

ESTUDO DE MELHORAMENTO DE COR EM TURMALINAS ELBAÍTAS VIA TRATAMENTO TÉRMICO

COLOR IMPROVEMENT STUDY IN BRAZILIAN ELBAITE TOURMALINES VIA HEAT TREATMENT

Marcelo Ribeiro BARISON, Caio Henrique GALIANO, Heloisa Yu Fon KAO

Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL. Instituto de Ciência e Tecnologia. Câmpus Avançado de Poços de Caldas. Rodovia José Aurélio Vilela, BR 267, Km 533 - Cidade Universitária. Poços de Caldas – MG. E-mails: marcelo.barison@unifal-mg.edu.br; caio.galiano@sou.unifal-mg.edu.br; heloisa.kao@sou.unifal-mg.edu.br

Introdução
Breve revisão bibliográfica
Turmalinas brasileiras
A origem da cor em minerais
Tratamento térmico de turmalinas
Material e métodos
Minas de turmalina elbaíta na região Araçuaí e Coronel Murta
Tratamento térmico em turmalinas elbaítas de Araçuaí e de Coronel Murta
Tratamento térmico de amostras de turmalinas elbaítas
Resultados do tratamento térmico em turmalinas elbaítas
Tratamento térmico a 250° C
Tratamento térmico a 350° C
Tratamento térmico a 500° C
Tratamento térmico a 620° C
Conclusões
Referências

RESUMO - As turmalinas brasileiras apresentam grande diversidade de cores e tonalidades, sendo muitas provenientes do norte do estado de Minas Gerais. São minerais gemológicos de expressivo valor comercial, que podem sofrer alteração nas suas cores quando expostos a um tratamento térmico adequado. O grupo das turmalinas é grande e inclui um vasto tipo de cores e tonalidades, sendo que as mais apreciadas são verde, azul e vermelho. Estudos anteriores mostraram que é possível executar tratamento térmico nesse grupo de minerais com a finalidade de melhorar sua cor. As turmalinas elbaítas são encontradas em Pegmatitos cujas maiores ocorrências estão ao norte do Estado de Minas Gerais, nas regiões de Araçuaí e de Coronel Murta. A causa da cor no grupo das turmalinas se deve a elementos químicos introduzidos como impurezas e graças a essas impurezas é que ganham diversas cores. Neste estudo, foi possível avaliar a alteração nas cores e nas tonalidades de várias turmalinas elbaítas, principalmente nas verdes e nas azuis. As demais cores, como nas rosas, cinzas e multicoloridas, tornaram-se muito claras a totalmente incolores. As turmalinas elbaítas negras permaneceram estáveis quanto sua cor em todas as faixas de temperaturas adotadas.

Palavras-chave: Turmalinas elbaítas. Tratamento térmico. Cor aprimorada.

ABSTRACT - Brazilian tourmalines come in a variety of colors and hues, with the majority originating from northern Minas Gerais state. These gemstone minerals have significant commercial value and can undergo color changes when exposed to appropriate heat treatment. The tourmaline group is large and includes a wide range of colors and hues, the most prized being green, blue, and red. Previous studies have shown that heat treatment of this group of minerals is possible to improve their color. Elbaite tourmalines are found in pegmatites, most commonly found in northern Minas Gerais state, in the Araçuaí and Coronel Murta regions. The color of this group of tourmalines is due to chemical elements introduced as impurities, and these impurities give it various hues. This study evaluated the color and hue changes of several Elbaite tourmalines, particularly the green and blue ones. As for the other colors, such as pinks, grays, and multicolors, they became very light to completely colorless. Black elbaite tourmalines remained stable in all temperature ranges.

Keywords: Elbaite tourmalines. Heat treatment. Enhanced color.

INTRODUÇÃO

De acordo com Svisero & Franco (1987), o Brasil se encontra entre as principais províncias gemológicas do mundo, sendo considerado um dos maiores produtores de gemas coradas. Destacam-se o grupo do Berilo (Esmeralda, Água marinha, Morganita e Heliodoro); o grupo das Turmalinas (Rubelita, Indicolita, Verdelita e os tipos Policrômicos); o grupo da Sílica (Ametista, Citrino, Ágatas e Opala); o grupo do Espodumênio (Kunzita e Hiddenita); o grupo do Criso-

berilo (Crisoberilo de cor amarelo esverdeada, Alexandrita e Olho de Gato); o Topázio Imperial da região de Ouro Preto, dentre outras gemas raras. Dentre as gemas não coradas, destacam-se os depósitos aluvionares contendo Diamantes.

Atualmente, muitas pedras preciosas passam por algum tipo de tratamento para melhorar suas qualidades óticas, principalmente para realçar ou acentuar a cor, que é uma propriedade física muito importante na sua valorização e melhor

comercialização (Clark, 2024).

Os tratamentos térmicos em pedras preciosas podem transformar gemas de pouco valor em itens de grande beleza e de grande valor agregado. Aquecer uma gema a uma temperatura específica e depois resfriá-la é um procedimento comum no mundo atual das gemas. Isso pode melhorar não somente a cor de uma gema, mas também aumentar sua transparência.

Dentre alguns tipos de tratamento para melhorar a cor de uma gema está o tratamento térmico em forno controlado de alta temperatura. Este forno produz uma queima controlada e assim permite acréscimos muito graduais de temperatura reduzindo o choque térmico, que pode fissurar e destruí-las. Uma maneira de reduzir danos no processo de aquecimento e resfriamento da gema, é o de inseri-la dentro de um pequeno recipiente de areia fina, não permitindo o contato direto com o ar.

Algumas turmalinas azuis e verdes muito escuras, mas certamente não todas, podem ter

suas cores atenuadas pelo aquecimento e este é um procedimento atual padrão comum no Brasil. A nova cor, mais clara e melhor definida, acarreta um aumento de valor no comércio de turmalinas, tornando-as mais atrativas.

O objetivo geral deste trabalho é o de estudar o grupo de minerais de turmalinas elbaítas frente a um tratamento térmico e assim estabelecer quais as faixas de temperatura que promovem mudanças nas suas cores e tonalidades. Desta forma, foram obtidas amostras de turmalinas elbaítas brasileiras de diversas cores da região de Araçuaí e Coronel Murta, Minas Gerais, para o estudo de tratamento térmico.

As turmalinas elbaítas foram escolhidas para esta pesquisa, em função de serem gemas importantes e intensamente comercializadas no Brasil e no exterior, por agregarem grande valor econômico quando possuem cores bem definidas e acentuadas, algo que pode ser alcançado por um tratamento térmico apropriado.

BREVE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Turmalinas brasileiras

As localidades brasileiras que produzem Turmalinas, a maioria se encontram no Estado de Minas Gerais, nos municípios de Araçuaí, Barra de Salinas, Governador Valadares, Malacacheta, Turmalina, Rubelita, Novo Cruzeiro, Itaporé, Rubim, Conselheiro Pena, Araguari, Coronel Murta, Taquaral; Santa Maria do Suaçuí, Coimbra, Itamarandiba e São José da Safira (MG); No Estado do Ceará, são encontradas nos municípios de Quixeramobim, Quixadá, Senador Pompeu e Solonópole; Há também no Município de Mata Azul, Estado de Goiás e nos municípios de Tremendal e Encruzilhada, Estado da Bahia

(Svisero & Franco, 1987).

Todas as variedades de turmalinas existentes seguem a complexa composição química geral $(\text{Na,Li,Ca})(\text{Fe}_{11}\text{MgMnAl})_3\text{Al}_6[(\text{OH})_4(\text{BO}_3)\text{Si}_6\text{O}_{18}]$ – (Klein & Dutrow, 2012).

De acordo com Klein & Dutrow (2012), as turmalinas constituem um grupo de minerais borossilicáticos complexos de composições distintas.

Sua fórmula química geral também pode ser expressa como $\text{XY}_3\text{Z}_6(\text{T}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3\text{V}_3\text{W}$, onde as letras indicam os diferentes sítios estruturais que podem ser ocupados por diversos elementos químicos (Tabela 1).

Tabela 1 - Fórmulas químico-estruturais das espécies mais comuns dos minerais do grupo das turmalinas (Fonte: Klein & Dutrow 2012).

ESPÉCIE	(X)	(Y ₃)	(Z ₆)	T ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	V ₃	W
Elbaíta	Na	Li _{1,5} Al _{1,5}	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
Schorlita	Na	Fe ⁺² ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
Dravita	Na	Mg ₃	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
Liddicoatita	Ca	Li ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Uvita	Ca	Mg ₃	MgAl ₅	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	F
Rossmannita	(*)	LiAl ₂	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH
Foitita	(*)	Fe ⁺² ₂ Al	Al ₆	Si ₆ O ₁₈	(BO ₃) ₃	(OH) ₃	OH

(*) Vacância atômica

De acordo com Lima (2007), os minerais do grupo da Turmalina constituem um dos mais complexos grupos de silicatos quanto à sua composição química, pertencentes ao grupo dos ciclos-silicatos. A maioria das turmalinas são do tipo Elbaítas, em função da sua composição química

geral $\text{Na}(\text{Li}_{0,5}\text{Al}_{0,5})_3\text{Al}_6(\text{BO}_3)_3\text{Si}_6\text{O}_{18}(\text{F})$. Como todas as turmalinas, este ciclossilicato cristaliza-se no sistema trigonal. O grupo da turmalina Elbaíta pode ser subdividida em quatro variedades: Verdelita (verde), Rubelita (vermelha ou rosa), Indicolita (azul) e Acroíta (incolor),

embora existam outras cores. Apresentam forte pleocroísmo, possuem dureza 7,5, densidade de 3,05 a 3,10, brilho vítreo e fratura conchoidal. Sua ocorrência mais frequente é em Pegmatitos, associados a outros minerais, como o quartzo, lepidolita e feldspatos sódicos e potássicos.

Recentemente, Bomal et al. (2025) estudaram 17 amostras de turmalinas provenientes de diversos pegmatitos oriundos da porção norte do Estado de Minas Gerais e observaram que quimicamente, a maioria apresenta predominância de (Na) no sítio X e, portanto, pertence ao grupo dos metais alcalinos. Foram classificadas como variedades flúor-elbaítas ou elbaítas, onde proporções semelhantes de Al e Li compartilham as posições Y.

As turmalinas elbaítas apresentam uma grande variedade de cores. Geralmente as ricas em ferro vão desde o preto ou preto-azulado ao castanho escuro; aquelas ricas em magnésio são castanhas a amarelas e as turmalinas ricas em lítio apresentam-se praticamente em todas as cores azul, verde, vermelho, amarelo ou cor-de-rosa. Muito raramente são incolores. Os cristais bicoloridos e multicoloridos são relativamente comuns, refletindo variações da composição do fluido durante a cristalização.

Klein & Dutrow (2012) discutiram que a variabilidade química na Turmalina é muito grande, e que ocorrem substituições simples ou acopladas, sendo as mais comuns: $\text{Fe}^{+2} \leftrightarrow \text{Mg}^{+2}$; $\text{Na}^+ + \text{Al}^{+3} \leftrightarrow \text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+3}$; $\text{Li}^+ + \text{Al}^{+3} \leftrightarrow 2 \text{Fe}^{+2}$. Mencionaram que embora exista uma tendência de se correlacionar a cor com sua composição para cada tipo de turmalina, esta correlação nem sempre se aplica, porque a cor é originada por elementos de transição que ocorrem como impurezas na estrutura atômica.

Há uma outra variedade de grande beleza e rara de turmalina, batizada de Turmalina Paraíba. A Turmalina Paraíba (variedade Elbaíta cuprífera) foi encontrada primeiramente no final da década de 80 no estado brasileiro da Paraíba, por isso leva seu nome. Sua diferença das demais turmalinas está na maior presença de cobre e manganês, que lhe proporciona uma coloração azul a verde neon. No Brasil existem três minas, a saber, Mina da Batalha (primeira a ser descoberta), Mina de Alto Quintos e Mina do Mulungu (Jesus et al., 2009; Nogueira et al., 2018).

Fritsch et al. (1990) executaram análises químicas e revelaram que essa variedade de Turmalina Paraíba (Elbaíta), contém concentrações surpreendentemente altas de cobre, até

1,92 do seu peso em % Cu (ou 2,38% em peso de CuO). Suas cores são devidas ao Cu^{2+} ou uma combinação de Cu^{2+} , Mn^{3+} e centros de cor induzidos por radiação natural ou defeitos estruturais. Embora o tratamento térmico possa modificar certas colorações, a maioria das tonalidades das elbaítas é de origem primária, formada durante a cristalização nos pegmatitos.

Shigley et al. (2001) confirmaram que essas Turmalinas Elbaítas Cupríferas (Turmalinas Paraíba) podem ter mais cores, que podem ser além de azuis e verdes, também roxas e violetas e continuam a ser mineradas em pequenas quantidades do nordeste do Brasil. Desde a descoberta inicial desta turmalina com cobre em 1982, a produção tem sido esporádica e não acompanhou a forte demanda do mercado. O tratamento térmico também é muito utilizado com as Turmalinas Paraíba, onde se ressalta que quase todo o material da mina de Mulungu é tratado termicamente como uma prática padrão e que pelo menos 80% do material azul transparente a azul esverdeado da área de São José da Batalha passou por tratamento térmico.

As turmalinas ocorrem em Pegmatitos graníticos e nas rochas mais imediatamente circundantes. Podem ser encontradas também como mineral acessório na maioria de rochas ígneas e metamórficas. É um mineral estável a partir de baixas a elevadas pressões e temperaturas. O tipo mais comum em pegmatitos são a Schorlita (Afrisita) e a Elbaíta., associadas com Lepidolita, Berilo, Apatita, Fluorita e outros minerais raros. Turmalinas ricas em Mg são encontradas em Xistos e Mármore (Klein & Dutrow, 2012).

Segundo Fernandes (2008), mais especificamente na região de Araçuaí e Coronel Murta, ocorre um segundo processo gerador de pegmatito que é a cristalização de resíduos silicáticos de corpos graníticos intrusivos, ou seja, são corpos ígneos que representam volumes de magma granítico residual que ascendem na crosta e se cristalizam lentamente. Esses pegmatitos residuais representam, de fato, a grande maioria das jazidas importantes de gemas, tais como Turmalinas Elbaítas, Água-Marinha, Morganita, Kunzita, Topázio Azul a Incolor, Heliodoro, dentre outras.

A origem da cor em minerais

Klein & Dutrow (2012), discutiram que os minerais possuem muitas propriedades físicas e a cor é a mais facilmente observada, porém a cor é uma das propriedades diagnósticas mais variáveis e não confiáveis. Isto se deve ao fato de que

a origem da cor em muitos minerais é uma resposta às irregularidades estruturais associadas ou não a elementos químicos (impurezas).

A cor percebida resulta da combinação dos comprimentos de onda remanescentes que são transmitidos através do cristal e atingem o olho. É a resposta do olho ao campo visível da luz do espectro eletromagnético. As absorções entre 0,4 e 0,7 μm resultam de elementos “cromóforos”, ou metais de transição tais como o Fe^{+3} e o Cr^{+3} , que causam a cor em um mineral. A cor em minerais varia amplamente. A cor pode ser usada como uma propriedade diagnóstica apenas quando o elemento causador da cor (um “cromóforo”) é essencial para o mineral. Isso é, o elemento deve estar sempre presente em uma quantidade específica que faz com que em todos os espécimes do mineral tenham uma cor constante (Klein & Dutrow, 2012).

De acordo com Klein & Dutrow (2012), os processos eletrônicos responsáveis pela cor em minerais podem ser classificados como “transições do campo cristalino”, “transições dos orbitais moleculares” e “centros de cor”. As transições do campo cristalino são transições eletrônicas entre orbitais 3d parcialmente preenchidos de elementos de transição e são mais comuns em minerais contendo os elementos de transição: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni e Cu. Neste caso, a cor das Rubelitas (Turmalinas vermelhas) o íon absorvente é o Mn^{+3} .

As transições do orbital molecular ocorrem em minerais quando os elétrons de valência se transferem para trás e para frente entre íons de locais adjacentes, e isso requer que cada íon exista em mais de um estado de valência. Neste caso, pode-se utilizar para exemplificar a cor das Águas Marinhas (berilo de cor azul), onde o par iônico é do Fe^{+2} para Fe^{+3} .

Por outro lado, os centros de cor podem ser causados por defeitos estruturais e pode ocorrer devido a um excesso de elétrons que ficaram aprisionados em algum defeito estrutural, causado por um íon ausente ou uma impureza intersticial. Essa “lacuna”, ou seja, a ausência de um elétron pode ocasionar o mesmo efeito. Neste caso, tem-se como exemplo a cor púrpura na Ametista e a cor azul no Topázio (Klein & Dutrow, 2012).

Tratamento térmico em turmalinas

Shigley et al. (2001) estudaram o tratamento térmico em turmalinas Elbaítas verdes, azuis e vermelhas utilizando fornos elétricos simples sem nenhum controle de atmosfera, normalmente em temperaturas que variaram de 480° a 620°C.

Essas temperaturas são significativamente mais altas do que algumas das relatadas inicialmente em trabalhos anteriores de outros pesquisadores, que utilizaram de 225° a 250°C (Koivula & Kammerling, 1991 segundo Shigley et al., 2001) e são ligeiramente mais altas, na faixa de 350° a 550° C do que as relatadas por Koivula & Kammerling (1990 apud Shigley et al., 2001).

Segundo Shigley et al. (2001), em geral, as pedras vermelho-púrpura tornam-se verde “esmeralda” a 480°–500°C, mas clarearam quando foram aquecidas demais. As cores azul “neon” e “turquesa” podem ser produzidas a 550° a 620°C, dependendo da cor inicial. As pedras mais escuras geralmente ficaram mais saturadas após o aquecimento, mas em alguns casos a cor se desbotou quando a pedra foi aquecida a uma temperatura muito alta.

Atualmente, não se conhecem meios confiáveis para distinguir a maioria das turmalinas cupríferas (Turmalinas Paraíbas) aquecidas e não aquecidas exceto, talvez, pela presença de indicações visuais, como inclusões fluidas não danificadas ou danificadas pelo calor (Shigley et al., 2001).

O tratamento térmico está associado à composição química complexa das turmalinas e também devido aos vários elementos possíveis que são os causadores de cor (alguns em diferentes estados de valência) que podem estar presentes em uma determinada gema. Nem todas as cores da Turmalina “Paraíba” puderam ser melhoradas pelo tratamento térmico (Shigley et al., 2001).

Em termos muito gerais, as seguintes mudanças de cor podem ser obtidas com tratamento térmico (Bernardes, 1999 apud Shigley et al., 2001): de vermelho púrpura para verde “esmeralda”; de roxo para roxo claro; de azul esverdeado para “turquesa neon”; de violeta para azul violeta; de azul claro para azul “neon”; e de azul escuro para azul “neon”.

Faye & Nickel (1968) revelaram que a cor azul na turmalina elbaíta contendo ferro (indicolita) é causada pelo ferro ferroso (Fe^{+2}) e pela transferência de carga intervalar entre o ferro ferroso e o ferro férrico (Fe^{+2} para Fe^{+3}).

Faye (1968) fez a primeira caracterização experimental da absorção ótica do Mn^{+3} em turmalinas, causa da cor rosa-vermelho.

Fritsch et al. (1986) mostraram experimentalmente que o tratamento térmico por aquecimento em turmalinas rosa-vermelhas reduz o Mn^{+3} para Mn^{+2} , atenuando sua cor ou tornando-as incolores.

Fuchs et al. (1998) apresentaram um estudo termogravimétrico e espectroscópico mostrando

estabilidade ótica na cor de turmalinas negras (schorlitas). Isso ocorre porque a proporção total de ferro é tão elevada que o equilíbrio $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{+2}$ muda pouco em termos óticos. Concluíram que o mecanismo Fe^{+2} para Fe^{+3} de transferência intervalente é responsável pela coloração escura e preta das turmalinas schorlitas e essa interação ótica é quimicamente estável até 700° C.

Castaneda et al. (2006) analisaram o comportamento químico e cristalino de turmalinas elbaítas de Araçuaí, Minas Gerais, quando submetidas ao aquecimento sob condições atmosféricas, e relataram que mudanças na cor após o tratamento se devem ao desordenamento atômico, presença de elementos de transição metálicos, oxidação de ferro ferroso no sítio octaédrico e aprisionamento simultâneo do excesso de elétrons.

As amostras foram submetidas a tratamento térmico por 2 h a 800 e 900 °C, 12 h a 110, 450, 700 °C e 48 h a 700 °C. Concluíram que estas turmalinas da série elbaíta-schorlita contêm quantidades significativas de Fe e Mn, e quantidades menores de Mg e Ti, e outros elementos, como Co (18 ppm na amostra verde) e Zn (0,10–0,58% em peso nas amostras verde e azul, respectivamente).

Amostras de turmalinas elbaítas rosas e azuis tornaram-se totalmente incolores quando submetidas a tratamento térmico de 110 a 450° C por 12 h. A amostra verde muda após 12 h para verde-claro (a 110 °C), para marrom (a 450 °C) e marrom-escuro (a 700 °C), enquanto a amostra verde-amarelada muda para incolor ou cinza. Os autores concluíram que turmalinas verde escuras e azul escuras podem se beneficiar do aquecimento a baixas temperaturas, produzindo colorações mais claras e que após um longo tratamento térmico a 700 °C, a turmalina azul se transforma em vermelha.

MATERIAIS E MÉTODOS

Minas de Turmalina Elbaíta na região de Araçuaí e Coronel Murta

A área de trabalho situa-se na região nordeste do Estado de Minas Gerais, nos municípios de Araçuaí e Coronel Murta, Médio Jequitinhonha, entre os paralelos 16° e 18° de latitude sul e os meridianos 42°30' e 41°30' de longitude oeste (Figura 1) – (Fernandes, 2008).

Tratamento térmico em Turmalinas Elbaítas de Araçuaí e de Coronel Murta

Foram obtidas amostras de turmalinas elbaítas brutas da região de Araçuaí e Coronel

Filip et al. (2012) apresentaram um estudo detalhado da oxidação e redução de Fe induzida termicamente na estrutura de turmalina negra tipo Schorlita (Afrisita). As amostras foram tratadas termicamente ao ar e hidrogênio a temperaturas de 700, 800 e 900 °C para oxidar ou reduzir o Fe estrutural. Foi observado um aumento de Fe^{+3} de até 100% após aquecimento ao ar a 700° C, enquanto apenas pequenas alterações na razão $\text{Fe}^{+3}/\text{Fe}^{\text{total}}$ após aquecimento sob hidrogênio a 700° C foram observadas. Os autores não comentaram sobre alterações na cor após o tratamento térmico.

Bosi et al. (2021) mostraram por espectroscopia de absorção óptica, que a coloração vermelho-púrpura em turmalinas elbaítas de Madagascar é causada por pequenas quantidades de Mn^{+3} ($\text{Mn}_2\text{O}_3 = 0,20\%$ em peso) e concluíram que o tratamento térmico ao ar até 750 °C intensificou fortemente a coloração das amostras devido à oxidação de todo o Mn^{+2} em Mn^{+3} (Mn_2O_3 até 1,21% em peso).

Altieri et al. (2023) estudaram turmalinas ricas em Fe^{+2} e Mn^{+2} tratadas termicamente ao ar a 700 °C para estudar variações de cor devido a mudanças nos estados de oxidação de Fe e Mn e na ordenação dos átomos, na qual houve uma alteração de cor de azul muito escuro para marrom escuro devido à oxidação progressiva de Fe^{+2} para Fe^{+3} e de Mn^{+2} para Mn^{+3} .

Mais recentemente, Li & Yue (2025) abordaram que as mudanças na cor das turmalinas elbaíta e flúor-elbaíta ricas em Fe e Mn (com cores alteradas de castanhas para incolores) durante o tratamento térmico a 500° C, na qual são resultantes de transições no estado de valência de elementos cromóforos (por exemplo, $\text{Fe}^{+3} \rightleftharpoons \text{Fe}^{+2}$, $\text{Mn}^{+3} \rightleftharpoons \text{Mn}^{+2}$) tanto sob condições oxidantes quanto redutoras.

Murta, Minas Gerais, nas cores verde, azul e vermelhas na qual foram submetidas a tratamento térmico para analisar alterações nas suas cores e nas suas tonalidades. O tratamento térmico das amostras de turmalinas foi executado em um forno/mufla Modelo SSFM do Laboratório Multiusuário III da UNIFAL, Câmpus Avançado de Poços de Caldas-MG, com medidas internas (A x L x C) 20x40x20 e medidas externas (A x L x C) 52x67x70, com capacidade de 6,7 litros, 80 kg e com potência 4000 watts. A temperatura de trabalho do forno

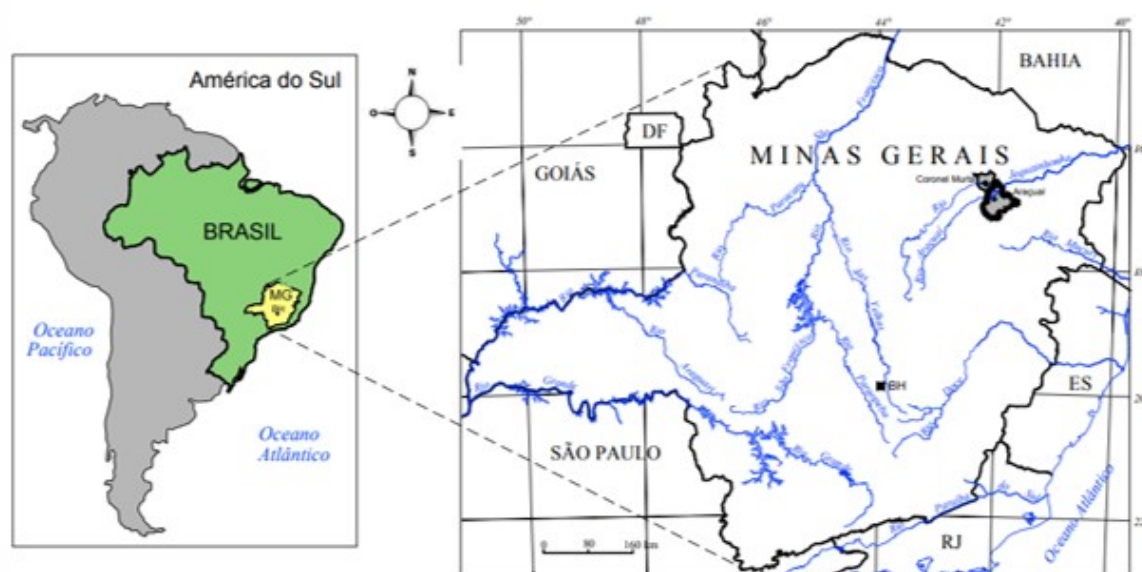


Figura 1 - Localização da área de Araucaí e Coronel Murta, Estado de Minas Gerais (adaptado de Fernandes, 2008).

é de 100°C até 1200°C, programável de 1 a 9999 minutos de 1 em 1 minuto.

Tratamento térmico de amostras de Turmalinas Elbaítas

De acordo com os relatos de pesquisadores, as faixas de temperaturas que apresentaram alteração de cor em turmalinas elbaítas encontram-se nas faixas de 225° a 250°C (Koivula & Kammerling, 1991 apud Shigley et al., 2001), de 350° a 550° C C (Koivula & Kammerling, 1990 apud Shigley et al., 2001) e de 480° a 620°C (Shigley et al., 2001).

Desta forma, neste presente trabalho, foram definidas 4 (quatro) faixas de temperaturas para verificar a mudança de cor nas turmalinas elbaítas de cores bem diversas e com tonalidades também diferentes, a saber, a 250° C, a 350° C, a 500° C e a 620° C, por um tempo estimado médio de 60 minutos.

Antes do início do tratamento térmico, foi realizada uma seleção criteriosa das amostras de turmalina a serem submetidas ao ensaio. Foram escolhidas três amostras de cada uma das cores previamente definidas no processo de separação

por tonalidade (incolores, cinzas, verdes, rosas, azuis, multicoloridas e negras). No entanto, em alguns casos em que a quantidade era limitada, foram utilizadas apenas duas amostras de determinada cor.

Foi iniciado o processo de tratamento térmico, utilizando em geral 3 amostras de cada cor para a temperatura de 250° C por 60 minutos em um forno/mufla Modelo SSFM do Laboratório Multiusuário III da UNIFAL, campus avançado de Poços de Caldas-MG, com salto de aquecimento de 1 em 1 segundo para cada grau até atingir a temperatura definida. As amostras foram inseridas em um cadinho de porcelana e recobertas por areia fina quartzosa, para evitar possíveis choques térmicos que poderiam causar danos e quebras nas amostras.

Após o término do tempo de 60 minutos, o forno foi desligado e deixado para resfriar vagarosamente e controlada, sem abrir a câmara, por 24 horas até atingir seu resfriamento total e ficar em temperatura ambiente de 25° C. Esse mesmo processo foi replicado para as temperaturas de 350° C, 500° C e 620° C.

RESULTADOS DO TRATAMENTO TÉRMICO EM TURMALINAS ELBAÍTAS

Tratamento térmico a 250° C

A seguir, é apresentado os resultados obtidos para o tratamento térmico a 250° C para as amostras de turmalinas elbaítas incolores, cinzas claras, verdes claras, verdes escuras, verde muito escuras, rosas claras, rosas escuras, azuis claras, azuis escuras, multicoloridas e as negras (figura 2), onde as amostras antes do tratamento se encontram à esquerda e as amostras pós-trata-

mento térmico, encontram-se à direita.

Após finalizar o procedimento de tratamento térmico a 250° C, foi realizada uma análise visual comparativa sob lupa binocular na qual foi observado que:

- As amostras de turmalinas incolores que inicialmente apresentavam uma leve tonalidade amarelada ou castanha ficaram mais incolores;
- As amostras de turmalinas cinzas não apre-

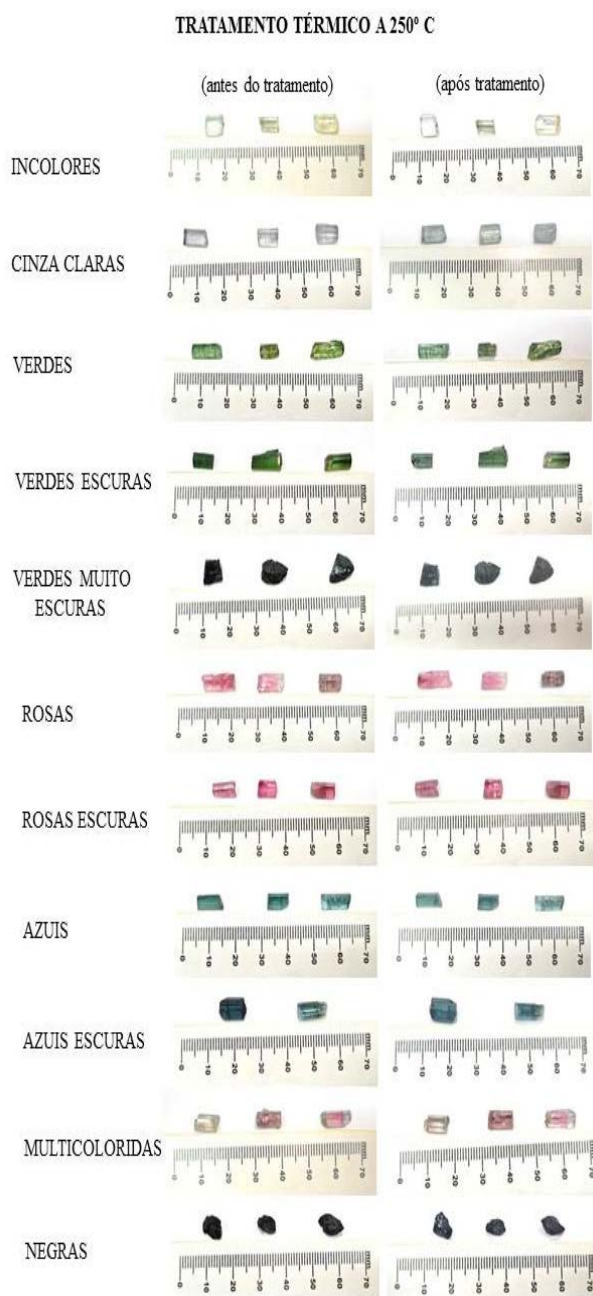


Figura 2 - Resultados do tratamento térmico a 250° C para diversas cores de turmalinas elbaítas.

apresentaram nenhuma mudança de tonalidade de cor;

- As amostras de turmalinas verdes e as amostras de turmalinas verdes escuras tiveram uma leve mudança na tonalidade para uma cor verde levemente azulada;

- As amostras de turmalinas verde muito escuras não apresentaram nenhuma alteração na tonalidade de cor;

- As amostras de turmalinas rosas e as amostras de turmalinas rosas escuras não apresentaram nenhuma mudança de tonalidade de suas cores;

- As amostras de turmalinas azuis e as amostras de turmalinas azuis escuras tiveram um ligeiro clareamento nas suas tonalidades de cor;

- As amostras de turmalinas multicoloridas tiveram um leve clareamento na tonalidade de suas cores; e por fim,

- As amostras de turmalinas negras não apresentaram nenhuma mudança de cor.

Tratamento térmico a 350° C

A seguir, é apresentado os resultados obtidos para o tratamento térmico a 350° C para as amostras de turmalinas elbaítas incolores, cinzas claras, verdes claras, verdes escuras, verde muito escuras, rosas claras, rosas escuras, azuis claras, azuis escuras, multicoloridas e as negras, conforme figura 3, onde as amostras antes do tratamento se encontram à esquerda e as amostras pós-tratamento térmico, encontram-se à direita.

Portanto, após finalizar o procedimento de

tratamento térmico a 350° C, foi realizada uma análise visual comparativa sob lupa binocular na qual foi verificado que:

- As amostras de turmalinas incolores que inicialmente apresentavam uma leve tonalidade amarelada ou castanha ficaram totalmente incolores e mais transparentes e brilhantes;

- As amostras de turmalinas cinzas não apresentaram nenhuma mudança de tonalidade de cor;

- As amostras de turmalinas verdes e as amostras de turmalinas verdes escuras tiveram uma mudança na tonalidade para uma cor verde azulada;

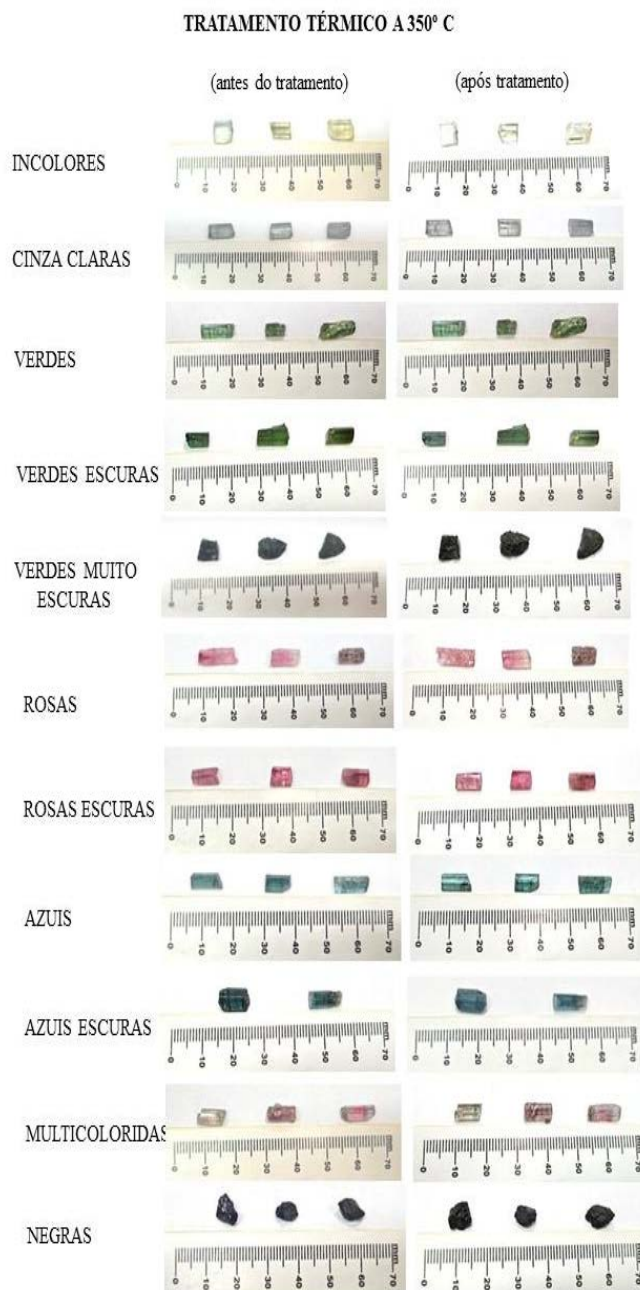


Figura 3- Resultados do tratamento térmico a 350° C para diversas cores de turmalinas elbaítas.

- As amostras de turmalinas verde muito escuras não apresentaram nenhuma alteração na tonalidade de cor;

- As amostras de turmalinas rosas e as amostras de turmalinas rosas escuras apresentaram uma leve mudança de tonalidade de suas cores, tornando-se um pouco mais claras, transparentes e mais brilhantes;

- As amostras de turmalinas azuis e as

amostras de turmalinas azuis escuras tiveram um clareamento nas suas tonalidades de cor azul, tornando-as um tom de azul mais nítido, mais transparente e brilhante;

- As amostras de turmalinas multicoloridas tiveram um leve clareamento na tonalidade de suas cores; e por fim,

- As amostras de turmalinas negras não apresentaram nenhuma mudança de cor.

Tratamento térmico a 500° C

A seguir, é apresentado os resultados obtidos para o tratamento térmico a 500° C para as amostras de turmalinas elbaítas incolores, cinzas claras, verdes claras, verdes escuras, verde muito

escuras, rosas claras, rosas escuras, azuis claras, azuis escuras, multicoloridas e as negras, conforme figura 4, onde as amostras antes do tratamento térmico se encontram à esquerda e as amostras pós-tratamento térmico, encontram-se à direita.

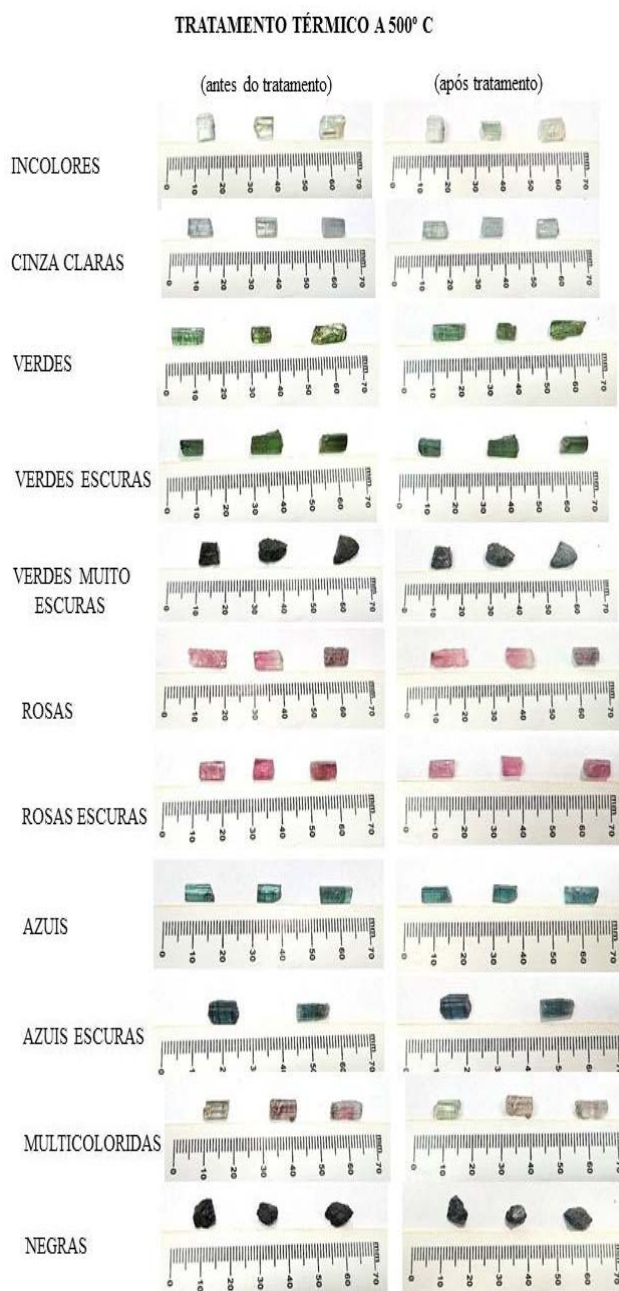


Figura 4 - Resultados do tratamento térmico a 500° C para diversas cores de turmalinas elbaítas.

Após finalizar o procedimento de tratamento térmico a 500° C, foi realizada uma análise visual comparativa sob lupa binocular na qual foi observado que:

- As amostras de turmalinas incolores permaneceram bem incolores e mais transparentes e brilhantes;
- As amostras de turmalinas cinzas claras ficaram um pouco mais claras, tendendo a incolores;
- As amostras de turmalinas verdes e as amostras de turmalinas verdes escuras tiveram uma

nova mudança na tonalidade levemente cor verde azulada;

- As amostras de turmalinas verde muito escuras não apresentaram nenhuma alteração na tonalidade de cor;
- As amostras de turmalinas rosas e as amostras de turmalinas rosas escuras apresentaram uma leve mudança de tonalidade de suas cores, tornando-se um pouco mais claras;
- As amostras de turmalinas azuis e as amostras de turmalinas azuis escuras tiveram um leve

clareamento nas suas tonalidades de cor azul, tornando-as um tom de azul mais definido, claro e brilhante;

- As amostras de turmalinas multicoloridas tiveram ficaram quase que totalmente incolores; e,
- As amostras de turmalinas negras não apresentaram nenhuma mudança de cor.

Tratamento térmico a 620° C

É apresentado a seguir os resultados obtidos

para o tratamento térmico a 620° C para as amostras de turmalinas elbaítas incolores, cinzas claras, verdes claras, verdes escuras, verde muito escuras, rosas claras, rosas escuras, azuis claras, azuis escuras, multicoloridas e as negras, conforme figura 5, onde as amostras antes do tratamento térmico se encontram à esquerda e as amostras pós-tratamento térmico, encontram-se à direita.

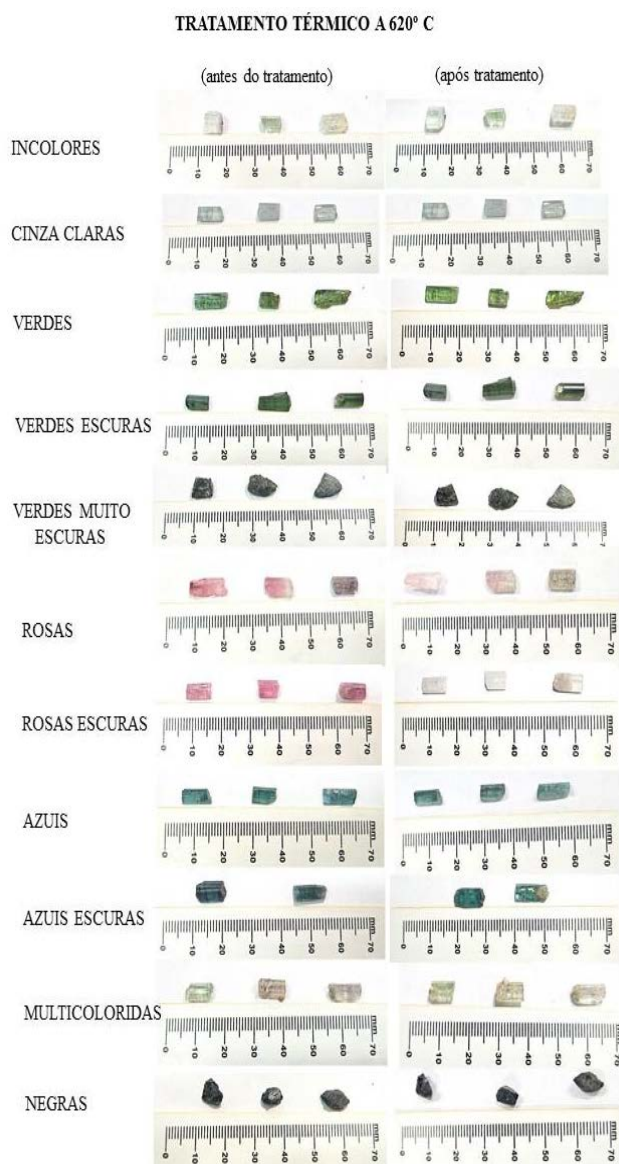


Figura 5 - Resultados do tratamento térmico a 500° C para diversas cores de turmalinas elbaítas.

Portanto, após finalizar o procedimento de tratamento térmico a 620° C, foi realizada uma análise visual comparativa sob lupa binocular na qual foi verificado que:

- As amostras de turmalinas incolores permaneceram totalmente incolores e mais brilhantes;
- As amostras de turmalinas cinzas claras permaneceram da mesma cor;
- As amostras de turmalinas verdes e as amostras de turmalinas verdes escuras tiveram

uma nova mudança na tonalidade para levemente de cor verde azulada a verde amarelada e um apresentando um leve aumento na intensidade de brilho e transparência;

- As amostras de turmalinas verde muito escuras tiveram alteração na tonalidade de cor, ficando levemente mais claras;
- As amostras de turmalinas rosas e as amostras de turmalinas rosas escuras apresentaram uma mudança completa de cor, tornando-

se brancas leitosas ou totalmente incolores;

- As amostras de turmalinas azuis e as amostras de turmalinas azuis escuras tiveram um leve clareamento nas suas tonalidades de cor azul, tornando-as um tom de azul mais definido, um

azul mais claro e mais brilhante e transparente;

- As amostras de turmalinas multicoloridas tiveram ficaram quase que totalmente incolores; e,

- As amostras de turmalinas negras não apresentaram nenhuma mudança de cor.

CONCLUSÕES

As amostras de turmalinas elbaítas foram obtidas de duas importantes procedências, a saber das regiões de Araçuaí e de Coronel Murta no norte do Estado de Minas Gerais, regiões essas do país onde muito se exploram turmalinas desta variedade e com tamanha diversidade de cores e tonalidades. Desta forma, foram obtidas amostras de turmalinas elbaítas incolores, cinza claras, verdes, verdes escuras, verdes muito escuras, rosas, rosas escuras, azuis, azuis escuras, multicoloridas e negras, o que possibilitou uma análise bem detalhada dos resultados dos tratamentos térmicos em diversas faixas de temperaturas (250° C, 350° C, 500° C e a 620° C).

As turmalinas incolores ou levemente amareladas, na primeira fase do tratamento térmico a 250° C, já se tornaram bem incolores e com melhoria na intensidade do brilho e transparência. Assim permaneceram nas demais etapas de tratamentos térmicos nas fases posteriores, a 350° C, 500° C e a 620° C.

As turmalinas cinzas claras tiveram um leve clareamento de cor quando submetidas ao tratamento térmico a 500° C, e nada ocorreu nas demais faixas de temperaturas.

As turmalinas elbaítas verdes e verdes escuras, desde o início do tratamento térmico, já tiveram um clareamento na tonalidade da cor e foi algo progressivo até 500° C, tornando-se verdes levemente azuladas. Porém, após o tratamento a 620° C, tornaram-se verdes levemente amareladas. Já as turmalinas verdes muito escuras, somente tiveram um pequeno clareamento, algo muito sutil, a partir dos 620° C. Em ambiente oxidante, a redução do Fe^{+3} para Fe^{+2} , presença do Mn^{+3} ou a redistribuição de íons de ferro podem ser a causa para um clareamento na cor verde.

As turmalinas elbaítas rosas e rosas escuras tiveram um ligeiro clareamento na sua tonalidade rosa a partir do tratamento térmico a 350° C assim como a 500° C, tornando-se também mais transparentes e brilhantes. Quanto submetidas à temperatura de 620° C, tornaram-se totalmente incolores, isso devido a redução do Mn^{+3} para Mn^{+2} , onde o Mn^{+2} praticamente não absorve no visível.

As turmalinas elbaítas azuis e azuis escuras, desde o início do tratamento térmico a 250° C, já apresentaram um ligeiro clareamento nas suas tonalidades de azul. Quando submetidas ao tratamento térmico a 350° C, 500° C e a 620° C, foram se tornando levemente mais claras e mais transparentes e brilhantes. Essa perda na intensidade da cor se deve à mudança no estado de oxidação do Fe^{+2} para Fe^{+3} em ambiente oxidante.

As turmalinas elbaítas multicoloridas, desde o início do tratamento térmico a 250° C até 350° C, foram se tornando levemente mais claras, mais transparentes e brilhantes. Após o 500° C se apresentaram quase ou totalmente incolores. Já em temperaturas superior, a 620° C, tornaram-se todas totalmente incolores.

As turmalinas elbaítas negras, quando submetidas em todas as etapas de tratamentos térmicos, desde 250° C até 620° C, não apresentaram nenhuma mudança ou alteração de cor, permanecendo totalmente negras em todas as faixas de temperaturas adotadas. A cor negra se deve à elevada absorção de ferro que satura completamente o espectro visível e quando aquecida não atenua sua cor devido à elevada quantidade de ferro total, onde a oxidação parcial do Fe^{+2} para Fe^{+3} não é suficiente para causar uma variação perceptível na absorção ótica.

Portanto, pode-se concluir que turmalinas elbaítas verdes e azuis responderam satisfatoriamente ao tratamento térmico até 500° C, com clareamento nas suas tonalidades de cores, cores essas mais apreciadas no comércio, valorizando-as. Já as turmalinas rosas, sofreram clareamento nas suas tonalidades de rosa, até 500° C, porém isso não traz uma valorização, pois perderam a intensidade da cor rosa, que é a mais apreciada e valorizada. Quando sob tratamento a 620° C, tornaram-se incolores, e assim, depreciadas no comércio. As turmalinas cinzas não apresentaram mudanças significativas com o tratamento térmico. As turmalinas multicoloridas foram perdendo intensidade de cores, e clareando com os tratamentos térmicos até 350° C. A partir de 500° C, tornaram-se incolores, algo também depreciativo no mercado de gemas. E por fim, as

turmalinas negras não sofreram nenhuma alteração de cor e tampouco na sua transparência em todas as etapas de tratamento térmico.

Este trabalho contribuiu para mostrar que é possível alterar a cor e a tonalidade de várias cores de turmalinas elbaítas, tornando algumas mais apreciadas no mercado, com cores mais nítidas, mais brilhantes e mais transparentes e assim, mais valorizadas, como foram as amostras verdes e as azuis.

Já as demais, ficaram muito claras ou perderam intensidade na cor, como as rosas, as cinzas e as multicoloridas, tornando-se aos poucos quase incolores, o que faz com que percam valor no mercado de gemas. As turmalinas cinzas foram as que menos apresentaram alterações na sua cor e as negras permaneceram estáveis quanto sua cor e não tiveram sua transparência alterada pelo tratamento térmico.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, A.; LUPPI, R.; SKOGBY, H.; HÅLENIUS, U.; TEMPESTA, G.; PEZZOTTA, F.; BOSI, F. Thermal Treatment of the Tourmaline Fe-rich Princivalleite $\text{Na}(\text{Mn}_2\text{Al})\text{Al}_6(\text{Si}_6\text{O}_{18})(\text{BO}_3)_3(\text{OH})_3\text{O}$. **Physics and Chemistry of Minerals**, v. 50, n. 27, p. 1-12, 2023.
- BERNARDES M.O. The mystic of Paraíba tourmaline. In: Unpublished report delivered at the INTERNATIONAL COLORED GEMSTONE (ICA) CONGRESS, Abano Terme, Italy, 1999.
- BOMAL, F.; HATERT, F.; PHILIPPO, S.; GUENNOU, M.; DEPRET, M.; WANG, H.; LEFEVRE, P.; ERAMBERT, M. Crystal chemistry and trace-element behaviour in tourmalines from Minas Gerais. **European Journal of Mineralogy**, v. 37, p. 709–731, 2025.
- BOSI, F.; CELATA, B.; SKOGBY, H.; HALENIUS, U.; TEMPESTA, G.; CIRIOTTI, M.E.; TITTARELLO, E.; MARENGO, A. Mn-bearing purplish-red Tourmaline from the Anjanabonoina pegmatite, Madagascar. **Mineralogical Magazine**, v. 85, p. 242–253, 2021.
- CLARK, D. Guia para Iniciantes sobre Tratamentos Térmicos Comuns em Pedras Preciosas. Fonte: <https://www.gemsociety.org/article/gemstone-heat-treatments/> (acesso em 02 de setembro de 2024).
- FAYE, G.H. & NICKEL, E.H. The origin of color in blue elbaite tourmaline. **The Canadian Mineralogist**, v. 9, n. 4, p. 618-622, 1968.
- FAYE, G.H. The optical absorption spectrum of Mn^{+3} in tourmaline. **The American Mineralogist**, 53, p. 1765-1772, 1968.
- FERNANDES, M.M. **Viabilidade Agronômica do Uso do Rejeito de Garimpos do Distrito Pegmatítico de Araçuaí, MG**. Belo Horizonte, 2008, 172 p. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais.
- FILIP, J.; BOSI, F.; NOVAK, M.; SKOGBY, H.; TUCEK, J.; CUDÁ, J.; WILDNER, M. Iron redox reactions in the tourmaline structure: High-temperature treatment of Fe^{3+} -rich schorl. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 86, p. 239–256, 2012.
- FRITSCH, E.; SHIGLEY, J. E.; ROSSMAN, G. R.; MERCER, M.E.; MUHLMEISTER, S. M.; MOON, M. Gem-Quality Cuprian-Elbaite Tourmalines from São Jose da Batalha, Paraíba, Brazil. **Gems & Gemology**, v. 26, n. 3, p. 189-205, Gemological Institute of America, 1990.
- FUCHS, Y.; LAGACHE, M.; LHOTÉ, F. Fe-tourmaline synthesis under different T and fO_2 conditions. **American Mineralogist**, v. 83, p. 525–534, 1998.
- JESUS, R.X1; CANDEIAS, L.M.M.; MARÇAL, F.A.; PAGEL, U.R.; SOARES, P.V.D.; NEWMAN CARVALHO, D.T. DE; CAROLINO, J.; BENTO, T.B.; NEWMAN, J.A.; FERREIRA, A.C.P.; PAULA, B.N.; PERINI, D.S. Análise Comparativa: Turmalina Paraíba do Brasil, Moçambique e Nigéria. In: II SEMANA DE GEMOLOGIA, Universidade Federal do Espírito Santo, 2009. **Anais...**Vitoria: 2009.
- KLEIN, C. & DUTROW, B. **Manual de Ciência dos Minerais**. Tradução e Revisão Técnica: Rualdo Menegat, 23ª Ed., Porto Alegre: Bookman, 2012.
- KOIVULA J.I. & KAMMERLING R.C. Eds. Gem News: Paraíba tourmaline update. **Gems & Gemology**, v. 25, n. 4, p. 248–249. 1989.
- LI, K. & YUE, S. Mechanisms of Thermal Color Change in Brown Elbaite–Fluorelbaite Tourmaline: **Insights from Trace Elements and Spectral Signatures**. **Minerals**, 15, 1032, 2025.
- LIMA, P.R.A. DOS S. **Guia de Mineralogia: Museu de Mineralogia Victor Dequech / Paulo Roberto Amorim dos Santos Lima**, 2ª ed. – Belo Horizonte: Rona Editora, 2007.
- NOGUEIRA, V.M.; FAVA, N.; KAFINO, C.V.; LIMA, E.A.M. Técnicas de Espectrometria Raman e Análise de Microsonda Eletrônica Aplicada ao Estudo Gemológico e Identificação de Turmalina Paraíba Lidicoatita. In: 49º CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 2018, Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geologia, 2018.
- SHIGLEY, J.E.; COOK, B.C.; LAURS, B.M.; BERNARDES, M.O. An Update on “Paraíba” Tourmaline from Brazil. **Gems & Gemology**, v. 37, n. 4, p. 260–276, Gemological Institute of America, 2001.
- SVISERO, D.P. & FRANCO, R.R. **A Província Gemológica Brasileira**. Revista Escola de Minas, v. 40, n. 3, p. 3742, 1987.

Submetido em 5 de novembro de 2025

Aceito para publicação em 14 de abril de 2026