

Efeitos ópticos produzidos em gemas do grupo dos feldspatos

Optical effects produced in gemstones from the feldspar group

Thiago Motta Bolonini¹; Antônio Misson Godoy²

¹ Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Centro de Ciências Jurídicas e Econômicas- CCJE/Departamento de Gemologia, Vitória/ES, Brasil. Email: thiago.bolonini@ufes.br

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-3742-3523>

² Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP, Instituto de Geociências e Ciências Exatas - IGCE/Departamento de Geologia, Rio Claro/SP, Brasil. Email: mgodoy@rc.unesp.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7827-2327>

Resumo: Este artigo revisa os efeitos ópticos dos feldspatos, um grupo de minerais com várias aplicações, incluindo a joalheria. Os feldspatos são divididos em alcalinos e plagioclásios, e apresentam efeitos como adularescência, labradorescência e aventurescência, dependendo do intercrescimento mineral. O artigo discute as variedades de gemas de feldspato, como pedra da lua, labradorita e pedra do sol, e destaca a importância da orientação do cristal na lapidação para maximizar os efeitos ópticos. O artigo conclui que mais pesquisas sobre as propriedades ópticas do feldspato podem melhorar as técnicas de processamento de gemas e o conhecimento mineralógico.

Palavras-chave: Efeitos Óptico; Gema; Feldspato.

Abstract: This article reviews the optical effects of feldspars, a group of minerals with various applications, including jewelry. Feldspars are divided into alkali and plagioclase, and exhibit effects such as adularescence, labradorescence and aventurescence, depending on the mineral intergrowth. The article discusses the gem varieties of feldspar, such as moonstone, labradorite and sunstone, and highlights the importance of crystal orientation in cutting to maximize the optical effects. The article concludes that more research on the optical properties of feldspar can improve gem processing techniques and mineralogical knowledge.

Keywords: Optical Effect; Gemstone; Feldspar.

1. Introdução

A grande dispersão do conhecimento e a escassez de referências técnicas e bibliográficas em português relacionadas aos cristais de feldspato gemológicos com efeitos ópticos, dificulta o acesso do setor de gemas, joias e afins a informações que podem modificar significativamente o valor final de uma gema.

Os cristais de feldspato representam um grupo de minerais formadores de rochas classificados como tectossilicatos (KLEIN e DUTROW, 2012).

Segundo Deer, Howie e Zussman (2010), são os constituintes mais abundantes das rochas ígneas (e.g. pegmatitos simples), são comuns em filões minerais, mas também ocorrem como componentes mineralógicos de rochas metamórficas e sedimentares. Nas rochas metamórficas, são os principais constituintes dos gnaisses e migmatitos, além de estarem presentes em rochas de metamorfismo regional. Nas rochas sedimentares, se apresentam logo após o quartzo em termos de abundância sob a forma de grãos detriticos.

As composições comuns podem ser expressas em termos do sistema $KAlSi_3O_8$ (ortoclásio – Or) – $NaAlSi_3O_8$ (albita – Ab) – $CaAl_2Si_2O_8$ (anortita – An) e, além desses, os feldspatos de bário – Ba como a celsiana $Ba[Al_2Si_2O_8]$.

Dadas as composições químicas que podem assumir $[(K, Na, Ca)(Si, Al)_4O_8]$, suas aplicações industriais passam pelas indústrias de produção de vidro, cerâmica, aditivos agrícolas e, quer seja como componentes de rochas magmáticas, metamórficas ou sedimentares, na indústria de produção de revestimentos. Segundo DNPM (2016), Turquia (23,1%), Itália (21,7%) e China (9,7%), configuraram os três maiores produtores mundiais de feldspatos industriais.

Além da utilização na indústria, exemplares mais raros e com padrões estéticos característicos são utilizados pelo setor joalheiro na produção de joias. Nesse setor, características como a raridade, a beleza, a cor, são as que determinam o valor para as peças, sejam elas brutas ou lapidadas.

2. Objetivos

Este estudo visa compilar informações sobre os efeitos ópticos dos cristais do grupo dos feldspatos utilizados na confecção de joias e busca fornecer orientações específicas sobre o posicionamento de estruturas e feições para maximizar o potencial desses minerais na lapidação.

3. Materiais e métodos

Este estudo seguiu a metodologia abaixo:

- Busca de referências sobre feldspatos e seus efeitos ópticos em gemas.
- Seleção por tema de interesse gemológico.
- Pesquisa complementar sobre temas com poucas referências.
- Compilação e estruturação dos trabalhos em capítulos.
- Edição de imagens com o CorelDraw.
- Redação e formatação conforme normas e dicionários técnicos.

4. Aspectos gerais dos cristais do grupo do feldspato

Os tectossilicatos, responsáveis por mais de 60% do volume das rochas da crosta terrestre, possuem uma estrutura cristalina composta por tetraedros $Si(Al)O_4$ onde os átomos de Si muitas vezes são substituídos por Al e estão rodeados por quatro átomos de O (VLACH, 2002).

Como aluminossilicatos $(Si,Al)O_4$, incorporam cátions para neutralizar a carga negativa do Al, sendo que a composição química e a ordem ou desordem de Al-Si definem os tipos de feldspato. Cristais resfriados rapidamente, têm Al-Si desordenado e os resfriados lentamente, têm Al-Si ordenado. Logo, dividem-se em dois subgrupos: os alcalinos ou feldspatos potássicos (microclínio, ortoclásio e sanidina) e os plagioclásios (série albita – anortita).

A sanidina, monoclinica e desordenada em alta temperatura e baixa pressão, normalmente é utilizada como exemplo de estrutura para os cristais do grupo dos feldspatos; o ortoclásio é monoclinico e pouco ordenado em temperatura intermediária e; o microclínio é triclinico e ordenado em baixa temperatura. O microclínio, é típico de rochas profundas e pegmatitos, ou seja, de resfriamento lento; o ortoclásio, de rochas intrusivas e de resfriamento intermediário e; a sanidina de lavas extrusivas de resfriamento rápido (KLEIN e DUTROW, 2012).

A estrutura geral da série dos plagioclásios é muito similar a estrutura do microclínio. Seu membro final rico em Na (albita) é triclinico e apresenta dois tipos de distribuição de Al-Si; uma ordenada (baixa temperatura) e outra completamente desordenada (alta temperatura).

O membro final rico em Ca (anortita) também é triclinico e apresenta ordenação perfeita de Al-Si. Essas relações de temperatura alteram como o Al-Si se organiza à medida que a polimerização evolui, sendo também responsáveis pelo desenvolvimento de planos de clivagem e pelas maclas. Além disso, parâmetros físicos como a densidade e a dureza também são definidos por essa organização (Figura 5).

Na figura 1, é possível observar composições que auxiliam na compreensão das texturas e demais feições estruturais. Na série de reação Or – Ab os feldspatos ricos em K possuem proporções entre Or_{37} e Or_{100} , o anortoclásio pode apresentar entre Or_{10} e Or_{37} e a albita pode conter até Or_{10} .

O diagrama mostra os intervalos de solução sólida entre Ab-An na série dos plagioclásios. A figura 2 traz maior detalhamento das condições abaixo de 800 °C, mostrando uma lacuna de miscibilidade entre os feldspatos potássicos e a albita, além de três lacunas de miscibilidade na série dos plagioclásios: região da Peristerita (An_0 a An_{25} , abaixo dos 600 °C); região de intercrescimento de Boggild (An_{47} a An_{58} , abaixo dos 800 °C) e; região de Hutton Locher (An_{60} a An_{90} , próximo aos 800 °C).

As lacunas de miscibilidade como a da Peristerita e a região de intercrescimento de Boggild são, respectivamente, importantes no desenvolvimento de efeitos ópticos de adularescência (pedra da lua ou adulária, embora sejam mais comuns estudos relacionados às exsoluções entre feldspatos potássicos e plagioclásios) e a labradorescência (labradorita) (KLEIN E DUTROW, Op. Cit).

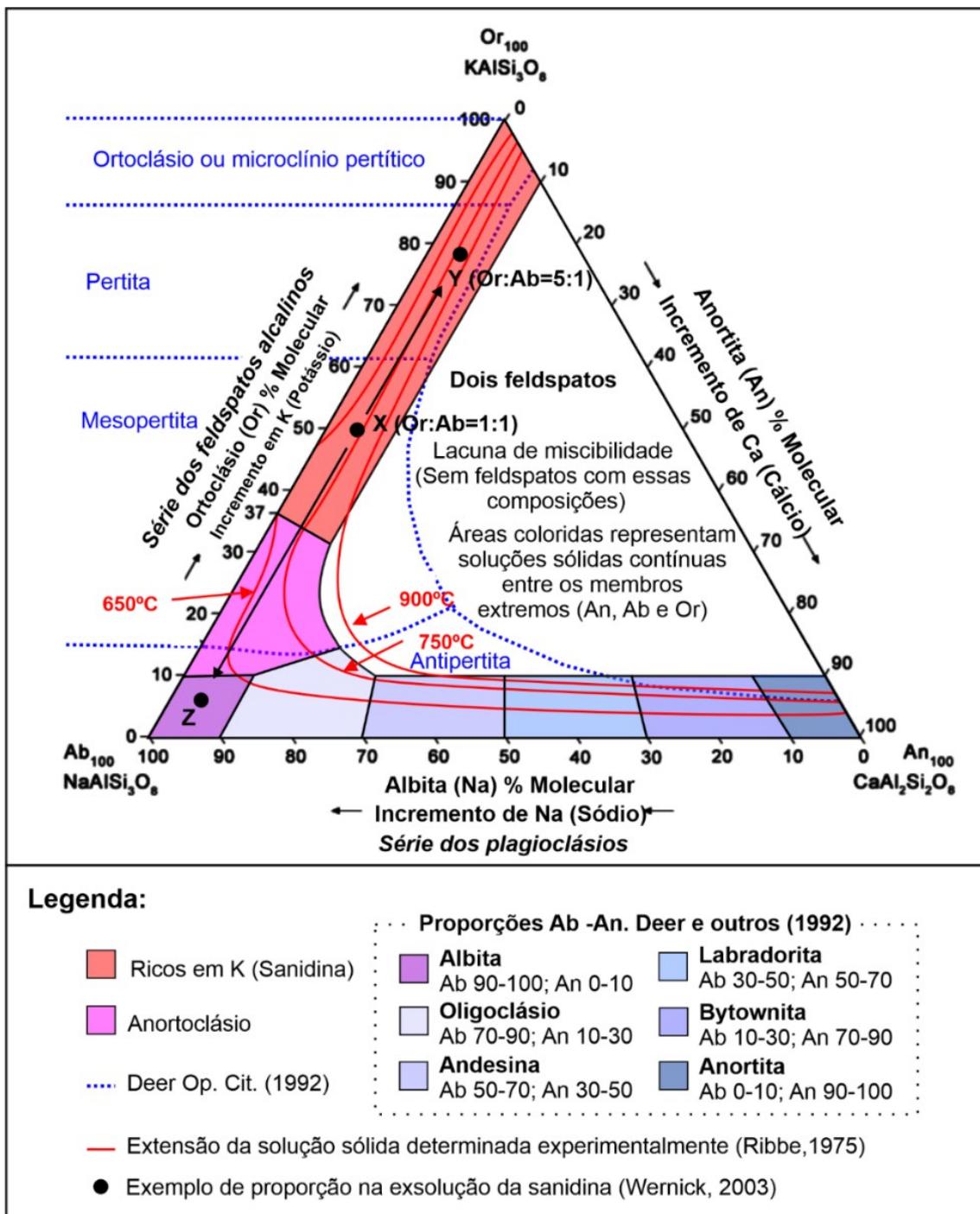


Figura 1 – Diagrama ternário de composição com base nos teores de Or, Ab e An.
Fonte: Adaptado de Deer, Howie e Zussman (2010), Ribbe (1975) e Wernick (2003).

As lacunas ocorrem em função da exsolução de uma solução sólida inicialmente homogênea por não se manter estável em determinadas condições de temperatura, se divide em dois ou mais minerais cristalinos diferentes sem acréscimo ou retirada de elementos no sistema (KLEIN e DUTROW, 2012).

Com a queda da temperatura durante a cristalização, considerando um cristal de sanidina a elevadas temperaturas (Ponto X - Figura 1), por exemplo, chega um momento em que a solução sólida não é mais estável e ocorre então uma

exsolução entre o teor de albina incorporado à altas temperaturas e o teor de albina dentro da estrutura do ortoclásio ou do microclínio à temperaturas mais baixas (Ponto Y - Figura 1). A composição do feldspato exsolvido é então o ponto Z na figura 1, rico em albina (WERNICK, Op.Cit.).

Feldspatos potássicos contendo albina exsolvida são denominados pertitas (Figura 3). Quando o feldspato potássico é muito rico em pertitas denomina-se mesopertita e; feldspatos potássicos exsolvidos em plagioclásios são denominados antipertita.

Além dessas classificações, uma pertita possui manchas ou lamelas irregulares de feldspato sódico dentro do feldspato alcalino potássico; no entanto, o termo pertita é frequentemente usado para descrever todos os tipos de exsolução nos feldspatos. A pertita que só pode ser observada com o auxílio de um microscópio é conhecida como micropertita (PANDIT, 2015).

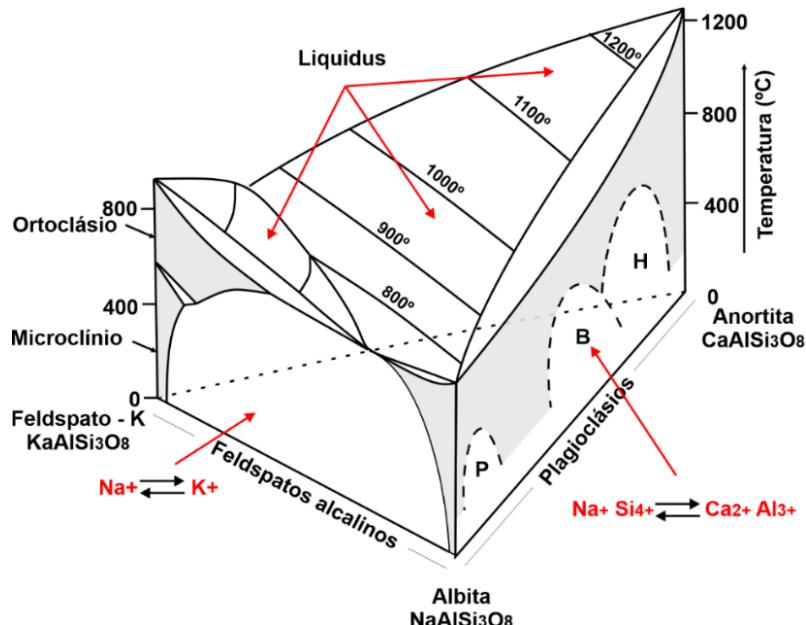


Figura 2 – Diagrama do sistema Feldspato potássico – albita - anortita. Legenda: Cinza- solução sólida; P – Peristerita; B – Intercrescimento de Boggild; H – Intercrescimento de Hutton Locher.

Fonte: Adaptado de Klein e Dutrow (2012).

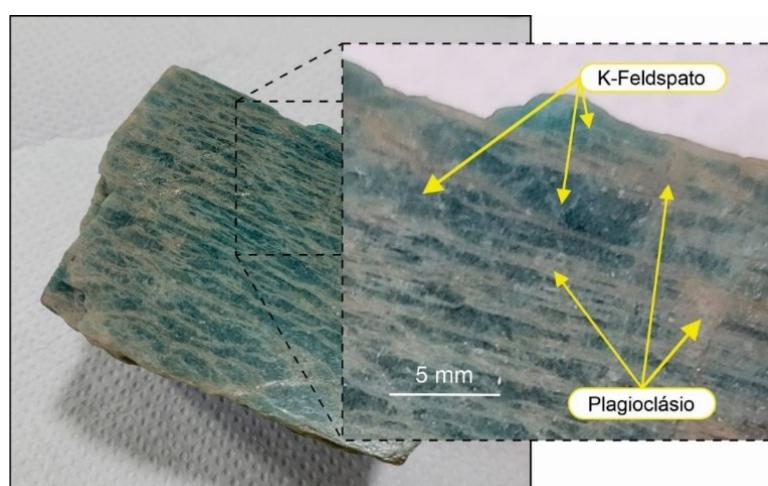


Figura 3 – Pertitas macroscópicas em feldspato potássico “amazonita”.
Fonte: Autores (2024).

Deer, Howie e Zussman (2010), classificam as pertitas em função do aspecto textural (Figura 4), mas alertam que nem todas as pertitas se originam da exsolução. Em pegmatitos graníticos, o feldspato potássico (microclínio pertítico) assim como o sódico, apresenta intercrescimentos grosseiros de quartzo com uma textura rúnica oriundos da cristalização simultânea, conhecido como textura gráfica (Figura 5). Xua et al. (2015) fornecem evidências do intercrescimento topotaxial de quartzo induzido pela rede cristalográfica do feldspato.

Nos plagioclásios, entre a albite e anortita ocorrem substituições entre Na e Ca em proporções (Figura 1) que caracterizam outros minerais e compõem a denominada série contínua dos plagioclásios. Segundo Sial e McReath (1984), os membros mais cárquicos se apresentam em rochas maficas e ultrabásicas. Já os membros mais sódicos, estão presentes em rochas felsicas.

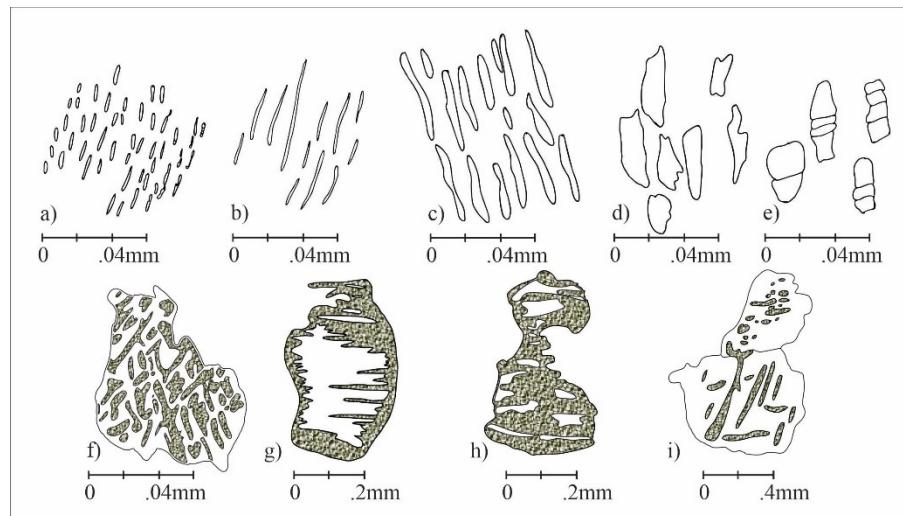


Figura 4 – Classificação textural para pertitas: a) filetes; b) vênulas; c) barras; d) gotículas; e) gotículas fracturadas; f) interligadas; g) interpenetradas; h) e i) de substituição.

Fonte: Adaptado de Deer, Howie e Zussman (2010).

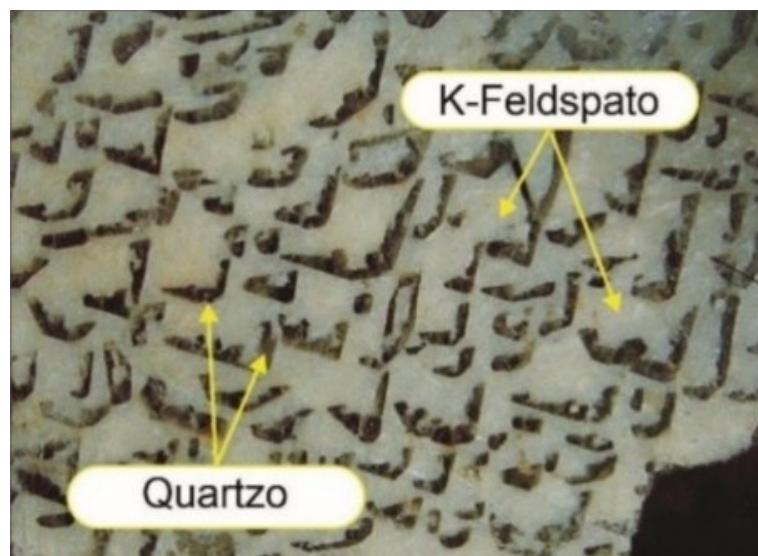


Figura 5 – Textura gráfica.
Fonte: Adaptado de MacKenzie et al. (1988).

Composições em termos dos óxidos de elementos maiores mostram que as estruturas dos plagioclásios admitem quantidades pequenas da molécula $KAlSi_3O_8$ (Feldspatos potássicos) e que também há possibilidade da incorporação de Fe^{3+} (SIAL e McREATH, 1984).

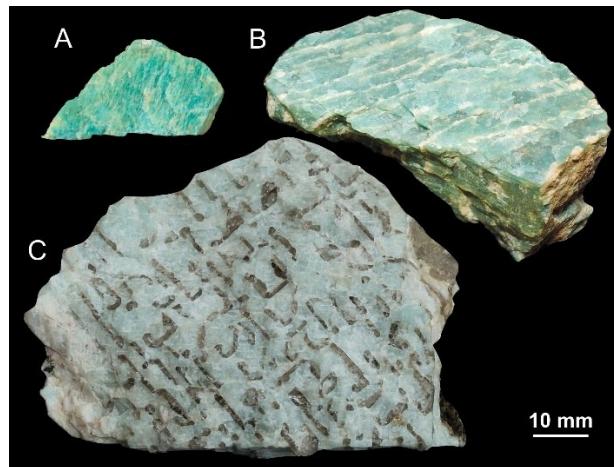


Figura 6 – Exemplos de intercrescimento em amazonita. Legenda: A – Vênulas pequenas (SEPPEL, 2015); B – Vênulas maiores (HELEBRANT, 2021); C – Gráfica: exsolução e crescimento topotaxial (BURIVAL, 2018).

Fonte: Autores (2024).

Os plagioclásios são, em maioria, cristais de baixa pressão, sendo os membros cálcicos menos estáveis que os sódicos e, portanto, apresentarão simetria mono- ou triclínica.

Um resumo das suas propriedades que permitirão a comparação destes com os feldspatos ditos alcalinos pode ser visto na figura 7.

5. Cristais de feldspato gemológicos

Anderson (2005) publicou que apenas a variedade pedra da lua era usada com frequência pela joalheria. Entretanto, muitas propriedades dos feldspatos passaram a ser observadas e apreciadas (efeitos ópticos) e uma série de variedades vêm sendo utilizadas na joalheria. Entre as mais conhecidas estão a pedra do sol, a pedra da lua e a labradorita.

Exemplares opacos, leitosos ou com cores muito saturadas são lapidados, em geral, nos formatos redondo ou elíptico, utilizando a técnica de lapidação em cabochão (READ, 2005).

As variedades podem ser incolores ou com tons de preto (pedra da lua preta), vermelho (pedra do sol), azulado (pedra da lua azul), verde (amazonita), amarelo (pedra da lua) e laranja (pedra do sol), como pode ser consultado na figura 7.

Nos feldspatos, a exsolução é um fenômeno comum e causa muitos dos efeitos ópticos encontrados. As lamelas podem variar em dimensões, espaçamento, direções e continuidade (Figuras 6A e 6B). A figura 6C, mostra que vários fenômenos podem ocorrer sobrepostos em um mesmo cristal.

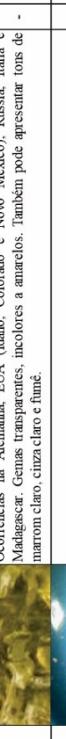
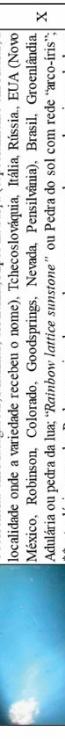
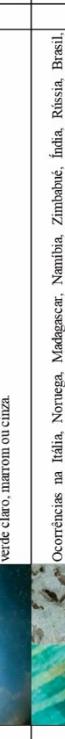
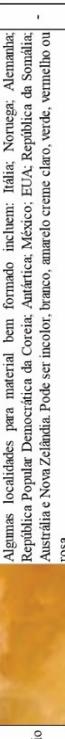
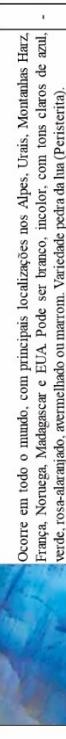
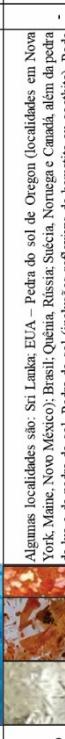
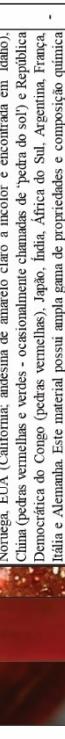
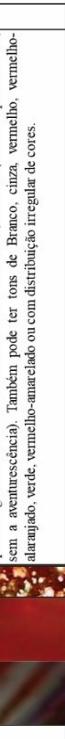
Mineral	Ilustrações	Variedades gemológicas, Localidades e cores possíveis reportadas	Dados ópticos cristalográficos e físicos							Dados ópticos cristalinos							
			ADU	MDCOR	IR	AVE	LAB	AST ^a	ACA	Clivagens	d	D	Shal	a	β	γ	
Sanidina		Ocorrências na Alemanha, EUA (Idaho, Colorado e Novo México), Rússia (Itália ^c e Madagáscar). Gemas transparentes, incolores a anacrelas. Também pode apresentar tons de marrom claro, cinza claro e laranja.	-	X	X	-	X*	X	-	Carlsbad.	{001} perfeita: (010) boa: (110) imperfeita	2,56- 2,62	(-)	1,518- 1,525	1,523- 1,520		
Orthoclorito		Ocorrências em Madagáscar, Mianmar, Sri Lanka, Alpes na Suíça (especialmente em Athlair, a localidade onde a variação recebe o nome), Tchecoslováquia, Itália, Rússia, EUA (Novo México, Robinson, Colorado, Goodspings, Nevada, Pensilvânia), Brasil, Grenelândia. Adularia ou pedra da luar, "Rainbow lattice sunstone" ou Pedra do sol com rede arco-íris ^c ; *ortoclorito anacrela. Pode ser incolores, champagne a amarelo, rosa, laranja, azul, cinza, verde claro a marrom ou cinza.	-	X	X	-	X*	X	-	X*	X	Carlsbad, Baveno e Marchbach.	{001} perfeita: (010) boa: (110) imperfeita	2,57	(-)	1,518	1,524
Microclínio		Ocorrências na Itália, Noruega, Madagáscar, Namíbia, Zimbábue, Índia, Rússia, Brasil, Austrália, Canadá e EUA. As amazônias ocorrem nos EUA, Canadá, Brasil, Índia, Quênia, Tanzânia, Madagáscar, Namíbia, África do Sul, Rússia, Afganistão e Austrália. Microclínio - verde é relatada em várias localidades do Brasil. Microclínio peritílico. Feldspato gráfico; Amazônia. Pode ser branco, amarelo claro, salmão ou verde.	-	X	X	-	X*	X	-	X*	X	Característica: Mocha em xadrez - Lei da albita, plano de macta {010} e Lei da periclinia, exo de macta {001} perfeita: (010) boa: (110) imperfeita	2,54- 2,57	(-)	1,522	1,526	
Autotoclosto		Algumas localidades para material bem formado incluem: Itália, Noruega, Alemanha, República Popular Democrática da Coreia, Autêntica, México, EUA, República da Somália, Austrália e Nova Zelândia. Pode ser incolor, branco, incolor, com tons claros de azul, rosa, verde, rosado, amarelo, avermelhado ou marrom. Variedade pedra da lua (Peristerita).	-	X	X	-	X*	X	-	X*	X	*{001} perfeita: (010) boa	2,58	(-)	1,519- 1,529	*1,524- 1,534	
Albita		Ocorre em todo o mundo, com principais localizações nos Alpes, Urais, Montanhas Hartz, França, Noruega, Madagáscar e EUA. Pode ser branco, incolor, com tons claros de azul, verde, rosado, amarelo, avermelhado ou marrom. Variedade pedra da lua (Peristerita).	-	X	X	-	X*	X	-	X*	X	Carlsbad, Baveno e Marchbach.	2,62	(+)	1,527	1,532	
Oligoclaásio		Algumas localidades são: Sri Lanka, EUA - Pedra do sol (localidades em Nova York, Maine, Novo México); Brasil; Quênia, Rússia, Suécia, Noruega e Canadá, além da pedra da lha e da pedra do sol (inclusões reflexivas de hematita ou goethita). Pode ocorrer em tons de branco, cinza, verde claro, azul, amarelo e marrom.	-	X	X	-	X*	X	-	X*	X	Carlsbad, Baveno e Marchbach.	2,65	(-)	1,533- 1,545	*1,536- 1,548	
Andesina		As localidades incluem a Grenelândia, a Cordilheira dos Andes (daí o nome Andesina), Noruega, EUA (California, antecâmara de anacrela a incolor em Idaho), China (pedras vermelhas e verdes - ocasionalmente chamadas de "pedra do sol") e República Democrática do Congo (pedras vermelhas), Japão, Índia, África do Sul, Argentina, França, Itália e Alemanha. Este material possui ampla gama de propriedades e composição química que abrange a fronteira andesina-labradorita. Pedra do sol: lavanda (similar a pedra do sol, sem a acentuação espectral). Também pode ter tons de Branco, cinza, vermelho, amarelo, azul, verde, vermelho-amarelo e com distribuição irregular de cores.	-	X	X	-	X*	X	-	X*	X	Polissintética {010}; Carlsbad, Baveno e Marchbach.	6-6,5	(-)	1,533- 1,545	*1,547- 1,563	
Labradorita		É encontrada no Canadá (Ilha Tabor, área Nain de Labrador), Madagáscar, Tanzânia, México, Rússia, Brasil e EUA (Oregon). Ucrânia, Rússia, Labradorita. Pedra do sol: "Rainbow Moonstone" ou pedra da luar "Arco-íris"; Pedra da lua negra. Olho de leão. Feldspato opalino; Olho de bicho. Espectroíta. Pode ser incolor, branco, acinzentado, amarelo fraco, cinza azulada ou esverdeada, muitas vezes mostrando labradorescência (normalmente azul e verde, mas pode ser amarelo, dourado, vermelho e toxo).	-	X	X	-	X*	X	-	X*	X	Carlsbad, Baveno e Marchbach.	2,69	(-)	1,556	1,559	
Bytownita		Localidades incluem Canadá, EUA (Oregon), México, Índia e África do Sul. É importante frisar que a variação compositonal pode ocorrer dentro de qualquer origem de plagioclorílico em cálculo, de modo que os intermediários podem variar de andesina, passando por labradorita e bytownita. Pedra do sol. Pode ocorrer em tons de branco, cinza, incolor ou pode ter tons claros de outras cores ou amarelo pastel claro.	-	-	-	-	-	-	-	X*	-	Carlsbad, Baveno e Marchbach.	2,71	(+)	*1,554- 1,565	*1,558- 1,569	
Autortita		Localidades incluem EUA, Itália, Finlândia, Suécia, Índia e Japão (crisais vermelhos transparentes muito ricos foram lapidados como gemas). As gemas são raras e normalmente coradas, apenas para colecionadores. Pode ocorrer em tons de branco, cinza, incolor ou avermelhado, pode apresentar tons claros de outras cores.	-	-	-	-	-	-	-	X*	-	Autortita {010}; Carlsbad, Baveno e Marchbach.	2,76	(-)	1,577	1,585	

Figura 7 – Variedades gemológicas do grupo dos feldspatos e suas propriedades.
Fonte: Compilado e traduzido de O'Donoghue (2006, tradução nossa) e Museu HE (2024).

6. Efeitos ópticos em gemas do grupo dos feldspatos

Os capítulos anteriores trataram da constituição dos minerais do grupo dos feldspatos, cujas composições se alteram conforme muda a temperatura de cristalização. As limitações destas reações evidenciam estruturas específicas fundamentais para o entendimento dos efeitos ópticos dos feldspatos (Figura 8).



Figura 8 – Substituição Isomórfica, Solução Sólida e Exsolução.
Fonte: O'Donoghue (2006, tradução nossa).

Manutchehr-Danai (2005) descreve gemas com efeitos ópticos como “gemas fenomenais” por apresentarem alguma ocorrência especial de fenômeno óptico que é observado ou se faz visível.

Gemas com efeitos ópticos são definidas e agrupadas em função da causa para os efeitos:

“Efeitos ópticos especiais causados pela interação da gema com a luz, podendo ser de três tipos: estruturais (jogo de cores, labradorescência, iridescência e adularescência), causados por inclusões (acatassolamento, asterismo e aventurescência) e mudança de cor (ABNT, 2016)”.

Destes, os que ocorrem nos feldspatos são mostrados na figura 07 e ao longo do texto.

Ao considerar a presença e orientação da(s) “estrutura(s)” no contexto da lapidação, o entendimento de como os efeitos ópticos se relacionam, sobretudo com a técnica do cabochão, é importante, pois alguns cristais podem desenvolver mais de um efeito óptico de forma simultânea.

No exemplo que segue, um mesmo cristal de feldspato potássico (Figura 9A) desenvolve tanto o acatassolamento (Figura 9B) quanto a adularescência da pedra da lua (Figura 9C) simplesmente pela variação do grau de convexidade do cabochão na lapidação; dois efeitos e uma mesma causa, a exsolução em finas lamelas de albita (Figura 9D).

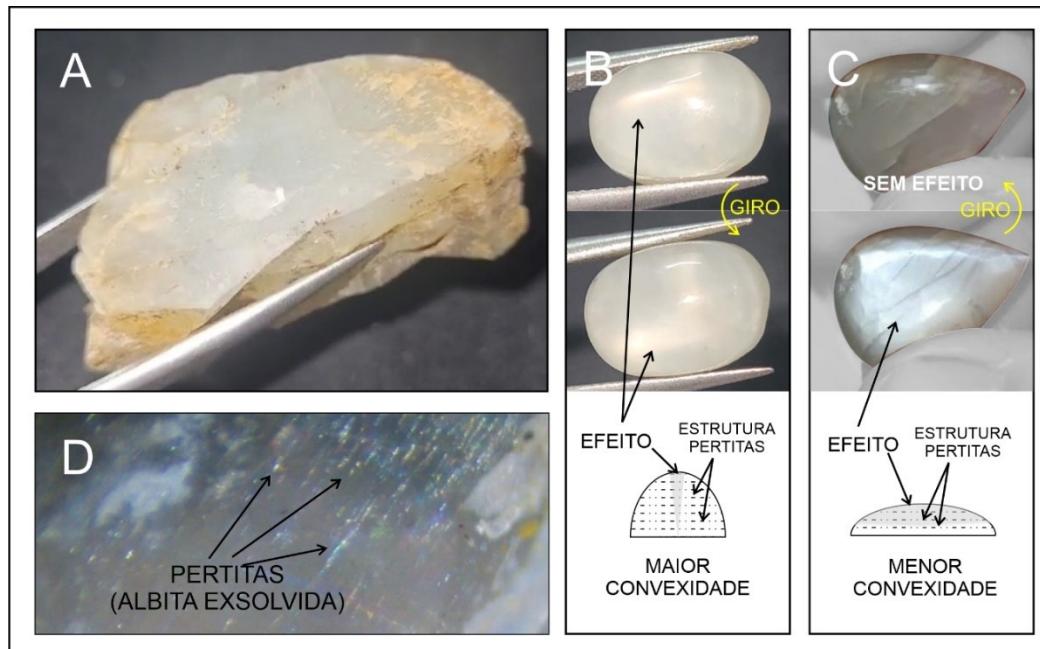


Figura 9 – Exemplo de mudança de efeito a partir da lapidação do cristal “A”. Legenda: A – Cristal em estado bruto; B – Cabochão simples com base elíptica, com perfil alto; C - Cabochão duplo com formato de gota, com perfil baixo; D – Causa dos efeitos (PACÍFICO e BOLONINI, 2023), em luz transmitida, ampliação 2000x.

Fonte: Autores (2024).

É importante lembrar que as lamelas exsolvidas variam em tamanho e distribuição, afetando a definição dos efeitos ópticos nas gemas lapidadas e que a orientação adequada é crucial para evitar assimetrias (Figura 10).

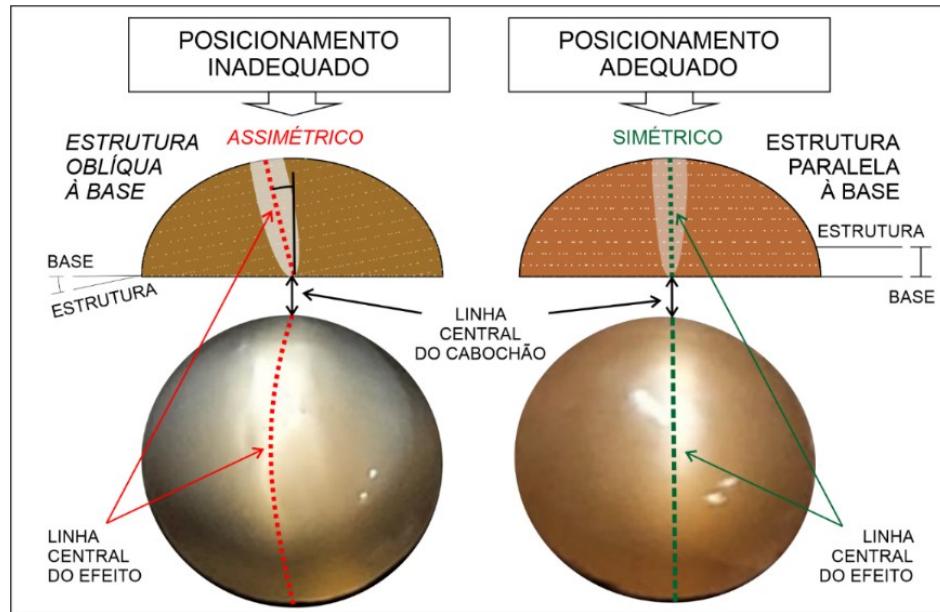


Figura 10 – Variedade de pedra da lua lapidada em cabochão, com olho de gato, no formato redondo.

Fonte: Autores (2024).

A pedra da lua pode refletir diferentes cores de luz (prata, azul, branco, cinza, marrom claro, entre outros) e esses reflexos foram atribuídos a adulária (RAO et al., 2013) e, portanto, o efeito ficou conhecido como adularescência. Na

figura 9C pode ser visualizada a adularescência prateada e, na figura 11, pode ser visualizada a adularescência azulada típica da pedra da lua.



Figura 11 – Exemplo de adularescência azulada.

Fonte: Autores (2024).

A adularescência, é definida como:

“Fenômeno óptico caracterizado por um brilho branco ou azulado, difuso e flutuante, observado em uma variedade de feldspato (pedra da lua/adulária) (ABNT, 2016)”.

O termo “adularescência” não se aplica apenas ao feldspato adulária (variedade de ortoclásio), pois outros feldspatos também desenvolvem esse efeito óptico e diversos estudos mostram que as variedades de pedra da lua são compostas por uma mistura de pertitas se apresentando em vários formatos (GIA, 2024b; IAMSUPA et al., 2016; RAO et al., 2013; RAMAN et al., 1950; STONE-SUNDBERG, 2019; TATEKAWA, 1972). No entanto, cristais de ortoclásio da Província de Dong Nai no Vietnã, que também desenvolvem tanto a adularescência quanto o acatassolamento, foram descritos, por Le (2021), com efeitos ópticos causados por inclusões fluidas, mostrando que as pesquisas relacionadas às causas para os efeitos adularescência e acatassolamento em cristais de feldspato precisam continuar avançando para que, além das origens dos efeitos, cada vez mais ferramentas possam ser utilizadas para facilitar a sua correta orientação durante a lapidação.

Estudos sobre cristais de berilo lapidados, mostraram que a orientação dos canalículos estruturais afeta os efeitos ópticos, como acatassolamento e asterismo. A posição do centro da estrela no asterismo e das faixas no acatassolamento variava conforme o giro do cabochão (SCHMETZER, KIEFERT, HÄNNI, 2004). Logo, a orientação correta da estrutura em relação à base é crucial para obter o efeito desejado.

O acatassolamento e o asterismo são definidos como:

“Acatassolamento ou olho de gato - Efeito óptico caracterizado por uma faixa estreita e brilhante na superfície de uma gema lapidada em cabochão, causada pela reflexão da luz em inclusões paralelas. (ABNT, 2016)”

“Asterismo - Efeito óptico caracterizado por duas ou mais faixas estreitas brilhantes que se cruzam na superfície de uma gema lapidada em cabochão, causadas pela reflexão da luz em inclusões dispostas paralelamente a duas ou mais orientações cristalográficas. (ABNT, Op. Cit.)”

Nesses casos, os efeitos são dependentes da presença de alguma estrutura ou padrão de repetição e orientação em uma ou mais direções cristalográficas, pois estas, aliadas à forma dada pela lapidação, geram os diferentes efeitos ópticos. A figura 12 traz, uma relação entre a quantidade de estruturas presentes, ângulos e posições em relação às formas e aos planos das bases dos cabochões.

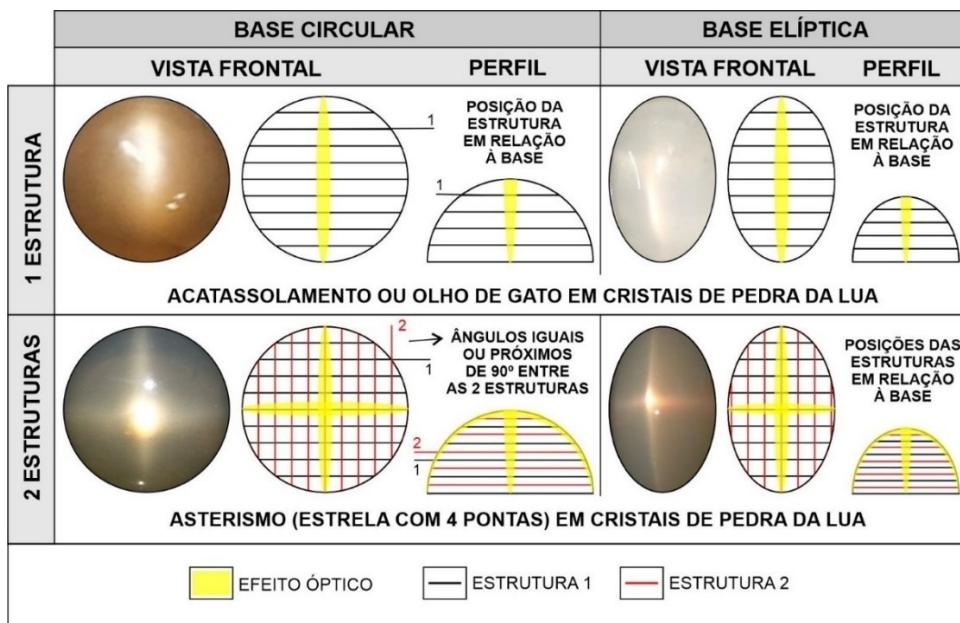


Figura 12 – Exemplos de orientação de estruturas em materiais gemológicos.

Fonte: Autores (2024).

O perfil de corte do cabochão representa a convexidade apresentada por ele e, no caso das gemas com efeitos ópticos, a decisão de cortar o cabochão com perfil alto ou baixo, pode inviabilizar a produção do efeito óptico pretendido (Figuras 12, 13 e 14).

Ao considerar a lapidação, é importante ter ciência de que existem, portanto, efeitos ópticos que são dependentes da estruturação ou organização interna de inclusões, lamelas de exsolução, entre outras descontinuidades físicas (Figura 13).

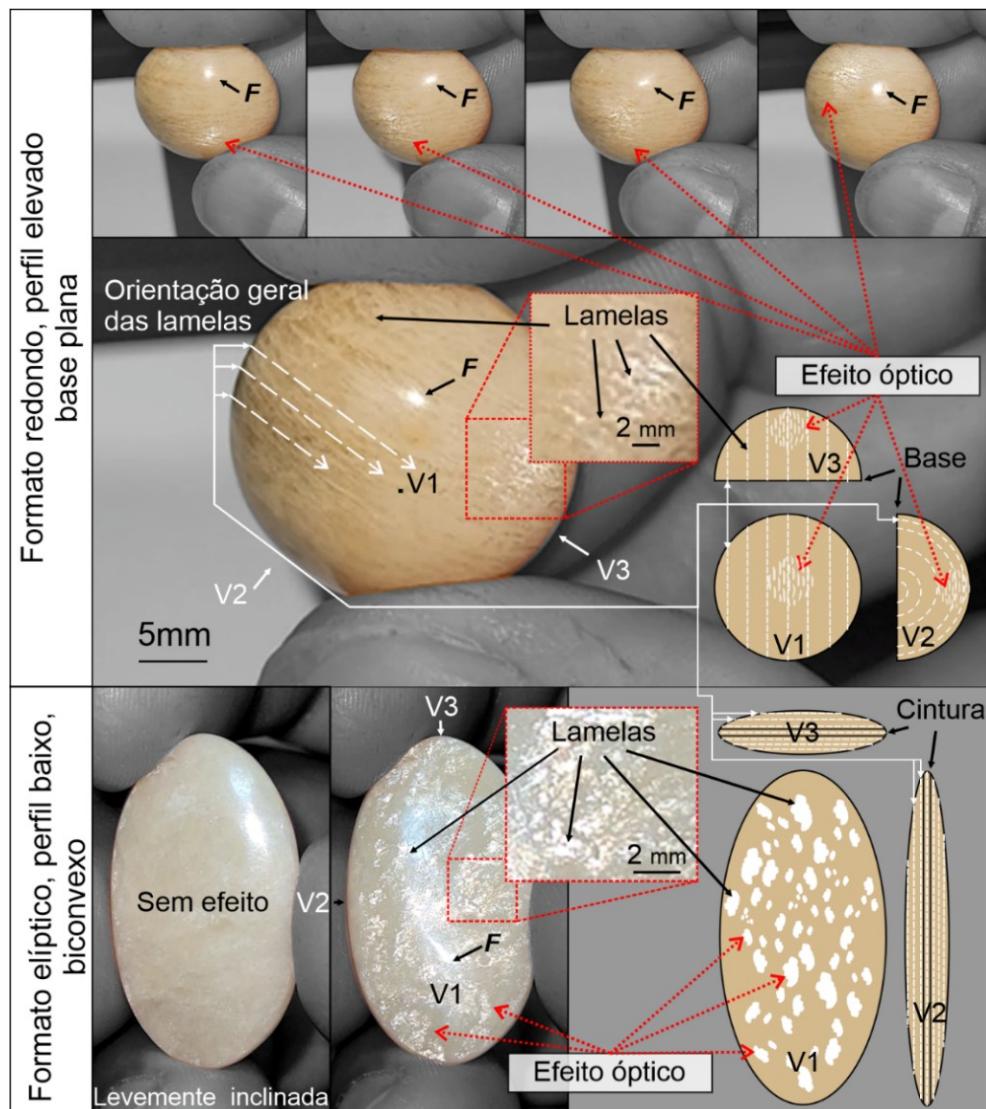


Figura 13 – Influência da orientação da estrutura e da forma do corte no efeito óptico. Legenda: F - Flash da câmera; V – Vista; Linhas tracejadas representam lamelas organizadas em planos.

Fonte: Autores (2024).

Ainda em relação à pedra da lua e sua adularescência, é importante saber que a chamada pedra da lua “arco-íris” não deve ser confundida com as pedras da lua compostas por feldspato potássico e albite exsolveda, pois é, na verdade, labradorita transparente, com brilho em uma variedade de cores iridescentes (GIA, 2024b; JOHNSON e KOIVULA, 1997).

A labradorita é conhecida por suas cores vibrantes (Figura 17) e o efeito óptico causador dessas cores variadas, denominado labradorescência, só ocorre na labradorita e é definido como:

“Efeito óptico de reflexão e interferência da luz, visto em determinadas labradoritas, produzindo cores visíveis apenas em uma dada direção de observação ABNT (2016)”.

Read (2005) descreve a labradorescência com uma forma particular de iridescência devida a finos flocos de feldspato resultantes da geminação lamelar.

Estudos mostram que as estruturas responsáveis pela labradorescência estão relacionadas a região de intercrescimento Bøggild (JIN e XU, 2017a e 2017b; JIN et al., 2021; KALNING et al., 1997) formando uma estrutura onde duas geminações (albita e periclinia) se interceptam ortogonalmente e; intercalada com as geminações da albite ocorre uma matriz com alternância entre lamelas ricas e pobres em Ca, com diferentes espessuras, paralela ao plano da

labradorescência, ou seja, é responsável por sua geração (GOTZ, KLEEB, KOLB, 2022). Logo, para que o efeito seja maximizado se faz necessária a orientação correta dos planos dessa estrutura em relação à sua base (Figura 14).

Ao comparar a figura 14C com a figura 14D nota-se que o desenvolvimento do efeito óptico se dá em superfícies planas ou convexas, mas é necessário observar a labradorescência na amostra bruta, imaginar/projetar um plano aproximado para essa superfície e produzir a base do cabochão paralela a ela para que o efeito seja maximizado (Figura 14E).

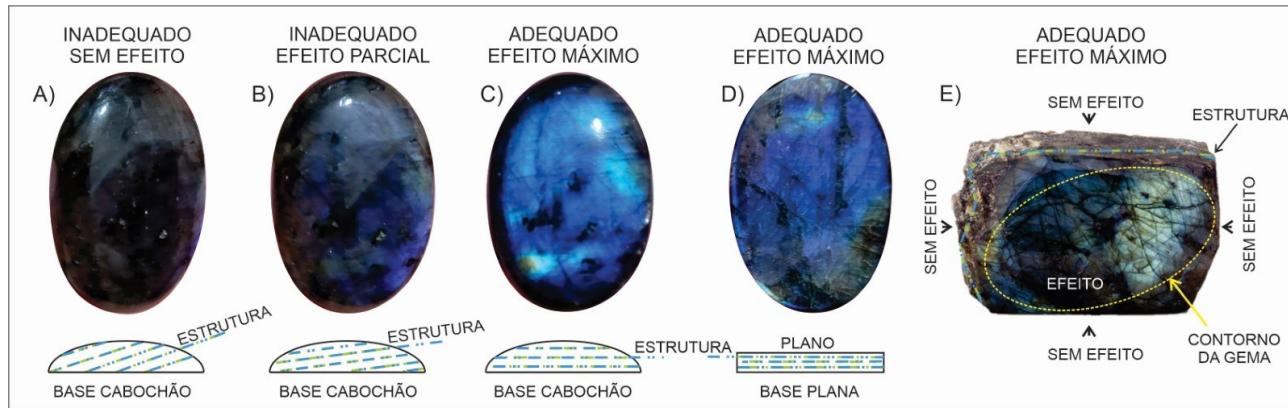


Figura 14 – Posicionamento dos planos da labradorescência na lapidação. Legenda: A) Estrutura oblíqua, ângulo alto; B) Estrutura levemente oblíqua; C e D) Estrutura paralela à base. A, B e C topo convexo e D topo plano.

Fonte: A, B, C e D – Autores (2024); E - Adaptada de HINKLEY (2012).

A labradorescência só ocorre em cristais de labradorita, mas nem toda labradorita apresenta o efeito. Cristais com qualidade gemológica do Oregon, por exemplo, são apreciados pelas cores vermelha, laranja e verde, bem como pelo fenômeno da aventurescência que segundo Koivula (2016), é causado por plaquetas de exsolução de cobre, normalmente, uma cor amarelo-esverdeada.

A aventurescência é definida como:

“Efeito óptico, observado ao girar a gema, caracterizado por reflexos brilhantes ou fortemente coloridos, oriundos de minúsculas inclusões em forma de plaquetas ou flocos. ABNT (2016)”.

A pedra do sol (Figura 15) é uma variedade onde inclusões de hematita ou goethita produzem uma refletância especular. O termo foi originalmente aplicado a cristais de oligoclásio cuja interferência da luz nessas inclusões resultava em cores verdes ou azuis nos cristais. Com o tempo, foram descobertos cristais de plagioclásio com aventurescência e outras inclusões, além de hematita e goethita. Mesmo assim, todos os feldspatos com aventurescência passaram a ser chamados de pedra do sol (READ, 2005).

Essas gemas possuem variedades tanto de cristais de feldspatos potássicos quanto plagioclásios e, portanto, o nome se refere à aparência da gema e não à sua composição química (GIA, 2024a).

Dada a variabilidade das fontes dos cristais, existem diversas características e propriedades para a pedra do sol e nem todas as pedras do sol apresentam aventurescência.



Figura 15 – Pedra do sol (aventurescência). Legenda: Esquerda, gema com 10 mm de eixo maior e; Direita, outro exemplar com aventurescência com plaquetas de hematita.

Fonte: Esquerda, autores (2024); Direita, Milshina (2021).

Hofmeister e Rossman (1985) informam que os tamanhos das plaquetas nas inclusões, depende do teor de Cu e da temperatura da sua exsolução. Abduriyim e Pogson (2011) apontam que plaquetas de cobre são mais conhecidas nas labradoritas do Oregon, tendendo a ser maiores que as das amostras tibetanas.

Outro efeito muito comum em estruturas ou descontinuidades como fraturas ou nos chamados filmes finos no interior e na superfície de materiais gemológicos, podendo ocorrer em qualquer escala, é a iridescência (Figura 16).

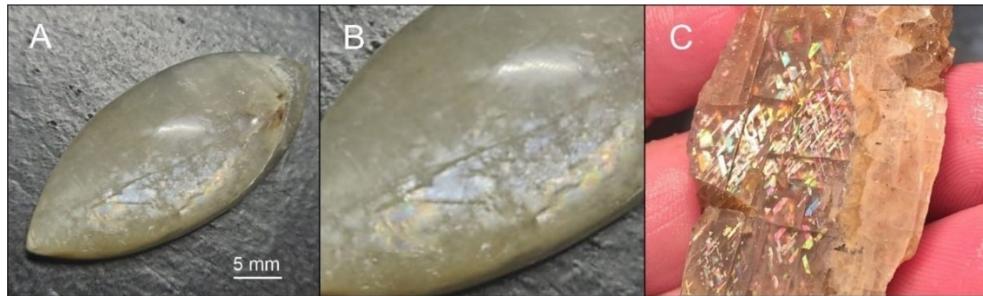


Figura 16 – Cabochão em formato navete: iridescência em planos de clivagem. A – Gema com 30 mm de eixo maior; B – Ampliação de A; C - Rede iridescente: pedra do sol.

Fonte: A e B, autores (2024); C - Wikimediacommons (2024).

A NBR -10630:2016 define a iridescência como:

“Efeito óptico caracterizado pela presença de cores semelhantes às do arco-íris, devido à reflexão e interferência da luz em camadas finas na superfície ou no interior da gema (ABNT, 2016)”.

Na figura 16C é possível visualizar um padrão em rede em uma pedra do sol “Rainbow Lattice Sunstone”; nome comercial dado ao ortoclásio que exibe iridescência a partir de plaquetas hexagonais de hematita em produzindo uma rede cruzada de cores, além de apresentar também a adularescência. Segundo Read (2005) e Stone-Sundberg (2019) o raro material gemológico é oriundo do norte da Austrália.

É mais um exemplo de interdependência entre a identificação e a orientação da estrutura no processo de lapidação, considerando que Branstrator (2023) afirma que os cristais que apresentam esse padrão em rede iridescente também apresentam, por vezes, características da pedra da lua; a adularescência. O autor complementa que as inclusões de magnetita (as iridescentes, alteradas e as não alteradas, são pretas com brilho metálico) formam lâminas finas em diferentes níveis de planos e se orientam para criar o padrão de rede característico; e que a hematita, é vista em pequenas plaquetas (amarelo a laranja) com formatos hexagonais, com orientação geral em planos paralelos provocando a aventurescência. Logo, os cristais podem apresentar aventurescência, iridescência e adularescência simultaneamente.

Certos materiais gemológicos, no entanto, só apresentam efeito óptico quando a fonte de iluminação ou estímulo luminoso tem seu padrão de cor modificado (referências de padrões de iluminantes para os comprimentos de onde são D65 – Luz do dia e A – Luz incandescente: CIE, 2024), pois possuem efeitos ópticos que não dependem da presença do ordenamento de estruturas como as citadas anteriormente para ocorrer.

Tal efeito é conhecido como fenômeno de mudança de cor ou “Efeito Alexandrita”, por ser característica do referido mineral. Entretanto, outros materiais gemológicos podem apresentar tal efeito como, por exemplo, monazita, fluorita, granadas, coríndon, espinélio e cianita (GUBELIN e SCHMETZER, 1982) e zircão (KRZEMNICKI, ZHOU, MAIZLAN, 2013).

A NBR -10630:2016 define o efeito de mudança de cor como:

“Efeito óptico percebido em determinadas gemas que mudam de cor quando observadas sob diferentes tipos de iluminação (luz incandescente e luz natural ou equivalente) ABNT (2016)”.

Schmetzer, Bank e Glibelin, (1980) apontam o V^{3+} e o Cr^{3+} como favorecedores das mudanças de cor com a mudança do estímulo luminoso no coríndon e alguns tipos de granadas piropo-espessartinas e Farrell e Newnham (1965) o Cr^{3+} em cristais de crisoberilo/alexandrita.

Krzemnicki (2004) descreveu labradoritas leitosas e verdes da República Democrática do Congo que ficavam vermelhas sob luz incandescente. O'Donoghue (2006) citou cristais de andesina/labradorita da República Democrática do Congo (mostrando cores alternadas dependendo da fonte de luz), da China (Material verde $An_{44}Ab_{54}Or_2$, mostra efeito semelhante tornando-se vermelho sub luz natural e perdendo a transparência sob luz incandescente) e do Oregon, USA, na mina Ponderosa, com a mudança de cor relacionada ao efeito que grandes coloides de cobre vistas em luz incidente. Na figura 17 pode ser visto um exemplo desse efeito óptico em feldspatos.



Figura 17 – Gemas G1 e G2 (inclusões visíveis) de feldspato potássico apresentando mudança de cor. Legenda: LB - Luz branca; LI - Luz incandescente.

Fonte: Autores (2024).

7. Considerações finais

A pesquisa buscou compilar publicações científicamente relevantes para explicar os fenômenos ópticos que ocorrem nos cristais de feldspato gemológicos e auxiliar na sua identificação, além de fornecer orientações para maximizar o potencial da gema na lapidação com o posicionamento adequado das estruturas. Os feldspatos são classificados em feldspatos alcalinos e plagioclásios com base em variações de composição (Or, Ab, An). Variedades de gemas notáveis como pedra da lua, labradorita e pedra do sol, conhecidas por seus efeitos ópticos (adularescência, labradorescência, aventurescência), foram discutidas, enfatizando o papel do intercrescimento mineral para seu desenvolvimento. As principais descobertas incluem a importância das características estruturais e da orientação correta do cristal durante o corte para obter os efeitos ópticos desejados. Conclui-se que a pesquisa contínua sobre as propriedades ópticas do feldspato pode refinar ainda mais as técnicas de processamento de gemas e melhorar a compreensão dos fenômenos mineralógicos.

8. Agradecimentos

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” UNESP e ao Prof. Dr. Antônio Misson Godoy. À Universidade Federal do Espírito Santo – UFES.

Referências

- ABDURIYIM, A.; POGSON, R. Separation of Natural Red Andesine from Tibet and Copper-Diffused Red Andesine from China. **News from Research**. Gemological Institute of America, 14p., 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10630: Gemas de cor — Terminologia e classificação**. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, 2016.
- ANDERSON, B. W. **A identificação das gemas** (9^a Ed). Traduzido por Rui Ribeiro Franco e Mário Del Rey. Rio de Janeiro, Brasil. Ao livro técnico, 2005. 460 p.
- BRANSTRATOR, B. Rainbow Lattice: The Feldspar with Two Phenomena. Gemworld International. Gemguide. **Gem Focus**, n. 1, 2p., 2023.
- BURIVAL, Zbynek. Graphic amazonite from Høydal, Norway. Disponível em: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Graphic_amazonite_from_H%C3%B8ydalen,_Norway.jpg. Acesso em: 29/06/2024. Licença Creative Commons: https://en.wikipedia.org/wiki/en:Creative_Commons.
- INTERNATIONAL COMMISSION OF ILLUMINATION. **Cielab Color Space**. Disponível em: <https://cie.co.at/publications/colorimetry-part-2-cie-standard-illuminants-0>. Acesso em: 29/06/2024.
- DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas: uma introdução** (4^a Ed.). Lisboa, Portugal. Fundação Calouste Gulbenkian. 727 p. 2010.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral**. Organizadores: Leandro Galinari Joaquim, Rui Fernandes P. Júnior. Coordenadores: Thiers Muniz Lima, Carlos Augusto Ramos Neves. Brasília – DF, Brasil: DNPM, 2016. 135 p.
- FARRELL, E. F.; NEWNHAM, R. E. Crystal-field spectra of chrysoberyl, alexandrite, peridot, and sinhalite. **American**

Mineralogist, v. 50, 1972-81, 1965.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA. **Is rainbow moonstone really moonstone?**. Frequently Asked Questions. 2024a. Disponível em: <https://www.gia.edu/gia-faq-rainbow-moonstone-really-moonstone#:~:text=Rainbow%20moonstone%20is%20transparent%20labradorite,prefer%20it%20to%20traditional%20moonstone>. Acesso em: 29/06/2024.

GEMOLOGICAL INSTITUTE OF AMERICA. **Moonstone description.** 2024b. Disponível em: <https://www.gia.edu/moonstone-description>. Acesso em: 29/06/2024.

GÖTZ, E.; KLEEBE, H.; KOLB, U. The hierarchical internal structure of labradorite. **European Journal of Mineralogy**, v. 34, 393–410, 2022.

GUBELIN, E.; SCHMETZER, K. Gemstones with Alexandrite Effect. **Gems & Gemology**, v. 18, n. 4, 1982.

HELEBRANT, Jan. IMGP2024026. 2021. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IMGP2024026_\(51264028859\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IMGP2024026_(51264028859).jpg). Acesso em: 29/06/2024. Licença Creative Commons: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/deed.en>.

HOFMEISTER, A. M.; ROSSMAN, G. R. Exsolution of Metallic Copper from Lake County Labradorite. **Geology**, v. 13, n. 9, 644–47, 1985.

IAMSUPA, N.; SRITHAI, B.; BOONSOONG, A. Gemological Characteristics of Moonstone from Sri Lanka. In: The 5th International Gem & Jewelry Conference, Pattaya, Thailand, 2016.

JIN, S.; XU, H. SOLVED: The enigma of labradorite feldspar with incommensurately modulated structure. **American Mineralogist**, v. 102, 21–32, 2017.

JIN, S.; XU, H. Study on structure variations of incommensurately modulated labradorite feldspars with different cooling histories. **American Mineralogist**, v. 102, 1328–1339, 2017.

JIN, S.; XU, H.; LEE, S. Revisiting the Bøggild Intergrowth in Iridescent Labradorite Feldspars: Ordering, Kinetics, and Phase Equilibria. **Minerals**, v. 11, n. 727, 2021.

JOHNSON, M. L.; KOIVULA, J. I. Blue and multicolor-sheen feldspar from India. **Gems & Gemology**, Gem News, v. 33, n. 2, p. 145, 1997.

KALNING, M. et al. High-Order Supersatellite Reflections in Labradorite. A Synchrotron X-ray Diffraction Study. **Acta Crystallographica**. A53, 632-642. 1997.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de Ciências dos Minerais** (23^a Ed.). Tradução e revisão técnica: Rualdo Menegat. Porto Alegre, Brasil. Editora Bookman, 2012. 716 p.

KOIVULA, J. I. Olivine in Oregon Labradorite. Micro-World. **Gems & Gemology**, v. 52, n. 1, p.77, 2016.

KRZEMNICKI, M. S. Red and green labradorite feldspar from Congo. **Journal of Gemology**. Gemmological Association and Gem Testing Laboratory of Great Britain, v. 29, n. 1, 15-23, 2009.

KRZEMNICKI, M. S.; ZHOU, W.; MAIZLAN, J. Colour change effects in gemstones: Causes and perception. In: 33rd International Gemmological Conference, Hanoi, Vietnam, 110-113p., 2013.

LE, N. N. Chatoyant Anorthoclase Feldspar from Dong Nai Province, Vietnam. **The Journal of Gemmology**, v. 37, n. 7, 672-673, 2021.

MACKENZIE, W. S.; DONALDSON, C. H.; GUILFORD, C. **Atlas of igneous rocks and their textures**. London, United Kingdom. Longman Scientific & Technical, 1988. 148p.

MANUTCHEHR-DANAI, M. **Dictionary of gems and gemology** (2nd Ed.) New York, USA. Springer, 2005. 889p.

MILSHINA, Masha. Sun and moon stone. feldspar, combining the "solar" and "moon" effect. 2021. Disponível em:

- https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Sun_and_moon_stone_02.jpg. Acesso em: 29/06/2024. Licença Creative Commons: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.
- MUSEU HE. Museu de minerais, minérios e rochas Heinz Ebert. Banco de dados. Disponível em: <https://museuhe.com.br/banco-de-dados/>. Acesso em: 29/08/2024.
- O'DONOOGHUE, M. **Gems. Their sources, descriptions and identification.** Oxford, UK. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2006. 937p.
- PACÍFICO, Jennifer Miguel; BOLONINI, Thiago Motta. Análise do potencial para desenvolvimento de efeitos ópticos na lapidação de cristais de feldspato da região de Santa Teresa-ES. In: BARBOSA, Milson dos Santos; DA SILVA Rafael Leal; MELLO, Roger Goulart. **Práticas e pesquisas aplicadas em ciências exatas**, v. 3, Rio de Janeiro: e-Publicar, 2023. 243-262p.
- PANDIT, D. Geochemistry of Feldspar Intergrowth Microtextures from Paleoproterozoic Granitoids in Central India: Implications to Exsolution Processes in Granitic System. **Journal Geological Society of India**, v. 85, 163-182, 2015.
- RAMAN, C. V. JAYARAMAN, A.; SRINIVASAN, T. K. The structure and optical behaviour of the Ceylon moonstones. **Proc. Indian Acad. Sci. (Math. Sci.)**, v. 32, 123-140p., 1950.
- RAO, R. V. et al, S. Trace elemental analysis of Indian natural moonstone gems by PIXE and XRD techniques. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 82, 211–222, 2013.
- READ, P. G. **Gemmology**. (3rd Ed.) Oxford, Inglaterra. Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. 341p.
- RIBBE, P. H. **Feldspar Mineralogy. Short Course Notes**. v. 2. Washington, USA. Mineralogical Society of America, 207p., 1975.
- SCHMETZER, K.; KIEFERT, L.; HÄNNI, H. A. Asterism in aquamarine, beryl, and emerald. **The Journal of Gemmology**, v. 29, n. 2, 2004.
- SCHMETZER, K.; BANK, H.; GLIBELIN, E. The alexandrite effect in minerals: Chrysoberyl, garnet, corundum, fluorite. **Neues Jahrbuch für Mineralogie Abhandlungen**, v. 138, 147-164, 1980.
- SEPPEL, Mai. Estonian Museum of Natural History Specimen No 202801 photo. 2015. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Estonian_Museum_of_Natural_History_Specimen_No_202801_photo_\(g_28_g28-393-3_1.jpg\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Estonian_Museum_of_Natural_History_Specimen_No_202801_photo_(g_28_g28-393-3_1.jpg).jpg). Acesso em: 29/06/2024. Licença Creative Commons: https://en.wikipedia.org/wiki/en:Creative_Commons.
- SIAL, A. N.; MCREATH, I. **Petrologia ígnea. Os fundamentos e as ferramentas de estudo.** Salvador, Brasil. Editoras SBG; CNPq; Bureau, 1984. 181p.
- STONE-SUNDBERG, J. Rainbow Lattice from Austrália. Gem News International, **Gems & Gemology**, v. LV, 131-132, 2019.
- TATEKAWA, M.; KANEZAKI, S.; NAKANO, S. On the perthitic structure of moonstones (II) High temperature form of moonstone. **Mineralogical Journal**, v. 7, n. 1, 9-28, 1972.
- HINKLEY, Mary. UCL Mathematical & Physical Sciences. Labradorite (UCL Geology Collection). 2012. Disponível em: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Labradorite_\(UCL_Geology_Collections\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Labradorite_(UCL_Geology_Collections).jpg). Acesso em: 29/06/2024. Licença Creative Commons: <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>.
- VLACH, Silvio Roberto Farias. **A classe dos tectossilicatos: guia geral da teoria e exercício.** Geologia USP. Série Didática, v. 1, p. 1-49, 2002.
- WERNICK, E. **Rochas magmáticas conceitos fundamentais e classificação modal, química, termodinâmica e tectônica.** Rio Claro – SP, Brasil. Editora UNESP, 2004. 656p.
- WIKIMEDIACOMMONS. Rainbow Lattice Sunstone rough. Disponível em:

https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rainbow_Lattice_Sunstone_rough.jpg. Acesso em: 29/06/2024. Licença Creative Commons: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>.

XU, H.; ZHANG, J.; YU, T.; RIVERS, M. L.; WANG, Y.; ZHAO, S. Crystallographic evidence for simultaneous growth in graphic granite. **Gondwana Research**, v.27, n. 4, p. 1550-1559, 2015.