

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS**

**THATIANE FERNANDES NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO  
QUARTZO PARA OBTENÇÃO DE SUAS VARIEDADES GEMOLÓGICAS**

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

**THATIANE FERNANDES NUNES**

**DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO  
QUARTZO PARA OBTENÇÃO DE SUAS VARIEDADES GEMOLÓGICAS**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia Ambiental pelo Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Alfenas. Área de Concentração: Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Ana Olívia Barufi Franco de Magalhães

**POÇOS DE CALDAS/MG**

**2025**

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas  
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Nunes, Thatiane Fernandes.

Desenvolvimento do processo de beneficiamento do quartzo para obtenção de suas variedades gemológicas / Thatiane Fernandes Nunes. - Poços de Caldas, MG, 2025.

92 f. : il. -

Orientador(a): Ana Olívia Barufi Franco de Magalhães.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. Quartzo. 2. Gemologia. 3. Beneficiamento. 4. Radiação gama. 5. Tratamento térmico. I. Magalhães, Ana Olívia Barufi Franco de, orient. II. Título.

Thatiane Fernandes Nunes

**DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO QUARTZO PARA OBTENÇÃO DE SUAS VARIEDADES GEMOLÓGICAS**

O Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestra em Ciência e Engenharia Ambiental da pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Recursos Hídricos e Meio Ambiente

Aprovada em: 01 de Agosto de 2025.

Profa. Dra. Ana Olívia Barufi Franco de Magalhães

Presidente da Banca Examinadora

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Fernando Soares Lameiras

Instituição: Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear

Prof. Dr. Matheus Fernando Ancelmi

Instituição: Universidade Federal de Alfenas



Documento assinado eletronicamente por **Ana Olívia Barufi Franco de Magalhães, Professor do Magistério Superior**, em 01/08/2025, às 15:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1577442** e o código CRC **F8240CF9**.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à

Universidade Federal de Alfenas, aos técnicos e professores do Instituto de Ciência e Tecnologia, que contribuíram para a evolução do projeto e todo o conhecimento adquirido por mim. A minha orientadora Ana especificamente, pela paciência e compreensão e por me proporcionar essa oportunidade.

Ao Laboratório Multiusuário 3 da UNIFAL, onde desenvolvi as etapas do tratamento térmico da pesquisa e passei inúmeras horas promovendo e discutindo os estágios do processo. Agradeço a cooperativa Uniquartz pelo fornecimento das amostras, e ao CDTN/UFMG pela irradiação das amostras.

Agradeço aos colegas que conheci durante as aulas, que me ajudaram na realização dos trabalhos e experimentos, em especial ao Cristiano Ramos da Cunha, que além do auxílio nas análises foi bastante prestativo para o entendimento das mesmas.

De maneira especial agradeço à minha família e amigos, a minha mãe singularmente, pelo apoio e incentivo de sempre e ainda mais durante esse percurso. Ao Gabriel, agradeço por me levar a iniciar esse ciclo.

Agradeço a Fundação de Amparo a Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG pela bolsa concedida para que eu pudesse continuar a pesquisa. Aos membros da banca Matheus e Fernando por se disporem a participar.

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001

## RESUMO

Com o aumento das buscas por alternativas viáveis de reaproveitamento de materiais, o presente trabalho descreve um estudo experimental focado no beneficiamento do quartzo hialino de rejeito mineral com objetivo de transformá-lo na variedade do quartzo *green gold*, visando aumentar seu valor mercado. Essa variedade, não encontrada naturalmente na natureza, possui cor amarelo esverdeado e é utilizada como material gemológico. O processo envolve o beneficiamento do material através da irradiação gama seguido do tratamento térmico, e a pesquisa buscou determinar as melhores condições de temperatura, tempo e dosagem de radiação para alcançar a coloração desejada desse quartzo. Para caracterizar as amostras antes e depois do tratamento, foram empregadas diversas técnicas analíticas, incluindo ICP OES, FTIR, DRX e Análise Térmica (TGA/DSC), além de fornecer contexto gemológico e geológico sobre o quartzo e suas variedades. O estudo foi realizado em duas etapas distintas. Na primeira etapa, as amostras foram padronizadas em tamanho e forma, para verificar se isso interfere na uniformidade da cor. Na etapa 2, as amostras foram beneficiadas em formas aleatórias. Os resultados indicaram que a padronização não interfere diretamente no alcance da cor, e que diferentes combinações de temperatura e tempo no tratamento térmico produzem variados graus de coloração. Com uma faixa de aquecimento entre 390°C a 410°C e tempo entre 12 e 15 minutos, os testes mostraram tons amarelos mais promissores, sendo mais sensíveis ao resultado do que a dosagem relacionada, uma vez que as mesmas não mostraram quaisquer padrões nos tratamentos.

Palavras-chave: quartzo; gemologia; beneficiamento; radiação gama; tratamento térmico.

## ABSTRACT

With the increasing search for viable alternatives to reuse materials, this work describes an experimental study focused on the beneficiation of hialino quartz from mineral waste in order to transform it into the variety of quartz green gold, aiming to increase its market value. This variety, not found naturally in nature, is greenish yellow and is used as gemological material. The process involves processing the material through gamma irradiation followed by heat treatment, and the research sought to determine the best conditions of temperature, time and radiation dosage to achieve the desired color of this quartz. To characterize the samples before and after treatment, several analytical techniques were employed, including ICP OES, FTIR, XRD and Thermal Analysis (TGA/DSC), in addition to providing gemological and geological context on quartz and its varieties. The study was conducted in two distinct stages. In the first step, samples were standardized in size and shape to verify if this interferes with color uniformity. In step 2, the samples were treated in random ways. The results indicated that standardization does not directly interfere with color range, and that different combinations of temperature and time in heat treatment produce varying degrees of color. With a heating range between 390°C to 410°C and time between 12 and 15 minutes, the tests showed more promising yellow tones, being more sensitive to the result than the related dosage, since they did not show any patterns in the treatments.

Keywords: quartz; gemology; beneficiation; gamma radiation; heat treatment.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quartzo green gold bruto (a) e lapidado (b).....	18
Figura 2 - Estrutura cristalina e tetraédrica SiO <sub>4</sub> do quartzo.....	19
Figura 3 - Ametista Bruta.....	21
Figura 4 - Cristais de Citrino de Ocorrência Natural.....	22
Figura 5 - Cristais de quartzo fumê e morion, respectivamente.....	23
Figura 6 - Quartzo hialino e leitoso, respectivamente.....	24
Figura 7 - Cristais de green gold da região de São José da Safira/MG.....	26
Figura 8 - Quartzo honey incolor (a), depois de irradiado (b), irradiado e tratado termicamente (c) e lapidado (d).....	27
Figura 9 - Mapa geológico do Brasil com as indicações das formações hidrotermais da Bacia do Paraná e da Serra do Espinhaço, e das formações pegmatíticas graníticas.....	28
Figura 10 - (Mina do Tião) e pegmatítico (Minas Boca Rica e do Bode). Localização das minas de quartzo hialino nos ambientes hidrotermal (Minas do Tião e Comechão) e pegmatítico (Minas Boca Rica e do Bode). (imagens obtidas do Google Earth e do Google Maps).....	29
Figura 11 - Distribuição da Serra do Espinhaço, com destaque nos locais de procedência dos cristais de quartzo, na região oriental brasileira.....	31
Figura 12 - Mapa de localização e vias de acesso à região de Corinto (MG).....	32
Figura 13 - Espectro Eletromagnético. O espectro visível ao olho humano abrange a faixa aproximada de 400 nm e 700 nm.....	33
Figura 14 - Quartzo green gold bruto (esquerda) e lapidado (direita) obtido por beneficiamento de radiação gama seguido do tratamento térmico.....	37
Figura 15 - Fluxograma Simplificado do Processo de Beneficiamento do Quartzo..	40
Figura 16 - Mufla utilizada no tratamento térmico das amostras.....	45
Figura 17 - Espectro de FTIR e fotografias de quartzo hialino natural e irradiado (a 65 kGy) e aquecido. No cristal, pesando 0,33 gramas, se observa as	

bandas 3.383, 3485 e 3595 cm <sup>-1</sup> características do green gold, com matiz amarelado, e os valores de fLi, área e c.....	48
Figura 18 - Espectrômetro de bancada do tipo FTIR Cary 360 a esquerda e o equipamento sendo testado com uma peça bruta da pesquisa (direita)..	49
Figura 19 - Difratorômetro de Raio X D2 PHASER/Bruker (A) e visualização interna (B) .....	51
Figura 20 - Difratoograma da amostra de quartzo, destacando os principais picos de minerais identificados.....	57
Figura 21 - Espectro de FTIR da amostra de quartzo hialino irradiada.....	58
Figura 22 - Espectro de FTIR da amostra de quartzo hialino bruta.....	59
Figura 23 - Resultado da análise térmica da amostra bruta em nitrogênio.....	60
Figura 24 - Resultado da análise térmica da amostra Irradiada não tratada em nitrogênio.....	61
Figura 25 - Resultado da análise térmica da amostra Irradiada após tratamento térmico em nitrogênio.....	62
Figura 26 - Amostras cortadas sem tratamento.....	63
Figura 27 - Amostras cortadas e irradiadas a 300, 600 e 900 kGy, respectivamente:..	63
Figura 28 - Amostras após tratamento térmico de 300°C por 25 minutos de 180 e 300 kGy.....	64
Figura 29 - Amostras após tratamento térmico de 300°C por 25 minutos de 600 e 900 kGy.....	64
Figura 30 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas a 180 kGy.....	65
Figura 31 - Resultado do tratamento térmico das amostras irradiadas a 180 kGy. À esquerda a temperatura é de 350°C por um tempo de 10 minutos, e a direita de 400°C por 10 minutos.....	66
Figura 32 - Resultado do tratamento térmico das amostras irradiadas a 180 kGy. De modo respectivo: 350°C por 10 minutos, 375°C por 8 minutos, 400°C por 8 minutos e 420 por 5 minutos.....	66
Figura 33 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas	

a 300 kGy.....	67
Figura 34 - Amostras irradiadas a 300 kGy, a temperatura de 350°C a 12 minutos (esquerda) e a 370°C a 10 minutos (direita).....	68
Figura 35 - Amostras irradiadas a 300 kGy, a temperatura de 400°C com exposição do tempo de 15 minutos, 380°C a 15 minutos e a 390°C por 8 minutos, nessa ordem.....	68
Figura 36 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas a 600 kGy.....	69
Figura 37 - Amostras irradiadas 600 kGY, com exposição a temperatura de 350°C por 15 minutos, 370°C por 12 minutos e 380°C por 15 minutos, respectivamente.....	70
Figura 38 - Amostras irradiadas a 600 kGy, a temperatura de 400°C a 8 minutos (esquerda) e a 400°C a 12 minutos (direita).....	70
Figura 39 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas a 900 kGy.....	71
Figura 40 - Resultado das amostras irradiadas a 900 kGy a temperatura de 350°C por 10 minutos, 360°C por 20 minutos e 380°C por 12 minutos da esquerda para direita.....	71
Figura 41 - Amostras irradiadas a 900 kGy 400°C por 8 minutos (esquerda) e 430°C graus por 5 minutos (direita).....	72
Figura 42 - Amostras irradiadas a 180, 300, 600 e 900 kGy para utilizadas na segunda etapa de testes do experimento.....	73
Figura 44 - Gráfico relacionando de temperatura e tempo referente a segunda etapa dos testes.....	74
Figura 45 - Primeiro teste da segunda etapa: amostras antes de serem aquecidas....	75
Figura 46 - Primeiro teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 220°C por 25 minutos.....	75
Figura 47 - Segundo teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 270°C por 20 minutos.....	76
Figura 48 - Segundo teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 350°C por 15 minutos.....	76

Figura 49 - Amostras antes de sofrerem interferência da temperatura.....	77
Figura 50 - Amostras submetidas a 350°C por 10 minutos.....	77
Figura 51 - Amostras aquecidas por mais 15 min a 350°C - duplicata do teste 3.....	77
Figura 52 - Processo detalhado 300 kGy.....	78
Figura 53 - Processo detalhado 600 kGy.....	78
Figura 54 - Quarto teste da segunda etapa: amostras antes de serem aquecidas...	79
Figura 55 - Quarto teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 410°C por 15 minutos.....	79
Figura 56 - Quinto ensaio do teste da segunda etapa: amostras antes de serem aquecidas.....	79
Figura 57 - Quinto ensaio da segunda etapa: amostras submetidas a 400°C por 12 minutos.....	80
Figura 58 - Sexto teste da segunda etapa: amostras antes do tratamento térmico..	81
Figura 59 - Sexto teste da segunda etapa: amostras antes do tratamento térmico inseridas no cadinho de porcelana.....	81
Figura 60 - Sexto teste da segunda etapa: Resultado das amostras submetidas a 380°C por 25 minutos.....	81
Figura 61 - Sétimo teste da segunda etapa: Resultado das amostras submetidas a 410°C por 12 minutos.....	82
Figura 62 - Oitavo teste da segunda etapa: Resultado das amostras submetidas a 390°C por 15 minutos.....	83
Figura 63 - Gráfico Relação de temperatura e tempo referentes às 2 etapas dos experimentos.....	83
Figura 64 - Destaque dos resultados dos testes referentes 3, 7 e 8 da segunda etapa.....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Escala Mohs de Dureza de Risco.....	17
Tabela 2 - Principais Propriedades do Quartzo.....	21
Tabela 3 - Comparação entre as formas de irradiação de gemas.....	42
Tabela 3 - Comparação entre as formas de irradiação de gemas.....	43
Tabela 4 - Referências analíticas da Caracterização do quartzo.....	48
Tabela 5 – Resultados da análise química por ICP OES das amostras de quartzo hialino (QH_1) e leitoso (QL_1).....	56
Tabela 6 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 180 kGy.. ..	66
Tabela 7 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 300 kGy... ..	68
Tabela 8 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 600 kGy... ..	70
Tabela 9 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 900 kGy... ..	71
Tabela 10 - Parâmetros de temperatura x tempo referente a segunda parte experimental.....	74

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS.....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
<b>3 DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>16</b>
3.1 GEMAS.....	16
3.2 QUARTZO.....	19
<b>3.2.1 Variedades do quartzo.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2.2 Quartzo como Gema.....</b>	<b>26</b>
3.3 GÊNESES DOS DEPÓSITOS DE QUARTZO.....	26
<b>3.3.1 Contexto Geológico Regional.....</b>	<b>31</b>
<b>3.3.2 Localização e Vias de Acesso.....</b>	<b>33</b>
3.4 COR.....	34
<b>3.4.1 As causas da Cor Relacionadas a Irradiação.....</b>	<b>35</b>
<b>3.4.2 Beneficiamento e o quartzo green gold.....</b>	<b>37</b>
<b>4 METODOLOGIA.....</b>	<b>40</b>
4.1 MÉTODOS DE IRRADIAÇÃO.....	42
<b>4.1.1 Irradiação por Raios Gama.....</b>	<b>43</b>
4.2 TRATAMENTO TÉRMICO.....	45
4.3 MÉTODOS ANALÍTICOS UTILIZADOS.....	47
<b>4.3.1 Método Analítico - ICP OES.....</b>	<b>47</b>
<b>4.3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)...</b>	<b>48</b>
.....	
<b>4.3.3 Difração de Raios X (DRX).....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.4 Análise Térmica.....</b>	<b>52</b>
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>55</b>
5.1 ICP OES.....	55

5.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X - DRX.....	57
5.3 FTIR.....	58
5.4 ANÁLISE TÉRMICA.....	60
5.5 TRATAMENTO TÉRMICO.....	63
<b>5.5.1 Primeira etapa.....</b>	<b>63</b>
<b>5.5.2 Segunda etapa.....</b>	<b>74</b>
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>86</b>
<b>7 SUGESTÕES FUTURAS.....</b>	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Os minerais usados como gemas, são aqueles que após serem lapidados despertam interesse devido às suas propriedades especiais como cor, brilho, beleza e raridade, sendo usados como ornamento ou joias geralmente possuindo alto valor econômico. A gemologia é a ciência que estuda os materiais gemológicos para a identificação, classificação e avaliação de inúmeras peças como esmeraldas, diamantes, ametistas, turmalinas entre diversos outros.

O Brasil produz grande parte dessas variedades, de acordo com o Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM, 2018), se destacando no mercado de joias alinhando tecnologia e criatividade, e devido a isso os estudos acerca de sua origem, identificação e aproveitamento devem ser aprimorados.

O beneficiamento de materiais gemológicos são os procedimentos realizados para melhorar suas propriedades a fim de agregar valor de mercado, e assim apresentar uma maior aceitabilidade para o mesmo. Dentre os diversos processos, destaca-se o beneficiamento por alteração da cor, uma vez que essa característica é considerada uma das mais importantes e conseqüentemente uma das que mais agrega valor comercial às mesmas. Existem tipos de tratamentos considerados práticas comerciais estabelecidas bem aceitas no mercado como exemplo a transformação permanente da cor da gema por tratamento térmico, seguido ou não de radiação por raios gama.

Um mineral-gema, como o quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), suscetível a alteração de cor quando exposto à irradiação gama, acrescidos de tratamento térmico ou não, podendo gerar uma gema com valor comercial superior. O quartzo, um dos minerais mais abundantes na natureza, é encontrado em muitas variedades coloridas como o citrino, o quartzo-rosa, a ametista, assim como o incolor e transparente, caso do quartzo hialino e leitoso. Nesse último caso, devido à facilidade de possíveis tratamentos em especial com radiação gama, de acordo com Correa (2010), as cores resultantes podem chegar a marrom, amarelo, amarelo-esverdeado, verde, laranja e inclusive o vermelho, como cores mais atrativas para o quartzo.

Comparados os quartzos coloridos aos naturais, os análogos estão sendo largamente introduzidos no mercado joalheiro principalmente devido a sua

homogeneidade de cor, segundo Pinto (2010), que ainda afirma que apesar de estar sendo investigado há muito tempo, a causa da cor em muitas espécies de quartzo continua em aberto, mas sua produção para aplicações joalheiras vem ocorrendo com um crescimento considerável. Algumas matizes obtidas através desses tratamentos não são encontradas na natureza, como é o caso da tonalidade amarelo-esverdeada, e quando o quartzo desenvolve essa cor é conhecido como quartzo *green gold* (Barbosa, 2012).

De posse dessas informações, o propósito deste trabalho é correlacionar o beneficiamento em amostras de quartzo hialino por irradiação gama seguido de tratamento térmico, visando alcançar a tonalidade *green gold* para agregar valor nas peças e serem inseridas no mercado joalheiro. Como as amostras de quartzo são provenientes de um material de rejeito mineral adquiridas de uma cooperativa de garimpos, o estudo também prioriza o questionamento relevante em se buscar alternativas viáveis de reaproveitamento de materiais, e neste caso melhorar as propriedades das mesmas a fim de se considerar seu uso para fins gemológicos, através do seu beneficiamento.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho possui caráter experimental, portanto para o estudo da pesquisa foram traçados objetivos para uma melhor organização e desenvolvimento da proposta. Através desse estudo, objetiva-se estabelecer uma metodologia de beneficiamento do rejeito de quartzo oriundo de uma cooperativa de garimpos em Corinto/MG. O intuito é analisar a interferência da radiação gama juntamente com o tratamento térmico na alteração de cor do quartzo hialino na perspectiva de se agregar valor às peças para fins gemológicos, alcançando a tonalidade da variedade do quartzo *green gold* após o beneficiamento.

### 2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Especificamente, os objetivos foram:

- a) Examinar a conduta das amostras de quartzo hialino mediante o tratamento por radiação gama em diferentes dosagens, seguido do tratamento térmico em laboratório.
- b) Aplicar esses ensaios de beneficiamento (radiação gama e tratamento térmico) para alcançar a coloração do quartzo *green gold* nas peças de quartzo.
- c) Considerar a possibilidade de melhoramento da qualidade das amostras para uso gemológico, agregando valor ao material desse rejeito para um aproveitamento dos mesmos no mercado joalheiro.
- d) Classificar e detalhar as amostras que obtiveram melhores resultados aparentes com os testes.
- e) Realizar ensaios físico-químicos que justifiquem que estabeleçam uma relação entre as amostras e a formação de cores resultantes nas mesmas após o beneficiamento.

### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 GEMAS

A mineralogia é o ramo das Ciências Geológicas que estuda os minerais através de suas propriedades, estruturas, modos de ocorrência e afins. A definição de mineral se refere a uma substância natural, sólida, cristalina, comumente inorgânica com composição química definida. Um mineral que pode ser lapidado e que possui propriedades especiais é considerado gemológico, geralmente chamado de gemas (Terra, 2020).

O termo gema, derivado do latim “*gemma*” corresponde a toda substância natural ou sintética, lapidada, rara, e que por suas características e propriedades como transparência, cor, brilho, dureza e certos efeitos ópticos especiais podem ser usadas para adorno pessoal (Franco; Svisero, 1987).

A Associação Internacional de Mineralogia - IMA (2024), reconhece mais de 6 mil espécies de minerais atualmente válidos, e de tempos em tempos novos são descobertos. De acordo com Schumann (2013), o termo “gema”, em virtude de suas propriedades e qualidades peculiares, pode ser usado apenas por aproximadamente 2% dos minerais.

A preciosidade das gemas, o que agrega valor ao material é o conjunto de atributos que elas apresentam para que possam ser consideradas preciosas (do latim *pretiosus* – de grande valor). Ou seja, não necessariamente qualquer peça terá um valor compensável para o mercado. O mineral com qualidade gemológica possui o equilíbrio entre cor, transparência, e brilho, forma e tamanho, durabilidade, raridade, além de considerar o fator da qualidade da lapidação (Terra, 2020).

A raridade das gemas está relacionada com sua ocorrência na natureza. Algumas espécies minerais são raras, enquanto outras ocorrem com mais frequência, e conseqüentemente isso influencia na procura de determinadas peças, fazendo com que o valor das mais comuns seja menor em relação àquelas que ocorrem com menos abundância. O preço de um item é comparado com a quantidade da oferta e da demanda, por isso nesse sentido a raridade geológica é observada e importante nesse sentido.

A durabilidade no âmbito da gemologia tem relação direta com características de dureza, tenacidade e estabilidade. A dureza é uma comparação à resistência ao

risco, ou seja, ao atrito do mineral. Quanto mais fácil ele se risca, menor a sua dureza e, seguindo essa lógica, quanto maior a dureza mais dificilmente ele será riscado. A escala que avalia essa propriedade é comparativa, denominada de escala Mohs. Ela utiliza 10 diferentes minerais na natureza, mostrados na Tabela 1, medindo a resistência ao risco que um tem em relação ao outro e varia de 1 a 10 (maior o número, maior a dureza). Pela escala de Mohs, qualquer mineral risca o anterior e é riscado pelo próximo.

Tabela 1 - Escala Mohs de Dureza de Risco

<b>Mineral</b>	<b>Dureza (Mohs)</b>
Talco	1
Gipsita	2
Calcita	3
Fluorita	4
Apatita	5
Ortoclásio	6
Quartzo	7
Topázio	8
Córidon	9
Diamante	10

Fonte: Mol (2004).

A tenacidade de um material é explicada pela sua resistência à deformação. O ouro, por exemplo, conforme Branco (2008), é o metal mais maleável e dúctil – propriedade de se modelar sem se romper. Mesmo com uma baixa dureza (2,5 a 3,0), com apenas 1 grama de ouro se pode obter até 2.000 metros de fio. Por isso, para a confecção de joias com esse metal, usam-se ligas com 75% de ouro (18 Kilates ou 18K), para aumentar sua tenacidade. Se compararmos com o vidro, o mesmo se romperia e quebraria facilmente ao aplicarmos uma pequena força mesmo possuindo dureza superior (5,5 a 7) o que não ocorreria com o ouro, ele apenas amassa ao invés de quebrar.

O fator relacionado à estabilidade se refere à resistência da gema aos efeitos da luz, calor e produtos químicos (Terra, 2020). O quartzo rosa, exemplificando, pode ter sua coloração alterada se submetido a exposições diárias de luz solar.

Na caracterização de interesse gemológico, o Boletim Referencial de Preços

de Diamantes e Gemas de Cor – IBGM (2009), identifica uma série de características do material que possibilitam sua identificação, como forma cristalina, hábitos dos cristais, dureza, clivagem, cor, brilho, densidade, dentre outras. Além disso, afirma que o sistema de classificação de gemas de cor no mercado é baseado numa graduação dos chamados **4 Cs** (**Carat** = Quilate, **Color** = Cor, **Clarity** = Pureza e **Cut** = Lapidação).

Para identificar e certificar as gemas, a sua densidade pode ser usada por ser uma propriedade específica e característica de cada mineral, uma vez que está diretamente relacionada com sua composição química e o arranjo dos átomos que o compõem (Brum; Juchen, 2014). Os autores explicam que a unidade de medida de peso usada para gemas é o quilate (*carat*, em inglês; símbolo = ct), que corresponde a 200 mg (1 ct = 200 mg). Ou seja, o peso das gemas de cor é expresso em quilates (1 ct = 0,2 g).

O quilate representado nesse caso, indica apenas o peso da joia. Se ela pesar 1g, ela possui o equivalente a 5 ct e assim por diante. Já no caso do ouro, por exemplo, a representação é em relação à pureza do metal, a sua proporção naquela liga. Um adorno feito com ouro puro é chamado ouro 24K, e possui comportamento maleável.

A pureza é um fator correspondente a ausência ou presença de inclusões, assim como das imperfeições externas, sendo que sua quantidade e qualidade interferem na transparência e beleza da gema. É considerado o segundo fator para avaliação das gemas, influenciando bastante em seu valor (IBGM, 2009).

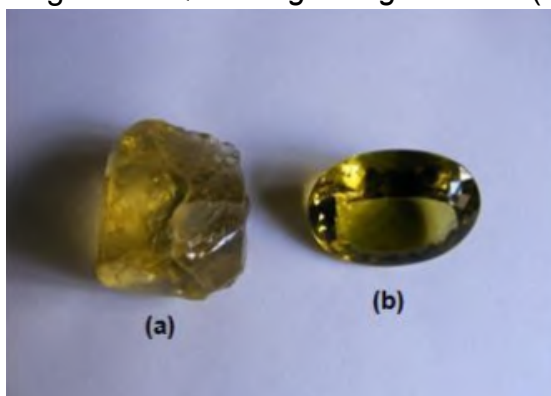
A cor, considerada o fator que mais aumenta o valor da peça em entendimento do Boletim Referencial de Preços de Diamantes e Gemas de Cor - IBGM (2009), se considera a relação entre sua boa uniformidade e distribuição na gema, não apresentando manchas. Ela é uma característica de percepção humana, não sendo absoluta de um objeto, ou seja, a cor de um material é decorrente dos comprimentos de onda na qual ele é capaz de absorver e refletir.

Ao ocorrer a incidência de luz em um mineral gema, uma parte dos seus comprimentos de onda é absorvida e outra parte refletida e transmitida através da mesma, sendo sua cor correspondente ao somatório dos comprimentos de onda que não foram absorvidos. Se nenhum comprimento de onda é absorvido, ela é incolor e se toda a luz é absorvida, ela aparece preta (Brum; Juchen, 2014).

O quarto fator, a lapidação, é o processo de corte e polimento. O seu objetivo

é melhorar visualmente as propriedades referentes a cor e brilho das gemas, que as torna ainda mais valiosas por selecionar o formato e que melhor representam suas propriedades, sendo o principal processo de beneficiamento e o melhor meio de agregar valor aos materiais gemológicos (Brum; Juchem, 2014). A figura 1 exemplifica o processo mostrando um quartzo *green gold* bruto (antes da lapidação) e após ser lapidado.

Figura 1 - Quartzo *green gold* bruto (a) e lapidado (b)



Fonte: Enokihara (2013, p 54).

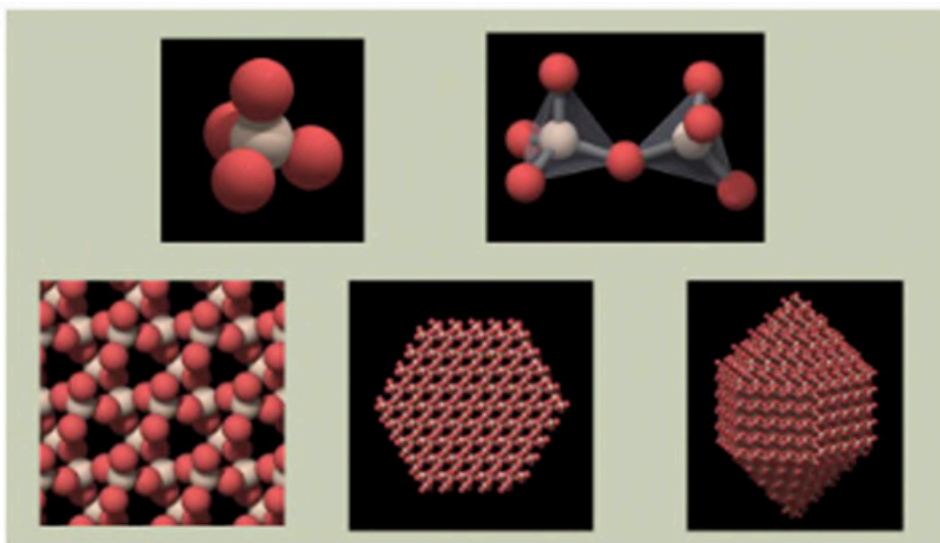
A indústria joalheira mundial é o destino final da maior parte das gemas lapidadas. Historicamente o Brasil é conhecido pela grande ocorrência e produção de várias pedras preciosas, como aponta o Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos – IBGM (2019), que afirma ainda que com exceção do diamante, rubis e esmeraldas, o Brasil se classifica no 2º lugar dos maiores fornecedores de pedras coradas, sendo referência de diversidade, qualidade e lapidação. Por ser um país extenso e diversificado geologicamente, essa ideia não seria diferente.

### 3.2 QUARTZO

O quartzo é um mineral da classe dos silicatos, sendo um dos mais abundantes na distribuição superficial da crosta terrestre (Correa, 2010). São constituídos por tetraedros de  $\text{SiO}_4$  (Silício e Oxigênio), formando uma estrutura tridimensional de maneira que todos os oxigênios dos vértices são compartilhados com os tetraedros vizinhos (Barbosa, 2009). O resultado dessa interação entre Si e O é uma estrutura estável formada por ligação química híbrida (iônica e covalente) na qual a razão Si:O é de 1:2. A Figura 2 mostra a reação da estrutura

tridimensional da disposição atômica dos átomos de oxigênio e sílica de quartzo.

Figura 2 - Estrutura cristalina e tetraédrica  $\text{SiO}_4$  do quartzo



Fonte: Adaptado de Akhavan (2011).

A estrutura  $\text{SiO}_2$  é capaz de utilizar diferentes maneiras de compartilhamento dos átomos de oxigênio que compõem os tetraedros. São conhecidos como polimorfos, ou seja, a mesma composição química  $\text{SiO}_2$  (dióxido de silício) mas estruturas cristalinas distintas, que são devido a temperatura e pressão de formação do ambiente geológico de acordo com Klein e Dutrow (2012).

A série dos polimorfos do quartzo é caracterizada por possuir diferentes cores: incolor, roxa, esfumaçada, amarela, preta, rosa, e apresentam importantes aplicações (Magalhães; Silva; Paiva, 2019). Cada uma dessas estruturas possui morfologia, dimensão de cela unitária e energia de rede própria; cada uma delas com um campo de estabilidade bem definido sob condições de equilíbrio (Barbosa, 2012).

O quartzo apresenta alta resistência ao intemperismo devido às suas propriedades, sendo muito estável mesmo em altas temperaturas, com grande resistência a ataques químicos (Correa, 2010). É também um mineral de grande durabilidade físico e quimicamente, e devido a isso Barbosa (2009) aponta que, quando as rochas ficam expostas durante muito tempo sob a ação dos agentes atmosféricos, alguns se desagregam, mas os grãos de quartzo resistem formando a maior parte dos cascalhos dos rios, das areias das praias e desertos. A Tabela 2 apresenta as principais propriedades do quartzo.

Tabela 2 - Principais Propriedades do Quartzo

Cor	Incolor ou branco, e colorido por impurezas como Li, Na, Al, Fe, Mn, Ti, P, H, entre outros.
Dureza (Mohs)	7
Densidade	2,65
Fórmula Química	SiO <sub>2</sub> (Óxido de silício)
Composição	46,7% de Si – 53,3 % O <sub>2</sub>
Peso Específico	2,6481 g / cm <sup>3</sup>
Ponto de Fusão	1705 ° C
Tenacidade	Frágil
Transparência	Transparente a translúcido
Traço	Incolor, branco (se puro)
Índice de refração	1,544 – 1,553
Fluorescência	Não apresenta
Brilho	Vítreo, gorduroso em algumas espécies.
Sistema Cristalino	Trigonal: (baixa temperatura) Hexagonal: (alta temperatura)

Fonte: Adaptado de Pinto (2012) e Correa (2010).

### 3.2.1 Variedades do quartzo

Quando puro, o quartzo é incolor, transparente, cristalino e muito rígido. Ele também ocorre em formas densas, sem cristais visíveis e muitas vezes multicoloridos (Correa, 2010). Algumas variedades não são encontradas na natureza, sendo os quartzos sintéticos, crescidos em condições semelhantes às do quartzo incolor usando-se soluções hidrotermais (Pinto, 2012). Como a cor desse mineral é devido à incorporação de impurezas, essa solução hidrotérmica adiciona essas impurezas causadoras da cor no mineral.

As inclusões nos minerais são muito frequentes. As inclusões fluidas são pequenos volumes de fluidos que ficam aprisionados os minerais durante ou após sua formação, e o quartzo, em concordância com Correa (2010) é um das espécies

com maior variedade de inclusões. A autora cita as mais comuns encontradas no mineral: hematita, magnetita, ouro, rutilo, enxofre, turmalina, fluorita, manganês, calcita, pirita, mica, zircão, granada, entre outros. A seguir, as principais variedades coloridas do quartzo com suas características são exemplificadas.

A **ametista** é o quartzo transparente com a presença do ferro como impureza, cuja cor violeta está indubitavelmente associada à presença desses íons de  $\text{Fe}^{3+}$  (Pinto, 2012). E por Enokihara (2013), está relacionada com o resultado da adsorção devido transferência de carga existente entre o  $\text{O}^{2-}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , originando o  $\text{Fe}^{4+}$ , indicando exposição à radiação natural ou artificial, explicando a transformação do ferro trivalente em ferro tetravalente causando a cor roxa, ou seja, a presença do ferro no quartzo são considerados precursores de cor da ametista. Sua cor raramente é distribuída uniformemente, embora em gemas lapidadas possa parecer. Um exemplo do mineral é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Ametista Bruta



Fonte: Natural Mystic (2020).

A variedade do **citrino** corresponde aquela de cor amarela a marrom-amarelada, podendo ser encontrado naturalmente ou por tratamento térmico da ametista e do quartzo fumê (Mol, 2004). O citrino de ocorrência natural varia entre cinza amarelado, cinza esverdeado e amarelo pálido amarronzado. Conforme Correa (2010), a causa da cor do citrino natural é compreendida hoje, pela presença do íon  $\text{Al}^{3+}$  na estrutura do quartzo, substituindo o íon  $\text{Si}^{4+}$ . Afirma ainda que os citrinos naturais são raros, e têm sua origem por irradiação natural. Um exemplo dos cristais naturais é mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Cristais de Citrino de Ocorrência Natural



Fonte: Akhavan (2011).

O citrino, então, pode ser produzido pelo tratamento térmico da ametista, aquecendo-a em uma faixa de temperatura entre 45°C a 600°C para obter colorações de amarelo claro a amarelo escuro/amarronzado. A irradiação também pode ser citada como um importante mecanismo para se obter os tons do citrino.

O **quartzo fumê** agrupa as variedades do quartzo cuja cor varia de pardo acastanhado (variedade fumê ou enfumaçado) até quase preto (*morion*) (Figura 5). As matrizes dessa variedade são atribuídas à radioatividade natural a que o cristal foi submetido. Drummond (2009) afirma que para a radioatividade atuar mudando a cor, faz-se necessária a presença de impureza na estrutura do quartzo, como o alumínio que substitui o silício. Sua cor então é dada pelo defeito na estrutura, podendo também ser obtido em laboratório pela irradiação do quartzo incolor.

Figura 5 - Cristais de quartzo fumê e *morion*, respectivamente



Fonte: Akhavan (2011).

O **quartzo hialino** (cristal de rocha) é o quartzo em seu estado ideal, sendo a variedade incolor, transparente e geralmente quimicamente puro, pois guarda essas características quando não possui inclusões de outros elementos e minerais em sua estrutura. Ele é um dos minerais gema mais abundantes e uma das principais variedades gemológicas do quartzo. Esse mineral tem sido alvo de diversos tratamentos e experimentos a fim de se obter gemas coradas. Ao ser submetido a irradiação seguido ou não de tratamento térmico, pode desenvolver cores dependendo da existência de elementos dopantes ou permanecer incolor, se for quimicamente puro (Drummond, 2009).

Uma variedade similar é o **quartzo leitoso**, material que varia de branco a cinza claro, sendo uma espécie de menor interesse gemológico. O aspecto leitoso (figura 6) é geralmente devido a inclusões fluidas, e ele pode ser encontrado associado a qualquer outra variedade do quartzo.

Figura 6 - Quartzo hialino e leitoso, respectivamente



Fonte: Autoria própria (2023)

Outra variedade de coloração amarelo esverdeado é o quartzo denominado *green gold* (Figura 1), que possui centros de cor produzidos por irradiação e tratamento térmico, resultando em tonalidades que vão de amarelo a verde oliva (Pinto, 2012). O mesmo autor relata que dependendo de sua composição (ferro e alumínio) e principalmente da proporção relativa dos centros de cor e das fases presentes, bem como do tratamento térmico, ambas as variedades (amarelo citrino e verde amarelado do *green gold*) podem ser encontradas numa mesma peça.

Porém, na natureza não se encontram quartzos *green gold*, apenas os citrinos que possuem ocorrência relativamente rara, então a maior parte das cores desse quartzo são obtidas irradiação seguida de tratamento térmico. Essa espécie de quartzo, então, pode ser obtida, por exemplo, através do processo de radiação gama, que o torna fumê a preto, e posteriormente se aplica o tratamento térmico até se obter a cor entre os tons desejados.

Outra maneira é utilizar o quartzo fumê de ocorrência natural e submetê-lo a baixas temperaturas, onde nesse caso a cor é adquirida pela substituição dos íons  $\text{Si}^{4+}$  pelo íon  $\text{Al}^{3+}$ , causando um desequilíbrio eletrônico, o qual compensado pela entrada de um cátion de  $\text{H}^+$  ou de  $\text{Li}^+$  na estrutura (Correa, 2010).

Existem algumas outras variedades de cor do quartzo como o verde, o azul, róseo, alguns com tonalidades criadas por experimentos em laboratório, porém são mais raros e de formação ainda sendo discutidos.

### 3.2.2 Quartzo como Gema

O quartzo foi provavelmente o primeiro mineral a ser usado pelo ser humano, principalmente como adorno (Drummond, 2009). O autor referencia que *Theophrastus* em seu trabalho *On Stones*, publicado em cerca de 300 a.C. fez referência ao quartzo e suas variedades coloridas, mais do que qualquer outro mineral. Ele é apreciado como mineral-gema não apenas pelo seu valor intrínseco ou por sua raridade, mas devido a suas diversas cores.

Algumas variedades coloridas da espécie com cristais bem formados, alto brilho, transparência elevada, cor uniforme e baixo índice de inclusões podem apresentar caráter gemológico, que são destinados a joalherias para fins esotéricos. Devido a sua grande importância técnica, sua abundância e seu papel nos processos geológicos, o quartzo é provavelmente um dos minerais mais estudados nos últimos tempos, mas ainda nem tudo sobre ele pode ser compreendido (Correa, 2010).

A ametista, por exemplo, é uma das variedades do quartzo mais apreciadas no mercado de gemas, assim como o citrino e as variedades do quartzo fumê. A crescente aceitação dessas gemas no mercado joalheiro torna o quartzo uma matéria prima importante na oferta de produtos minerais do país (Mol, 2004).

### 3.3 GÊNESES DOS DEPÓSITOS DE QUARTZO

Existem diversos ambientes geológicos onde o quartzo pode ser encontrado, e as ocorrências de quartzo no Brasil podem ser classificadas em relação à gênese em depósitos primários e secundários (Enokihara, 2013). Em conformidade com o autor, os depósitos primários correspondem às formações de origem hidrotermal e pegmatítica e os secundários são os depósitos residuais que estão localizados próximos das regiões das formações hidrotermais e pegmatíticas, sendo originadas pelo intemperismo e erosão dos mesmos. Existem então, dois ambientes principais para seus depósitos: Veios Hidrotermais, e Pegmatíticos Graníticos, sendo eles responsáveis pela formação dos cristais de quartzo de qualidade gemológica.

O ambiente pegmatítico granítico também denominado de Província Pegmatítica Oriental Brasileira abrange todo o cinturão que se estende de Santa

Catarina até o Rio Grande do Norte e partes da região Norte e Centro-Oeste (Enokihara, 2013). O quartzo do ambiente pegmatítico é formado a alta temperatura e pressão (400°C a 500°C e aproximadamente 1500 a 3000 kgf/cm<sup>3</sup> de pressão) e tem uma baixa taxa de crescimento dos cristais. São produtos de fracionamento ígneo a partir de um material granítico, frequentemente ocorrendo de forma tabular e variam de poucos centímetros até centenas de metros de comprimento apresentando em alguns casos quilômetros de comprimento e, localmente, com 200 a 300 metros de espessura (Barbosa, 2012).

As variedades de quartzo que são encontradas nos domínios pegmatíticos são o citrino, a ametista, o quartzo róseo, e o quartzo incolor. São encontrados principalmente na região e Minas Gerais, onde o quartzo incolor da região pode adquirir, quando submetido a beneficiamento por tratamento térmico e radiação cores diferentes, variando entre o verde amarelado, comercialmente conhecido pelo quartzo *green gold*, encontrado nas regiões de São José da Safira (MG). Outro exemplo de quartzo amarelo amarronzado é o designado de quartzo *honey*, encontrado na localidade de Coluna, próximo a cidade de Itamarandiba – MG (Enokihara, 2013). A Figura 7 mostra um quartzo *green gold* da região citada e a Figura 8 exemplifica o processo da variedade do quartzo *honey*.

Figura 7 - Cristais de *green gold* da região de São José da Safira/MG



Fonte: Correa (2010, p. 115).

Figura 8 - Quartzo *honey* incolor (a), depois de irradiado (b), irradiado e tratados termicamente (c) e lapidado (d).



Fonte: Enokihara (2013, p. 54).

Os veios hidrotermais são o resultado de expressivas adições e/ou subtrações de componentes químicos, por meio da migração de fluidos aquosos de alta a baixa temperatura, desde curtas a longas distâncias, e fornecem normalmente o quartzo (cristal de rocha) e fragmentos ou lascas de quartzo (Correa, 2010).

Devido aos veios serem quase exclusivamente formados por minerais de quartzo, os mesmos também são conhecidos como “veios de quartzo”. A mesma autora afirma que a grande massa desses veios é formada por quartzo leitoso, material de qualidade gemológica inferior ao quartzo hialino. Em geral os cristais hialinos emergem de massas de quartzo leitoso, que por sua vez encontram-se encaixadas em quartzitos, rochas graníticas ou sedimentos.

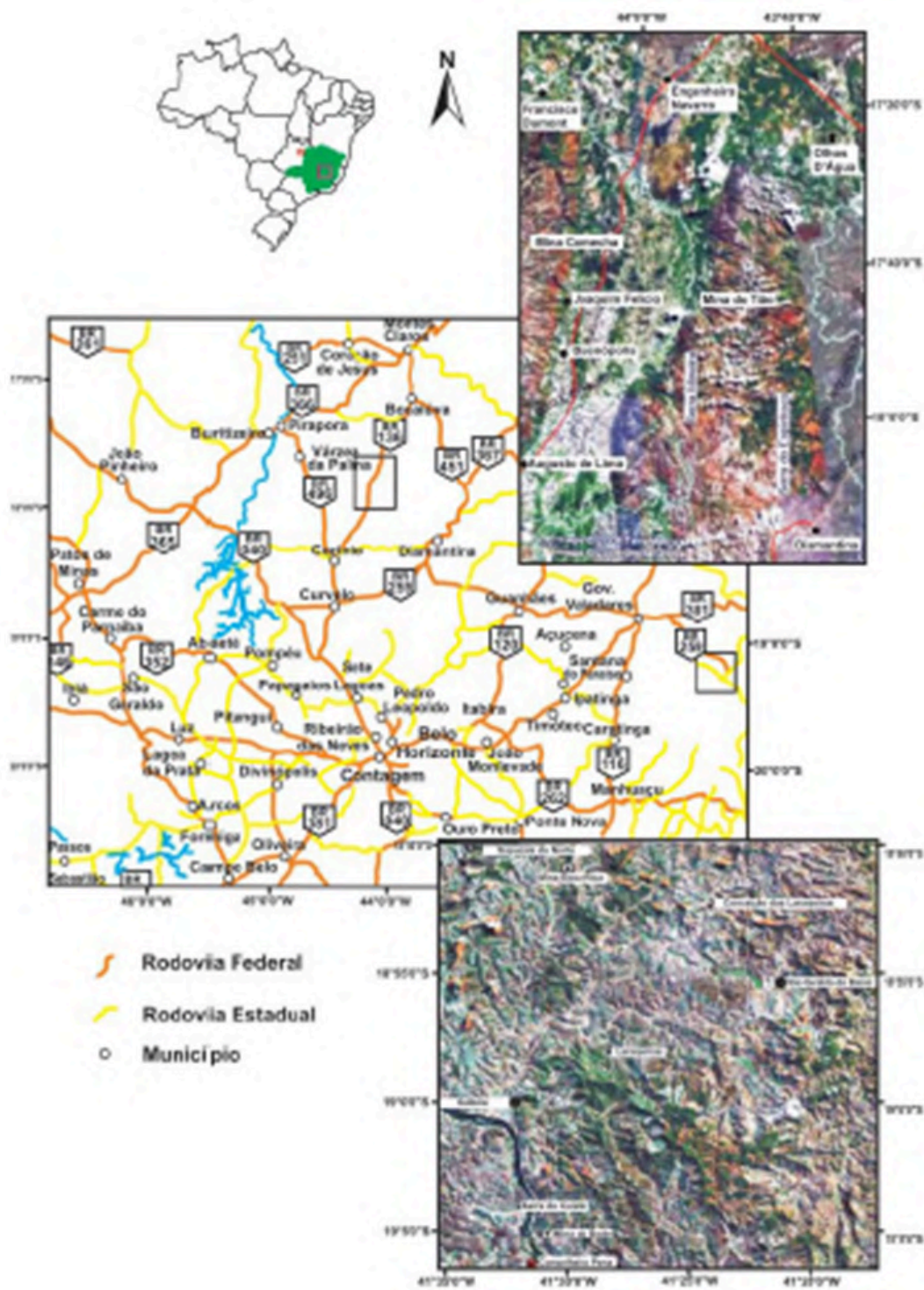
Os veios hidrotermais de quartzo podem ser fundamentados pelo baixo grau de solubilidade da sílica em água em condições de baixa pressão e temperatura. Quando fluidos hidrotermais ricos em  $\text{SiO}_2$  preenchem cavidades existentes nas rochas graníticas próximas à crosta, nanocristais de quartzo hialino crescem inclinados ou perpendiculares às paredes das cavidades (Correa, 2010). A Figura 9 a seguir mostra o mapa geológico do Brasil indicando as formações hidrotermais e graníticas. Logo em seguida, para exemplificar, a Figura 10 apresenta a localização das minas de quartzo hialino nos ambientes hidrotermal.

Figura 9 - Mapa geológico do Brasil com as indicações das formações hidrotermais da Bacia do Paraná e da Serra do Espinhaço, e das formações pegmatíticas graníticas



Fonte: Enokihara (2013, p.53).

Figura 10 - (Mina do Tião) e pegmatítico (Minas Boca Rica e do Bode). Localização das minas de quartzo hialino nos ambientes hidrotermal (Minas do Tião e Comechão) e pegmatítico (Minas Boca Rica e do Bode). (imagens obtidas do Google Earth e do Google Maps).



Fonte: Drummond, Mendes e Lameiras (2010, p. 451).

### 3.3.1 Contexto Geológico Regional

Num mesmo corpo e em um mesmo ambiente geológico, o teor de impurezas do mineral pode variar. O domínio geológico que compõe o contexto das amostras de quartzo utilizadas neste trabalho é conhecido como Serra do Espinhaço. A região é compreendida como um conceito geográfico cuja extensão vai desde o Quadrilátero Ferrífero, nas proximidades de Belo Horizonte, até os limites dos estados do Piauí e Pernambuco (Correa, 2010).

O Espinhaço, como também é conhecido, tem predomínio de quartzos de origem hidrotermal. Os depósitos hidrotermais compreendem as variedades de quartzo que são encontradas em geodos ou veios da Serra do Espinhaço, segundo Enokihara (2013). A autora explica que os geodos disseminados nas rochas basálticas da Bacia do Paraná geram quartzos como ametista, a ágata, o quartzo hialino (incolor) e podem ser encontrados nas localidades do Estado do Rio Grande do Sul, Santa Catarina, com derrames basálticos atingindo as regiões sudeste do Brasil e parte do Uruguai, Argentina e Paraguai. Esses cristais da Bacia do Paraná são gerados por baixas temperaturas e pressão.

O quartzo da Serra do Espinhaço é formado a baixa e média temperatura (200°C a 300°C) e pressões maiores do que o quartzo da Bacia do Paraná, apresentando menos imperfeições, ou seja, possui menos defeitos de crescimento (Enokihara, 2013). A Serra do Espinhaço então se situa no sudeste do Brasil, com uma extensa faixa linear com direção que se inicia nos arredores de Belo Horizonte (MG), acompanha a leste o Cráton do São Francisco e segue para o interior da zona cratônica no Estado da Bahia até a área da Chapada Diamantina (Figura 11).

Figura 11 - Distribuição da Serra do Espinhaço, com destaque nos locais de procedência dos cristais de quartzo, na região oriental brasileira



Fonte: Barbosa (2009, p.10).

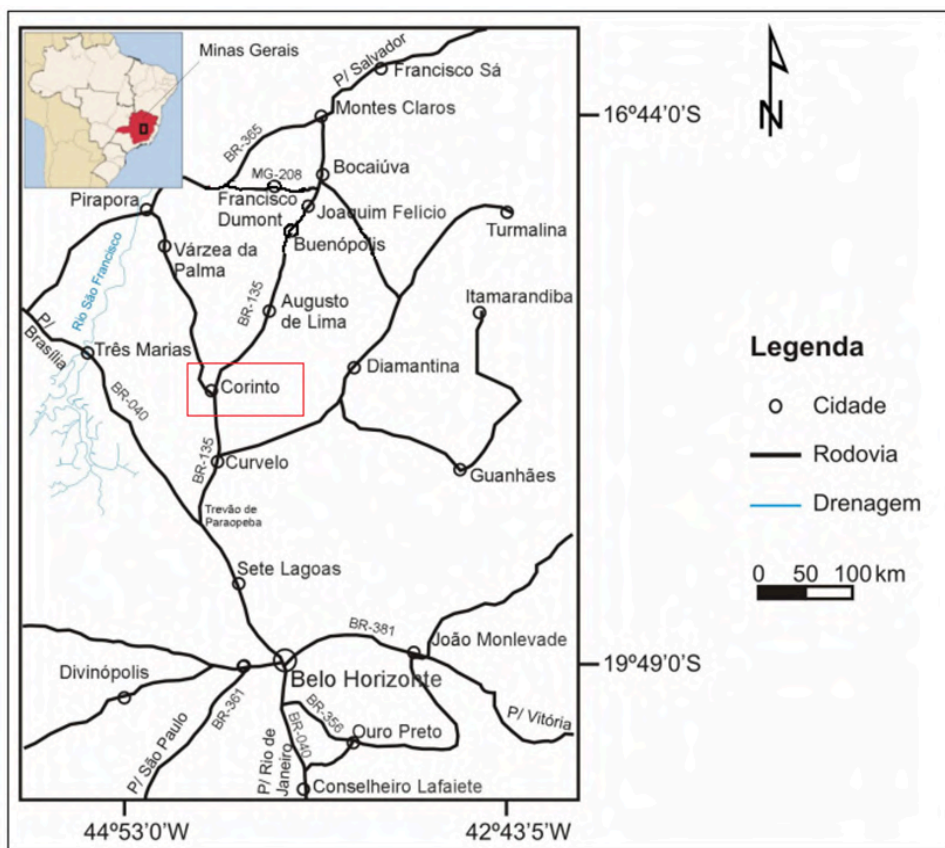
Em relação aos veios da Serra do Espinhaço, as rochas associadas são as quartzíticas do Supergrupo Espinhaço, onde a Serra do Espinhaço está abrangida. Ela compõe principalmente os Estados de Minas Gerais e da Bahia, com variedades do quartzo incolor que podem ser transformados em quartzos coloridos, como já mencionados pelo processo de radiação, provenientes da região de Corinto (MG), Curvelo (MG), Oliveira do Brejinho (BA).

As amostras de quartzo utilizadas nesta pesquisa são procedentes da região de Corinto/MG e foram obtidas por doação da Cooperativa Uniquartz. São pertencentes à região geológica Supergrupo São Francisco/Grupo Bambuí, inserido na província de São Francisco (CPRM/CODEMIG, 2014).

### 3.3.2 Localização e Vias de Acesso

A cooperativa Uniquartz está localizada no endereço: Rodovia BR 135, KM 579 – Fazenda Capão da Rocha, Corinto – MG, CEP: 392999-000, Caixa Postal 20. Partindo-se de Belo Horizonte, o acesso é feito pela BR – 040, tomando-se direção a Brasília até Sete Lagoas pela mesma BR por 73 m. Seguindo por mais 49 km ainda pela BR – 040, chega-se ao trevo (Trevo de Paraopeba), pega-se a direção sentido Montes Claros pela BR – 135, passando por Curvelo, dirigindo-se até a próxima cidade que é Corinto, local onde se encontra a Cooperativa. A Figura 12 mostra o percurso para chegar à cidade de Corinto, localização da Uniquartz.

Figura 12 - Mapa de localização e vias de acesso à região de Corinto (MG)



Fonte: Adaptado de Drummond (2009).

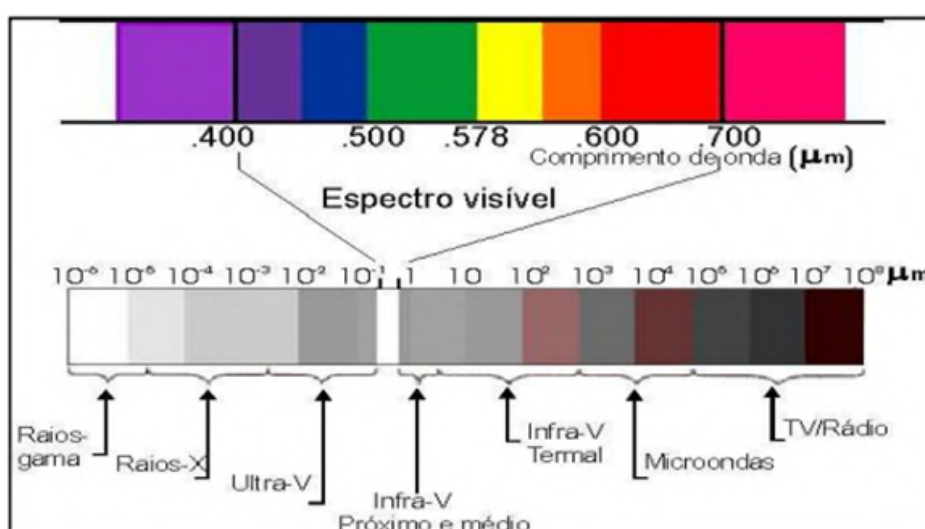
O grupo da região do centro de Minas tem o quartzo silício como principal produto, e compõe uma equipe de garimpeiros, mineradores e lapidários desenvolvendo as atividades como foco além da extração, mas abrangendo várias etapas da cadeia produtiva do quartzo.

A Cooperativa tem por objetivo extrair, adquirir, receber, classificar, armazenar, transportar, beneficiar, industrializar, comercializar e registrar, se for o caso a produção de pedras preciosas, semipreciosas, minerais metálicos e não metálicos, incluindo a cadeia produtiva, buscando a defesa socioeconômica de seus cooperadores.

### 3.4 COR

A cor é uma das principais propriedades ópticas observadas em um mineral, sendo importante até para sua identificação. Sabe-se que a cor de um mineral ocorre quando eles absorvem, refletem ou transmitem luz, ou seja, a resposta do olho a escala da luz visível do espectro eletromagnético, e da adsorção dos comprimentos de onda do espectro visível. A luz branca emitida pelo sol consiste nos comprimentos de onda do espectro visível, que se estendem de 375 nm a 740 nm (nm = nanômetro) (Mol, 2004). O espectro eletromagnético é mostrado na Figura 13 abaixo.

Figura 13 - Espectro Eletromagnético. O espectro visível ao olho humano abrange a faixa aproximada de 400 nm e 700 nm



Fonte: Correa (2010, p.100).

A cor apresentada por um objeto, de acordo com Mol (2004), difere-se em três sentidos: a Matriz, representando o comprimento de onda predominante pelo qual a gema pode ser descrita como verde azul ou vermelha; a Saturação, representando a quantidade de luz branca misturada a matriz; e Intensidade, sendo o grau que aquela cor difere de um cinza de mesmo tom. Por esse motivo, segundo o mesmo autor, é comum o uso de termos pelos gemólogos como vermelho-amarelado e amarelo esverdeado, por exemplo.

A coloração não é causada apenas pela composição química do mineral. Mas também pela presença de inclusões, impurezas e defeitos cristalinos (Barbosa, 2012). O autor afirma que o quartzo natural pode conter inclusões sólidas e fluidas, que são resíduos aprisionados pelo mineral durante sua cristalização, assim como impurezas, que são elementos traços presentes em diferentes posições na sua rede cristalina.

A ametista, por exemplo, contém o ferro como elemento de impureza, e ele causa distorção na rede cristalina que causa absorção pelo material da luz de cor amarela, verde e laranja, o que causa a transmissão de luz (cor) violeta característica (Mol, 2004). Já o defeito é representado por qualquer violação na simetria da posição da estrutura cristalina, ou seja, lacunas causadas por irradiação, impurezas como átomos ou íons não são considerados defeitos (Barbosa, 2012).

O íon silício ( $\text{Si}^{4+}$ ), de acordo com Helfenberger (2007), permite a incorporação apenas de pequenas quantidades de elementos na sua estrutura, devido ao seu tamanho e estrutura do quartzo, podendo ser substituído por Al, Fe, Ti, Ge, Ga, H e P. Se ocorrer déficit de cargas após a substituição, pode haver compensação de carga por cátions que correspondem principalmente a  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{H}^+$ , embora alguns outros íons também possam fazer essa substituição. As impurezas na estrutura do quartzo, então, contribuem para o aparecimento de defeitos na sua rede cristalina que se relacionam diretamente com a cor do mineral.

### **3.4.1 As causas da Cor Relacionadas a Irradiação**

A alteração da cor em um mineral pode ser feito por diversas técnicas: tingimento, impregnação, processos termoquímicos entre outros, sendo os processos de irradiação os mais utilizados no mundo (Ericksson; Brum; Silva, 2013).

O autor também considera que nesse processo de coloração, a cor final é definida pela dose de radiação e pelas impurezas da peça, e que no Brasil o processo utilizado é por irradiação de raios gama, cuja fonte geradora da radiação é o Cobalto 60, sendo que esta radiação não deixa resíduos e o material não se torna radioativo.

As cores nos minerais, quando eles são submetidos a qualquer tipo de radiação, não possuem uma única causa exclusiva, basicamente são três mecanismos identificados como causadores de cor em gemas irradiadas. A energia ionizante pode ser liberada na forma de partículas: radiação alfa, beta, raios gama ou nêutrons (Barbosa, 2012). Conforme o autor, então, os responsáveis pelas cores são: íons metálicos dispersos, transferência de cargas e centros de cor.

Íons metálicos dispersos ocorrem quando a presença de determinados elementos na estrutura do cristal (como Al, Ni, Cu, Fe, entre outros), e pode provocar o aparecimento da cor quando seus elétrons forem excitados pela luz do espectro visível, absorvendo assim, energia. Desse modo os elétrons podem saltar de um nível de energia baixo para um nível mais alto, e a depender da diferença de energia entre esses dois níveis será absorvida uma determinada frequência, resultando numa cor específica (Barbosa, 2009).

A transferência de carga em minerais acontece com a presença de elementos em dois estados de valência diferentes, que frente a determinadas causas como irradiação (natural ou induzida), calor e até mesmo a simples incidência da luz natural, um elétron pode ser transferido entre eles por oxidação de um e redução de outro (Barbosa, 2009). Essa transferência de elétron de um átomo para outro causa a absorção de energia produzindo cor no cristal.

Os elétrons da banda de valência ao receberem energia suficiente da radiação, ocupam os níveis de energia criados pela presença do ativador. Ao deixarem de se excitar e retornarem aos níveis de valência, os elétrons emitem a energia referente à diferença dos níveis, na forma de fótons, que são então propagados pela estrutura cristalina. A produção dos fótons é proporcional à energia da radiação (Tauhata *et al.*, 2014).

Centros de cor, de acordo com o Comércio Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2010) é o fenômeno responsável pela origem da cor quando o mineral é exposto à irradiação. São defeitos pontuais induzidos em minerais através da irradiação natural existente nas rochas. Os centros de cor também podem ser

causados intencionalmente usando a radiação gama emitida pelo Cobalto 60 (Barbosa, 2009).

De acordo com o CNEN (2010), pesquisas têm mostrado que a maioria dos centros de cor produzidos na irradiação é devido à presença de determinados íons metálicos que não fazem parte da composição original do mineral, são impurezas tais como Mn, Al, Fe, Li, Cu, Ti que adentram na estrutura cristalina do mineral durante o seu crescimento.

Os centros de cor, então, são defeitos eletrônicos na estrutura do cristal que absorvem a luz, produzindo específicas bandas de absorção que irão proporcionar cor ao mineral (Barbosa, 2009). Basicamente o que ocorre no processo, segundo o autor, é que se formam dois centros complementares, um que doa o elétron ao átomo, e outro é o receptor desse elétron, onde apenas um deles causa a cor observada.

O aquecimento é um processo que reverte a situação, pois libera o elétron doado ao átomo de origem, restaurando a estrutura do cristal resultando em sua cor original (Barbosa, 2009).

### **3.4.2 Beneficiamento e o quartzo *green gold***

O beneficiamento de minerais gemológicos é considerado qualquer procedimento realizado, que não seja a lapidação e/ou polimento que vise melhorar a durabilidade, aparência, cor e brilho destes minerais de forma a agregar valor de mercado aos mesmos (Magalhães; Silva; Paiva, 2019). O quartzo é um mineral que pode ser beneficiado por radiação gama e tratamento térmico para lhe conferir um valor comercial superior ao inicial.

O método consiste em acelerar o processo de coloração, que a radiação natural emitida pelos elementos radioativos da natureza como urânio, tório e potássio existentes próximos aos minerais levariam milhares de anos para produzir os mesmos efeitos (Enokihara, 2013). O processo então é natural, e o modelo de beneficiamento por radiação faz o adiantamento do mesmo.

A partir da década de 1990 a bibliografia mostra que os ensaios laboratoriais baseados em radiação gama seguidos ou não de aquecimento começaram a ser aplicados no quartzo para alteração da cor. Drummond (2009) ressalta que as

espécies de quartzo hialino de Minas Gerais eram vendidas a preços irrisórios, e após a aplicação dessa técnica, eram agregados valores de até 100 vezes daquele inicialmente comercializado. Algumas cores eram semelhantes, inclusive às aquelas encontradas na natureza devido a ação da radioatividade natural da Terra. Assim, o autor explica que variedades de cor já conhecidas foram criadas com esses procedimentos (ametistas, citrino, fumê), além de variedades coloridas desconhecidas (*beer, green gold, champagne, whisky*).

A partir desse entendimento, é possível afirmar que o quartzo pode desenvolver cores diferentes após ser submetido a radiação gama seguido por tratamento térmico ou não. Como exemplo, tem-se a seguir uma figura (Figura 14) retirada de um *green gold* do trabalho de Drummond (2009), que foi irradiado a 65 kGy e posteriormente aquecida entre uma temperatura de 310°C e 31°C por um período de 20 minutos. O autor consta que o peso do cristal é de 50,96 gramas e o da gema é de 8,95 ct.

Figura 14 - Quartzo *green gold* bruto (esquerda) e lapidado (direita) obtido por beneficiamento de radiação gama seguido do tratamento térmico



Fonte: Drummond (2010)

O quartzo *green gold* é a variedade de coloração amarelo-esverdeada do mineral quartzo adquirida por radiação gama (cobalto-60) aplicada em quartzos originalmente hialinos de algumas regiões brasileiras. O nome *Green-Gold* (do inglês Ouro Verde) é uma referência aos matizes verde-amarelo que são adquiridos após exposição à irradiação (Barbosa, 2014).

De acordo com a ficha técnica dos das principais variedades adquiridas através da irradiação, trata-se de um dos primeiros quartzos irradiados e seu tratamento foi descoberto no início da década de 80 no Brasil pela empresa Embrarad, logo após a descoberta dos tratamentos para topázios azuis com o mesmo processo. Apresenta enorme aceitação comercial, estando sempre presente nas principais joalherias nacionais e internacionais.

O *green gold* não apresenta correspondente natural, portanto toda gema observada em joias é sempre produto do beneficiamento. Acredita-se que sua cor esteja relacionada ao conteúdo do Ferro adquirido das rochas no momento de seu crescimento na natureza, porém poucos trabalhos foram realizados neste sentido por alguns autores (Drummond, 2009, 2010; Barbosa, 2009, 2012; Enokihara, 2013) que buscaram estudos relacionados ao quartzo *green gold*.

## 4 METODOLOGIA

Neste trabalho estudou-se a correlação da radiação gama e tratamento térmico em amostras de quartzo provenientes da região de Corinto (MG) que foram obtidas pela doação da Cooperativa Uniquartz. As amostras no estado bruto foram separadas em quartzo da variedade hialino e leitoso, e retiradas nas Unidades da Cooperativa.

Devido a estudos já realizados previamente (Nunes, 2023), optou-se pela padronização inicial do tamanho das peças a fim de se retirar o parâmetro da fratura das mesmas, pela possibilidade de que isso alterasse a uniformidade das cores obtidas. No presente trabalho, apenas a variedade do quartzo hialino participou dos testes.

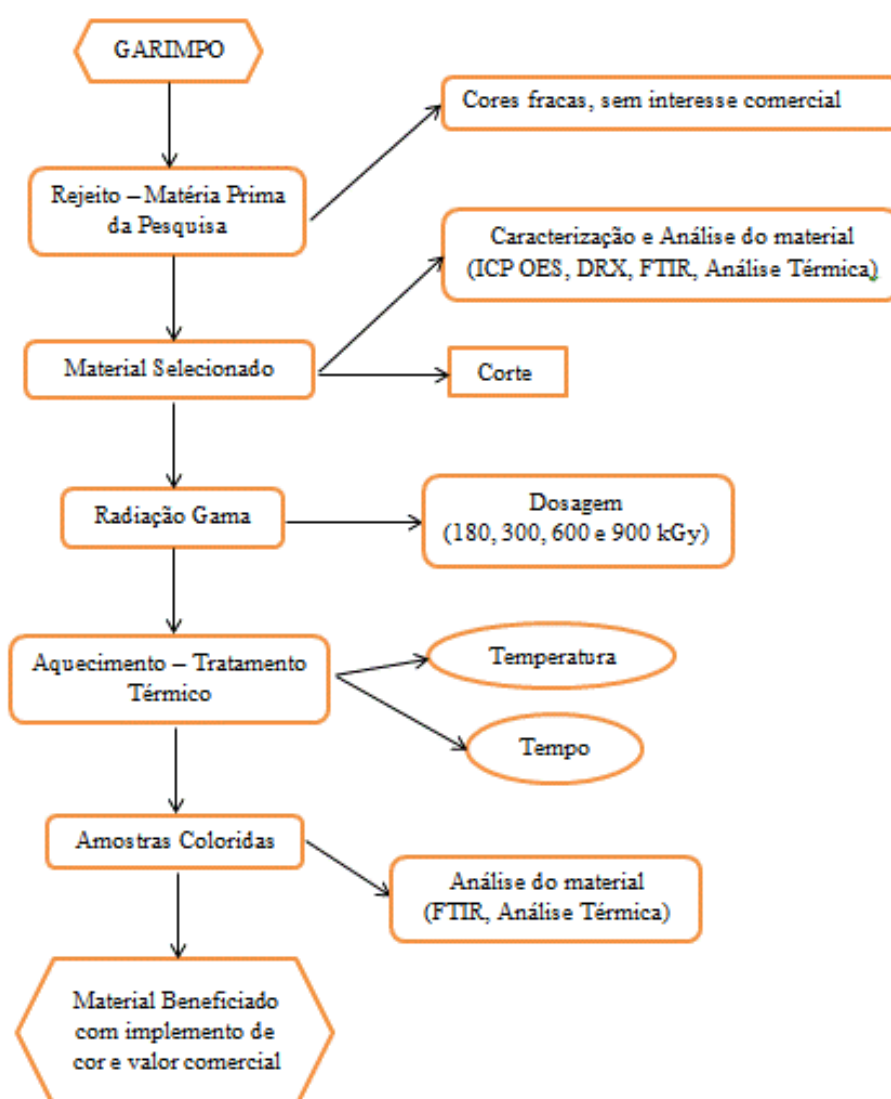
Assim, no primeiro momento dos testes todas as amostras tinham dimensões aproximadas de 2,0 x 2,0 cm, onde os cortes foram preparados no Laboratório de Laminação do Instituto de Geociências IG/UNICAMP, em Campinas – SP. O total das amostras cortadas foi de 24 peças, pois ocorreu uma perda considerável devido ao material ser muito friável.

Os procedimentos de beneficiamento do rejeito de quartzo hialino foram feitos, perante a submissão das amostras à radiação gama com fonte de Cobalto 60 ( $Co^{60}$ ), no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, localizado na Universidade Federal de Alfenas - UFMG. Os ensaios de tratamento térmico foram realizados no Laboratório Multiusuário 3 do Instituto de Ciência e Tecnologia do Campus Avançado de Poços de Caldas da Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL/MG. Vale salientar novamente que os experimentos destinaram-se a obter a tonalidade mais aproximada do *green gold* nos exemplares do quartzo hialino.

As amostras selecionadas de quartzo também foram submetidas a análises em relação a seus elementos e propriedades. Para a determinação dos elementos maiores e traços, foram feitas análises químicas por ICP/OES. A espectroscopia de absorção na região do infravermelho com Transformada de *Fourier* (FTIR) para definições dos cristais, assim como a difração de raios-X (DRX). Análises térmicas também foram realizadas no mineral, para detectar possíveis alterações em suas propriedades em relação ao aquecimento, uma vez que o tratamento térmico é uma das principais partes do beneficiamento.

De uma maneira sintetizada, o processo desse beneficiamento do quartzo se inicia com a seleção do material bruto, que neste específico caso são processos de rejeito que não foram selecionados para uso da cooperativa. As peças, sem cor atrativa, não possuem valor ou interesse comercial. Quando são submetidas a dosagens de radiação gama, e na sequência aquecidas pelo tratamento térmico, se tornam peças coloridas agregando as mesmas possíveis valor e destino comercial. Um fluxograma simplificado do processo é mostrado na Figura 15 abaixo.

Figura 15 - Fluxograma Simplificado do Processo de Beneficiamento do Quartzo



Fonte: Autoria Própria (2024).

Após a finalização dos experimentos com o lote das amostras padronizadas, foi encaminhado novamente para o CDTN um novo lote de amostras, com a mesma

variedade e localização - quartzo hialino do rejeito da Cooperativa Uniquartz - para serem mais uma vez irradiadas, porém sem considerar a normalização do tamanho das mesmas.

O trabalho foi feito em duas etapas, então, e em ambas as dosagens recebidas de radiação também foram iguais - 180, 300, 600 e 900 kGy. A única alteração entre as etapas foi a fratura e as temperaturas escolhidas durante o tratamento térmico, para que se possa realmente afirmar ou não a influência da irregularidade física em relação à alteração de cor.

#### 4.1 MÉTODOS DE IRRADIAÇÃO

Para este trabalho os cristais de quartzo foram submetidos, dentre os tratamentos existentes, a radiação gama e tratamento térmico. O beneficiamento por esses métodos buscaram o acréscimo de sua qualidade gemológica, para aplicações diversas. Vale ressaltar que nenhum desses procedimentos aplicados a gemas, em laboratório, são prejudiciais à saúde (Correa, 2010).

As fontes de irradiação atualmente existentes para o beneficiamento de pedras e gemas utilizadas em pesquisas ou a nível comercial são: os aceleradores de elétrons, os nêutrons, raios gama e os Raios X, que Liz (2007) relata que por apresentarem baixa penetração e fazem com que as gemas coloridas por esses processos não se tornem comercialmente viáveis. No entanto, dentre elas, a radiação gama é um tratamento que possui uma penetração maior, sendo por isso o escolhido para realizar os testes deste trabalho. A Tabela 3 mostra uma breve explicação sobre os modelos de irradiação usados para tratamento de gemas.

Tabela 3 - Comparação entre as formas de irradiação de gemas

(continua)		
<b>Irradiação</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Raios X	Maior disponibilidade de equipamentos para pesquisas iniciais.	Baixo poder de penetração. Baixa uniformidade de cor.

Tabela 3 - Comparação entre as formas de irradiação de gemas

(conclusão)		
<b>Irradiação</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Raios Gama	Poder de penetração relativamente alto. Não deixa resíduos radioativos na gema. Boa uniformidade de cor.	Doses em menores taxas.
Nêutrons	Alto poder de penetração. Boa uniformidade de cor.	Podem gerar resíduos radioativos
Acelerador de Elétrons	Emissão Controlável.	Baixo poder de penetração.

Fonte: Adaptado de Liz (2007).

A irradiação neutrônica apresenta maior energia que a dos raios X e gama, com maior poder e penetração no material e proporciona assim, colorações mais intensas. Entretanto, Liz (2007) afirma que é necessário um período de quarentena, pois tal tratamento pode tornar a gema radioativa.

#### 4.1.1 Irradiação por Raios Gama

Os Raios gama são ondas eletromagnéticas semelhantes a luz, com comprimento de onda muito menor e energia muito mais elevada, sendo superior às dos raios X (Drummond, 2009). Na área da gemologia, a irradiação gama nos minerais tem como função acelerar o processo de aparecimento da coloração, que seria produzido naturalmente pela natureza por um longo período de tempo.

O processo provoca a expulsão de elétrons nos retículos cristalinos (resultante dos defeitos causados pelos íons dopantes), formando os centros de cor (Drummond, 2009). O autor afirma também que os minerais suscetíveis a essas mudanças com a radiação gama são os que possuem impurezas, e que já possuem os centros de cores, porém não sendo capazes de criar cor, precisando serem irradiados para isso.

As medidas da radiação gama são denominadas Gray (Gy) e Rad. No caso deste presente trabalho, elas foram expressas na unidade Gray, que é relacionada

com a energia absorvida da radiação por unidade de massa. D = dose absorvida (J/kg ou Gray, 1 Gy = 100 rad), ou seja, 1 Gy – Gray equivale a 1 Joule por quilograma.

Os tratamentos térmicos e pela radiação Gama são tipos de beneficiamentos conhecidos como melhoramento (*enhancement*) ou modificação de cor e permite a produção de variadas tonalidades a partir do quartzo incolor. Quando seus cristais são submetidos à irradiação, acontece o escurecimento dos mesmos, e, ao serem aquecidos, o processo da irradiação é revertido resultando na mudança de cor. O que influencia no escurecimento do quartzo quando submetido à irradiação é a presença do alumínio na sua estrutura, e sabe-se que é uma impureza comum nesse mineral (Mol, 2004).

A radiação gama por Cobalto 60 ( $\text{Co}^{60}$ ) tem o princípio físico associado ao uso da fonte desse isótopo na criação de centros de cor. Sabe-se que a coloração das variedades de quartzo estão relacionadas a presença de impurezas e defeitos, e as ações ionizantes (raios gama e raios X) podem dar origem a centro de cor, e o uso de irradiadores com fontes de ( $\text{Co}^{60}$ ) tornou-se uma opção para induzir ou intensificar cores, apresentando melhores resultados quanto a qualidade, estabilidade e variedade de cores destacando-se no quartzo gemológico. (Enokihara, 2013).

As amostras de quartzo oriundas do rejeito que foram utilizadas neste trabalho foram submetidas, então, a irradiação gama com fonte de ( $\text{Co}^{60}$ ) no CDTN, foram separadas e dosadas em Gy (quilo Gray). Não foi informado o tempo de exposição das peças pelo laboratório.

Para ambos os testes foram selecionadas quatro dosagens diferentes: 180 kGy, 300 kGy, 600 kGy e 900 kGy. As diferentes doses de irradiação aplicadas foram escolhidas para analisar em qual faixa se pode alcançar melhores resultados com os tratamentos, indicado por trabalhos anteriores (Nunes, 2023). Os valores extremos também são justificados para possivelmente se poder excluir alguma faixa de dosagem.

Em relação às peças uniformizadas, haviam 24 quotas, então separou-se igualmente em 6 unidades para cada uma das dosagens citadas. No caso das peças da segunda etapa, que não passaram pelo procedimento de corte, os testes foram realizados em 8 amostras de cada quantidade.

## 4.2 TRATAMENTO TÉRMICO

O tratamento térmico é considerado um dos mais antigos realizados em gemas, e em conjunto com a irradiação pode proporcionar grandes resultados. Ele é usado não somente para alterações de cor, uniformização ou melhoramento, mas também para se observar o estudo da parte de estabilidade da cor nas mesmas (Correa, 2010).

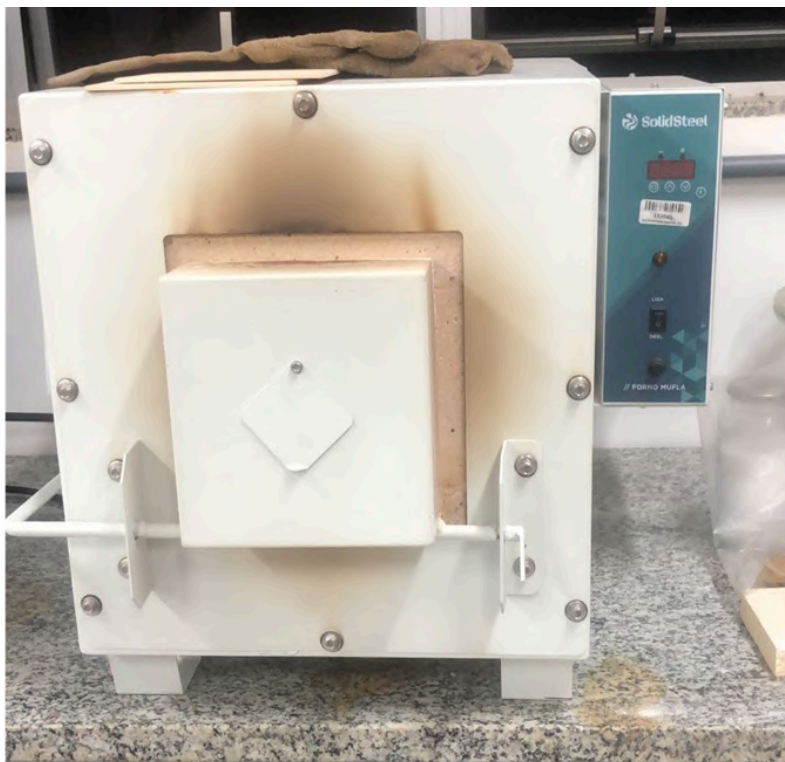
Essa técnica consiste em aquecer um mineral com objetivo de alterar alguma de suas propriedades, quer seja sua cor ou transparência, para torná-lo mais atrativo fisicamente e assim agregar valor mercadológico. A cor adquirida pelo tratamento térmico é resultante pela destruição de certos centros de cor contidos no cristal gerados pela radiação, quando o mesmo é aquecido.

O aquecimento, segundo Liz (2007), produz a reversão da mudança de cor causada pela radiação. Invariavelmente, um centro de cor envolve um elétron removido de uma posição normalmente ocupada, constituindo um centro de cor por buraco pela ausência do elétron, ou pela presença de um elétron extra, formando um centro de cor por elétron. A função da radiação é simplesmente transferir um elétron, formando simultaneamente um centro de cor por lacuna e um centro por elétron (Liz, 2009).

O quartzo, após ser irradiado, adquire coloração entre preto e marrom escuro, necessitando então de um tratamento térmico para torná-lo colorido. O processo é minucioso em relação à variação da temperatura, pois tende a apresentar respostas distintas dependendo de suas características. Como a maioria dos minerais gemas possuem defeitos cristalinos, fraturas e inclusões, o tratamento deve ser feito de forma cautelosa e gradual, sendo necessárias considerações cautelosas em relação ao tempo de exposição e temperatura máxima.

Para o aquecimento das amostras do rejeito de quartzo hialino, utilizou-se uma mufla modelo SSFM, com medidas internas (A x L x C) 20 x 40 x 20 cm e medidas externas (A x L x C) 52 x 67 x 70 cm, com capacidade de 6,7 litros, 80 kg e com potência de 4000 watts. A temperatura de trabalho da mufla é de 100°C até 1200°C, programável de 1 a 9999 minutos de 1 em 1 minuto. A Figura 16 mostra a mufla utilizada nos experimentos.

Figura 16 - Mufla utilizada no tratamento térmico das amostras



Fonte: Autoria Própria (2025).

Os testes foram realizados com uma taxa fixa de aquecimento da mufla de 15°C por minuto, onde as amostras foram alocadas antes do início do aquecimento na primeira etapa, ou seja, sofreram a interferência do tempo da taxa de aquecimento. No segundo estágio, no entanto, as amostras foram inseridas no momento em que a mufla atingiu a temperatura escolhida, não sofrendo influência sobre o período de aquecimento inicial.

O tempo de permanência e a temperatura foram ajustados entre 5 e 25 minutos, e 220 e 430°C. Essa faixa foi escolhida aleatoriamente, porém na medida em que se houve percepção da alteração significativa de cor. Já se havia observado, que valores tanto abaixo dessa temperatura quanto acima, causavam a destruição dos centros de cores criados e retornavam a coloração inicial antes da irradiação (incolor). De acordo com o resultado obtido em cada uma das amostras, o parâmetro tempo/temperatura foi reajustado para a amostra seguinte, visando alcançar a cor desejada mais próxima ao quartzo *green gold* com parâmetros mais otimizados.

### 4.3 MÉTODOS ANALÍTICOS UTILIZADOS

Os métodos analíticos utilizados na caracterização físico-química e mineralógica de amostras geológicas são variados, e servem para reunir informações dos materiais e medir suas propriedades. Alguns métodos analíticos foram necessários para quantificar e caracterizar o quartzo, e justificar o comportamento das amostras. O estudo das matérias-primas foi feito tanto anteriormente ao processo de irradiação, ou seja, nas peças brutas quanto após o tratamento térmico, a fim de se comparar, validar e buscar a possível causa da mudança da cor.

#### 4.3.1 Método Analítico - ICP OES

A técnica ICP OES (espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado) é baseada na propriedade dos átomos em emitir radiações de comprimento de onda características, quando submetidos a determinadas fontes de energia, de acordo com o Laboratório de Caracterização Tecnológica da USP. Essa técnica tem como diferencial, a capacidade de excitação de praticamente todos os átomos da tabela periódica através do plasma de detecção de níveis extremamente baixos de radiação emitidos pelos átomos na faixa do visível e ultravioleta.

Essas características tornam o ICP OES a técnica recomendada para determinação de elementos em concentrações traço (ppm – partes por milhão e ppb – partes por bilhão) e também de materiais geológicos ( rochas, metal base, terras raras...). A determinação elementar de quartzo foi feita por Digestão Multiácida – ICP OES/ICP MS, onde os ensaios foram realizados na SGS GEOSOL, laboratórios LTDA, Certificado de Análises em Vespasiano - MG. A Tabela 4 mostra as referências analíticas com detalhes, assim como a preparação das amostras:

Tabela 4 - Referências analíticas da Caracterização do quartzo

REFERÊNCIA ANALÍTICA			
<b>ICPOM</b>			
ICM42Q: Determinação de Quartzo por Digestão Multiácida - ICP OES / ICP MS			
<b>MN</b>			
PHY42Q: Digestão Multiácida - ICP			
<b>PREP</b>			
PGA70J_E2: Preparação Gral de Ágata - Secagem, britagem 75% a 3mm, quarteamento em Jones e Pulverização 20 g, 95% <150#			
PREPQC: Controle de Qualidade - Preparação Física			
LEGENDA: SIGLAS			
L.D. = Limite de Detecção	BLK = Branco	REP = Replicata	DUP = Duplicata
L.N.R. = Listado e não Recebido	I.S. = Amostra Insuficiente	N.A. = Não Analisado	STD = Padrão
I.N.F. = Não reportado devido a interferentes		OVR = Não Analisado devido ao alto teor	

Fonte: SGS GEOSOL (2023)

### 4.3.2 Espectroscopia no Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR)

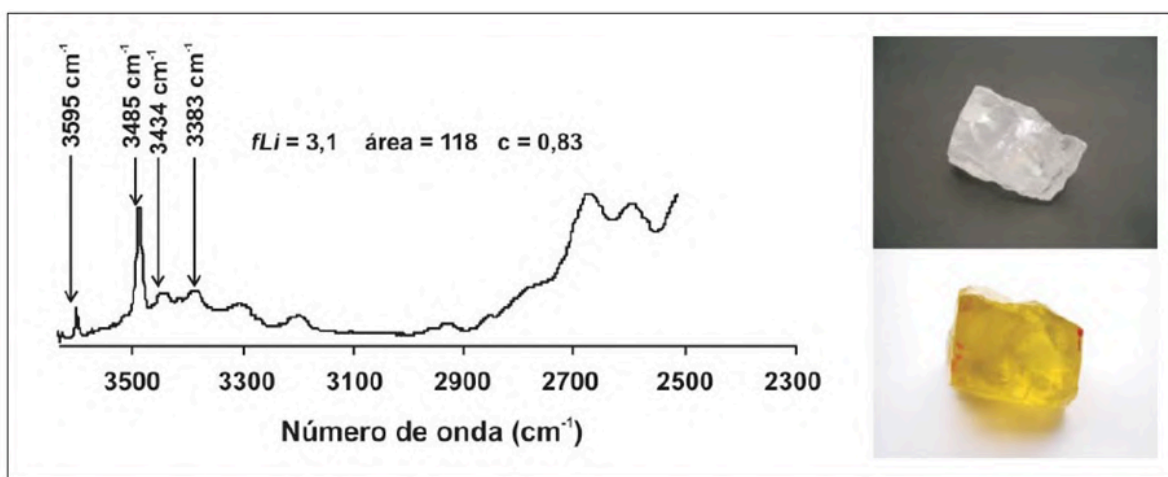
Espectroscopia é a ciência que estuda a interação da radiação eletromagnética com a matéria. De acordo com a região do espectro eletromagnético envolvido nas medidas podemos classificar os métodos espectroscópicos como: raios gama; raios X; ultravioleta (UV); visível (VIS); infravermelho (IV); micro-ondas e rádio frequência (Souza; Lima; Oliveira, 2014). Essas técnicas nos permitem obter informações sobre a estrutura molecular e ligações químicas das substâncias, tendo como principal objetivo identificação das moléculas.

A espectrofotometria na faixa do infravermelho identifica os compostos, e segundo Cunha *et al.* (2014), por causar movimentos rotacionais e vibracionais dos grupos moleculares e ligações químicas de cada molécula, elas absorvem energia em determinada frequência de ressonância de acordo com as características dos átomos. Essa radiação provoca, portanto, o aumento da amplitude das vibrações moleculares.

A região espectral da radiação no infravermelho atravessa a amostra a ser analisada, e a mesma é transmitida e comparada com aquela transmitida na ausência da amostra, O espectrômetro então registra o resultado na forma de uma banda de absorção. Esse método tem sido usado em vários estudos para identificar grupos funcionais, e se baseia no fato de que as ligações químicas das substâncias possuem frequências de vibrações específicas que correspondem aos níveis de energia (vibracionais) das moléculas (Cunha *et al.*, 2014).

O teor de impurezas pode variar em um mineral, e o espectro de FTIR indica o potencial de desenvolvimento de cor e/ou matiz resultante no quartzo. A Figura 17 mostra fotografias de quartzo hialino natural e do mesmo após ser irradiado e aquecido, assim como o espectro de FTIR após o beneficiamento onde se mostram as bandas típicas do *green gold* ( 3.383, 3485 e 3595  $\text{cm}^{-1}$  ), e a matiz amarelada do cristal. A peça é oriunda da Mina do Bode, de origem pegmatítica.

Figura 17 - Espectro de FTIR e fotografias de quartzo hialino natural e irradiado (a 65 kGy) e aquecido. No cristal, pesando 0,33 gramas, se observa as bandas 3.383, 3485 e 3595  $\text{cm}^{-1}$  características do *green gold*, com matiz amarelado, e os valores de fLi, área e c.



Fonte: Drummond, Mendes e Lameiras (2010, p.455).

As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Alfenas, Central Analítica II – UNIFAL – MG com o equipamento Espectrômetro de bancada do tipo FTIR Cary 360 - Figura 18, A tecnologia aplicada foi pelo FTIR de transmissão, na faixa de varredura entre 4.000 a 400  $\text{cm}^{-1}$ . Foram realizadas duas análises: nas amostras brutas, e posteriormente com elas já irradiadas com 300 kGy para fim comparativo.

Figura 18 - Espectrômetro de bancada do tipo FTIR Cary 360 a esquerda e o equipamento sendo testado com uma peça bruta da pesquisa (direita)



Fonte: Autoria Própria (2025).

#### 4.3.3 Difração de Raios X (DRX)

A Difração de Raios X (DRX) é uma técnica analítica não destrutiva, usada para analisar propriedades físicas, e caracterizar materiais cristalinos. Ela fornece informações a respeito das estruturas, das fases, da orientação dos cristais em uma amostra, além de outros parâmetros estruturais como tamanho médio de grão, cristalinidade, tensão e defeitos do cristal (Silva, 2020). A Difração de Raios X, então, é uma ferramenta complementar de identificação mineral.

O fenômeno apresenta a interação entre o feixe de Raios X que incidem nos elétrons dos átomos componentes de um material, relacionado ao espalhamento coerente. Gobbo (2003) diz que o instrumento tradicional é o difratômetro, método em pó, composto por três itens principais: uma fonte de Raios X, um suporte de amostra e um detector, e o feixe difratado é normalmente expresso através de picos. O autor explica que cada composto cristalino apresenta um padrão característico, permitindo assim sua identificação através das posições angulares e intensidades relativas dos picos difratados. Assim, a identificação pode ser realizada por meio da

comparação dos padrões de difração de Raios X obtidos de amostras já conhecidas nos bancos de dados de referência com as amostras que se quer determinar.

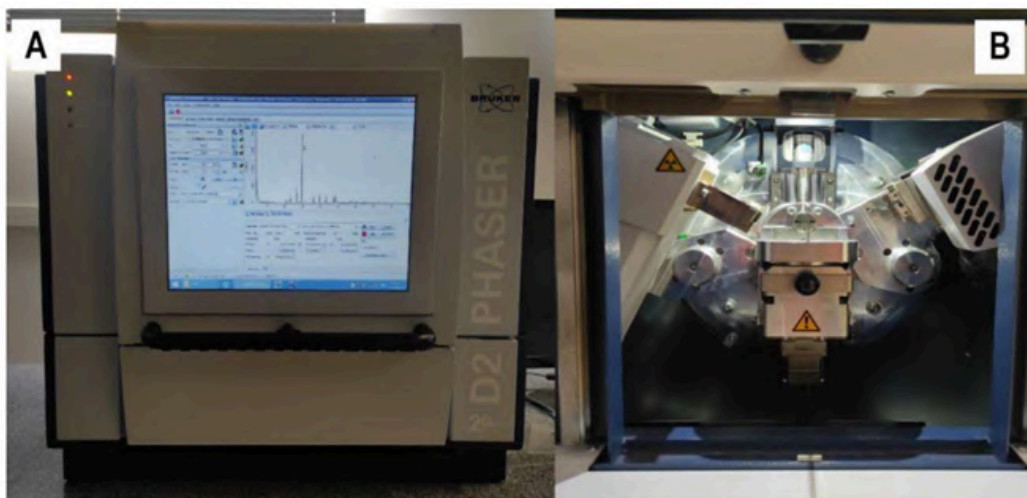
No presente trabalho, a técnica foi usada para identificação das amostras de quartzo, sendo elas foram realizadas no Centro de Ciências Naturais Aplicadas - UNESPetro, no Laboratório de Radiações Ionizantes - LARIN, localizado em Rio Claro – SP. As amostras foram submetidas a 2 etapas, visando a pulverização e preparação para sua análise no Difratorômetro de Raios X, sendo ela: Rocha Total, para análise qualitativa dos minerais presentes na rocha.

Inicialmente a preparação é realizada a partir da desagregação de rocha em partes menores. Estas passaram pelo processo de pulverização no moinho almofariz pistilo MA590 que visou homogeneizar o tamanho das partículas evitando desvios ou distorções nas medidas. Assim, as amostras pulverizadas são colocadas no suporte do aparelho para serem analisadas no equipamento de DRX.

O aparelho utilizado nesta etapa foi o Difratorômetro de Raio X D2 PHASER/Bruker - Figura 19, que analisou o fenômeno da difração pela maneira com que os Raios X são difratados de uma amostra cristalina. Assim, conhecendo o comprimento de onda é possível gerar os difratogramas de análises. O difratorômetro é equipado com um contador proporcional e analisador de altura de pulso por radiação  $\lambda = 1.54060$  angstrom, voltagem 30 kV e corrente elétrica de 10mA. Os espectros de difração são coletados em intervalos específicos para cada tipo de identificação. A rotação do girômetro tem uma velocidade de  $15^\circ/\text{min}$ , passo 0,02. As fendas características usadas foram de 0,6 mm para análise Total.

O suporte de amostra de fundo do material moído então foi submetido a uma varredura de Raios X na faixa de análise de  $4^\circ$  a  $90^\circ$  em  $2\theta$  (ângulo da difração) com a intenção de caracterizar a assembleia mineral das rochas através dos picos presentes.

Figura 19 - Difratômetro de Raio X D2 PHASER/Bruker (A) e visualização interna (B)



Fonte: Laboratório de Radiações Ionizantes - LARIN (2024).

Os difratogramas gerados no Difratômetro de Raios X D2 PHASER/Bruker foram analisados e interpretados no Programa DIFFRAC.SUITER EVA (BRUKER), comparados com padrões existentes em banco de dados fornecidos pelo PDF-4 Minerals 2024 que permitiu a identificação dos minerais das amostras (análise qualitativa). O software permite identificar os minerais de acordo com o ângulo de difração ( $2\theta$ ) ou distância entre os planos.

#### 4.3.4 Análise Térmica

A análise térmica abrange um grupo de técnicas a partir das quais uma propriedade física de uma substância e/ou seus produtos de reação é medida em função do tempo ou da temperatura enquanto essa substância é mantida a uma programação controlada de temperatura sob uma atmosfera especificada (Lemos, 2003).

Quando um material é aquecido, podem ocorrer mudanças físicas ou químicas em sua estrutura, de acordo com as energias de suas ligações. A análise térmica permite estudar a estabilidade térmica do material, pois além de se observar mudanças de fases, podem ocorrer reações químicas pela decomposição da amostra – ruptura de ligações (Ávila, 2023), permitindo investigar a estabilidade térmica e a composição de uma variedade de substâncias e misturas nas amostras.

O objetivo principal dessas técnicas, então, é reunir informações para se caracterizar os materiais, onde três critérios precisam ser seguidos: a medição de uma propriedade física – massa, temperatura ou calor; a condição de que a medida deve ser expressa em função da temperatura; e uma razão e aquecimento, que seria o controle programado de temperatura em função do tempo (Ávila, 2023).

Dentre as diversas modalidades, utilizou-se o analisador térmico STA para análise TGA/DSC das amostras de quartzo. As demais técnicas, então, não serão abordadas no presente trabalho. O equipamento utilizado foi o analisador térmico simultâneo NETZSCH STA 449 F3, eficaz para a medição de alterações de massa e efeitos térmicos, sob atmosferas distintas: inerte, oxidante, redutora, estática e dinâmica.

A TGA = análise Termogravimétrica (massa) - pode ser expressa basicamente como a variação de massa da amostra em função da programação da temperatura. Ela acompanha a perda e/ou ganho de massa, em função de um tempo ou temperaturas controladas, sob uma atmosfera específica (Denari, 2013). As informações adquiridas são em relação à estabilidade térmica dos materiais, por exemplo, em qual temperatura ele sofre decomposição, além de sua caracterização: ponto de fusão, ebulição, se o material apresenta água de hidratação, determinação de impurezas entre outras coisas (Ávila, 2023).

Já a DSC = Calorimetria Exploratória Diferencial (entalpia), pode ser expressa como uma técnica na qual as variações de entalpia são monitoradas em relação a um material de referência termicamente inerte enquanto ambas são submetidas a uma programação controlada de temperatura (Denari, 2013). Nesse contexto, se registra a diferença entre a temperatura de referência e a da amostra, fornecendo informações qualitativas e quantitativas sobre as mudanças físicas e químicas relacionadas a processos endotérmicos, exotérmicos, ou mudanças na capacidade calorífica.

O quartzo pode ser quantificado por métodos analíticos como DRX, espectroscopia de infravermelho, entre outras. As técnicas relacionadas às análises térmicas citadas acima, porém, são alternativas possíveis para a sua determinação. Os testes foram realizados no Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Alfenas, Central Analítica II – UNIFAL – MG.

A quantidade de amostra analisada foi igual a 1 grama, sob atmosfera inerte de nitrogênio. A análise em ambiente inerte é para se evitar algum processo

químico do mineral, caso seja ou tenha algum componente sensível à oxidação. A análise ocorreu em três diferentes estados da amostra: Bruta, após ser apenas irradiada, e na mesma peça irradiada após o tratamento térmico para uma comparação dos resultados.

A faixa de temperatura escolhida para a realização das duas análises sob ambas atmosferas foi de 25°C a 500°C com objetivo de se determinar possíveis indícios de mudanças de fase, uma vez que a banda de temperatura usada no tratamento térmico em laboratório não ultrapassou os 450°C.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ICP OES

A determinação do quartzo por digestão multiácida – ICP OES/ICP MS que foi realizada mostrou os elementos químicos (em ppm) presentes nas amostras. Segundo o certificado do laboratório, o quartzo mostrou possuir uma pureza elevada, apresentando 99,78% de SiO<sub>2</sub>. Esse teor reflete a pureza do quartzo, mas não interfere nos matizes criados na irradiação e no aquecimento (Drummond, 2009).

Dos elementos que foram dosados por ICP/OES MS, Al (alumínio), Fe (ferro) e Li (Lítio) podem ser responsáveis pela mudança de cor nas etapas de tratamento de quartzo (Lameiras *et al.*, 2007). Segundo Drummond *et al.* (2010), no quartzo de ambiente hidrotermal os valores de alumínio estão entre 12 e 100 ppm e no ambiente pegmatítico os valores ficam entre 260 e 300 ppm, aproximadamente. Ele afirma que no ambiente pegmatítico o alumínio presente no quartzo alcança valores até cinco vezes maiores do que no hidrotermal.

As amostras analisadas não contêm quantidades consideráveis de outros elementos traços, apenas o Alumínio (Al) e o Ferro (Fe) apresentaram números relevantes contendo 326 ppm e 400 ppm, respectivamente. O teor de Lítio apresentado foi de apenas 2 ppm.

O resultado completo é exibido na Tabela 6 abaixo, onde o quartzo hialino é representado por QH\_1 e o quartzo da variedade leitoso como QL\_1. A título comparativo, as duas variedades da cooperativa foram analisadas e mostraram resultados bastante semelhantes.

Tabela 5 – Resultados da análise química por ICP OES das amostras de quartzo hialino (QH\_1) e leitoso (QL\_1)

(continua)									
ANÁLISES	Ag	Al	As	B	Ba	Be	Bl	Ca	Cd
Unidade	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Limite de detecção	0,2	1	1	1	1	<0,1	2	2	0,02
QH_1	<0,2	326	17	<1	1	<0,1	<2	64	<0,02
QL_1	<0,2	254	13	<1	1	<0,1	<2	58	<0,02

ANÁLISES	Ce	Co	Cr	Cs	Cu	Fe	Ga	Ge	Hf
Unidade	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Limite de detecção	0,05	3	1	5	1	2	0,1	0,1	0,02
QH_1	0,36	<3	6	<5	3	400	<0,1	<0,1	<0,02
QL_1	0,54	<3	11	<5	4	629	<0,1	<0,1	<0,02

ANÁLISES	In	K	La	Li	Lu	Mg	Mn	Mo	Na
Unidade	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Limite de detecção	0,02	2	0,1	2	0,01	2	2	1	2
QH_1	<0,02	35	0,2	<2	<0,01	39	31	2	106
QL_1	<0,02	51	0,5	<2	<0,01	81	27	1	50

Tabela 5 – Resultados da análise química por ICP OES das amostras de quartzo hialino (QH\_1) e leitoso (QL\_1)

ANÁLISES	(conclusão)								
	Nb	Ni	P	Pb	Rb	Re	S	Sb	Sc
Unidade	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Limite de detecção	0,1	1	1	1	0,2	0,1	100	0,05	0,5
QH_1	<0,1	12	5	2	<0,4	<0,1	136	0,13	<0,5
QL_1	0,2	11	5	2	<0,3	<0,1	128	0,08	<0,5

ANÁLISES	Se	SiO2	Sn	Sr	Ta	Tb	Te	Th	Ti
	ppm	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Limite de detecção	2	0,01	0,3	1	0,05	0,05	0,05	0,2	1
QH_1	<2	99,78	<0,4	2	<0,05	<0,05	<0,05	<0,2	9
QL_1	<2	99,74	<0,6	<1	<0,05	<0,05	<0,05	<0,2	16

ANÁLISES	Tl	U	V	W	Y	Yb	Zn	Zr
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Limite de detecção	0,02	0,1	1	0,1	0,1	0,1	1	1
QH_1	<0,02	<0,1	<1	<0,1	<0,1	<0,1	<1	<1
QL_1	<0,02	<0,1	<1	<0,1	0,1	<0,1	2	<1

Fonte: Adaptado SGS GEOSOL Laboratórios – LTDA (2024).

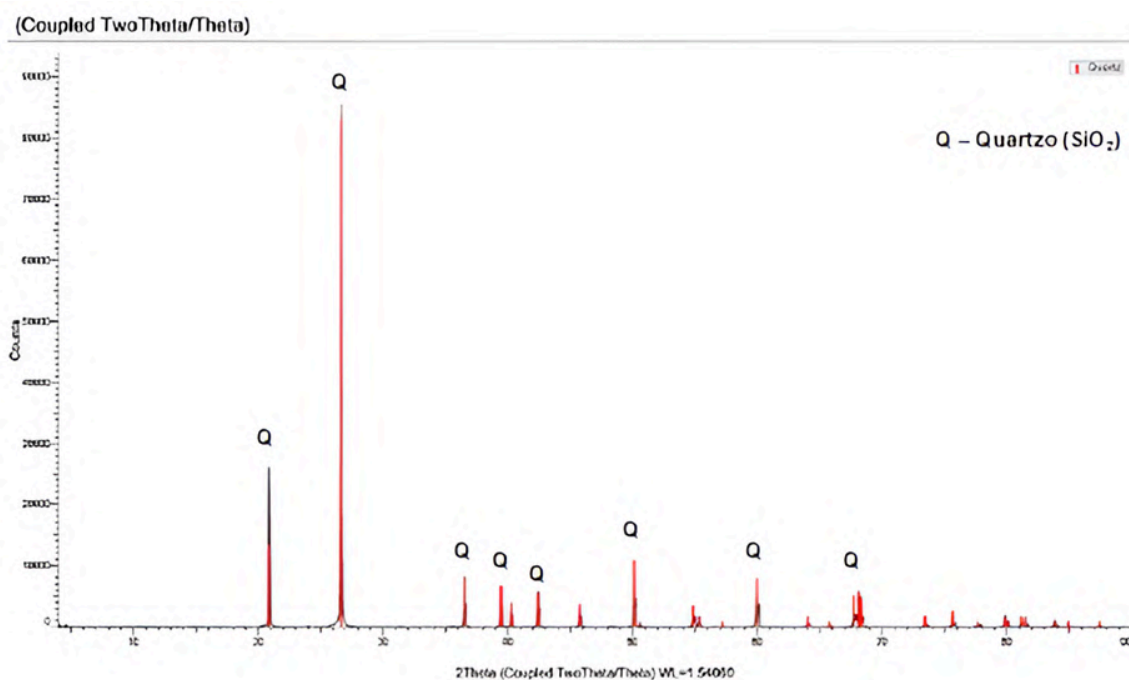
## 5.2 DIFRAÇÃO DE RAIOS X - DRX

Os cristais são descritos como materiais onde os átomos, moléculas ou íons constituintes se encontram empacotados num padrão repetitivo e com uma ordem regular (Haddow, 2012). A cristalinidade, segundo Rawat *et al.* (2023) refere-se ao

grau em que um material ou substância é composto de arranjos ordenados, ou seja, um material cristalino tem um arranjo periódico e bem definido.

A caracterização em relação ao grau de cristalinidade das amostras foi gerado utilizando a difração de raios X. Na difração de Raios X a determinação de minerais é possível sempre que estes estejam presentes em mais de 5% em volume na amostra e na forma de grãos bem cristalizados. A seguir, são apresentados os difratogramas das análises realizadas, referentes às amostras dos experimentos. Ao todo, foram analisadas 11 amostras. Conforme o difratograma (Figura 20) o mineral identificado foi o Quartzo.

Figura 20 - Difratograma da amostra de quartzo, destacando os principais picos de minerais identificados



Fonte: Autoria própria (2025).

### 5.3 FTIR

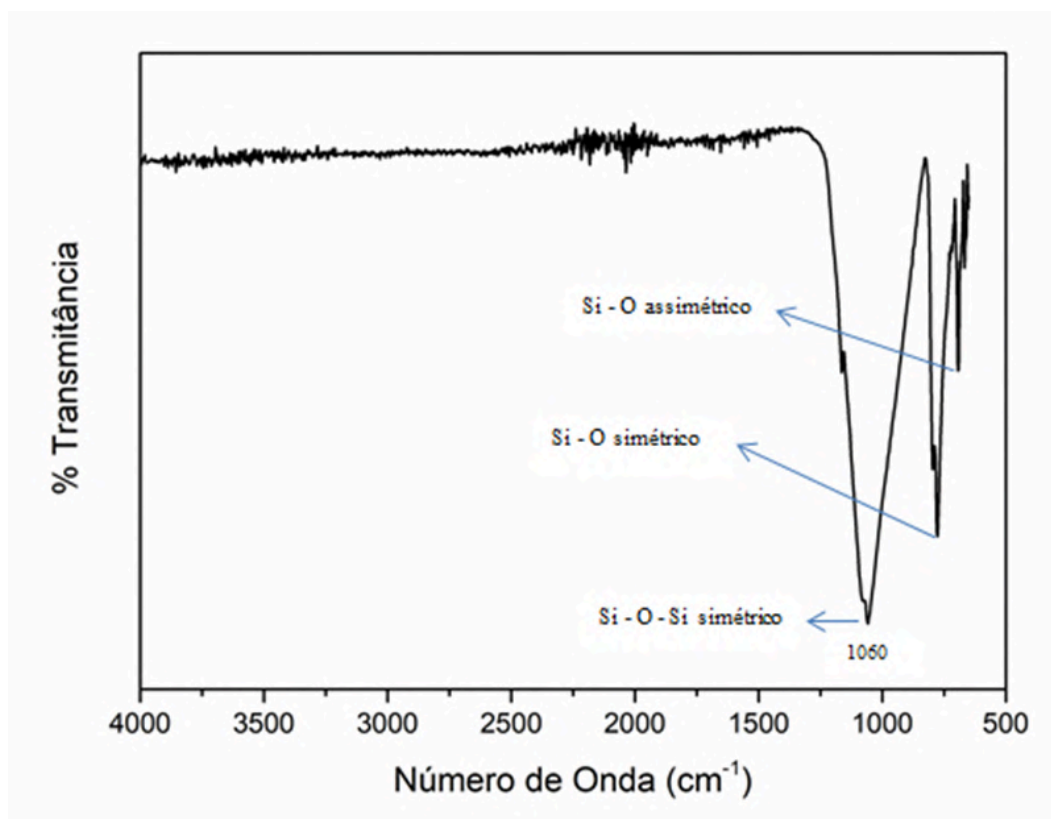
O espectro de FTIR obtido para a amostra de quartzo hialino com irradiação, sem tratamento térmico encontra-se na Figura 21. Podem ser observados bandas características do espectro de SiO<sub>2</sub> correspondentes a vibrações de ligações Si-O-Si em aproximadamente 1060 cm<sup>-1</sup>. A região mais utilizada para a avaliação do FTIR

situa-se entre  $3018$  e  $3630\text{ cm}^{-1}$ , onde podem ser encontradas 12 bandas associadas às impurezas causadoras de cor (Lameiras, 2007). Entretanto não se observou após a irradiação gama confirmações de aparecimentos de centro de cor.

Não se encontram números de onda associados a moléculas de água, que segundo a tabela de valores de absorção no infravermelho (2004) se encontram por entre  $3200 - 3600\text{ cm}^{-1}$ , mostrando não possuir inclusões de moléculas de água na sua estrutura. A ausência de água sugere que o quartzo possui uma matriz cristalina “limpa”, e as bandas demonstram que a irradiação não afetou as ligações do mineral.

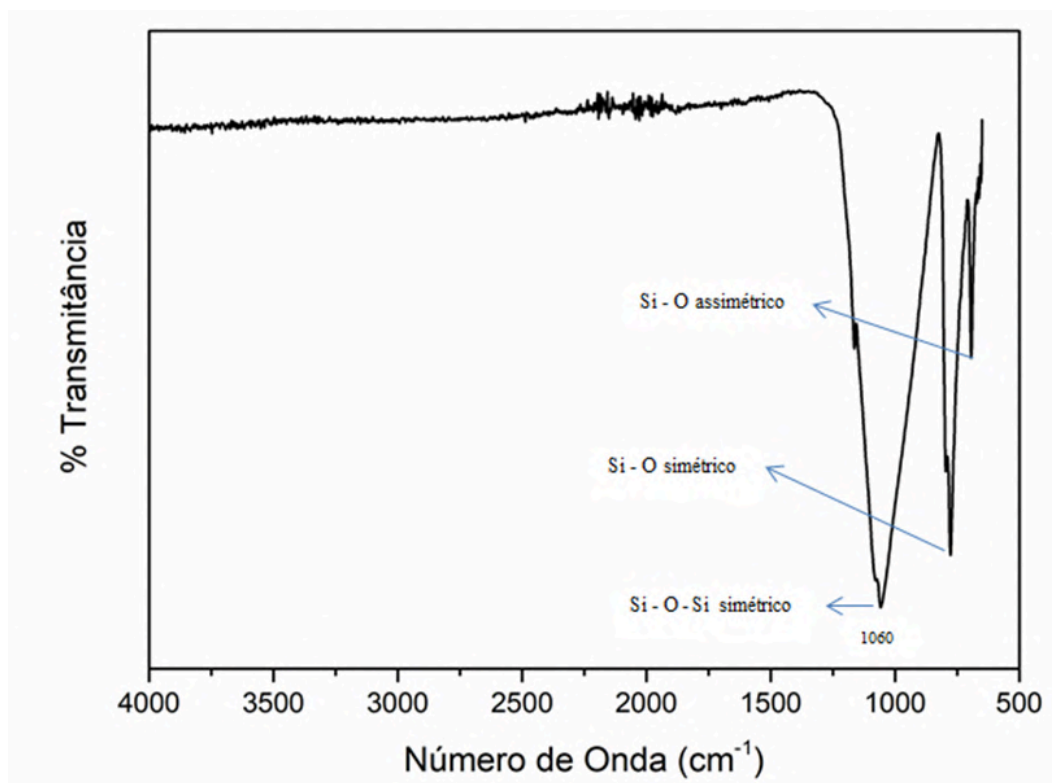
Em seguida, a Figura 22 apresenta o espectro de FTIR obtido para a amostra de quartzo hialino sem passar por quaisquer tratamentos, ou seja, a peça bruta. A semelhança entre os espectros confere com as constatações em relação à amostra irradiada, mostrando a matriz cristalina sem inclusões, e confirmando que a o processo de irradiação não alterou o mineral.

Figura 21 - Espectro de FTIR da amostra de quartzo hialino irradiada



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 22 - Espectro de FTIR da amostra de quartzo hialino bruta



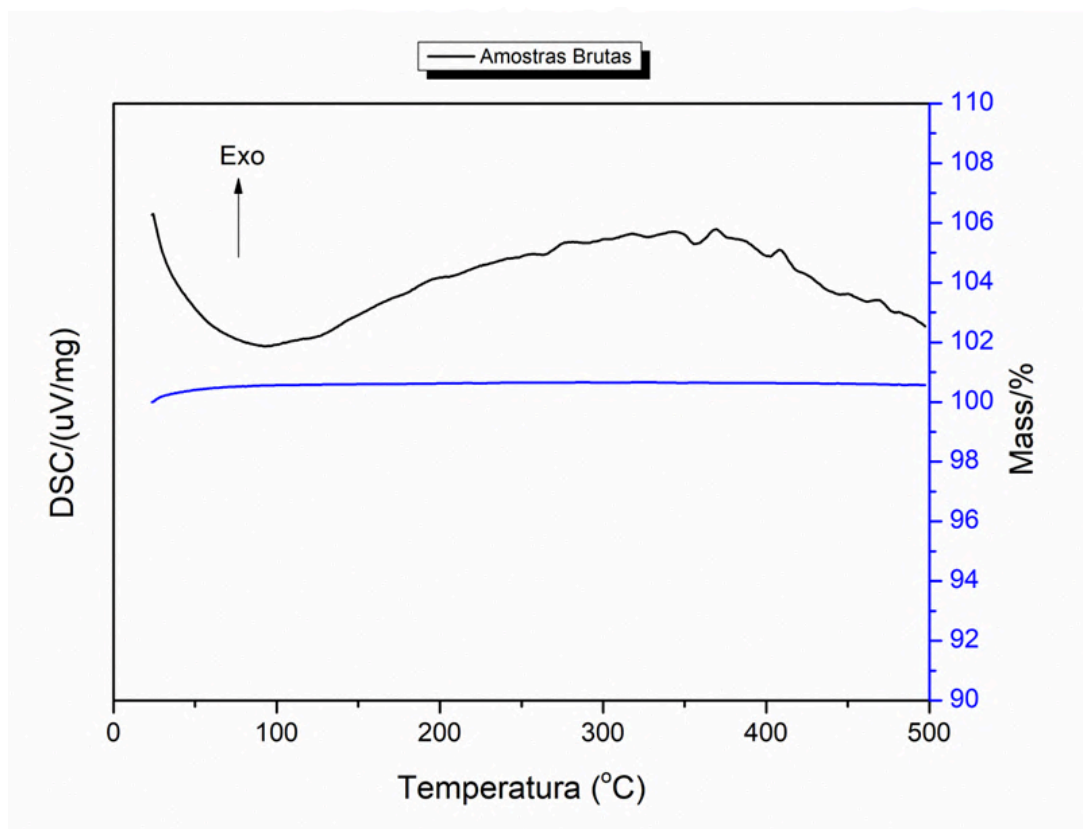
Fonte: Autoria Própria (2024).

#### 5.4 ANÁLISE TÉRMICA

Examinando as análises termogravimétricas das amostras, não se verifica picos na curva do quartzo, percebendo uma linearidade. Esse padrão se manteve em todos os testes realizados nos três distintos estados das peças – brutas (Figura 23), após serem irradiadas (Figura 24) e depois de passarem pelo tratamento térmico (Figura 25).

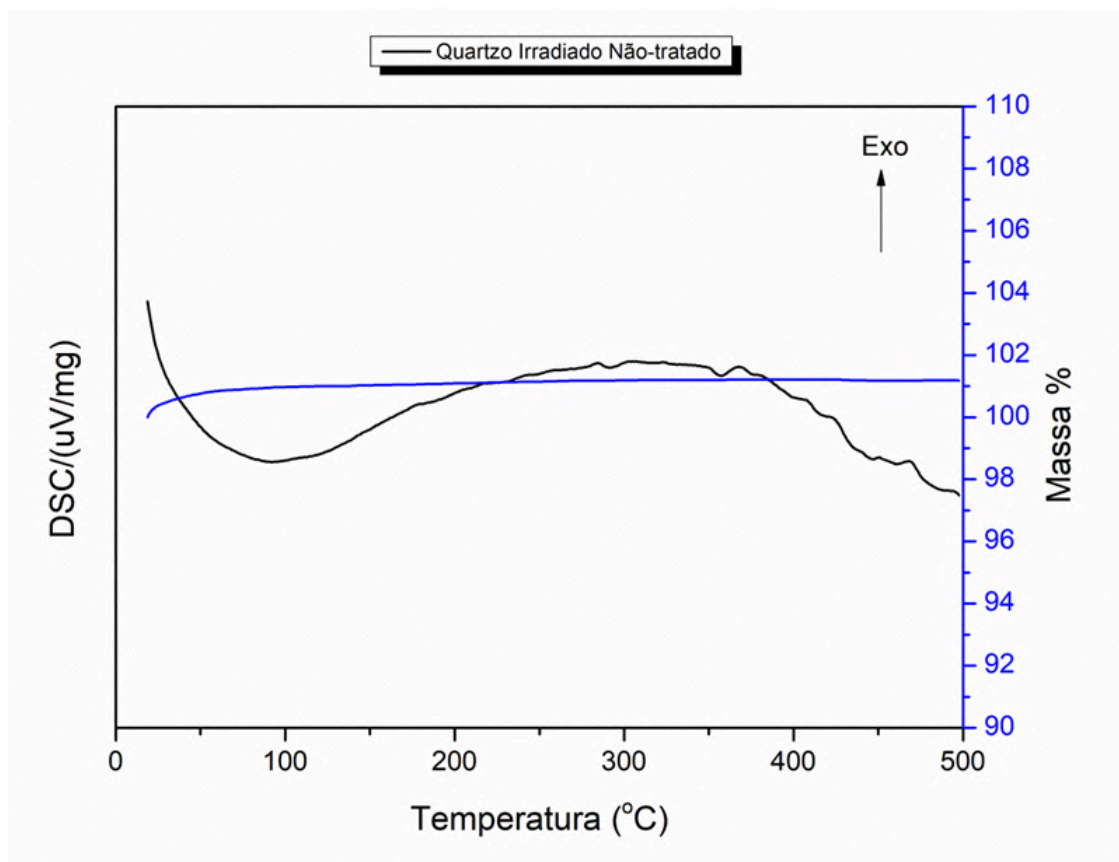
As curvas se mostram praticamente constantes, verificando-se que não houve mudanças significativas de massa na faixa de temperatura escolhida (ambiente a 500°C). Como o valor de aquecimento nas etapas do tratamento térmico se encontra entre essa faixa (até 450°) o resultado mostra uma ausência de elementos significativos na amostra e assim evidenciando a pureza do quartzo que foi utilizada no trabalho, inclusive em relação a não presença de moléculas de água, comprovando que o tratamento também foi indiferente em relação a composição da estrutura do quartzo.

Figura 23 - Resultado da análise térmica da amostra bruta em nitrogênio



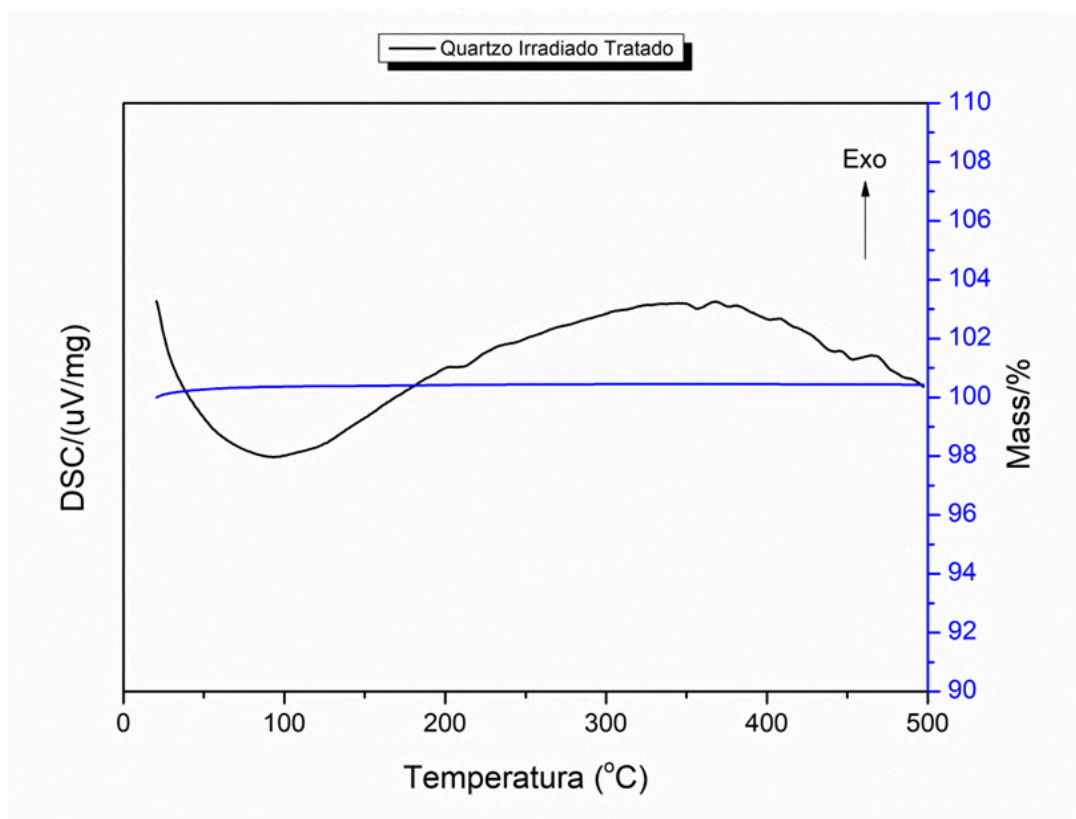
Fonte: Laboratório de Materiais UNIFAL - MG (2025).

Figura 24 - Resultado da análise térmica da amostra Irradiada não tratada em nitrogênio



Fonte: Laboratório de Materiais UNIFAL - MG (2025).

Figura 25 - Resultado da análise térmica da amostra Irradiada após tratamento térmico em nitrogênio



Fonte: Laboratório de Materiais UNIFAL - MG (2025).

## 5.5 TRATAMENTO TÉRMICO

### 5.5.1 Primeira etapa

A primeira etapa do tratamento térmico realizada neste trabalho se iniciou após as amostras cortadas serem irradiadas. As amostras foram expostas a temperaturas e tempos distintos, com o objetivo de alcançar a tonalidade do quartzo *green gold*. Na Figura 26 é possível ver o lote das amostras apenas cortadas, antes de serem irradiadas, para ilustrar o formato em que foram padronizadas.

É observado que todas possuem a mesma configuração, o mesmo molde além do mesmo tamanho aproximado (2,0 x 2,0 cm). Logo após na Figura 27 tem-se o resultado das peças cortadas após serem irradiadas, mas antes de receberem o tratamento térmico. Verifica-se que a cor adquirida (preta) se encontra

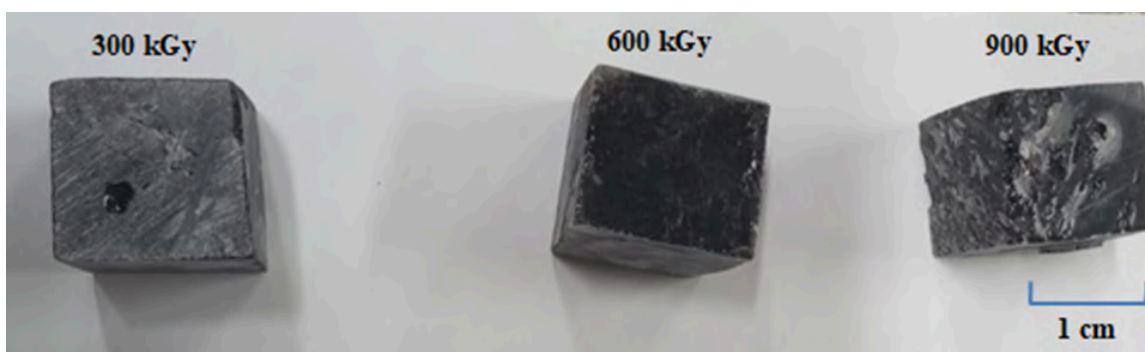
em todas indiferentemente da dosagem de radiação recebida, pois essa é a cor padrão obtida devido ao processo de criação dos centros de cor causados pelo processo da radiação gama. Os resultados em relação ao tratamento térmico serão demonstrados de acordo com a dosagem de radiação recebida.

Figura 26 - Amostras cortadas sem tratamento



Fonte: Autoria própria (2024).

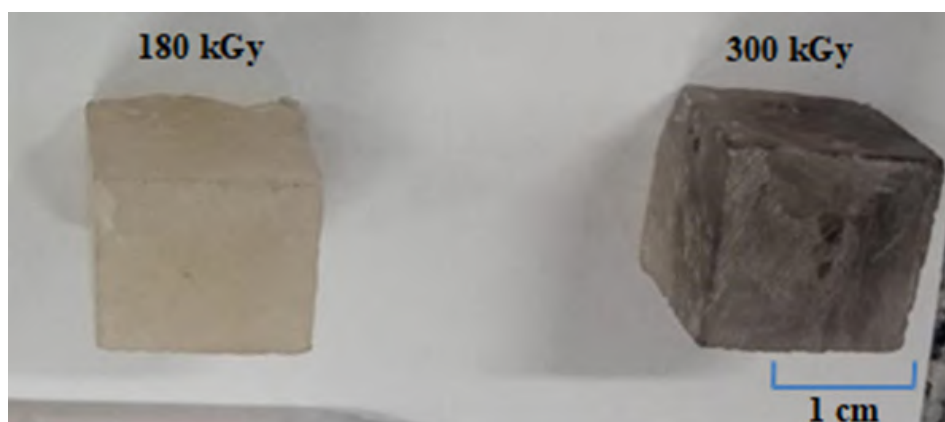
Figura 27 - Amostras cortadas e irradiadas a 300, 600 e 900 kGy, respectivamente:



Fonte: Autoria própria (2024).

Para melhor se estabelecer os parâmetros de temperatura e tempo, uma amostra inicial de cada dosagem foi submetida no primeiro momento a uma mesma temperatura de 300°C, por 25 minutos para uma observação preliminar do comportamento das mesmas. Os resultados são mostrados nas Figuras 28 e 29.

Figura 28 - Amostras após tratamento térmico de 300°C por 25 minutos de 180 e 300 kGy.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 29 - Amostras após tratamento térmico de 300°C por 25 minutos de 600 e 900 kGy.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Como observado na figura, foi possível perceber que a amostra de 180 kGy mostrou-se muito sensível a variação de temperatura, retornando a coloração inicial antes de ser irradiada, ou seja, ocorreu a destruição dos centros de cores formados pela irradiação. As demais amostras não obtiveram alterações significativas em relação ao tratamento térmico, alcançando apenas alguns tons mais claros. Nesse parâmetro de temperatura (300°C) e tempo (25 min) nenhuma das amostras manifestou alterações próximas da coloração desejada.

Com os resultados preliminares, novas temperaturas e tempos foram determinados para as amostras de acordo com a radiação sofrida pelas mesmas. A

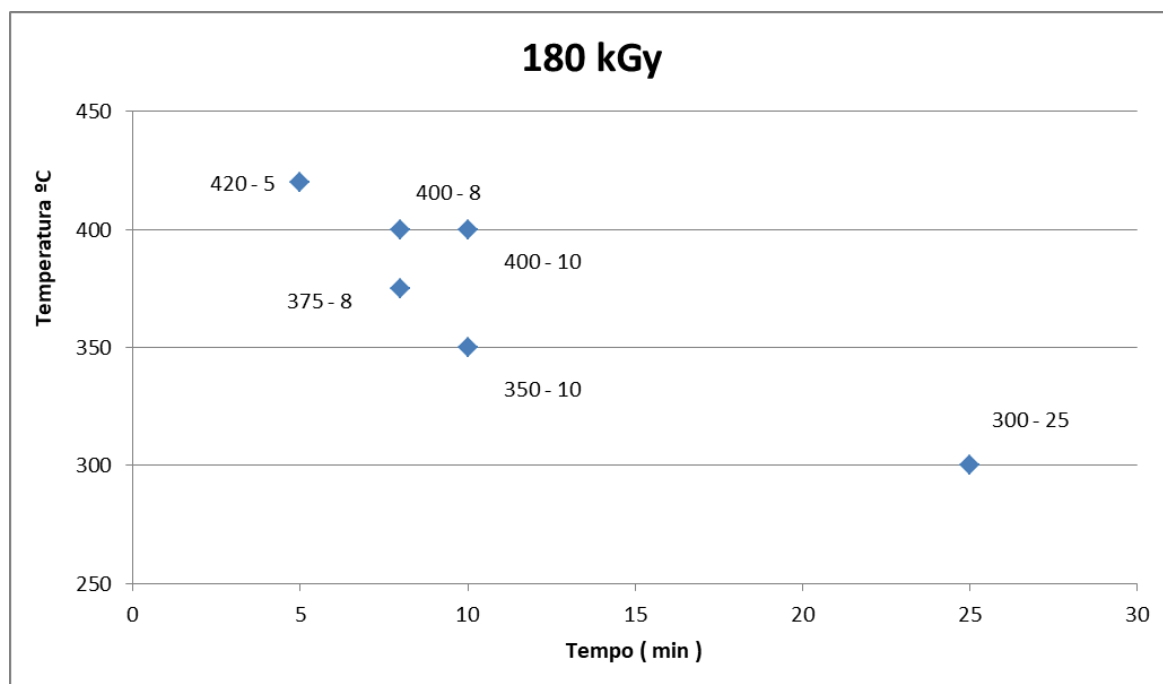
Tabela 6 mostra a relação de temperatura e tempo das peças sujeitas a radiação de 180 kGy, e subsequentemente a Figura 30 mostrando graficamente os dados agrupados. Os resultados das mesmas são exibidos nas Figuras 31 e 32.

Tabela 6 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 180 kGy

Amostras	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	300	25
2	350	10
3	400	10
4	375	8
5	400	8
6	420	5

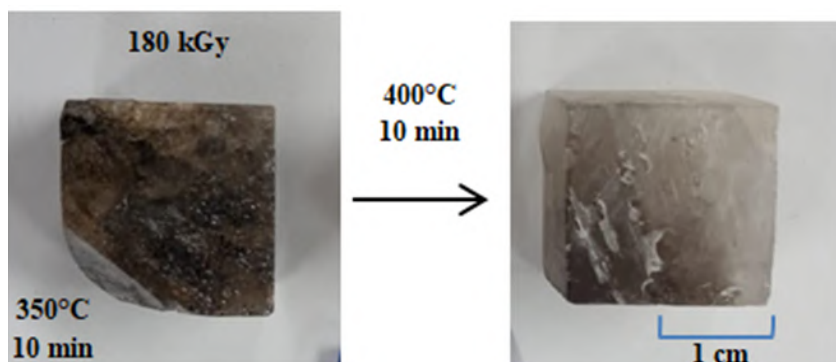
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 30 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas a 180 kGy



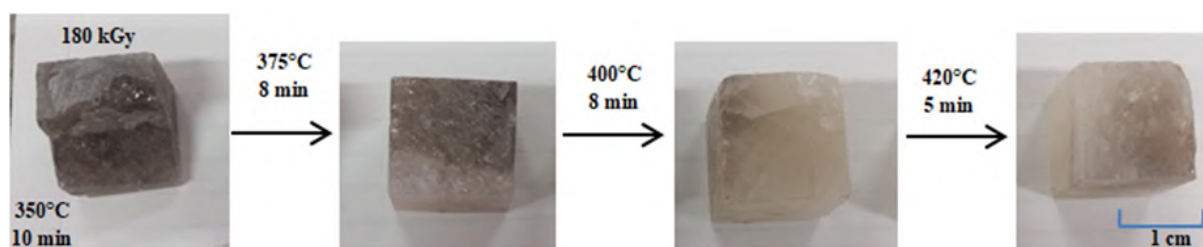
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 31 - Resultado do tratamento térmico das amostras irradiadas a 180 kGy. À esquerda a temperatura é de 350°C por um tempo de 10 minutos, e a direita de 400°C por 10 minutos.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 32 - Resultado do tratamento térmico das amostras irradiadas a 180 kGy. De modo respectivo: 350°C por 10 minutos, 375°C por 8 minutos, 400°C por 8 minutos e 420°C por 5 minutos



Fonte: Autoria Própria (2024).

Analisando os exemplares irradiados a 180 kGy, nota-se que nenhum dos índices adotados de temperatura e tempo alcançou o objetivo esperado da coloração. À medida que se aumentou a temperatura, as amostras ficaram mais claras, porém sem alteração da cor, ou seja, ocorreu alteração apenas na tonalidade. Apenas a peça submetida a 400°C por 10 minutos, internamente apresentou um tom levemente amarelado.

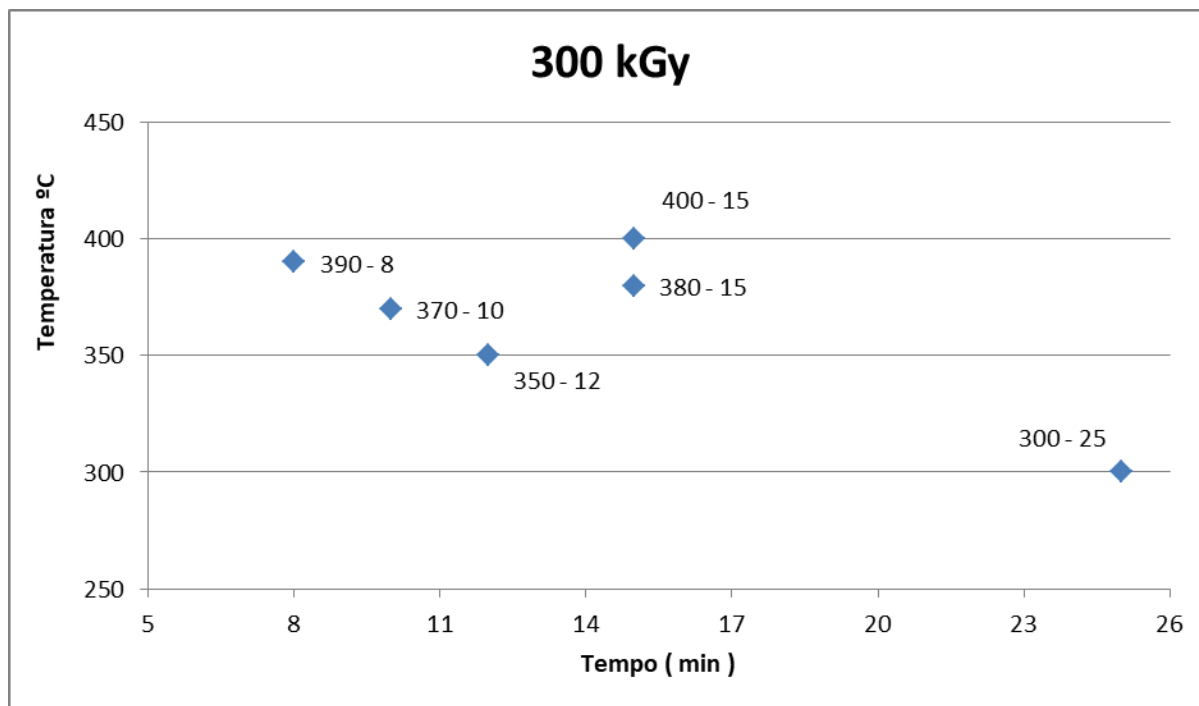
A Tabela 7 e a Figura 33 mostram os indicadores referentes às amostras de 300 kGy. Os resultados são semelhantes aos exemplares das amostras irradiadas a 180 kGy, sendo apresentados subsequentemente nas Figuras 34 e 35.

Tabela 7 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 300 kGy

Amostras	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	300	25
2	350	12
3	370	10
4	380	15
5	390	8
6	400	15

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 33 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas a 300 kGy



Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 34 - Amostras irradiadas a 300 kGy, a temperatura de 350°C a 12 minutos (esquerda) e a 370°C a 10 minutos (direita)



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 35 - Amostras irradiadas a 300 kGy, a temperatura de 400°C com exposição do tempo de 15 minutos, 380°C a 15 minutos e a 390°C por 8 minutos, nessa ordem



Fonte: Autoria própria (2024).

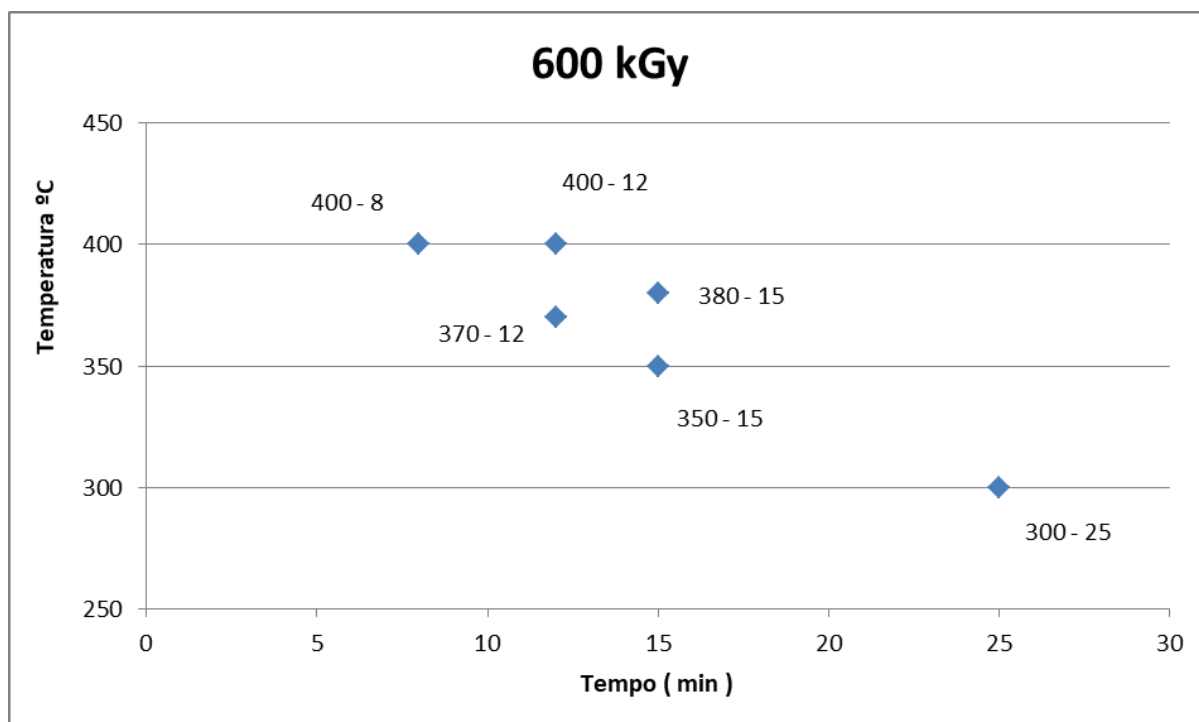
As medidas referentes a 600 kGy são exibidos na Tabela 8, com o gráfico na Figura 36 em seguida. As Figuras 37 e 38 apresentam os resultados, onde foi observado o mesmo padrão de repetição, praticamente não houve mudanças nas peças. Todas com esses parâmetros permaneceram com o tom escuro - fumê, onde apenas algumas partes ficaram mais claras. Quando aumentou a temperatura para 400°C, porém, elas ficaram praticamente brancas e opacas novamente.

Tabela 8 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 600 kGy

Amostras	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	300	25
2	350	15
3	370	12
4	380	15
5	400	8
6	400	12

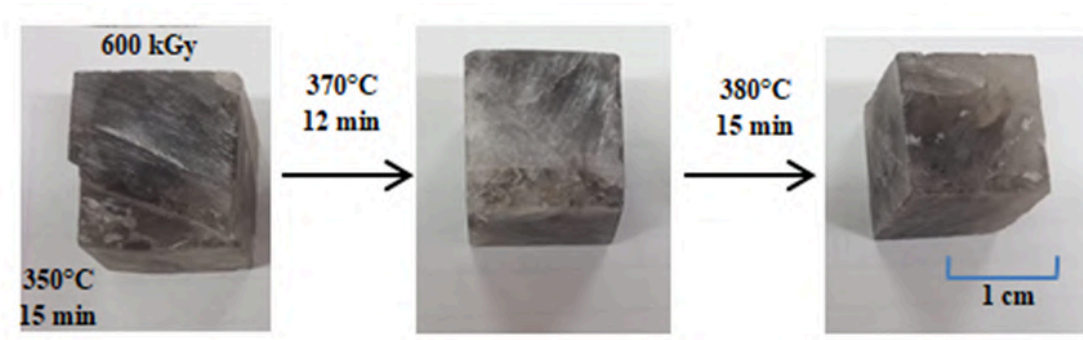
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 36 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas a 600 kGy



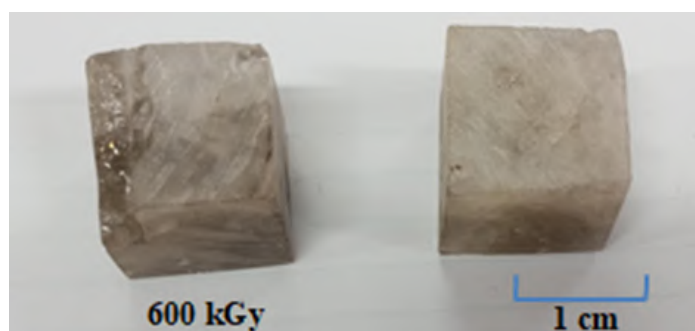
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 37 - Amostras irradiadas 600 kGy, com exposição a temperatura de 350°C por 15 minutos, 370°C por 12 minutos e 380°C por 15 minutos, respectivamente



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 38 - Amostras irradiadas a 600 kGy, a temperatura de 400°C a 8 minutos (esquerda) e a 400°C a 12 minutos (direita)



Fonte: Autoria própria (2024).

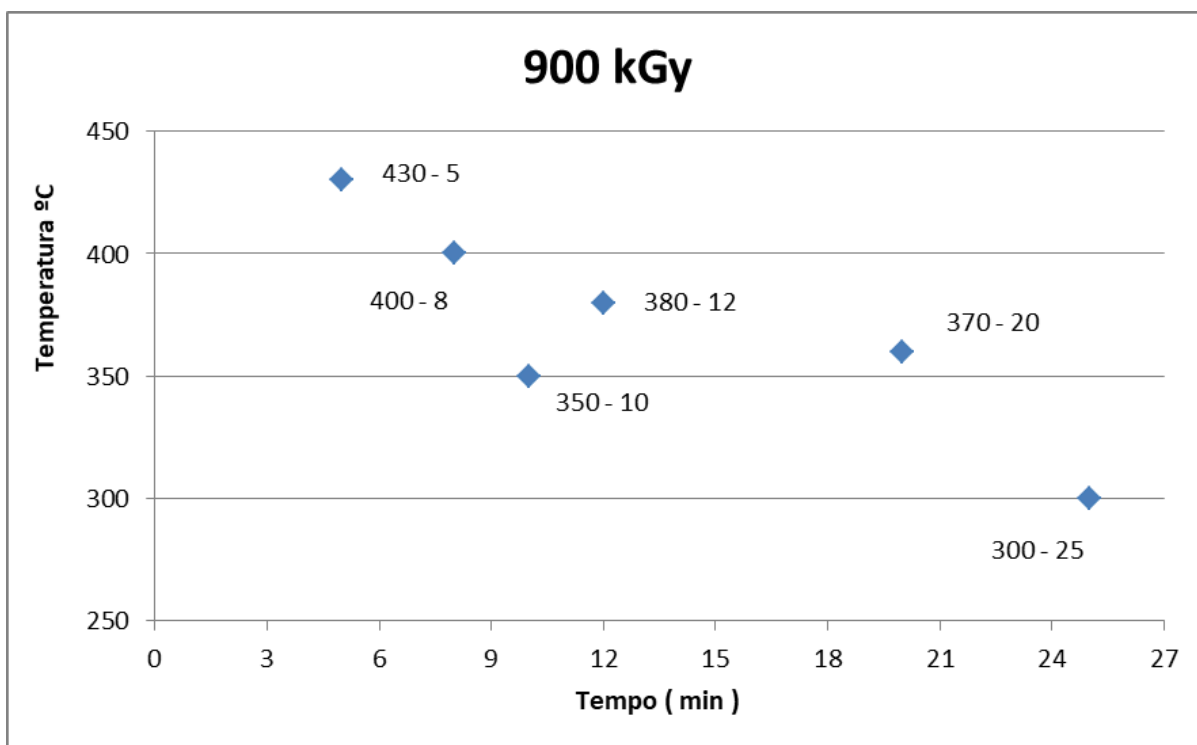
Referentes a 900 kGy, a Tabela 9 e o gráfico na Figura 39 mostram todas as medidas adotadas. As figuras 40 e 41 ilustram os resultados obtidos.

Tabela 9 - Parâmetros de temperatura x tempo das amostras irradiadas a 900 kGy

Amostras	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	300	25
2	350	10
3	360	20
4	380	12
5	400	8
6	430	5

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 39 - Gráfico com a relação de temperatura e tempo das amostras irradiadas a 900 kGy



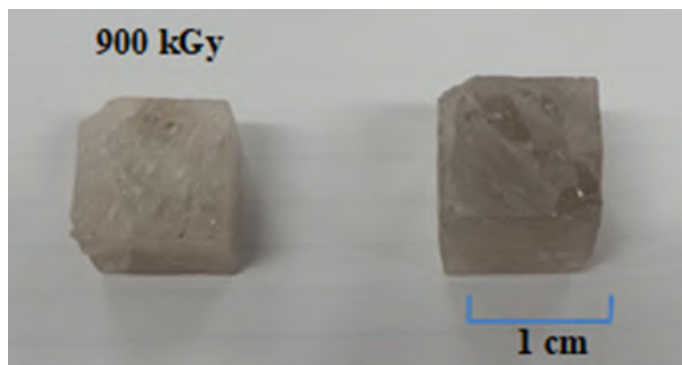
Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 40 - Resultado das amostras irradiadas a 900 kGy a temperatura de 350°C por 10 minutos, 360°C por 20 minutos e 380°C por 12 minutos da esquerda para direita.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 41 - Amostras irradiadas a 900 kGy 400°C por 8 minutos (esquerda) e 430°C graus por 5 minutos (direita)



Fonte: Autoria própria (2024).

A partir desses resultados, observou-se que as amostras do rejeito do quartzo hialino alcançaram apenas alteração da tonalidade da cor, ficando apenas mais claras em relação à cor anterior ao tratamento térmico. Ambas as dosagens não alcançaram o objetivo de chegar a coloração do quartzo *green gold* em nenhum dos critérios escolhidos de temperatura e tempo. Uma justificativa seria o fator corte das amostras, que poderia ter alterado a estrutura das mesmas, uma vez que o procedimento da padronização das peças foi uma proposta para aumentar a uniformidade da cor, não tendo sido realizado anteriormente.

Devido a essa análise, foi feita uma segunda etapa de testes utilizando amostra do mesmo lote, procedentes do mesmo local e mesma variedade - quartzo hialino. A escolha das dosagens em relação à irradiação também permaneceu - 180, 300, 600 e 900 kGy, porém as amostras da segunda parte do experimento não passaram pela etapa de corte, ou seja, foram amostras brutas

Essa etapa então também visou a obtenção da variedade colorida do quartzo *green gold*, e ainda incrementar sobre a relação da interferência ou não da questão do fator da padronização das peças. A Figura 42 mostra os novos exemplares já irradiados, anteriormente ao tratamento térmico. Como é possível observar, as amostras não possuem padrão ou tamanho fixo, não são uniformes.

Figura 42 - Amostras irradiadas a 180, 300, 600 e 900 kGy para utilizadas na segunda etapa de testes do experimento



Fonte: Autoria própria (2025).

### 5.5.2 Segunda etapa

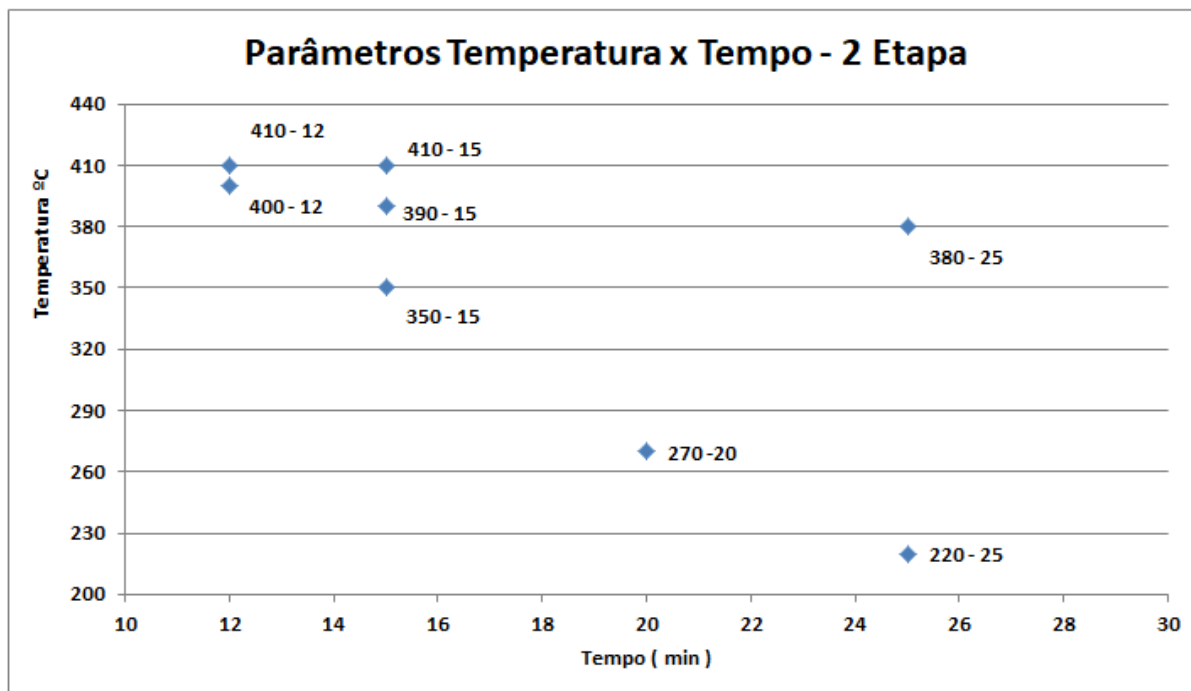
Na segunda etapa dos experimentos, com as amostras sem a padronização de tamanho, um exemplar de cada dosagem foi submetido à mesma condição de temperatura e tempo. Esse processo foi realizado 8 vezes, obtendo então 8 testes para cada uma dos diferentes valores irradiados. A Tabela 10 apresenta os dados dos testes com as temperaturas e tempo, e em seguida a representação gráfica dos mesmos - Figura 43.

Tabela 10 - Parâmetros de temperatura x tempo referente a segunda parte experimental

Teste	Temperatura (°C)	Tempo (minutos)
1	220	25
2	270	20
3	350	15
4	410	15
5	400	12
6	380	25
7	410	12
8	390	15

Fonte: Autoria Própria (2025).

Figura 44 - Gráfico relacionando de temperatura e tempo referente a segunda etapa dos testes



Fonte: Autoria Própria (2025).

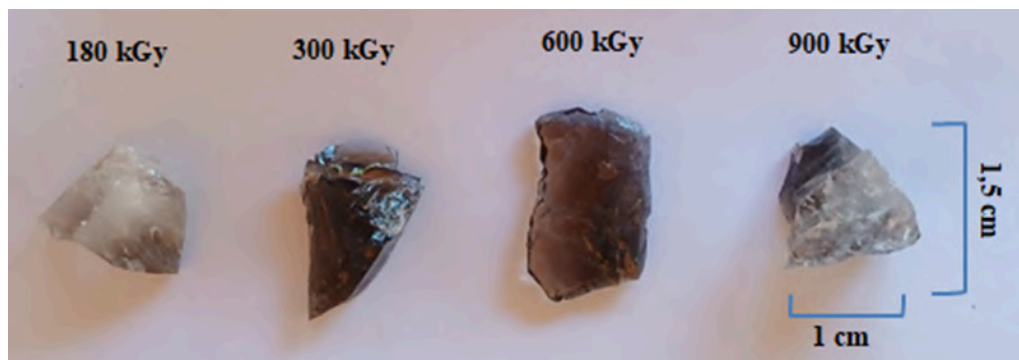
No primeiro teste referente à segunda etapa, a temperatura inicial foi de 220°C com um tempo de 25 minutos. A Figura 45 mostra as amostras anteriormente ao aquecimento, e em seguida a Figura 46 com os resultados. Foi observado que as amostras de 300 e 600 kGy praticamente não sofreram alterações de cor, enquanto as amostras de 180 e 900 se mostraram mais sensíveis e praticamente retornaram a coloração das peças brutas brancas a incolores, embora uma parte das mesmas permaneceu preta. Essa questão, inclusive, já havia sido observada corriqueiramente em tratamentos anteriores e foi a justificativa de se cortar as amostras antes do beneficiamento.

Figura 45 - Primeiro teste da segunda etapa: amostras antes de serem aquecidas.



Fonte: Autoria própria (2025).

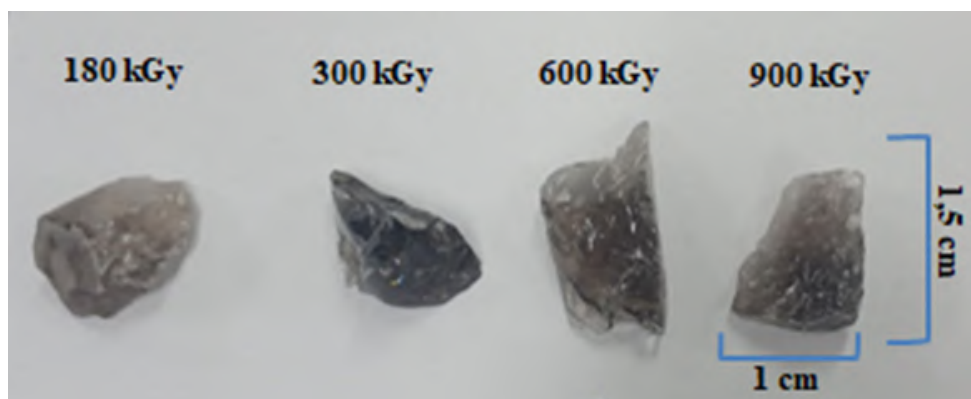
Figura 46 - Primeiro teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 220°C por 25 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

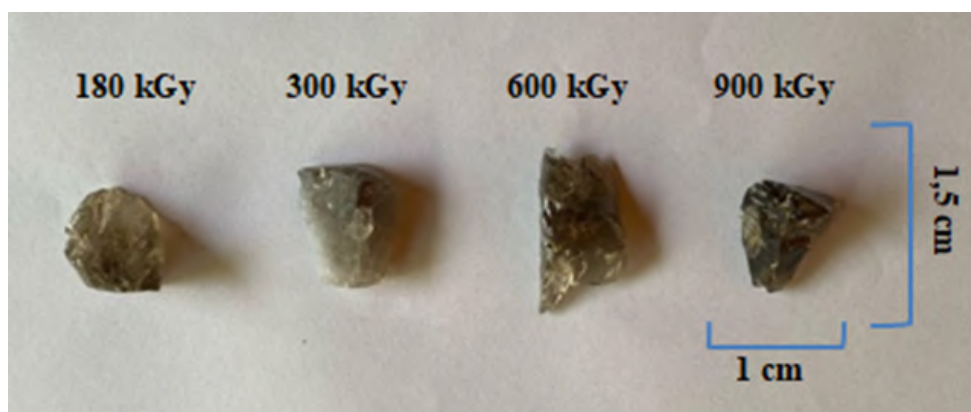
Na segunda tentativa da etapa 2, a temperatura foi de 270°C por 20 minutos. Os resultados seguem na Figura 47. Esse teste, porém, foi realizado novamente. Além dessa exposição de tempo e temperatura não ter mostrado alterações, buscou-se tentar estabelecer um parâmetro inicial de sensibilidade das peças, encontrando um valor inicial em que elas começam a demonstrar mudança à coloração. Após seu resfriamento, então, foi feita uma outra exposição das mesmas sendo novamente inseridas na mufla por 15 minutos, a temperatura de 350°C. A Figura 48 mostra o resultado da duplicata.

Figura 47 - Segundo teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 270°C por 20 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 48 - Segundo teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 350°C por 15 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

No terceiro teste desta etapa, a temperatura aplicada inicial foi de 300°C por 10 minutos. Novamente, porém, os resultados foram irrisórios e não demonstraram alterações significativas. Sendo assim, após o resfriamento ocorreu outra exposição referente às quatro dosagens a 350° C por 15 minutos de permanência. A Figura 49 mostra as amostras antes de serem expostas, a Figura 50 após a 1 tentativa e a Figura 51 após o último ensaio.

Figura 49 - Amostras antes de sofrerem interferência da temperatura



Fonte: Autoria própria (2025).

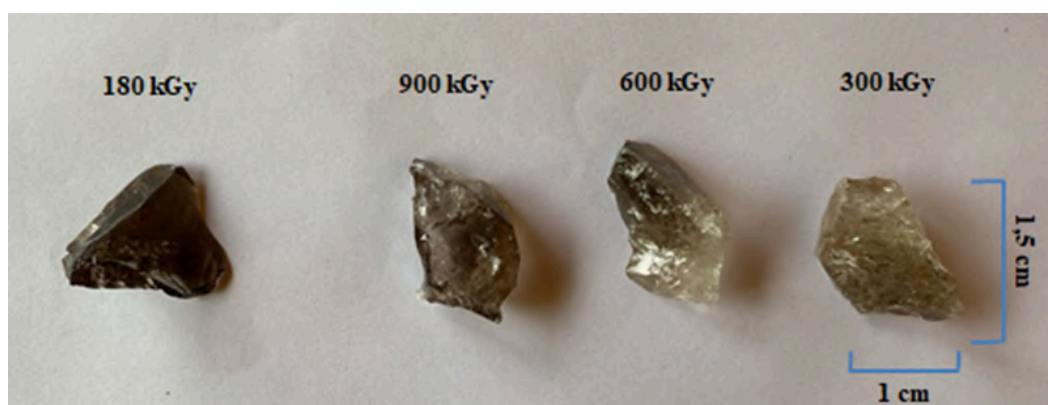
Figura 50 - Amostras submetidas a 350°C por 10 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

Comparando-se as amostras iniciais da Figura 49, observa-se uma alteração mínima em apenas algumas partes das peças. As amostras irradiadas a 300 e 600 kGy apresentaram uma mudança por ficarem mais claras, enquanto as outras - 180 e 900 kGy permaneceram praticamente iguais.

Figura 51 - Amostras aquecidas por mais 15 min a 350°C - duplicata do teste 3



Fonte: Autoria própria (2025).

Nessa segunda exposição, as amostras que haviam mostrado um maior clareamento na primeira tentativa - 300 e 600 kGy demonstraram uma mudança representativa, com um resultado aparente. Para uma melhor visualização do processo, as Figuras 52 e 53 mostram com mais detalhes a alteração nesses dois casos.

Figura 52 - Processo detalhado 300 kGy



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 53 - Processo detalhado 600 kGy



Fonte: Autoria própria (2025).

O quarto ensaio da etapa número 2 ocorreram mudanças mais significativas comparando-se às tentativas anteriores. Elas tornaram-se mais claras, e visivelmente tons de amarelo que não haviam sido observados em quaisquer dos testes anteriores, inclusive os da primeira etapa. A temperatura aplicada foi de 410°C por 15 minutos. A Figura 54 mostra o antes - amostras apenas irradiadas e a Figura 55 após o tratamento térmico.

Figura 54 - Quarto teste da segunda etapa: amostras antes de serem aquecidas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 55 - Quarto teste da segunda etapa: Amostras aquecidas a 410°C por 15 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

Em sequência, no quinto ensaio o material foi submetido a temperatura de 400°C por 12 minutos. As amostras antes e depois do ensaio seguem na Figura 56 e Figura 57, respectivamente.

Figura 56 - Quinto ensaio do teste da segunda etapa: amostras antes de serem aquecidas.



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 57 - Quinto ensaio da segunda etapa: amostras submetidas a 400°C por 12 minutos



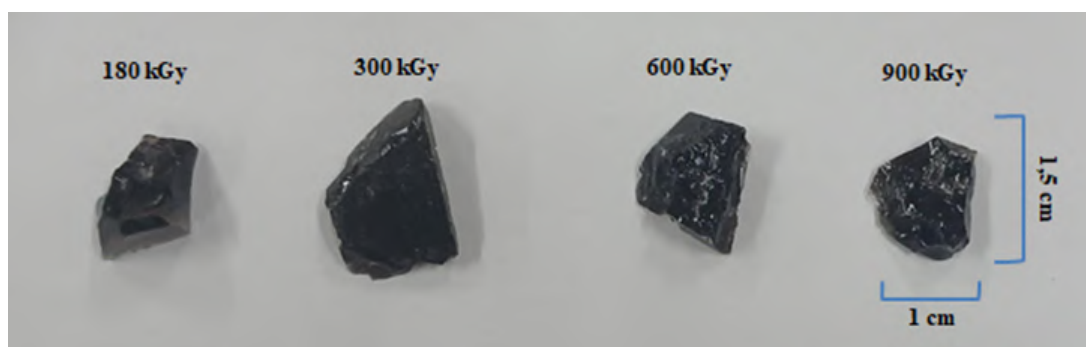
Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados mostram que as peças submetidas às dosagens de 600 e 900 kGy, se tornaram com menor grau de transparência e branca, porém, semelhantes à variedade do quartzo leitoso. Isso indica que os centros de cor criados pela radiação provavelmente foram totalmente destruídos pela temperatura, então para essas dosagens os parâmetros se excederam.

Porém, as amostras submetidas às dosagens referentes a 180 e 300 kGy praticamente não demonstraram quaisquer mudanças. Nesse teste a relação do aumento das dosagens se mostrou nítido, ou seja, a uma radiação mais intensa a sensibilidade a temperatura também se torna maior.

No sexto caso, tendo em vista o resultado do anterior - quinto ensaio, as amostras foram colocadas em cadinhos de porcelana para uma possível melhor distribuição do calor. A Figura 58 mostra as amostras antes, e a Figura 59 a representação das mesmas inseridas nos cadinhos. Em sequência, na Figura 60, o resultado após serem levadas a uma temperatura de 380°C por 25 minutos.

Figura 58 - Sexto teste da segunda etapa: amostras antes do tratamento térmico



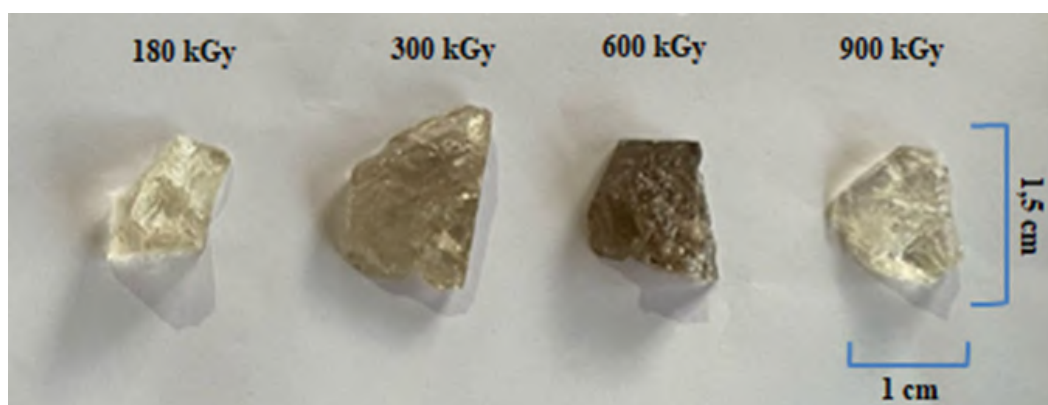
Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 59 - Sexto teste da segunda etapa: amostras antes do tratamento térmico inseridas no cadinho de porcelana



Fonte: Autoria própria (2025).

Figura 60 - Sexto teste da segunda etapa: Resultado das amostras submetidas a 380°C por 25 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

Nesse resultado, diferentemente do anterior, a amostra de 180 kGy demonstrou bastante sensibilidade à temperatura se tornando bastante clara, e com tom amarelo, e a amostra com dosagem de 600 kGy foi a que permaneceu mais escura dentre as outras. Como não ocorreu um padrão específico em relação às dosagens e o teste anterior, o uso do cadinho para uniformização da temperatura se mostrou irrelevante. Além disso, o resultado da amostra de 180 kGy obteve bastante semelhança de tom amarelo da amostra de 900 kGy do quarto teste a 410°C por 15 minutos.

Em relação ao sétimo experimento, a uma temperatura de 410°C por 12 minutos, as amostras obtiveram o seguinte resultado da Figura 61. Observou-se uma similaridade entre as cores em todas as dosagens, e apesar de permanecerem claras, a tonalidade das mesmas foi a mais próxima dos resultados esperados, especialmente nas peças com maior dosagem de 600 e 900 kGy. Como o cadinho foi inserido apenas no teste anterior (sexto), seu uso realmente não tem interferência nos resultados.

Figura 61 - Sétimo teste da segunda etapa: Resultado das amostras submetidas a 410°C por 12 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

No último teste da segunda etapa, a temperatura escolhida foi de 390°C por 15 minutos. O resultado é mostrado abaixo na Figura 62 abaixo. Nesses parâmetros, as peças ficaram mais claras em relação ao aumento das dosagens, e novamente a peça irradiada a 900 kGy apresentou um resultado visualmente mais satisfatório.

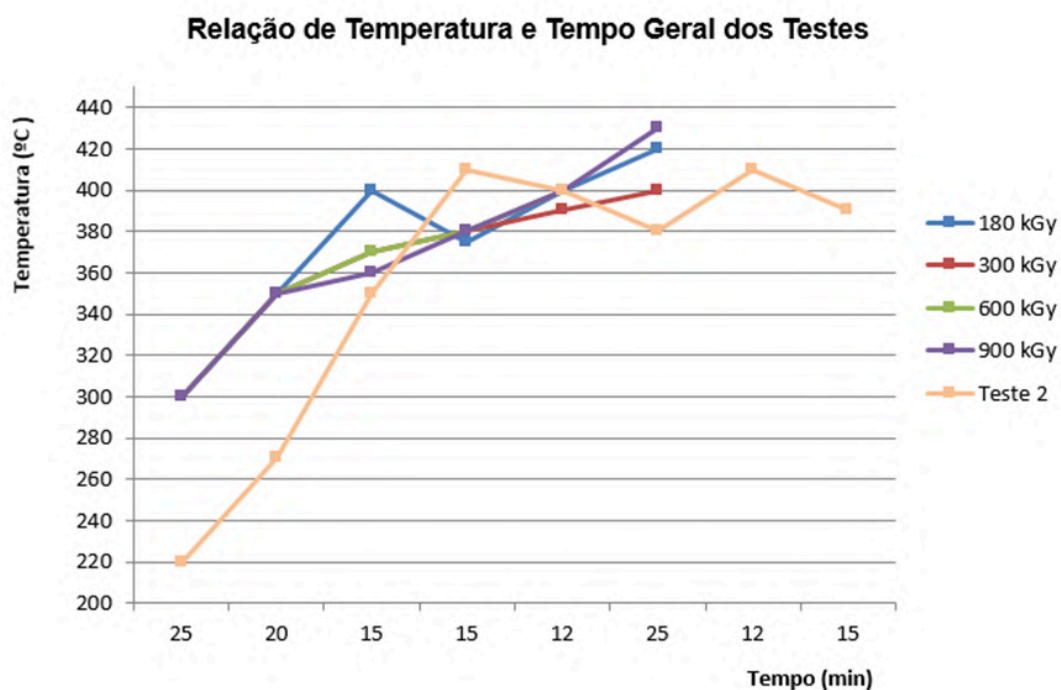
Figura 62 - Oitavo teste da segunda etapa: Resultado das amostras submetidas a 390°C por 15 minutos



Fonte: Autoria própria (2025).

O gráfico 6 mostrado na Figura 63 exibe a relação de temperatura e tempo aplicados na Etapa 1 e Etapa 2 dos procedimentos experimentais:

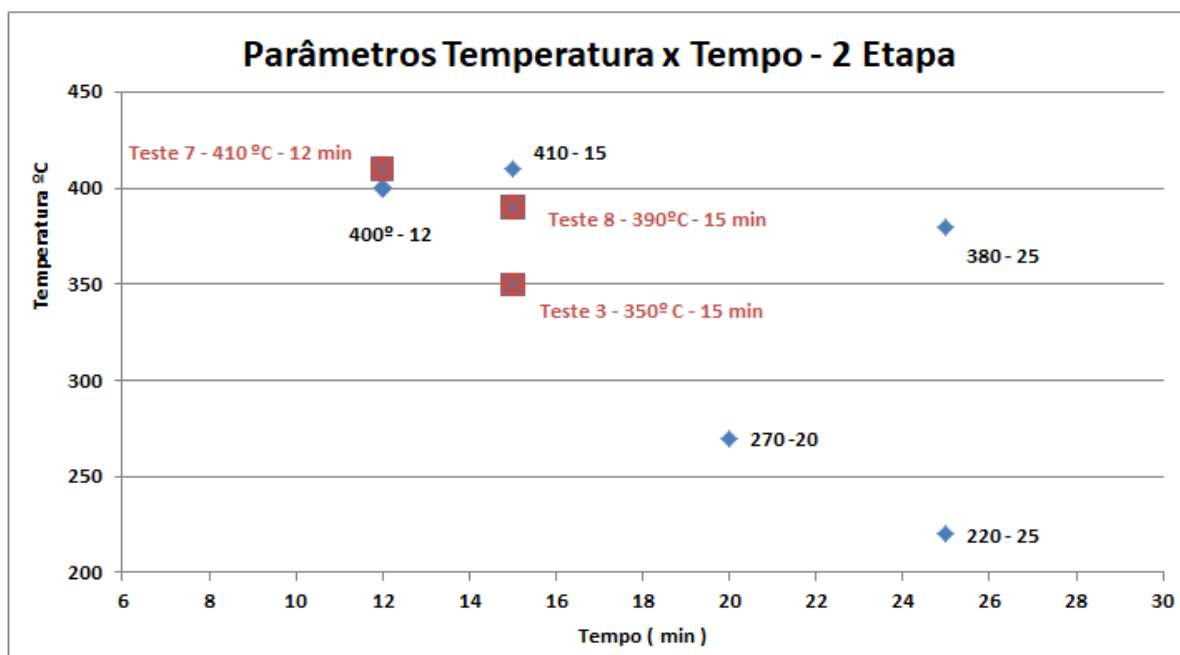
Figura 63 - Gráfico Relação de temperatura e tempo referentes às 2 etapas dos experimentos



Fonte: Autoria própria (2025).

Considerando os melhores resultados obtidos, A Figura 64 mostra em destaque a segunda etapa dos experimentos com os melhores resultados: teste 3 - 350°C por 10 minutos; teste 7 - 410°C por 12 minutos e teste 8 - 390°C por 15 minutos.

Figura 64 - Destaque dos resultados dos testes referentes 3, 7 e 8 da segunda etapa



Fonte: Autoria própria (2025).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como principal objetivo aplicar a metodologia sistemática para o beneficiamento do quartzo hialino, proveniente de rejeitos minerários da Cooperativa Uniquartz (Corinto - MG), visando a obtenção do quartzo gemológico na variedade *green gold*. O estudo, de caráter experimental, empregou a irradiação gama com fonte de Cobalto 60 seguido do tratamento térmico, técnicas já conhecidas para indução de centros de cor e obtenção de variedades não ocorrentes na natureza.

A pesquisa contou com duas fases de irradiação gama e tratamento térmico. Na primeira etapa, ocorreu uma padronização das amostras para observação da influência do tamanho e corte das peças em relação à mudança de cor. Sendo assim, elas passaram pelo processo de corte antes de serem irradiadas, porém em relação ao tratamento térmico se concluiu que o formato ou tamanho das amostras não interfere nos resultados, que inclusive foram insatisfatórios para com o objetivo.

A segunda etapa avaliou as amostras sem o fator corte, com o tamanho das mesmas sem qualquer padrão. Buscando o tom amarelo esverdeado característico do quartzo *green gold*, essa etapa obteve mais êxito com algumas amostras apresentando tons amarelos bem claros. A duplicata do teste 3 a 350°C por 15 minutos se aproximou da tonalidade, em especial as amostras irradiadas a 300 e 600 kGy. Os testes 7 - 410°C por 12 minutos e o teste 8 - 390°C por 15 minutos foram os mais satisfatórios, porém não obtiveram grandes diferenças em relação a dosagem, no sétimo teste praticamente todas as amostras chegaram ao mesmo resultado.

As técnicas analíticas aplicadas foram importantes para a caracterização físico-química das amostras e demonstraram a manutenção da estrutura do quartzo mesmo após os procedimentos de beneficiamento. A análise ICP OES detectou impurezas de Al e Fe e Li que indicam o potencial do material em desenvolver centro de cores após o processo de irradiação.

Os ensaios de FTIR foram semelhantes tanto nas amostras brutas quanto após os tratamentos de beneficiamento, mostrando que não ocorreu a formação de centros de cores distintos e característicos do *green gold*. As análises térmicas apresentaram a pureza do quartzo mostrando ausência de água e quaisquer

elementos significativos, além de comprovar que os tratamentos realizados não interferem na estrutura e composição do material e que os tratamentos não interferem em sua composição.

Do ponto de vista ambiental e econômico, a proposta representa uma alternativa de agregação de valor a materiais que, sem o beneficiamento, permaneceram como passivos ambientais ou subprodutos de baixo valor.

## 7 SUGESTÕES FUTURAS

O estudo demonstra viabilidade técnico-científica de rejeitos minerais de baixo valor agregado em gemas com alto valor comercial. Portanto, como complementação deste trabalho recomendo alguns projetos futuros:

- Fazer testes nas amostras de ambiente pegmatítico
- Testar a variedade do quartzo leitoso
- Realizar análise FTIR das amostras após o tratamento térmico
- Investigar a relação da quantidade de Al, Fe e Li nas amostras para a criação dos centros de cor
- Fazer um estudo sucinto de viabilidade econômica do processo e aceitação das peças no mercado
- Processo de finalização das amostras - lapidação para complementar o estudo de viabilidade e aceitação das joias no mercado

## REFERÊNCIAS

- AKHAVAN, A.C. **The quartz page: quartz structure**. 2011. Disponível em : [http://www.quartzpage.de/gen\\_struct.html](http://www.quartzpage.de/gen_struct.html). Acesso em: 25 jul. 2025.
- ÁVILA, S.T de. **Análise térmica: princípios básicos e aplicações**. Youtube, 27 de julho de 2023. 55min26s. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=LIKz3NLwCWE>. Acesso em: 26 set. 2024.
- BARBOSA, C.T. **A cor do citrino: efeito de irradiação e tratamento térmico**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Geologia) - Instituto de Geociências e Ciências da Terra. Universidade Estadual Paulista/UNESP. Rio Claro, SP, 2009.
- BARBOSA, C.T. **A origem do quartzo *green gold*: tratamento e ambiente geológico**. 2012. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - Instituto de Geociências/USP. São Paulo, SP, 2012.
- BRANCO, P. M. **Dicionário de mineralogia e gemologia**. 2008. 2 ed. São Paulo: Oficina de Textos. 608 p. 2008.
- BRUM, T.M.M.; JUCHEM, P. L. **Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do RS**. Capítulo 6 - Identificação e certificação de gemas. 2014. Laboratório de Gemologia, Departamento de Mineralogia e Petrologia. Biblioteca de Geociências, UFRGS. Porto Alegre, RS, 2014.
- CNEN - Comércio Nacional de Energia Nuclear. **Estudo da cadeia de suprimento do programa nuclear brasileiro relatório parcial- irradiadores e aplicações - irradiação de gemas (pedras preciosas)**. CGEE - Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Brasília, 2010. Disponível em: <https://www.gov.br/cnen/pt-br/aceso-a-informacao/institucional/cs-rel-parcial-gemas.pdf>. Acesso em: 16. jul. 2025.
- CODEMIG - **Companhia de desenvolvimento econômico de Minas Gerais**. Mapa de Recursos Minerais sobre fundo tectônico. Escala 1:1.000.000. 2014.
- CORREA, M. **Variedades gemológicas de quartzo na Bahia, geologia, mineralogia, causas de cor, e técnicas de tratamento**. 2010. Dissertação (Mestrado em Mineralogia e Petrologia) - Instituto de Geociências/USP. São Paulo, SP, 2010.
- CUNHA, D. A. da S. *et al.* Aplicações de espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FTIR) para caracterização de complexos. *In*: ENCONTRO DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, 6., 2014. Mato Grosso do Sul. **Anais [...]**. Mato Grosso do Sul: UEMS, 2014.
- DENARI, G. B. **Contribuições ao ensino de análise térmica**. 2013. Dissertação (Mestrado em Química Analítica e Inorgânica) – Instituto de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2013. DOI:

10.11606/D.75.2013.tde-04042013-151955. Disponível em:  
<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75135/tde-04042013-151955/pt-br.php>  
Acesso em: 12 set. 2023.

DRUMMOND, N. F. **Ambientes geológicos e mudanças de cor no quartzo hialino**. 2009. [manuscrito]/Ney Friedemann Drummond - Fundação Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP, MG, 2009.

DRUMMOND, N. F. MENDES, J. C. LAMEIRAS, F. S. . Caracterização de quartzo para obtenção de suas variedades gemológicas por irradiação gama e/ou Tratamento Térmico. **REM:R. Esc. Minas**, Ouro Preto, 63(3), jul. set. 2010. DOI:<https://doi.org/10.1590/S0370-44672010000300005>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rem/a/3x4XDPcGzQGJcSKrnxCGQNd/?lang=pt>. Acesso em: 10 jul. 2025

ENOKIHARA, C. T. **Estudo do quartzo verde de origem hidrotermal tratado com radiação gama**. 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Aplicações) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares/IPEN. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. DOI: <https://doi.org/10.11606/T.85.2013.tde-18022014-133514>. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-18022014-133514/pt-br.php> Acesso em: 03 dez. 2023.

ERICKSSON, C.; BRUM, I. A. S.; SILVA, J.T. Padronização e otimização de sistemas de tingimento de gemas. *In*: ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS, 25.; MEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE ON MINERAL TECHNOLOGY, 8.; 2013, Goiânia. **Anais** [...]. Goiânia: editora Pires do Rio Ltda-ME, 2013. p. 43 - 48.

FRANCO RUI R. SVISERO D. P. Conceito, Nomenclatura e classificação das gemas. **REM: Revista Escola de Minas**, v. 40, n. 3 , p. 3-7, 1987. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/35396b0b-aea0-447c-9fd8-85ce52a66823/0788341.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2024

GOBBO, L.de A. **Os compostos do clínquer Portland: sua caracterização por difração de raios-X e quantificação por refinamento de Rietveld**. 2003. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2003. DOI:10.11606/D.44.2003.tde-09102003-112552. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44133/tde-09102003-112552/pt-br.php> Acesso em: 12 maio 2025.

HADDOW, M. *The new definition of crystals - or how to win a Nobel Prize*. **Science in School**, p. 59-64, *Issue 2024: autumn 2012*. Disponível em: <http://www.scienceinschool.org/print/3611>. Acesso em: 19 fev. 2025.

HELFENBERGER, A. F. M. **Estudo da interferência da radiação gama na cor das ametistas de Montezuma, MG**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. Disponível em: <https://bdta.abcd.usp.br/item/001664586>. Acesso em: 13 ago. 2024.

IBGM - **Boletim referencial de preços de diamantes e gemas de cor. 6ª EDIÇÃO** - Revisada e Ampliada – 2009.

IBGM - Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos - IBGM Informa. (2019). **O setor em grandes números 2018: gemas, joias, e metais preciosos.** Publicado em 17 set. 2019. Disponível em: <https://ibgm.com.br/publicacao/publicacao-o-setor-em-grandes-numeros-2018/> Acesso em 31/10/2024. Acesso em: 18 nov. 2024.

Infrared Spectroscopy Absorption Table. **LibreTexts Chemistry**. 2004. Campus Bookshelves. *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 84th Edition (2004). Disponível em: [https://chem.libretexts.org/Ancillary\\_Materials/Reference/Reference\\_Tables/Spectroscopic\\_Reference\\_Tables/Infrared\\_Spectroscopy\\_Absorption\\_Table](https://chem.libretexts.org/Ancillary_Materials/Reference/Reference_Tables/Spectroscopic_Reference_Tables/Infrared_Spectroscopy_Absorption_Table). Acesso em: 06 jan. 2025.

International Mineralogical Association (IMA). **Commission on new minerals, nomenclature and classification (CNMNC)**. List of IMA – approved minerals, September 2024. Disponível em: [https://cnmnc.units.it/files/IMA\\_Master\\_List\\_\(2024-09\)-1.pdf](https://cnmnc.units.it/files/IMA_Master_List_(2024-09)-1.pdf). Acesso em: 28 out. 2024.

KLEIN, B. DUTROW, C. **Manual de ciência dos minerais**. São Paulo, Editora: Bookman. 23. ed. 724 p. 2012.

LAMEIRAS, F.S. et al. **Relatório interno do centro de desenvolvimento da tecnologia nuclear**. 2007. Belo Horizonte, MG: CDTN, 2007.

LARIN - Laboratório de radiações ionizantes. centro de ciências naturais aplicadas - UNESPetro, 2024.

LCT- **Laboratório de caracterização tecnológica – departamento de engenharia de minas e petróleo da escola politécnica da USP**. 2024. Disponível em <https://www.lct.poli.usp.br/sobre/lct>. Acesso em: 22 nov. 2024.

LEMOS, A. B. Generalidades da Análise Térmica. **Boletim de tecnologia e desenvolvimento de embalagens – Instituto de tecnologia de alimentos. CETEA-ITAL**. v. 15, n.3, p. 1- 4, 2003.

LIZ, O. S. R. Irradiação e tratamento de quartzos. 2007. **Dossiê Técnico**. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais/CETEC. Serviço Brasileiro de de Respostas Técnicas. Novembro de 2007. Edição atualizada em maio de 2022. Disponível em: <https://respostatecnica.org.br/busca/irradiacao-e-tratamento-de-quartzos/228/dossie>. Acesso em: 12 jul 2025.

MAGALHÃES, A. O. B.; SILVA, B. A.; PAIVA, R. M.B. Beneficiamento do quartzo hialino e leitoso para obtenção de variedades gemológicas. **Revista Extensão & Cidadania**. [S. l.], v. 7, n. 12, p. 11, 2019. DOI: 10.22481/recuesb.v7i12.5908. Disponível em: <http://periodicos2.uesb.br/recuesb/article/view/5908>. Acesso em: 13

ago. 2024.

MOL, A. A. **Estudo de ferramenta computacional para análise de parâmetros em gemas lapidadas: quartzo hialino**. 2004. [manuscrito]./Adriano Aguiar Mol. – 2004. Universidade Federal de Ouro Preto/UFOP/CETEC/UEMG.

Natural Mystic: **Cristais e acessórios naturais**. 2020. Loja Virtual de Comércio de pedras e artesanato. Vinhedo/SP. 2020. Disponível em: <https://www.naturalmystic.com.br/ametista-bruta-m>. Acesso em: 29 set. 2023.

NUNES, T. F. **Beneficiamento do quartzo para obtenção de suas variedades gemológicas**. 2023. Trabalho de Conclusão e Curso (Graduação em Engenharia de Minas) - Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal de Alfenas/UNIFAL. Poços de Caldas, MG, 2023.

PINTO, L. C. B.de M. **Crescimento hidrotérmico e caracterização de quartzos dopados em cobalto**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP. Ouro Preto, MG, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2842>. Acesso em: 29 nov. 2023

RAWAT, N. *et al.* Chapter Two - Interaction of cells with different types of TiO<sub>2</sub> nanostructured surfaces. **Advances in biomembranes and lipid self-assembly**, v. 37, p. 29-59. 2023. DOI: 10.1016/bs.abl.2023.05.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451963423000031>. Acesso em: 20 jul. 2025.

SCHUMMANN, W. **Gemstones of the world**. 5 ed. New York: Sterling. 2013, 418p.

SGS Geosol Laboratórios LTDA. Certificado de Análises. [www.sgsgeosol.com.br](http://www.sgsgeosol.com.br) Vespasiano-MG, 2024.

SILVA, R. F. DA. A difração de raios X: uma técnica de investigação da estrutura cristalina de materiais. **Revista Processos Químicos**, v. 14, n. 27, p. 73-82, 2020. DOI:10.19142/rpq.v14i27.577. Disponível em: [https://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq\\_n1/article/view/577](https://ojs.rpqsenai.org.br/index.php/rpq_n1/article/view/577). Acesso em: 22 set. 2024.

SOUZA, A. K. R.; LIMA, D. M. V.; OLIVEIRA, S. L. A. Técnica FTIR e suas aplicações em amostras orgânicas. *In*: ENCONTRO DE PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO, 6., 2014, Mato Grosso do Sul. **Anais [...]**, Mato Grosso do Sul: UEMS, 2014.

TAUHATA, L. *et al.* **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. Rio de Janeiro - IRD/CNEN. 10 revisão abril/2014. 344 p, 2014.

TERRA, C. Gemologia: a ciência de mil cores. **Terræ Didática**, v. 16, p.1-13, maio. 2020. DOI: 10.20396/td.v160.8658362. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8658362>. Acesso em: 10 abr. 2024.