

Tratamento térmico aplicado à água-marinha: implicações gemológicas

Dias, M. C. L.^{1*}; Depianti, J. B.¹; Bittencourt, V. O.¹; Vassalo, G. A.¹; Figueiredo, K. V. A.¹; Ferreira Júnior, P. D.¹; Santos, T. L.¹; Oliveira, G. R.¹.

¹ Departamento de Gemologia, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES, Brasil.

E-mail: maria.l.dias@edu.ufes.br

Resumo

Este trabalho teve como objetivo analisar o tratamento térmico de amostras de água-marinha em diferentes temperaturas, visando a melhoria da cor e agregação de valor. Utilizamos diferentes temperaturas para avaliar seus efeitos sobre a cor e a saturação das gemas. Tratamos amostras esverdeadas e amareladas de água-marinha em aquecimento controlado, em forno, a temperaturas variando de 300 °C a 500 °C, com o objetivo de atingir uma tonalidade azul em todas as amostras. Os resultados mostraram que o aquecimento a 425 °C por um período de 2 horas foi o mais eficaz na intensificação do tom azul das amostras de água marinha, sem causar fraturas e outros danos às gemas. Realizamos análises UV-Vis-NIR (ultravioleta-visível-infravermelho próximo) com o objetivo de observar possíveis diferenças nos espectros das amostras tratadas e não tratadas termicamente, mas não observamos diferenças significativas nos espectros. Observamos que, independentemente da temperatura, o tratamento térmico não é capaz de modificar a saturação da gema, visto que uma gema esverdeada ou amarelada, após o tratamento, torna-se azul, mas mantém a saturação vista anteriormente em seu estado natural, seja ela pálida ou intensa. Concluímos que o tratamento térmico é uma técnica eficiente para aprimorar as propriedades gemológicas da água-marinha, podendo aumentar seu valor comercial no mercado de joias, gemas e afins.

Palavras Chave: Tratamento, Aquecimento, Água-Marinha, Cor, Valorização, Gema.

Abstract

This study aimed to analyze the heat treatment of aquamarine samples at different temperatures, aiming at improving their color and adding value. We used different temperatures to evaluate their effects on the color and saturation of the gemstones. We treated greenish and yellowish aquamarine samples in a controlled heating oven at temperatures ranging from 300 °C to 500 °C, with the aim of achieving a blue hue in all samples. The results showed that heating at 425 °C for a period of 2 hours was the most effective in intensifying the blue hue of the aquamarine samples, without causing fractures and other damage to the gemstones. We performed UV-Vis-NIR (ultraviolet-visible-near infrared) analyses in order to observe possible differences in the spectra of the heat-treated and non-heat-treated samples, but we did not observe significant differences in the spectra. We observed that, regardless of the temperature, heat treatment is not capable of modifying the saturation of the gemstone, since a greenish or yellowish gemstone, after treatment, becomes blue, but maintains the saturation previously seen in its natural state, whether pale or intense. We conclude that heat treatment is an efficient technique for improving the gemological properties of aquamarine, and can increase its commercial value in the jewelry, gemstone and related markets.

Keywords: Treatment, Heating, Aquamarine, Color, Enhancement, Gemstone.

1. Introdução

O tratamento térmico de gemas é amplamente utilizado na gemologia para melhorar a aparência e valor comercial das gemas (McClure et al. 2010). No caso da água-marinha, esse processo é aplicado principalmente para intensificar sua cor azul, eliminando tonalidades esverdeadas ou amareladas. Estima-se que mais de 90% das amostras de água-marinha e morganita (variedade rosa do berilo) vendidas no mercado global passam por tratamento térmico (Sabioni & Ferreira, 1996).

A água-marinha é uma variedade pertencente ao grupo do berilo com composição química $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$, se cristaliza segundo a simetria P6/mcc. A estrutura do berilo consiste em camadas de anéis de Si_6O_{18} conectados ao Al^{3+} nos sítios octaédricos e ao Be^{2+} nos sítios tetraédricos. As camadas formadas pelos anéis de Si_6O_{18} encontram-se empilhadas ao longo do eixo C criando canais que podem ser preenchidos por íons alcalinos, água, dióxido de carbono e Fe^{2+} (Figura 1) (Deer et al., 1997).

O berilo é um mineral alocromático, o que significa que se não possui impurezas em sua composição, ele é incolor (D'Azevedo, 2021). Apesar da literatura relatar diferentes mecanismos para explicar a cor azul na água marinha, todos os mecanismos apontam a presença de Fe como impureza em sua estrutura cristalina.

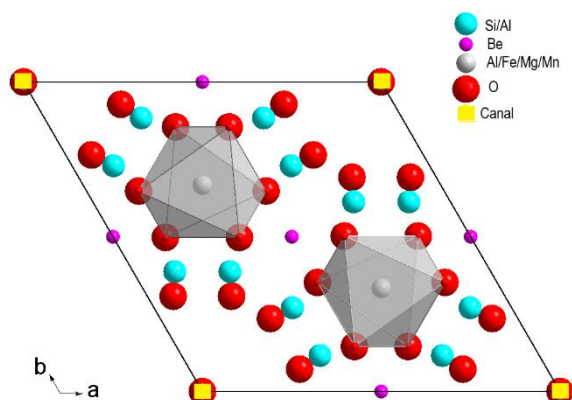


Figura 1 - Estrutura do Berilo projetada no plano basal (001) gerada a partir da ficha CIF - ICSD: 128054.

Conforme Branco (2008), o ferro pode ocorrer em diferentes estados de oxidação, sendo o Fe^{2+} responsável pela tonalidade azul, enquanto o Fe^{3+} gera tonalidades amareladas ou esverdeadas. De acordo Goldman et al. (1977) a cor azul é devido à presença de Fe^{2+} nos canais presentes na estrutura. Já Nassau et al. (1976) sugere a teoria do centro de cor para explicar a cor azul profunda. Já Taran and Rossman (2001) propõem que a cor azul profunda ocorre pela interação de intervalência de carga (IVCT) $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ situados em sítios adjacentes. Outros trabalhos também sugerem que a cor azul profunda é devido a IVCT $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ (LIN et. Al.; 2013, BUNNAG, et. al.; 2020).

Segundo Nassau (1994), a mudança (oxidação) $\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ pode ocorrer no berilo e a água-marinha verde pode adquirir a cor azul por aquecimento. Esse processo

de oxidação é facilmente desencadeado através do aquecimento a temperaturas baixas a intermediárias, situadas entre 250 °C e 500 °C, dependendo do ambiente de formação da água-marinha, da sua composição química e da presença de elementos cromóforos (Fridrichová et al. 2015).

Segundo Polli (2006), temperaturas entre 250 °C e 500 °C são convenientes para a água-marinha, mas algumas amostras podem requerer temperaturas mais altas. Apesar disso, é necessário controlar cuidadosamente a temperatura para evitar possíveis danos como fraturas. Ainda segundo Polli (2006), a maior parte das fraturas e desintegração física do mineral é produzida por um choque térmico, especialmente em temperaturas maiores que 500 °C. O sucesso do tratamento térmico vai depender da estabilidade térmica do berilo e da sua composição química.

O tratamento térmico de água-marinha tem sido amplamente utilizado para melhorar a cor e valor das gemas, particularmente no Brasil, que é um dos maiores produtores mundiais de gemas coradas do mundo (Bello et al. 1991). Embora o tratamento térmico seja amplamente utilizado, a transparência sobre sua aplicação é essencial. De acordo com o CIBJO (Confederação Mundial de Joalheria), as gemas tratadas devem ser corretamente identificadas por uma divulgação geral que deve conter uma declaração verbal, com linguagem clara e compreensível, tanto para manter a integridade da indústria quanto para garantir que os compradores entendam o que estão adquirindo. Os estudos revisados (McClure et al. 2010; Sabioni & Ferreira 1996; D'Azevedo 2021; Branco 2008; Nassau 1994; Polli 2006) demonstram que, quando realizado adequadamente, o tratamento térmico pode transformar uma água-marinha com tonalidades menos desejadas em uma gema de alta qualidade e valor comercial. A continuidade da pesquisa sobre as variáveis de tratamento térmico é essencial para otimizar esse processo e assegurar a qualidade das gemas brasileiras.

2. Metodologia

Neste trabalho, foram conduzidos dez testes utilizando amostras de água-marinha em seu estado bruto e um teste utilizando amostras de água-marinha lapidadas. Embora a maioria das amostras brutas fosse de qualidade inferior, elas constituíram a base da pesquisa. Foram utilizadas amostras de procedências distintas, sem a determinação exata de sua origem.

O aquecimento das amostras de água-marinha foi realizado em um forno de alta temperatura da marca VRC Equipamentos, no Laboratório de Lapidação e Facetamento (DEGEM/UFES). Na fase inicial de testes, o foco estava na aplicação de tratamento térmico em diversas temperaturas (300 °C, 350 °C, 400 °C, 450 °C e 500 °C). Em cada experimento, as amostras foram aquecidas a uma taxa média de 10°C/min e mantidas

XIV Encontro Científico de Física Aplicada - 2024

por 1h na temperatura máxima. Nessa fase inicial da pesquisa, utilizou-se a taxa de aquecimento média (10°C/min) do equipamento, uma vez que não havia preocupação com o surgimento de trincas e fraturas, já que essas amostras, por serem de qualidade inferior, não seriam submetidas à lapidação.

Na segunda etapa do trabalho, foram realizados cinco testes nessa segunda etapa, um para cada temperatura (300 °C, 350 °C, 400 °C, 425 °C e 450 °C). Em cada teste, as amostras foram aquecidas novamente a uma taxa média de 10 °C/min, repetindo o tempo de permanência de 1h. Na terceira e última etapa, foi realizado o aquecimento de um lote de gemas lapidadas a 425 °C, a temperatura que obteve o melhor resultado na segunda fase do trabalho. Mais uma vez, as amostras foram aquecidas a uma taxa média de 10 °C/min e mantidas por 1h na temperatura máxima. Além disso, após feito o aquecimento e passado o tempo de permanência, as amostras foram resfriadas naturalmente dentro e fora do forno, para evitar o surgimento de fraturas.

A caracterização gemológica foi realizada com exemplares não tratados e tratados em diferentes temperaturas, tanto em estado bruto quanto lapidados. As amostras foram preparadas no Laboratório de Lapidação e Facetamento do Departamento de Gemologia da UFES (DEGEM/UFES) e submetidas à marcha analítica tradicional, no Laboratório de Caracterização de Gemas (DEGEM/UFES). Foram realizadas medições do índice de refração, birrefringência, propriedades ópticas, densidade e pleocroísmo.

Também foram realizadas medidas de absorção UV-Vis-NIR, em um GL Gem Spectrometer, no intervalo de 300-1.000nm nas amostras como recebidas e após tratamento para a temperatura de 425°C.

3. Discussão dos resultados

Os resultados da caracterização gemológica de 10 amostras não tratadas e 10 amostras tratadas podem ser observados na Tabela 1. Esses valores estão de acordo com os encontrados no Manual Técnico de Gemas (IBGM, 2005). Não foram identificadas diferenças nos valores (densidade, birrefringência e índice de refração) entre as amostras submetidas ao tratamento térmico e aquelas que não foram, o que sugere que o aquecimento não ocasionou alterações substanciais nas propriedades essenciais das amostras, assim como visto na pesquisa de Polli et al (2006), em que as amostras se mostraram estáveis até a temperatura de 800 °C, sem modificações indesejáveis, com tempos curtos de aquecimento (1 ou 2 horas).

Tabela 1: Resultados dos dados obtidos na marcha analítica de amostra tratadas e não tratadas de água-marinha. Legenda: d (densidade); b (birrefringência); Re (raio extraordinário); Rw (raio ordinário); Temp (temperatura em °C); NT (amostra não tratada).

Amostra	Peso (g)	d	Índice de Refração Rw	Índice de Refração Re	b	Temp
1	1,467	2,67	1,583	1,575	0,006	NT
2	1,285	2,72	1,573	1,581	0,008	NT
3	3,337	2,70	1,575	1,585	0,010	NT
4	0,921	2,69	1,576	1,581	0,006	NT
5	2,107	2,70	1,582	1,591	0,009	NT
6	0,197	2,66	1,572	1,578	0,006	NT
7	0,230	2,77	1,571	1,576	0,005	NT
8	0,217	2,61	1,570	1,575	0,005	NT
9	0,216	2,60	1,575	1,570	0,005	NT
10	0,357	2,68	1,579	1,570	0,009	NT
11	1,319	2,71	1,578	1,583	0,008	300
12	2,667	2,66	1,581	1,572	0,009	300
13	0,922	2,68	1,573	1,581	0,009	300
14	1,538	2,72	1,578	1,568	0,010	350
15	4,309	2,72	1,583	1,590	0,008	350
16	0,146	2,65	1,575	1,570	0,005	425
17	0,159	2,70	1,572	1,579	0,007	425
18	0,498	2,78	1,571	1,562	0,009	425
19	0,465	2,83	1,572	1,578	0,006	425
20	0,649	2,69	1,571	1,575	0,004	425

Tabela 2: Resultados dos dados obtidos na marcha analítica de amostra tratadas e não tratadas de água-marinha.

Amostra	Pleocroísmo
1	Azul a amarelo pálido
2	Incolor a azul médio
3	Incolor a azul médio
4	Não apresenta
5	Não apresenta
6	Incolor a amarelo pálido
7	Amarelo pálido a amarelo médio
8	Incolor a amarelo pálido
9	Amarelo pálido a amarelo médio
10	Amarelo pálido a amarelo médio
11	Azul médio a amarelo pálido
12	Azul pálido a amarelo pálido
13	Azul pálido a amarelo pálido
14	Azul médio a amarelo pálido
15	Azul médio a amarelo médio

XIV Encontro Científico de Física Aplicada - 2024

16	Azul pálido a amarelo pálido
17	Incolor a azul médio
18	Incolor a azul médio
19	Amarelo pálido a azul pálido
20	Incolor a azul médio

No primeiro lote, foram aquecidas amostras de baixa qualidade, já que este primeiro lote não seria levado à lapidação (Figura 2). De acordo com Polli (2006), a mudança ou uniformização da cor do berilo pode ser obtida, na maioria das vezes, com tratamentos de até 1 ou 2 horas de duração e temperaturas entre 350 °C e 900 °C, mas, de acordo com Fridrichová et al. (2015), o processo de oxidação é facilmente desencadeado através do aquecimento a temperaturas baixas a intermediárias, situadas entre 250 °C e 500 °C. Por isso, inicialmente, as amostras de água-marinha foram aquecidas a 300 °C. Algumas amostras apresentaram uma mudança de cor pouco significativa, passando de um verde-amarelado para um azul pálido; porém, outras amostras perderam totalmente a cor, adquirindo um aspecto queimado e uma cor acinzentada. A mudança de cor se tornou um pouco mais acentuada no aquecimento a 350 °C, gerando um azul pálido em algumas amostras e, novamente, um aspecto queimado em outras. A 400 °C, é possível perceber um aumento na intensidade do azul em algumas amostras e, em outras, apesar da perda de cor, o aspecto queimado citado anteriormente não foi observado. No quarto lote, ao aquecer as amostras a 450 °C, observou-se uma diminuição na saturação, gerando um azul pálido, com exceção de duas amostras: uma atingiu um azul médio, enquanto a outra se tornou uma goshenita (variedade incolor do berilo), perdendo totalmente a cor. Isso sugere que a temperatura ideal para a mudança de cor da água-marinha pode estar acima de 400 °C. No quinto e último lote, ao aquecer as amostras a 500 °C, observou-se uma mudança de cor significativa: algumas amostras apresentaram um azul claro, outras, um azul médio característico da água-marinha, e outras amostras assim como na pesquisa realizada por Polli (2006), devido a fraturas internas, não obtiveram mudança de cor. Ainda segundo Polli (2006), grande parte das fraturas responsáveis por alterações na transparência e desintegração física do material, são produzidas por choque térmico, principalmente em temperaturas iguais ou superiores a 500 °C.



Figura 2: Fotografia das amostras brutas de água-marinha aquecidas na primeira fase da pesquisa. Fonte: Produção dos próprios autores.

Na segunda fase da pesquisa, amostras de melhor qualidade foram utilizadas no aquecimento, além de possuírem procedência diferente das amostras utilizadas na primeira fase da pesquisa (Figura 3). Assim como na primeira fase, o primeiro lote foi aquecido a 300 °C. As amostras apresentaram um comportamento semelhante ao das amostras analisadas na primeira fase, pois, apesar da mudança significativa de cor de verde para um azul pálido, a cor cinza e o aspecto queimado prevaleceu em todas as amostras. Ao aquecer as amostras a 350 °C, foi possível observar uma mudança significativa de cor, com as amostras esverdeadas assumindo uma cor azul; entretanto, algumas amostras apresentaram um aspecto queimado semelhante ao das amostras aquecidas a 300 °C. A 400 °C, observou-se uma grande mudança de cor, sem nenhum aspecto queimado. As amostras esverdeadas ficaram completamente azuis, e as amostras mais translúcidas tiveram seu tom azul acentuado. Na temperatura seguinte, de 450 °C, algumas amostras perderam um pouco de sua cor, enquanto outras obtiveram um resultado semelhante ao das amostras aquecidas a 400 °C (azul acentuado). Além disso, na primeira fase da pesquisa, algumas amostras tiveram fraturas provocadas pelo choque térmico a 500 °C. Por esses motivos, no último lote, foi realizada uma mudança no planejamento inicial: em vez de realizar um aquecimento a 500 °C, escolheu-se uma temperatura intermediária entre 400 °C e 450 °C. O aquecimento a 425 °C resultou em amostras totalmente esverdeadas que tornaram-se completamente azuis. Além disso, as amostras levemente esverdeadas também adquiriram um novo tom azul, mas com a mesma saturação que possuíam anteriormente.

XIV Encontro Científico de Física Aplicada - 2024



Figura 3: Fotografia das amostras brutas de água-marinha aquecidas na segunda fase da pesquisa. Fonte: Produção dos próprios autores.

Todos os lotes de amostras submetidos ao tratamento térmico apresentaram respostas diversas ao aquecimento, e nem todas as amostras de um mesmo lote tratado alcançaram a mesma tonalidade. Isso indica que o sistema responsável pela coloração é altamente variável e que precauções devem ser tomadas ao testar o material antes de expor um grande lote ao tratamento térmico, pois, em um mesmo lote, os minerais podem reagir de maneiras diferentes. No entanto, as amostras obtiveram melhores resultados quando aquecidas a 425 °C, atingindo uma coloração esverdeada que se transformou no azul característico da água-marinha.

Após os testes com amostras de água-marinha em seu estado bruto, a última fase foi realizada com amostras já lapidadas, todas com coloração amarelo-esverdeado, mas pouco saturadas. As 10 amostras lapidadas passaram por um aquecimento a 425 °C (temperatura que obteve melhor desempenho anteriormente). Mais uma vez, as amostras sofreram uma mudança de cor, passando de amarelo-esverdeado para azul. Contudo, a saturação não mudou, variando de um amarelo-esverdeado pálido para um azul também pálido. Além disso, as amostras não desenvolveram fraturas quando aquecidas a essa temperatura.

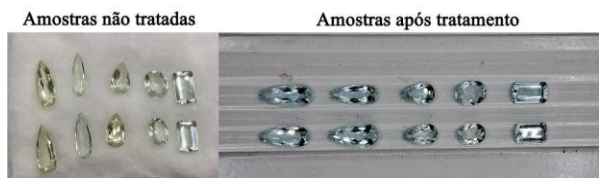


Figura 4: Fotografia das amostras lapidadas de água-marinha aquecidas a 425 °C na terceira fase da pesquisa. Fonte: Produção dos próprios autores.

A figura 5 a e b mostra os espectros UV-Vis-NIR para uma amostra como recebida e após o tratamento térmico. Os espectros apresentam três picos principais de absorção em torno de 370 nm, 430 nm e 830 nm. A literatura atribui o pico ~830 nm ao Fe^{2+} no sítio octaédrico ou presentes nos canais da estrutura. Os picos em ~370 nm e ~430 nm são atribuídos ao Fe^{3+} no sítio octaédrico (Wood e Nassau, 1968; Goldman et al., 1977; Taran e Rossman, 2001; Chankhantana et al., 2016) ou, além desses picos serem atribuídos ao Fe^{3+} no sítio octaédrico, também podem ser atribuídos ao

Fe^{3+} presente nos canais e em sítios intersticiais (Spinolo et al., 2007).

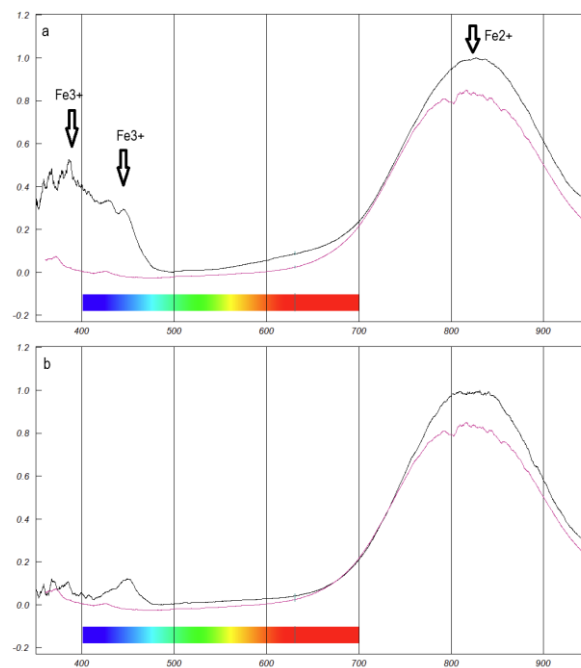


Figura 5- Espectro UV-Vis-NIR. a) amostra como recebida. b) amostra após o tratamento térmico a 425 °C. A linha preta corresponde ao espectro das amostras estudadas nesse trabalho e a linha vermelha corresponde ao espectro da referência utilizada no equipamento.

Quando a água marinha adquire cor azul profunda é possível observar no espectro UV-Vis-NIR um ombro em 700 nm para a incidência da luz no plano (100) o que indica que o pico observado em ~830 nm corresponde a IVCT $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ (BUNNAG, et. al.; 2020). Apesar dos espectros UV-Vis-NIR neste trabalho terem sido tomados em direções arbitrárias para a incidência da luz, não sendo possível observar o ombro em 700 nm, acredita-se que a cor azul adquirida pelas amostras após o tratamento térmico seja devida apenas a oxidação do Fe^{3+} em Fe^{2+} presente nas amostras pois, a saturação não mudou, variando de um amarelo-esverdeado pálido para um azul também pálido. Baseando-se nos trabalhos publicados, anteriormente citados, a cor azul profunda é devido à presença dos íons Fe em sítios adjacentes de modo que seja possível a IVCT $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$.

4. Conclusão

Os resultados do trabalho indicam que a melhor temperatura para aquecimento da água-marinha testada é de 425 °C. Com o aquecimento realizado a esta temperatura, foi possível observar uma significativa mudança de cor nas amostras esverdeadas, que adquiriram uma coloração azul característica de uma água-marinha. Dessa forma, o valor comercial se eleva, já que anteriormente o material seria vendido por um

XIV Encontro Científico de Física Aplicada - 2024

preço menor pela ausência de sua principal característica: a cor azul celeste. Além disso, independente da temperatura de aquecimento, a saturação do material não se altera. Logo, em cristais com zoneamento de cor, as cores indesejadas (tonalidades esverdeadas) podem ser homogeneizadas, mas possuirão a mesma intensidade que antes.

O tratamento térmico de água-marinha é essencial para a cadeia produtiva de gemas, joias e afins, pois se trata de um processo não destrutivo amplamente aceito no setor gemológico, já que consegue valorizar o material sem comprometer a estrutura cristalina e química da gema. A aplicação adequada desse processo contribui significativamente para a competitividade da água-marinha brasileira no cenário internacional. Por fim, o teste de novos materiais de minas com gênese distinta juntamente da análise da causa de cor e dos fenômenos físicos envolvidos são temas relevantes acerca do tratamento térmico, além de essencial para a pesquisa e inovação no campo da gemologia.

6. Referências

- BELLO, R. M. da S. et al. Inclusões fluidas em gemas brasileiras. Boletim IG-USP, Publicação Especial, v. 9, p. 9-12, 1991.
- BEZERRA, Marcelo Soares; NESI, Júlio de Rezende. Rochas e minerais industriais. Rio de Janeiro: CETEM/MCT. 2.ed. p. 339-361, 2008.
- BRANCO, Pércio de Moraes. Dicionário de mineralogia e gemologia. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- BUNNAG, Nantharat et al. Study of Fe ions in aquamarine and the effect of dichroism as seen using UV-Vis, NIR and x-ray. Radiation Physics And Chemistry, v. 177, p. 107-109, 2020.
- CHANKHANTHA, Chawalit; THANASUTHIPITAK, Panjawan; KIDKHUNTHOD, Pinit. Iron K-edge XANES study of heated green beryl from Madagascar. Walailak Journal of Science and Technology (WJST), v. 13, n. 12, p. 977-983, 2016.
- CORNEJO, Carlos; BARTORELLI, Andrea. Minerais e pedras preciosas do Brasil. São Paulo: Solaris Edições Culturais, 704p., 2010.
- CIBJO Coloured Stone Commission. The Gemstone Book. The blue books: CIBJO (International Confederation of Jewellery, Silverware, Diamonds, Pearls and Stones), 2022.
- D'AZEVEDO, Rhenan Gonçalves Braun. Caracterização de água marinha: uma nova ocorrência no estado do Rio de Janeiro. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2021.
- DEER, William Alexander; HOWIE, Robert Andrew; ZUSSMAN, Jack. (Ed.). Rock-forming minerals: single-chain silicates, Volume 2A, 1997.
- FRIDRICHOVÁ, Jana et al. Optical and crystal-chemical changes in aquamarines and yellow beryls from Thanh Hoa province, Vietnam induced by heat treatment. Physics and Chemistry of Minerals, v. 42, n. 4, p. 287-302, 2015.
- GEMDAT. Aquamarine.2024. Disponível em: <https://www.gemdat.org/gem-289.html>. Acesso em: 10 ago. 2024.
- GOLDMAN, Don S.; ROSSMAN, George R.; DOLLASE, Wayne A. Channel constituents in cordierite. American Mineralogist, v. 62, n. 11-12, p. 1144-1157, 1977.
- IBGM. Manual técnico de gemas. IBGM, DNPM. 3. ed. rev. e atual. Consultoria, supervisão e revisão técnica desta edição, Jane Leão N. da Gama. Brasília, 2005.
- LIN, Jinru; CHEN, Ning; HUANG, Dan; PAN, Yuanming. Iron pairs in beryl: New insights from electron paramagnetic resonance, synchrotron X-ray absorption spectroscopy, and ab initio calculations. American Mineralogist, v. 98, p.1745-1753, 2013.
- McCLURE, Shane; KANE, Robert; STURMAN, Nicholas. Gemstone enhancement and its detection in the 2000s. Gems & Gemology, v. 46, n. 3, p. 218-240, 2010.
- MINDAT. Aquamarine. 2024. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-289.html> . Acesso em: 10 ago. 2024.
- MINDAT. Beryl. 2024. Disponível em: <https://www.mindat.org/min-819.html> . Acesso em: 10 ago. 2024.
- NASSAU, K.; PRESCOTT, B. E.; WOOD, D. L. The deep blue Maxixe-type color center in beryl. American Mineralogist, v. 61, n. 1-2, p. 100-107, 1976.
- NASSAU, K. Gemstone enhancement: history, science, and state of the art. 2a ed. Butterworth-Heinemann Ltd., 252p, 1994.
- POLLI, Gabriel de Oliveira et. al. Comportamento Físico-Químico do Berilo a altas temperaturas. Revista Brasileira de Geociências. v.1, n.3, p. 593-602, dez. 2006.
- POLLI, Gabriel de Oliveira. Tratamento térmico de berilo incolor (goshenita) e colorido (água-marinha, heliodoro e morganita). Tese (Doutorado) - Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Minas Gerais, 2006.
- SABIONI, Antônio Claret Soares, FERREIRA, César Mendonça. Alguns aspectos técnicos e econômicos do tratamento térmico de gemas. Revista Escola de Minas, v.49, n.1, p 60-66, 1996.
- SVISERO, Darcy Pedro. As variedades gemológicas do Berilo. Gemologia, v. 23-24, n. 45-46, p. 67-71, 1978.
- TARAN, Michael N.; ROSSMAN, George R. Optical spectroscopic study of tuiuite and a re-examination of the beryl, cordierite, and osumilite spectra. American Mineralogist, v. 86, n. 9, p. 973-980, 2001.
- WOOD, D. L.; NASSAU, K. The characterization of beryl and emerald by visible and infrared absorption

XIV Encontro Científico de Física Aplicada - 2024

spectroscopy. American Mineralogist: Journal of Earth
and Planetary Materials, v. 53, n. 5-6, p. 777-800, 1968.