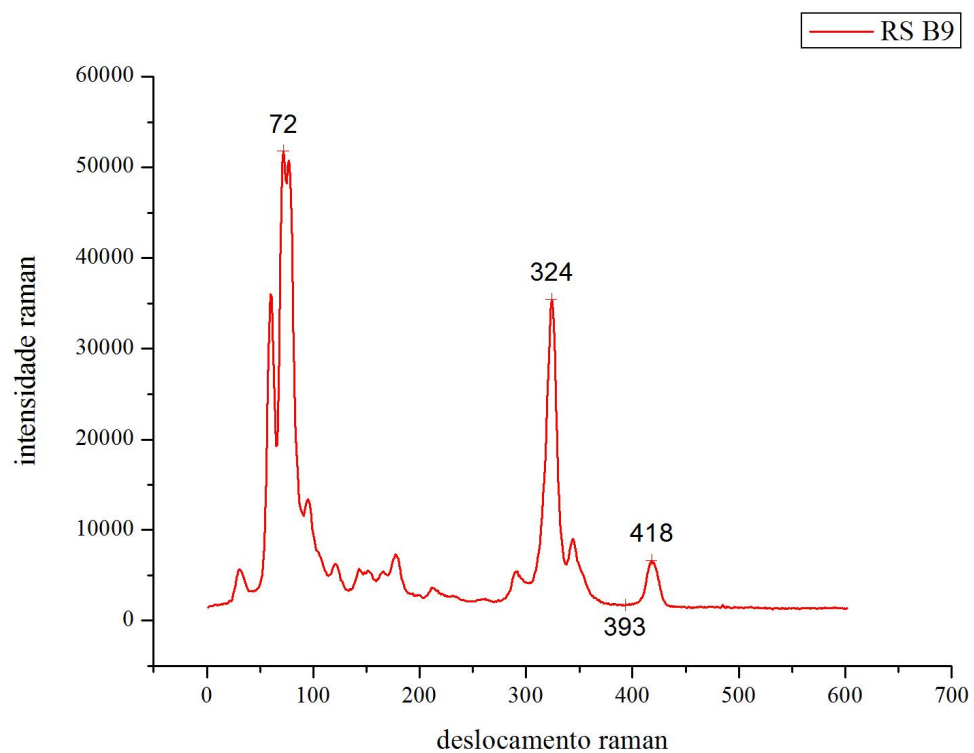


Figura 10: espectro obtido a partir da análise da amostra RS B 9

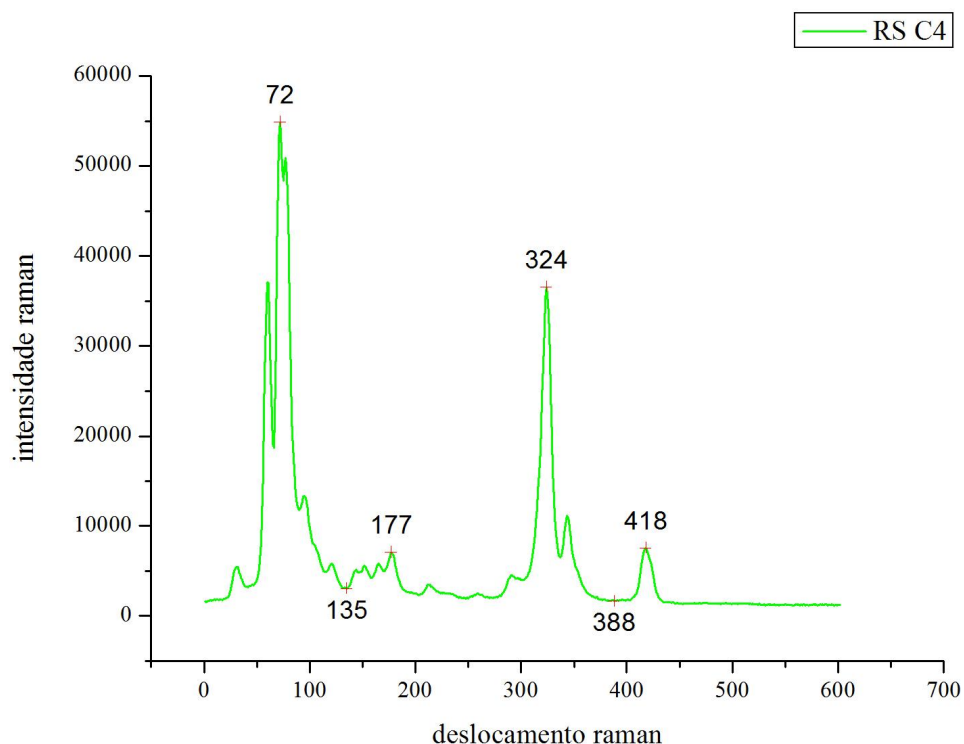


Figura 11: espectro obtido a partir da análise da amostra RS C 4

5.2.1. Análise das Amostras de Rodrigo Silva (RS)

As amostras selecionadas para este grupo (RS A 8, RS B 9 e RS C 4) demonstraram uma elevada consistência espectral, sugerindo que pertencem à mesma fase mineral majoritária.

Todas as amostras apresentaram três bandas principais e intensas localizadas em 72 cm^{-1} , 324 cm^{-1} e 418 cm^{-1} . Observou-se um padrão constante na magnitude dos sinais, onde o pico em 72 cm^{-1} apresentou a maior intensidade relativa, seguido pelo de 324 cm^{-1} e, por fim, o de 418 cm^{-1} .

Na amostra RS C 4, identificou-se um pico adicional em 177 cm^{-1} . Na mineralogia, o surgimento de bandas extras pode indicar a presença de uma fase cristalina menor ou uma micro-inclusão que não seria detectada por métodos de análise macroscópica tradicionais.

5.2.2. Análise das Amostras de Antônio Pereira (AP)

As amostras deste grupo (AP A 1, AP B 2, AP C 2 e AP D 3) revelaram uma diversidade maior e diferenças mais significativas.

A amostra AP B 2 apresentou duas terminações com colorações distintas (verde clara e alaranjada). Embora compartilhem a estrutura base, os espectros revelaram deslocamentos nos picos. A terminação laranja e a amostra AP C 2 mantiveram o pico principal em 72 cm^{-1} . A terminação verde apresentou um deslocamento deste pico para 77 cm^{-1} , enquanto a AP D 3 o localizou em 71 cm^{-1} . Tais deslocamentos de 1 a 5 cm^{-1} são comuns e podem ser influenciados pela orientação do cristal (efeitos de polarização), pela resolução do equipamento ou por pequenas deformações na rede cristalina.

Picos na região de $319\text{--}324\text{ cm}^{-1}$ foram identificados em quase todas as amostras, com intensidades variadas. Nas terminações de AP B 2, o pico situou-se em 323 cm^{-1} ; em AP C 2, em 324 cm^{-1} ; e em AP D 3, em 319 cm^{-1} . O pico de menor intensidade em 418 cm^{-1} (ou 416 cm^{-1} para AP D 3) também foi observado consistentemente.

Além do padrão base, a amostra AP D 3 exibiu um pico positivo exclusivo em 164 cm^{-1} , reforçando a sensibilidade da técnica para detectar variações locais na composição.

Diferente de todas as outras análises apresentadas, a amostra AP A 1 revelou um espectro Raman completamente distinto, caracterizado por apenas dois picos positivos em 388 cm^{-1} (mais intenso) e 180 cm^{-1} (menos intenso). Esta discrepância na "impressão digital" espectral indica que a amostra AP A 1 possui elementos traços diferentes das demais amostras RS e AP analisadas. Enquanto as outras amostras parecem compartilhar uma estrutura cristalina e química comuns (definida pelos picos em ~ 72 , ~ 324 e $\sim 418\text{ cm}^{-1}$), a AP A 1 aparenta estar isolada neste estudo.

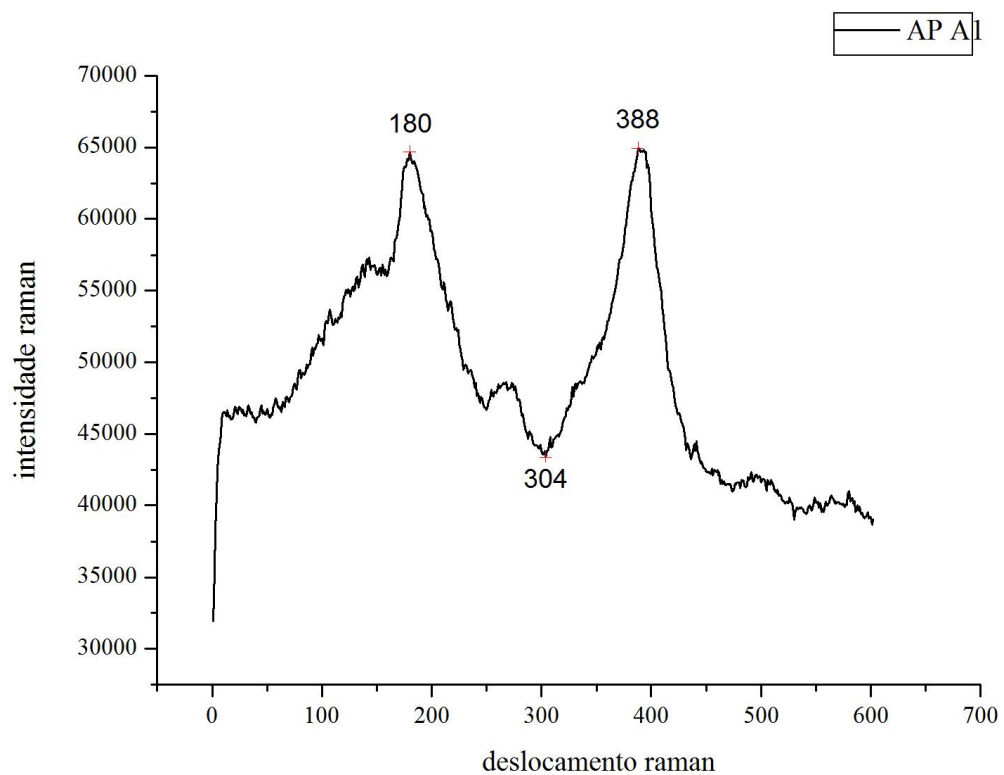


Figura 12: espectro obtido a partir da análise da amostra AP A 1

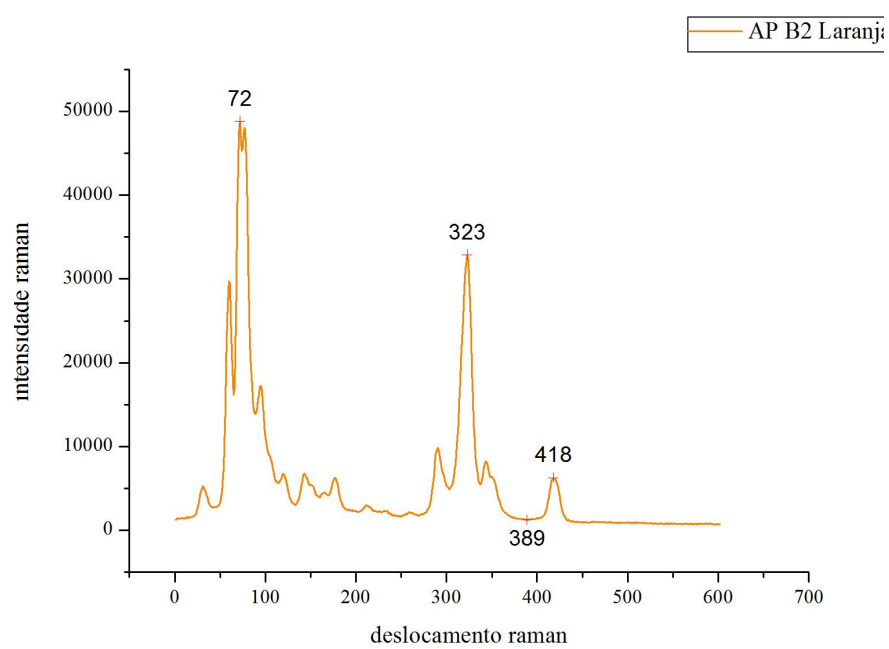


Figura 13: espectro obtido a partir da análise da ponta laranja da amostra AP B 2

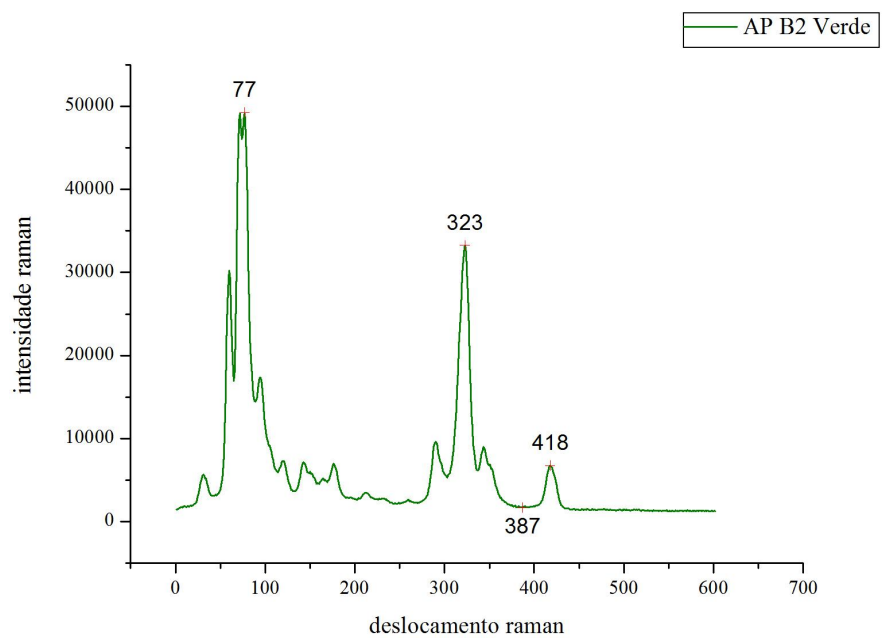


Figura 14: espectro obtido a partir da análise da ponta verde da amostra AP B 2

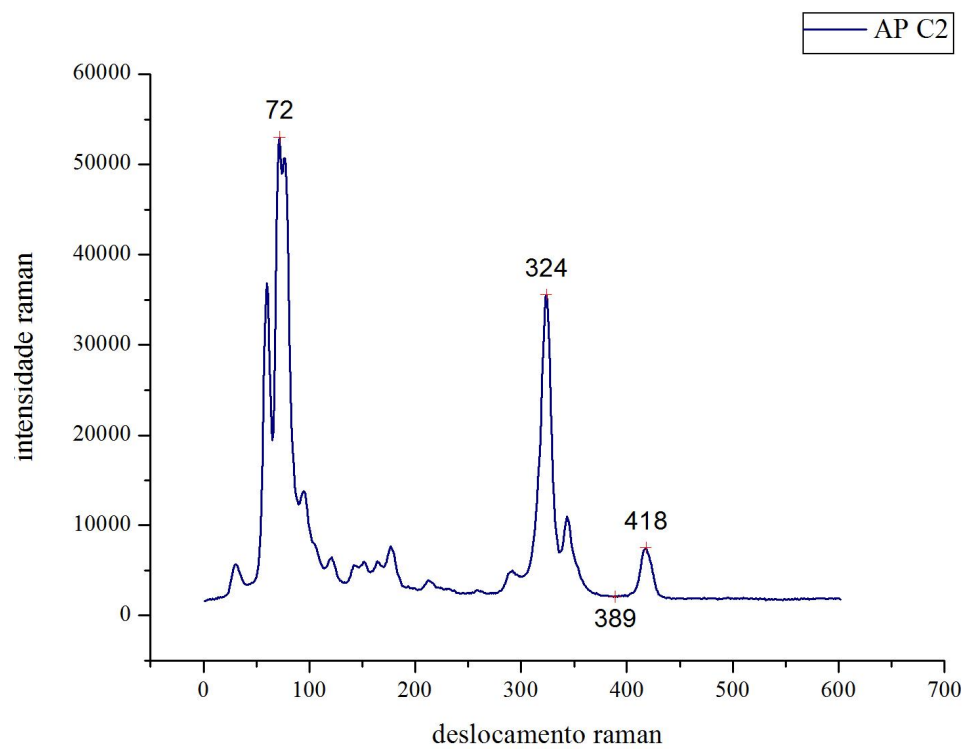


Figura 15: espectro obtido a partir da análise da amostra AP C 2

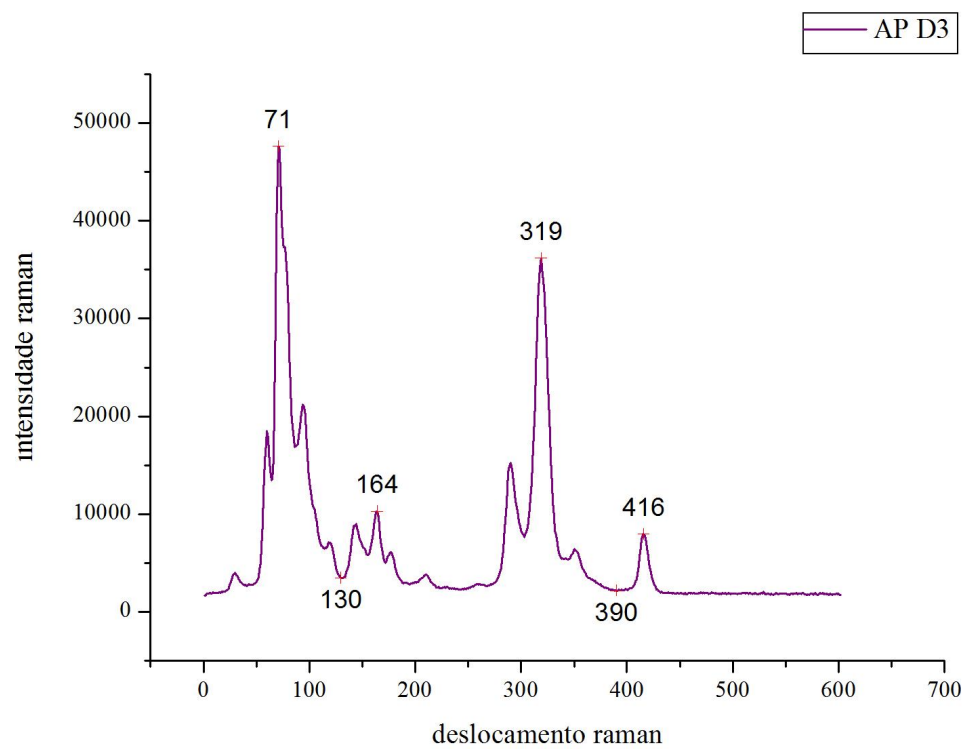


Figura 16: espectro obtido a partir da análise da amostra AP D 3

6. DISCUSSÃO

A análise comparativa dos espectros Raman das amostras de Antônio Pereira (AP) e Rodrigo Silva (RS) revela uma complexidade mineralógica que vai além da inspeção visual, confirmando a técnica como uma "impressão digital" fundamental para a identificação de fases sólidas.

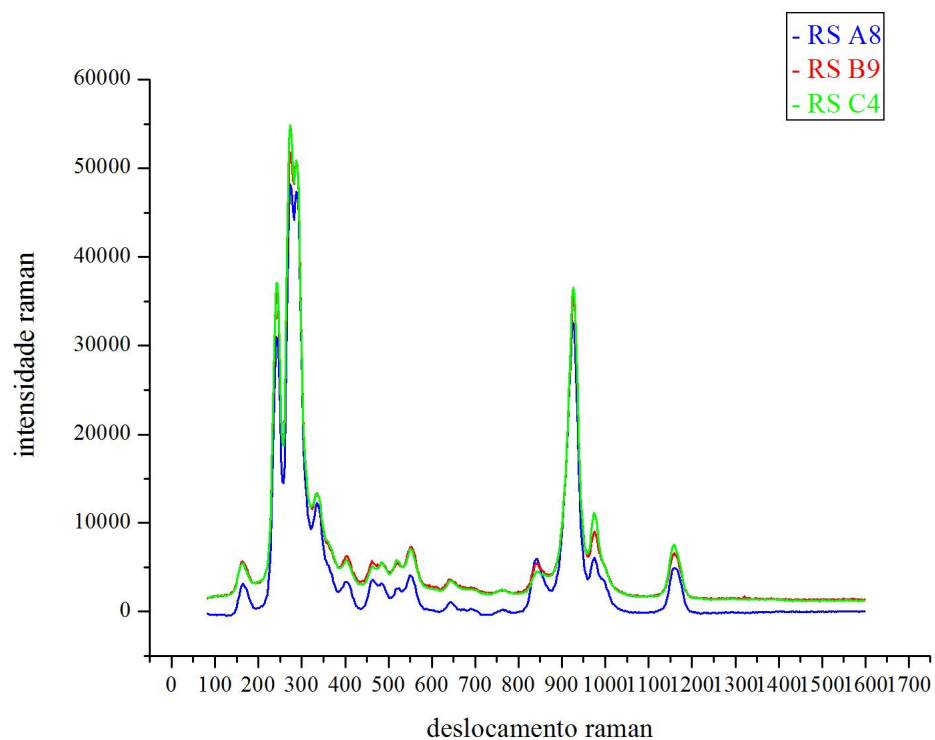


Figura 17: espectros de Rodrigo Silva agrupados

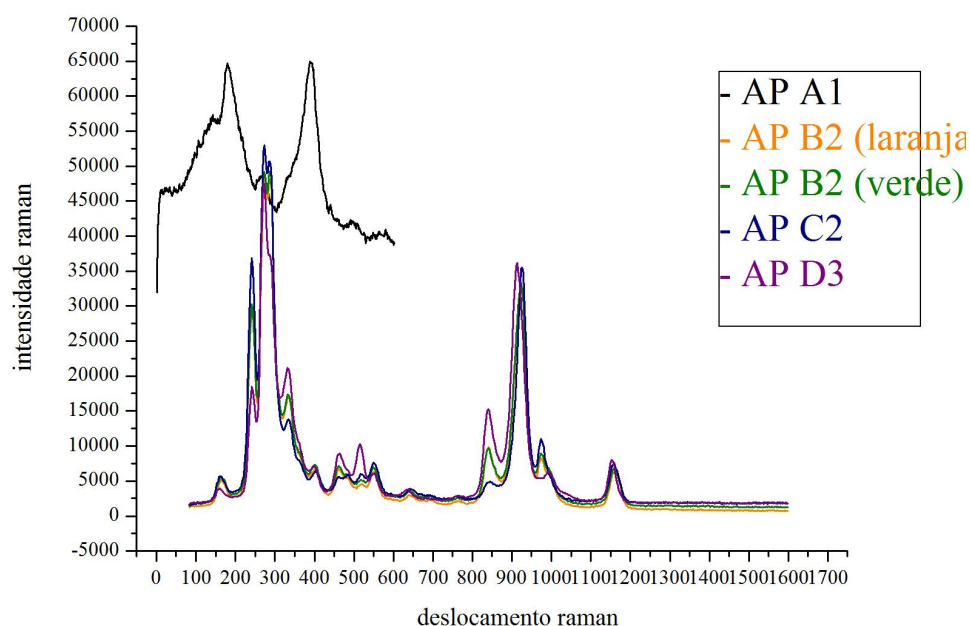


Figura 18: espectros das amostras de Antônio Pereira

6.1. Padrão dominante: Assinaturas de Óxidos de Ferro

A grande maioria das amostras analisadas (RSA, RSB, RSC e as amostras APB, APC e APD) apresenta um núcleo comum de picos em aproximadamente 324 cm^{-1} e 418 cm^{-1} . De acordo com a literatura especializada (Santos, 2019 ; Queiroz, 2024) esses valores são diagnósticos para fases específicas:

- Pico em 418 cm^{-1} : Este sinal é altamente característico da hematita (Fe_2O_3), cujo modo vibracional ativo (E_g) é esperado na faixa de 411-412 cm^{-1} . Pequenos deslocamentos para 418 cm^{-1} podem ocorrer devido a condições de formação do cristal ou presença de impurezas.
- Pico em 324 cm^{-1} : Este pico é condizente com a magnetita (Fe_3O_4), que apresenta um modo vibracional E_g entre 300-334 cm^{-1} .
- Pico em 72 cm^{-1} : Embora picos abaixo de 100 cm^{-1} sejam desafiadores para alguns equipamentos, na mineralogia eles representam fônons da rede (vibrações

que se propagam ao longo dos eixos cristalográficos) e interações cátion-oxigênio de baixa frequência, fundamentais para a estabilidade da estrutura cristalina.

A coexistência dessas bandas sugere que as amostras de ambas as localidades são compostas majoritariamente por uma mistura ou associação de hematita e magnetita, o que é comum em depósitos de minério de ferro brasileiros. A presença desses íons é determinante para a modificação das propriedades óticas e das bandas de absorção do cristal. Isso sugere que a intensidade dos picos está diretamente ligada à concentração e ao estado de oxidação do ferro presente na rede cristalina (Skvortsova, 2013)

6.2. A Singularidade da Amostra AP A 1: Identificação da Goethita

A amostra AP A 1 destaca-se por não seguir o padrão anterior, apresentando picos em 388 cm^{-1} e 180 cm^{-1} . Com base na bibliografia (Queiroz, 2024), o pico intenso em 388 cm^{-1} é um marcador clássico da goethita ($\alpha\text{-FeOOH}$), cujo modo vibracional principal é esperado em torno de 385 cm^{-1} . O pico secundário em 180 cm^{-1} também é observado na presença desta fase, indicando um ambiente de alteração ou hidratação diferente para este cristal específico, transformando óxidos anidros em hidróxidos de ferro, revelando uma gênese ou ambiente de alteração diferente para este cristal específico.

6.3. Interpretação das Diferenças e Deslocamentos (Shifts)

As pequenas variações observadas entre as localidades (como o deslocamento de 319 para 324 cm^{-1} entre AP e RS) podem ser explicadas por alguns fatores abaixo:

- **Efeitos de Polarização:** A intensidade e a posição exata de um pico dependem da orientação relativa entre o laser e os eixos do cristal (Lottici, 2010; Queiroz, 2024). Diferentes faces de um mesmo mineral podem suprimir ou realçar certas bandas.
- **Presença de Impurezas e Defeitos:** Conforme discutido por Skvortsova, a introdução de íons metálicos externos (como Cr^{3+} ou variações de Fe) na rede cristalina cria novos centros de absorção e altera as frequências vibracionais. Isso explica por que a amostra APD tem um pico em 164 cm^{-1} e a RSC em 177

cm^{-1} : são reflexos de micro-inclusões (como quartzo ou silicatos) capturados dentro do grão principal durante seu crescimento, ou substituições químicas locais.

- Irradiação: Estudos indicam que o histórico de exposição do mineral a radiações naturais ou mudanças térmicas pode modificar sua estrutura. Esses processos podem causar o alargamento das bandas ou pequenos deslocamentos (Alves, 2024), como observado na amostra APB Verde (pico em 77 cm^{-1}) comparada à APB Laranja (pico em 72 cm^{-1}).
- Substituição Química: A troca de íons de Ferro (Fe) por Alumínio (Al) na rede cristalina (substituição Al-por-Fe) é comum em hematitas e goethitas, causando variações sutis na frequência dos picos.

6.4. Correlações com a Geologia

As ocorrências de topázio imperial nas localidades analisadas estão profundamente conectadas ao contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, especificamente às rochas do Supergrupo Minas (Gandini, 1994). Os picos de hematita (418 cm^{-1}) e magnetita (324 cm^{-1}) identificados nos espectros refletem a riqueza em ferro dessa província geológica, onde o topázio ocorre em veios que cortam formações como os grupos Itabira e Piracicaba. Conforme os estudos de geodiversidade na região, a localidade de Antônio Pereira situa-se no flanco nordeste do Anticlinal de Mariana, uma estrutura regional onde a intensa variação litológica e a dinâmica tectônica favoreceram a concentração de minerais gemológicos e metálicos (Nascimento & Castro, 2019).

A identificação desses minerais como micro-inclusões é corroborada pela literatura clássica da região, que descreve o topázio de Ouro Preto como um mineral hospedeiro de diversas fases sólidas, sendo a hematita (especularita) uma das mais abundantes (Gandini, 1994). O pico de goethita (388 cm^{-1}) encontrado exclusivamente em Antônio Pereira (amostra AP A 1) é um marcador geológico importante, indicando um ambiente de forte alteração secundária. Na região, o topázio é frequentemente extraído de solos lateríticos e produtos de decomposição conhecidos como "borra de café" (Gandini, 1994), onde óxidos anidros como a

magnetita podem ser oxidados ou hidratados para fases como a hematita e a goethita sob condições hidrotermais de baixa profundidade.

Essas assinaturas espectrais funcionam como um registro histórico dos processos que ocorreram em cada localidade. As pequenas diferenças entre as amostras de Rodrigo Silva e Antônio Pereira podem ser atribuídas à complexidade estrutural do Anticlinal de Mariana, que é seccionado por falhas regionais (como a Falha do Fundão) que serviram de condutos para fluidos hidrotermais saturados em ferro e sílica. Dessa forma, a espectroscopia Raman revela que o topázio capturou a "impressão digital" do quimismo regional do Quadrilátero Ferrífero, permitindo-nos rastrear a proveniência das amostras através das inclusões minerais preservadas em sua estrutura.

7. CONCLUSÕES

Com base na análise dos dados e nas referências bibliográficas, as principais Conclusões deste estudo sobre as amostras de topázio de Antônio Pereira (AP) e Rodrigo Silva (RS) são:

- **Identificação de Micro-inclusões:** Os picos encontrados em 418 cm^{-1} (hematita), 324 cm^{-1} (magnetita) e 388 cm^{-1} (goethita) confirmam que essas fases de ferro não estão substituindo átomos na rede do topázio, mas sim presentes como micro-inclusões sólidas capturadas durante o crescimento do cristal. A identificação experimental dessas fases de óxidos e hidróxidos de ferro por Raman é corroborada pela literatura técnica.
- **Diferenciação Ambiental entre Localidades:** Embora ambas as localidades apresentem um ambiente de formação rico em ferro (comprovado pela hematita e magnetita), a presença exclusiva de goethita na amostra AP A 1 indica que a localidade de Antônio Pereira passou por processos específicos de alteração secundária ou hidratação que não foram detectados nas amostras de Rodrigo Silva.
- **Influência de Impurezas e Desordem Estrutural:** De acordo com os princípios de Skvortsova (2013), o alargamento observado nas bandas e os deslocamentos nos fônons da rede (entre 71 e 77 cm^{-1}) são evidências de desordem estrutural provocada por impurezas metálicas (como o ferro) e pelo histórico de formação geológica dos cristais.
- **Padrão de Posição vs. Substituição:** A ausência de deslocamentos significativos nos picos intrínsecos do topázio, acompanhada do surgimento de novas bandas de óxidos de ferro, ratifica a conclusão de que o ferro nestas amostras ocorre majoritariamente como fases minerais distintas (inclusões) e não por substituição atômica de Al-por-Fe na rede cristalina do "hospedeiro".
- **Relações geológicas:** As assinaturas espectrais observadas nas amostras de Antônio Pereira e Rodrigo Silva estão profundamente relacionadas ao contexto geológico do Quadrilátero Ferrífero, onde o topázio imperial ocorre associado às rochas ricas em ferro do Supergupo Minas. A identificação de picos diagnósticos de hematita e magnetita na maioria das amostras reflete a mineralogia regional

predominante, capturada na forma de micro-inclusões sólidas, enquanto a presença singular de goethita na amostra AP A 1 atua como um marcador de processos de alteração secundária ou hidratação ocorridos no flanco nordeste do Anticlinal de Mariana. Essa correlação confirma que o topázio atua como uma "cápsula do tempo" para o quimismo local, utilizando o efeito Raman como uma impressão digital para identificar a proveniência e o histórico geológico dos cristais.

Por fim, os dados obtidos demonstram que as bandas ainda podem ser trabalhadas, possivelmente através de métodos de aprendizado de máquina e deconvolução, para encontrar características cada vez mais específicas sobre a estrutura e a gênese dessas amostras. Assim, a espectroscopia Raman demonstrou ser uma ferramenta de alta resolução e não destrutiva, funcionando como uma "impressão digital" capaz de identificar com precisão as fases minerais presentes, mesmo em escala microscópica.

8. REFERÊNCIAS

Alves, Juliana da Fonseca, **Espectroscopia Raman aplicada à análise mineralógica**, Universidade Federal de Juiz de Fora, Instituto de Ciências Exatas. Programa de pós graduação em Química, 2024

BERSANI, D. LOTTICI, P. P. **Applications of Raman spectroscopy to gemology**, Anal Bioanal Chem p: 2631–2646, 2010

COSTA, F. R. T. D, **Microscopia Eletrônica de Varredura: potencialidades e aplicações**, Curso de Química Industrial - Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA. 51p, 2016

disponível em:
<https://monografias.ufma.br/jspui/bitstream/123456789/1506/1/FernandaCosta.pdf>

OLIVEIRA, I. G., CARNEIRO, L. S., CARDOSO, J. S., CARNEIRO, N. M. A., PASCHOAL, C. W. A., NERI, T. F. A, **Ocorrências de Turmalina em Quixeramobim, Ceará**. in Geociências UNESP, São Paulo, v: 41; p: 35-45, 2022

disponível em:
<https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/16219/12341>

ENDO I. et. al. **Quadrilátero Ferrífero: avanços do conhecimento nos últimos 50 anos**, Departamento de Geologia da Escola de Minas – UFOP - Centro de Estudos Avançados do Quadrilátero Ferrífero. 2020.

GANDINI, Antonio Luciano. **Mineralogia, inclusões fluidas e aspectos genéticos do topázio imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais**. Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia, Instituto de Geociências, USP

GANDINI, Antonio Luciano. TOPÁZIO IMPERIAL, um raro mineral-gema do Brasil. *In: CORNEJO, Carlos. Gemas do Brasil*. p: 502,505. 2023.

GAUZI, Teodoro; GRAÇA, L. M; LAGOEIRO, Leonardo; MENDES, ISOLDA DE CASTRO; QUEIROGA, G.N. **The fingerprint of imperial topaz from Ouro Preto region (Minas Gerais state, Brazil) based on cathodoluminescence properties and composition**. *In: Mineralogical Magazine*, p. 943,960, 1 ago. 2018.

HENRY, Darrell. **Cathodoluminescence Theory, in Geochemical Instrumentation and Analysis** - Louisiana State University, 2007. Disponível em: https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/CLTheory.html

HINCHRINS, R., PORCHER, C. C., **Capítulo 12: Catodoluminescência**, in Gemas, 2014.

Disponível em:
<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/107343/000919052.pdf?sequence=1&locale=en>

MAGAÑA, S. E. BREEDING, C. M. PALKE, A. C. HOMKRAJAE, A. SUN, Z. MCELHENNY G. **Raman and Photoluminescence Mapping of Gem Materials**. *In: Minerals* 2021

NASCIMENTO, S. T. CASTRO, P. T. A. **Modelagem da geodiversidade para o anticlinal de Mariana, sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil**. *Geologia USP. Série Científica*, São Paulo, Brasil, v. 19, n. 1, p. 117–127, 2019. DOI:

10.11606/issn.2316-9095.v19-134534.

Disponível

em:

<https://revistas.usp.br/guspsc/article/view/134534>.. Acesso em: 8 out. 2025.

NASCIMENTO-DIAS, B. L., DOS ANJOS, V. C. **Aplicação da espectroscopia Raman na identificação de olivinas em meteoritos.** in: Journal of Experimental and Technique Instrumentation- JETI, v.04, n.02, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufms.br/index.php/JETI/article/view/12434>

ROSIÈRE, C. A., JÚNIOR, H. A. N., ENDO, I. **Sobre a geologia estrutural do Anticlinal de Mariana, região sudeste do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - uma revisão.** in: Revista Escola de Minas, v.45, 1992. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/server/api/core/bitstreams/c37216b7-6f40-49ed-842e-38d46337a314/content>

SANTOS, A. R. MENEZES, D. B. ELLENA, J. ANDRADE, M. B. **aplicação da espectroscopia raman na caracterização de minerais pertencentes a uma geocoleção.** in: Quim. Nova, Vol. 42, No. 5, 489-496, 2019. Disponível em: <https://quimicanova.sbq.org.br/pdf/v42n5a03>

SAUER, D. A. KELLER, A. S., MCCLURE, S. F. **An Update on Imperial Topaz from the Capão Mine Minas Gerais Brazil.** In: Gems & Gemology, Gemological Institute of America. Vol. 32, No. 4, p: 232,241, 1996

SCHUMANN, Walter. **Gemas do Mundo**, 3ª edição. Munchen, Alemanha. Verlagsgesellschaft mbH, 254 p. 1985

SKVORTSOVA, V., MIRANOVA-ULMANE, N., TRINKER, L., CHIKVAIDZE, G.,
Optical properties of natural topaz in: International Conference on Functional
Materials and Nanotechnologies 2013, vol 49, University of Tartu, Estonia.
Disponível em
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/49/1/012051/meta>

QUEIROZ, Alfredo Antônio Alencar Exposito de. **Classificação de minerais de ferro por espectroscopia Raman e aprendizado de máquina**. Tese USP-SC, 2024 Disponível em:

https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/76/76135/tde-20032024-092246/publico/AlfredoAntonioAlencarExpositodeQueiroz_DO_corrigida.pdf

Ribeiro-Kwito, R. de Oliveira, C. G., **O depósito aurífero de Antônio Pereira, Quadrilátero Ferrífero: Condições P-T e natureza dos fluidos mineralizadores**. In: Revista Brasileira de Geociências, Volume 34, p: 117, 126 , 2004

Wise, Michael A. Topaz: **A Mineralogical Review**. In **Rocks & Minerals**, Vol: 70, p: 16, 25, 1995

9. ANEXOS

Tabela 1 - Morfologia dos cristais de topázio imperial de Rodrigo Silva

Grupo A	Morfologia
RS A 01	prismático, apresenta uma fratura, inclusões visíveis e estrias
RS A 02	prismático, apresenta inclusões visíveis e estrias
RS A 03	prismático, não possui terminação perfeita e apresenta inclusões visíveis
RS A 04	prismático, terminação quase perfeita, inclusões visíveis e estriado
RS A 05	prismático, base reta, inclusões visíveis e faces não estriadas
RS A 06	prismático, base reta, apresenta uma fratura, inclusões visíveis e estrias
RS A 07	prismático, está fraturado, não apresenta inclusões visíveis, está estriado
RS A 08	prismático, fraturado, não apresenta terminação perfeita e nem inclusões, algumas faces estão estriadas e outras lisas
RS A 09	prismático, base reta, terminação perfeita, estriado e não apresenta inclusões visíveis
RS A 10	prismático, base reta, sem terminação perfeita, estriado
RS A 11	prismático, base reta, sem terminação perfeita, possui uma face reta e outras estriadas e apresenta inclusões visíveis
RS A 12	prismático, base reta, com terminação quase perfeita e estriado, não apresenta inclusões visíveis
Grupo B	Morfologia
RS B 01	prismático, base e topo retos, sem terminação, apresenta uma face lisa e outras estriadas, possui inclusões visíveis
RS B 02	prismático, sem terminação, fraturado, estriado e sem inclusões visíveis
RS B 03	prismático, base reta, sem terminação, fraturado, estriado e possui inclusões visíveis
RS B 04	prismático, base e topo retos, sem terminação, faces estriadas, não possui inclusões visíveis
RS B 05	prismático, base e topo retos, sem terminação, faces estriadas, não possui inclusões visíveis
RS B 06	prismático, base e topo retos, sem terminação, faces estriadas, não possui inclusões visíveis
RS B 07	prismático, base e topo retos, fraturado, sem terminação, faces estriadas, não possui inclusões visíveis

RS B 08	prismático, fraturado, com terminação quase perfeita e estriado e apresenta inclusões visíveis
RS B 09	prismático, com terminação perfeita e estriado, não apresenta inclusões visíveis
RS B 10	prismático, sem terminação perfeita e estriado, não apresenta inclusões visíveis
RS B 11	prismático, com terminação perfeita e estriado, apresenta inclusões visíveis
RS B 12	prismático, com terminação perfeita e estriado, não apresenta inclusões visíveis
Grupo C	
RS C 01	prismático, sem terminação perfeita e estriado, não apresenta inclusões visíveis
RS C 02	prismático, base reta, fraturado, sem terminação, faces estriadas, não possui inclusões visíveis
RS C 03	prismático, sem terminação perfeita e estriado, não apresenta inclusões visíveis
RS C 04	prismático, base reta, sem terminação, fraturado, estriado e possui inclusões visíveis
RS C 05	prismático, base reta, com terminação perfeita e estriado, não apresenta inclusões visíveis

Tabela 2 - Morfologia dos cristais de Antônio Pereira

Grupo A	Morfologia
AP A 01	prismático, base reta e terminação perfeita, apresenta inclusões
Grupo B	Morfologia
AP B 01	prismático, base fraturada e terminação perfeita, apresenta inclusões visíveis
AP B 02	prismático, base fraturada e terminação perfeita, apresenta inclusões visíveis
AP B 03	prismático, base fraturada e terminação perfeita, apresenta inclusões visíveis
Grupo C	Morfologia
AP C 01	prismático, base fraturada e terminação perfeita, pouco estriado não apresenta inclusões visíveis
AP C 02	prismático, base fraturada e terminação perfeita, estriado e apresenta inclusões visíveis
AP C 03	prismático, base fraturada e terminação perfeita, estriado e apresenta inclusões visíveis
Grupo D	Morfologia
AP D 01	prismático, base fraturada e terminação perfeita, apresenta inclusões visíveis
AP D 02	prismático, base fraturada e terminação perfeita, apresenta inclusões visíveis
AP D 03	prismático, topo e base retos, não apresenta inclusões visíveis

Tabela 3 - Anisotropia das amostras de Rodrigo Silva

Rodrigo Silva					
Grupo A	Característica	Grupo B	Característica	Grupo C	Característica
RS A 01	anisotrópico	RS B 01	anisotrópico	RS C 01	anisotrópico
RS A 02	anisotrópico	RS B 02	anisotrópico	RS C 02	anisotrópico
RS A 03	anisotrópico	RS B 03	anisotrópico	RS C 03	anisotrópico
RS A 04	anisotrópico	RS B 04	anisotrópico	RS C 04	anisotrópico
RS A 05	anisotrópico	RS B 05	anisotrópico	RS C 05	anisotrópico
RS A 06	anisotrópico	RS B 06	anisotrópico		
RS A 07	anisotrópico	RS B 07	anisotrópico		
RS A 08	anisotrópico	RS B 08	anisotrópico		
RS A 09	anisotrópico	RS B 09	anisotrópico		
RS A 10	anisotrópico	RS B 10	anisotrópico		
RS A 11	anisotrópico	RS B 11	anisotrópico		
RS A 12	anisotrópico	RS B 12	anisotrópico		

Tabela 4 - anisotropia das amostras de Antônio Pereira

Antônio Pereira							
Grupo A	Característica	Grupo B	Característica	Grupo C	Característica	Grupo D	Característica
AP A	anisotrópico	AP B 01	anisotrópico	AP C 01	anisotrópico	AP D 01	anisotrópico
		AP B 02	anisotrópico	AP C 02	anisotrópico	AP D 02	anisotrópico
		AP B 03	anisotrópico	AP C 03	anisotrópico	AP D 03	anisotrópico

Tabela 5 - pleocroísmo das amostras de Rodrigo Silva

Rodrigo Silva					
Grupo A	Pleocroísmo	Grupo B	Pleocroísmo	Grupo C	Pleocroísmo
RS A 01	não	RS B 01	sim, alaranjado fraco a alaranjado médio	RS C 01	sim, alaranjado rosado a alaranjado amarelado
RS A 02	não	RS B 02	sim, alaranjado fraco a alaranjado médio	RS C 02	sim, alaranjado fraco rosado a alaranjado médio
RS A 03	não	RS B 03	sim, alaranjado médio a alaranjado forte	RS C 03	sim, alaranjado rosado a alaranjado amarelado
RS A 04	não	RS B 04	sim, alaranjado muito fraco a alaranjado fraco	RS C 04	sim, alaranjado fraco rosado a alaranjado médio
RS A 05	sim, amarelo claro a amarelo médio	RS B 05	sim, alaranjado muito fraco a alaranjado fraco	RS C 05	sim, alaranjado rosado a alaranjado forte
RS A 06	não	RS B 06	sim, alaranjado muito fraco a alaranjado fraco		
RS A 07	sim, amarelo claro a amarelo médio	RS B 07	sim, alaranjado fraco a alaranjado médio		
RS A 08	sim, amarelo claro quase incolor a amarelo médio	RS B 08	sim, alaranjado muito fraco a alaranjado fraco		
RS A 09	sim, amarelo claro a amarelo médio	RS B 09	sim, alaranjado muito fraco a alaranjado fraco		
RS A 10	sim, amarelo claro quase incolor a amarelo médio	RS B 10	sim, alaranjado fraco a alaranjado médio		
RS A 11	não	RS B 11	sim, alaranjado muito fraco a alaranjado fraco		
RS A 12	não	RS B 12	sim, alaranjado muito fraco a		

			alaranjado médio		
--	--	--	------------------	--	--

Tabela 6 - pleocroísmo das amostras de Antônio Pereira

Antônio Pereira							
Grupo A	Pleocroísmo	Grupo B	Pleocroísmo	Grupo C	Pleocroísmo	Grupo D	Pleocroísmo
AP A 01	amarelo quase incolor a amarelo claro	AP B 01	amarelo claro a amarelo forte	AP C 01	amarelo rosado a amarelo esverdeado	AP D 01	amarelo rosado a amarelo esverdeado
		AP B 02	amarelo médio a amarelo forte	AP C 02	amarelo claro a amarelo forte	AP D 02	alaranjado claro a alaranjado forte
		AP B 03	amarelo claro a amarelo médio	AP C 03	amarelo claro a amarelo forte	AP D 03	roxo claro a roxo forte

Tabela 7 - peso das amostras de topázio imperial

Rodrigo Silva							
Grupo A	Peso (g)	Grupo B	Peso (g)	Grupo C	Peso (g)		
RS A 01	0,623	RS B 01	0,888	RS C 01	1,326		
RS A 02	0,696	RS B 02	1,077	RS C 02	1,465		
RS A 03	0,869	RS B 03	0,626	RS C 03	1,783		
RS A 04	1,399	RS B 04	0,717	RS C 04	1,115		
RS A 05	0,556	RS B 05	0,603	RS C 05	2,537		
RS A 06	0,755	RS B 06	1,722				
RS A 07	0,816	RS B 07	1,38				
RS A 08	0,934	RS B 08	1,398				
RS A 09	1,165	RS B 09	0,756				
RS A 10	1,234	RS B 10	2,041				
RS A 11	2,771	RS B 11	2,089				
RS A 12	0,768	RS B 12	1,524				
Antonio Pereira							
Grupo A	Peso (g)	Grupo B	Peso (g)	Grupo C	Peso (g)	Grupo D	Peso (g)
AP A 01	2,348	AP B 01	3,222	AP C 01	1,138	AP D 01	0,509
		AP B 02	3,174	AP C 02	2,671	AP D 02	2,336

Tabela 8 - Dimensão das amostras de topázio imperial de Rodrigo Silva

Amostras	largura	comprimento	Amostras	largura	comprimento	Amostras	largura	comprimento
Grupo A			Grupo B			Grupo C		
RS A 01	0,5	1,2	RS B 01	0,7	1	RS C 01	0,7	1,8
RS A 02	0,3	2,5	RS B 02	0,6	1,1	RS C 02	0,8	1,1
RS A 03	0,6	1,3	RS B 03	1	1,5	RS C 03	0,5	1,5
RS A 04	0,8	1,3	RS B 04	0,5	1	RS C 04	0,9	1,3
RS A 05	0,4	2,2	RS B 05	0,7	1,2	RS C 05	0,6	2
RS A 06	0,5	1,5	RS B 06	0,3	1,5			
RS A 07	0,4	1,4	RS B 07	0,9	1,4			
RS A 08	0,6	1,7	RS B 08	0,8	1,2			
RS A 09	0,8	1,1	RS B 09	0,7	1,8			
RS A 10	0,7	1,1	RS B 10	0,9	1,7			
RS A 11	1,1	1,5	RS B 11	0,5	1			
RS A 12	0,8	1,1	RS B 12	1,2	1,6			

Tabela 9 - Dimensões das amostras de topázio imperial de Antônio Pereira

Amostras	largura	comprimento	Amostras	largura	comprimento	Amostras	largura	comprimento	amostras	largura	comprimento
Grupo A			Grupo B			Grupo C			Grupo D		
AP A 01	0,7	3	AP B 01	0,8	3	AP C 01	0,4	2,1	AP D 01	0,3	1,6
			AP B 02	0,7	2,8	AP C 02	0,7	2,2	AP D 02	0,7	1,8
			AP B 03	0,9	2,9	AP C 03	0,5	3	AP D 03	0,9	1,2

Tabela 10 - reação UV das amostras de Rodrigo Silva

Grupo A	Reação UV Curto	Reação UV Longo	Grupo B	Reação UV Curto	Reação UV Longo	Grupo C	Reação UV Curto	Reação UV Longo
RS A 01	reação leve, esverdeado	reação forte, amarelo	RS B 01	reação leve, amarelo	reação forte, verde	RS C 01	reação leve, verde	reação forte, verde
RS A 02	reação leve, esverdeado	reação forte, amarelo	RS B 02	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo	RS C 02	reação leve, verde	reação forte, verde
RS A 03	reação leve, esverdeado	reação forte, amarelo	RS B 03	reação leve, amarelo	reação forte, laranja	RS C 03	reação leve, laranja	reação forte, laranja
RS A 04	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo	RS B 04	reação leve, amarelo	reação forte, verde	RS C 04	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo
RS A 05	reação leve, esverdeado	reação leve, verde	RS B 05	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo	RS C 05	reação leve, verde	reação forte, laranja
RS A 06	reação leve, amarelo	amarelo	RS B 06	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo em uma ponta, verde em outra			
RS A 07	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo	RS B 07	reação leve, laranja	reação forte, laranja			
RS A 08	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo em uma ponta e verde na outra ponta	RS B 08	reação forte, amarelo	reação forte, amarelo			
RS A 09	reação leve, esverdeado	reação forte, amarelo	RS B 09	reação forte, amarelo	reação forte, amarelo			
RS A 10	reação leve, esverdeado	reação forte, verde	RS B 10	reação leve, amarelo	reação forte, laranja			
RS A 11	reação leve, esverdeado	reação forte, amarelo	RS B 11	reação leve, amarelo	reação forte, laranja			

RS A 12	reação leve, amarelo	reação forte amarelo	RS B 12	reação leve, amarelo	reação forte, laranja			
---------	----------------------	----------------------	---------	----------------------	-----------------------	--	--	--

Tabela 11 - Reação UV das amostras de Antônio Pereira

Grupo A	Reação UV Curto	Reação UV Longo	Grupo B	Reação UV Curto	Reação UV Longo	Grupo C	Reação UV Curto	Reação UV Longo	Grupo D	Reação UV Curto
AP A 01	reação leve, amarelo	reação forte, amarelo	AP B 01	reação leve, verde	reação intensa na ponta terminada, amarelo	AP C 01	reação leve, amarelo	reação leve, amarelo	AP D 01	reação leve, laranja
			AP B 02	reação leve, verde	reação intensa na ponta terminada, amarelo	AP C 02	reação leve, amarelo	reação intensa, amarelo	AP D 02	reação leve, laranja
			AP B 03	reação leve, verde	reação intensa na ponta terminada, amarelo	AP C 03	reação leve, verde	reação intensa, amarelo	AP D 03	não reagiu