

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Estudo da Interferência da Radiação Gamma na Cor
das Ametistas de Montezuma, MG**

ANDRÉ FRANCISCO MUNHOZ HELFENBERGER

ORIENTADOR: PROF. DR. RAINER SCHULTZ GÜTTLER

**TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2007/05)**

São Paulo
2007

TF
H474
AFM.e

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Estudo da Interferência da Radiação Gamma na Cor
das Ametistas de Montezuma, MG**

ANDRÉ FRANCISCO MUNHOZ HELFENBERGER

ORIENTADOR: PROF. DR. RAINER SCHULTZ GÜTTLER

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024092

**TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2007/05)**

**São Paulo
2007**



AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai Sr. Carlos Munhoz pela constante ajuda.

Agradeço ao meu orientador pelo acompanhamento e ensinamentos.

Agradeço ao Sr. Cláudio Kohigashi pela doação das amostras para estudo, e ao Sr. Cyro Enokihara (IPEN/USP) por se encarregar da irradiação das amostras.

Agradeço à minha mãe, Krista, irmã, Laura e demais familiares, e também aos amigos que me acompanharam no decorrer do curso de graduação, em especial Hermes Augusto e Weder Portugal.

Índice Geral

1.	Introdução	8
2.	Objetivos	10
3.	Levantamento Bibliográfico	10
3.1.	Propriedades Estruturais e Cristaloquímicas do Quartzo	10
3.2.	A teoria da cor e os sistemas de classificação	13
3.3.	Métodos de Tratamento de Ametista	18
3.4.	A cor nas Ametistas	18
3.5.	Caracterização geológica regional da Mina de Montezuma, MG	20
3.6.	Gênese dos Depósitos de Quartzo Hidrotermal	23
4.	Materiais e Métodos	25
4.1.	Descrição das amostras adquiridas para estudo	25
4.2.	Ensaio de irradiação com raios gamma	25
4.3.	Ensaio de aquecimento	26
4.4.	Funcionamento do método gráfico de classificação das cores	28
5.	Desenvolvimento do Trabalho	30
5.1.	Separação das Amostras (após o 1º aquecimento entre 380 e 450°C)	31
5.2.	Irradiação com raios gamma	33
5.3.	Aquecimento entre 200 e 300°C	33
5.4.	Aquecimento entre 380 e 430°C (após a etapa de irradiação)	34
5.5.	Análises Químicas Semi-Quantitativas	34
6.	Resultados Obtidos e Discussão dos Resultados	35
6.1.	Resultados obtidos após 1º aquecimento entre 380 e 450°C	35
6.2.	Resultados obtidos após a etapa de irradiação com raios gamma	35
6.4.	Resultados obtidos após os aquecimentos entre 380 e 430°C (posteriores à etapa de irradiação)	42
6.5.	Resultados das análises químicas	44
7.	Conclusões	44
8.	Referências Bibliográficas	46

Índice de Tabelas

NO TEXTO

Tabela 4.3.1 – Dados referentes à calibração do termopar tipo J para o 3º aquecimento	27
---	----

NO ANEXO

Tabela 6.1.1 - Classificação da cor das amostras dos Grupos 1, 2, 3 e 4 após o 1º aquecimento entre 380 e 450°C	
Tabela 6.3.1 - Classificação da cor das amostras do Grupo 1 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300°C	
Tabela 6.3.2 - Classificação da cor das amostras do Grupo 2 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300°C	
Tabela 6.3.3 - Classificação da cor das amostras do Grupo 3 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300°C	
Tabela 6.3.4 - Classificação da cor das amostras do Grupo 4 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300°C	
Tabela 6.3.5 - Cor das amostras do Grupo 3 (irradiadas com 5kGy) após aquecimento de 250°C	
Tabela 6.3.6 - Cor das amostras do Grupo 1 (irradiadas com 371kGy) após aquecimento de 250°C	
Tabela 6.3.7 - Cor das amostras do Grupo 3 (irradiadas com 371kGy) após aquecimento de 250°C	
Tabela 6.4.1 - Resultados do aquecimento das amostras de safirita do Grupo 2 a 380 e 430°C	
Tabela 6.4.2 - Resultados do aquecimento das amostras de safirita do Grupo 3 a 380 e 430°C	

Índice de Figuras

NO TEXTO

Figura 1.1 – Localização de Montezuma, MG	8
Figura 1.2 – (1) Ametista natural de Montezuma em bruto; (2) Prasiolita em bruto (ametista queimada); (3) Prasiolita lapidada; (4) Safirita em bruto (ametista queimada e irradiada); (5) Safirita lapidada	9
Figura 3.1.1 – Arranjo estrutural do quartzo β , ao longo do eixo c , no grupo espacial $P6_422$, com a origem deslocada em $1/3c$ para facilitar a comparação	11
Figura 3.1.2a – Arranjo estrutural do quartzo α (esquerdo), no grupo espacial $P3_121$	11
Figura 3.1.2b – Arranjo estrutural do quartzo α (direito), no grupo espacial $P3_221$	11
Figura 3.1.3 – Sistema de substituições de elementos químicos e incorporação de água na estrutura do quartzo	12
Figura 3.2.1 – Círculo das Cores de Newton	14
Figura 3.2.2 – Espaço da cor	15
Figura 3.2.3 – Sistema de cores de Munsell	15
Figura 3.2.4 – Sistema da Mistura das Cores Aditivas	16
Figura 3.2.5 – Diagrama de cromaticidade CIE, 1931	17
Figura 3.4.1 – Posição dos canais estruturais I_6 e I_4 na estrutura do quartzo	19
Figura 3.5.1 – Mapa Geológico do setor norte da Faixa Araçuaí	21
Figura 3.5.2 – Rocha encaixante dos veios de ametista (quartzito) com acamamento vertical, na região da Mina de Montezuma	22
Figura 3.5.3 – Rocha encaixante dos veios de ametista (quartzito) com acamamento sub-vertical, na região da Mina de Montezuma	22
Figura 3.5.4 – Veio de ametista dentro da mina subterrânea de Montezuma	22
Figura 3.6.1 – Solubilidade do quartzo em água pura, sob um gradiente geotermobárico de 35 °C e 300 bar por quilômetro	23
Figura 3.6.2 – Modelo de gênese de depósitos de quartzo hidrotermal na Serra do Espinhaço	24
Figura 4.3.1 – Forno COBEL utilizado nos ensaios de aquecimento	26
Figura 4.3.2 – Curva de calibração: Medidor IMIT (do termopar tipo K) x Medidor Minipa (do termopar tipo J)	28
Figura 4.4.1 – Princípio utilizado para classificação das cores das gemas	29
Figura 5.1 – Fluxograma dos ensaios de tratamento realizados nas amostras de ametista de Montezuma	30

Figura 5.1.1 – Os cinco grupos de amostras selecionadas: Grupo 1 (verde claro); Grupo 2 (verde amarelado); Grupo 3 (verde escuro); Grupo 4 (marrom); Grupo 5 (verde azulado)	32
Figura 6.2.1 – Amostras do Grupo 5 após serem irradiadas com uma dose de 160kGy .	36
Figura 6.3.1 – Variação da saturação das cores das amostras do Grupo 1, irradiadas com 160kGy, após o aquecimento com 200, 250 e 300°C	39
Figura 6.3.2 – Variação da saturação das cores das amostras do Grupo 2, irradiadas com 160kGy, após o aquecimento com 200, 250 e 300°C	39
Figura 6.3.3 - Variação da saturação das cores das amostras do Grupo 3, irradiadas com 160kGy, após o aquecimento com 200, 250 e 300°C	40
Figura 6.3.4 - Variação da saturação das cores das amostras do Grupo 4, irradiadas com 160kGy, após o aquecimento com 200, 250 e 300°C	40
Figura 6.3.5 - Variação da cor preta das amostras do Grupo 1 em função do aumento da temperatura	41
Figura 6.3.6 – Variações na tonalidade da safirita	41
Figura 6.4.1 – Diferença na tonalidade de cor da prasiolita “tipo 1” e da prasiolita “tipo 2”	43

NO ANEXO

Foto 1 – Amostras do Grupo 1, irradiadas com 160kGy, após o tratamento térmico de 200, 250 e 300°C nos intervalos de 30, 60 e 90 min.

Foto 2 – Amostras do Grupo 2, irradiadas com 160kGy, após o tratamento térmico de 200, 250 e 300°C nos intervalos de 30, 60 e 90 min.

Foto 3 – Amostras do Grupo 3, irradiadas com 160kGy, após o tratamento térmico de 200, 250 e 300°C nos intervalos de 30, 60 e 90 min.

Foto 4 – Amostras do Grupo 4, irradiadas com 160kGy, após o tratamento térmico de 200, 250 e 300°C nos intervalos de 30, 60 e 90 min.

Foto 5 – Amostras resultantes do aquecimento a 420°C após terem sido irradiadas com raios gamma em dosagens de 256 e 371kGy.

Resumo

O depósito de ametista de Montezuma (MG) é o único no mundo cujos cristais de ametistas, após passarem por um processo de tratamento térmico e de irradiação gamma, são capazes de gerar como produto a safirita, um quartzo azul violeta.

Outro produto que é possível produzir a partir do material dessa jazida são as prasiolitas “tipo 1” e “tipo 2”, que se diferem pela coloração. A prasiolita “tipo 1” corresponde a um quartzo verde amarelado, enquanto que a prasiolita “tipo 2” possui um tom verde azulado.

Este projeto compreende ensaios de irradiação e aquecimento de cristais de ametista do depósito de Montezuma, com o objetivo de se documentar as mudanças de cor decorrentes de cada seção de tratamento, destacando-se as condições (temperatura + irradiação) em que foram obtidas as amostras com a melhor coloração, tanto da safirita, como da prasiolita “tipo 2”, em aspectos gemológicos comerciais.

Em resumo observa-se que a irradiação dos cristais de ametista de Montezuma sempre provoca o escurecimento das amostras, enquanto que o aquecimento sempre provoca o clareamento, o que sugere que estes processos desenvolvem reações opostas.

Abstract

The amethyst mine of Montezuma, Minas Gerais, is the only one on earth which produces, after heat and irradiation treatment, a quartz of a blue to violetish blue body color, the so-called “Safirita” in the trade. Beside this, it is possible by heat treatment to produce two types of Prasiolita, “type 1” and “type 2” differing in its green color. Prasiolita 1 is a quartz with a yellowish green, Prasiolita 2 with a bluish green color.

Here are given details about irradiation and heating procedures of heated amethyst from Montezuma to show the changes in color after each step. This allows to select the best conditions for the production of the ideal quality of “Safirita” and “Prasiolita 2”.

Finally it can be concluded that the irradiation of material from Montezuma always produces an increase in grayish black tones and heating always leads to lighter tones in the colors. It is possible that there exists two processes on atomic scale with opposite reactions.

Palavras chave (key words): ametista, Montezuma, irradiação gamma, aquecimento, tratamento de ametistas, prasiolita, safirita.

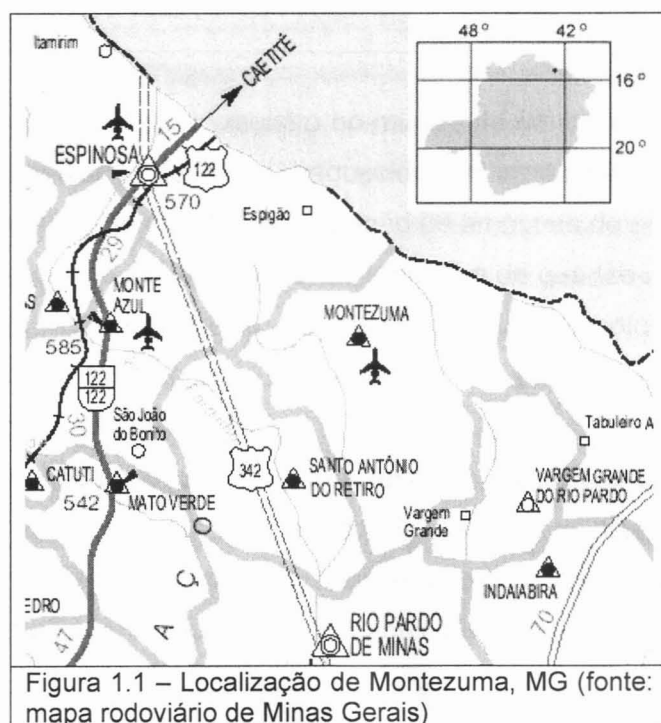
1. Introdução

O tratamento de gemas é uma atividade realizada desde a antiguidade (pelos romanos e egípcios, por exemplo), com o objetivo de imitar as características das gemas que na época eram de uso restrito da nobreza.

Ainda hoje, novas técnicas de tratamento vêm sendo desenvolvidas, envolvendo procedimentos de aquecimento, irradiação, tingimento, recobrimento, entre outros.

Este trabalho visa estudar a interferência da radiação gamma em amostras de ametistas do depósito de Montezuma (MG), envolvendo também o tratamento térmico.

O depósito de Montezuma, localizado no norte do estado de Minas Gerais, próximo à divisa com a Bahia (Figura 1.1), vem sendo lavrado desde a década de 60. Até então as ametistas vinham sendo queimadas para produção da chamada “prasiolita” (Cassedanne e Cassedanne, 1977), um quartzo verde produzido a partir do aquecimento dos cristais de ametista entre 380 e 450°C. No entanto, a prasiolita é diferente do citrino (quartzo amarelo/laranja) produzido no sul do país pelo mesmo processo.



Recentemente, uma nova variedade de quartzo está sendo produzida na região, através da irradiação da prasiolita com raios gamma. O produto é um quartzo

azul violeta comercialmente denominado de “safirita” (Güttler, 2006a). A Figura 1.2 mostra a prasiolita e a safirita com qualidade gemológica, em estado bruto e lapidado.



Figura 1.2 – (1) Ametista natural de Montezuma em bruto; (2) Prasiolita em bruto (ametista queimada); (3) Prasiolita lapidada; (4) Safirita em bruto (ametista queimada e irradiada); (5) Safirita lapidada.

Este, no entanto, é o único registro no mundo de um depósito cujos cristais de ametistas tornam-se azuis, depois de aquecidos e irradiados com raios gamma (Güttler, 2006b). Um recente estudo de irradiação de amostras de ametistas brasileiras foi realizado por Enokihara et al (2007), onde amostras de quartzo incolor da Bacia do Paraná foram submetidas à radiação gamma, e obtiveram a coloração esverdeada. Pretende-se realizar neste trabalho um estudo semelhante, mas com amostras de ametistas do depósito de Montezuma.

Ainda não há estudos que tratem a respeito do motivo das diferenças nos resultados entre o tratamento do quartzo do Rio Grande do Sul, e de Montezuma (MG). Também não há publicações e estudos relacionados à geologia do depósito de Montezuma, e nenhuma caracterização mineralógica dos produtos minerais extraídos.

2. Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é estudar a interferência da radiação gamma e da temperatura, na cor do quartzo colorido, “tipo ametista”, do depósito de Montezuma (MG).

Desse modo amostras de ametista serão submetidas a ensaios de irradiação gamma e aquecimento em diferentes níveis de intensidade, com a finalidade de transformar as amostras de ametista em prasiolita ou safirita.

A cor das amostras será classificada no final de cada ensaio a fim de se definir em quais condições de tratamento (térmico + irradiação), foram obtidas as amostras com a melhor tonalidade de verde ou azul (em aspectos gemológicos comerciais).

3. Levantamento Bibliográfico

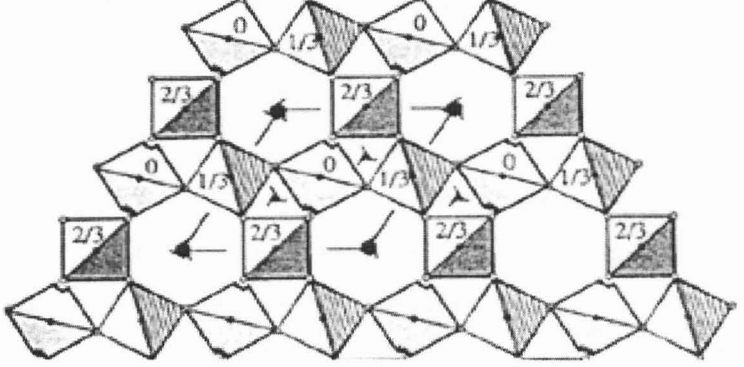
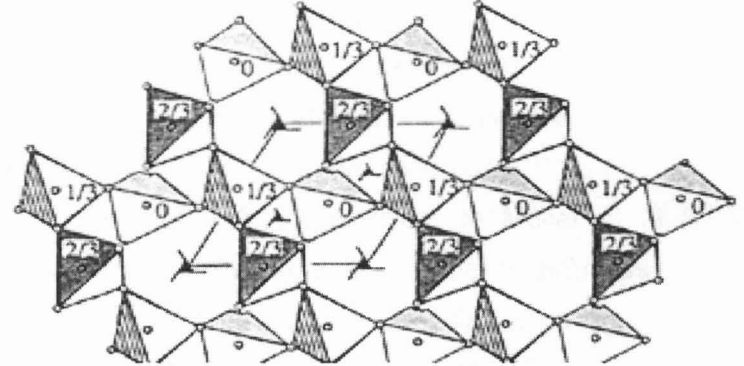
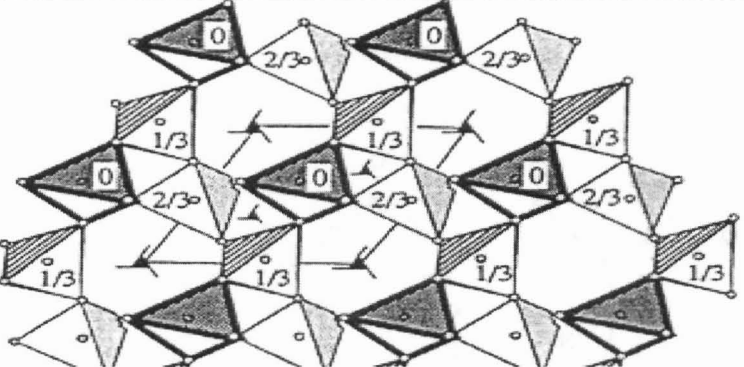
3.1. Propriedades Estruturais e Cristaloquímicas do Quartzo

Assim como nos demais tectossilicatos, os tetraedros SiO_4 no quartzo formam uma estrutura tridimensional, onde todos os íons de oxigênio, em cada tetraedro de sílica, são compartilhados com os tetraedros vizinhos (Hurlbut, 1969). O resultado disso é uma estrutura estável com relação Si:O de 1:2.

A estrutura do quartzo pode ser modificada em função da temperatura, sendo que os principais polimorfos do quartzo são os quartzos α (de baixa temperatura), e quartzo β (de alta temperatura). A diferença estrutural entre o quartzo α e β diz respeito apenas ao comprimento ou direção das ligações Si-O.

De acordo com Heaney (1994) a estrutura do quartzo α pode ser visualizada mais facilmente como uma distorção da estrutura do quartzo β . No quartzo β , as correntes helicoidais emparelhadas dos tetraedros de sílica, seguem no mesmo sentido, em torno dos eixos 6_4 ou 6_2 , paralelos ao eixo c (Figura 3.1.1).

Quando o quartzo β (hexagonal) é resfriado abaixo de 573°C e 1 atm, a sua estrutura expandida colapsa para uma configuração trigonal mais densa (a do quartzo α). A distância da ligação Si-O varia de $1,599\text{\AA}$ a 590°C para $1,609\text{\AA}$ a 25°C , mas o ângulo da ligação Si-O-Si cai de $150,9^\circ$ para $143,61^\circ$, para as mesmas temperaturas supra citadas (Figuras 3.1.2a e 3.1.2b). A diferença entre o quartzo direito e o esquerdo diz respeito ao sentido de rotação dos eixos helicoidais na estrutura.

	<p>Figura 3.1.1 – Arranjo estrutural do quartzo β, ao longo do eixo c, no grupo espacial $P6_422$, com a origem deslocada em $1/3c$ para facilitar a comparação.</p>
	<p>Figura 3.1.2a – Arranjo estrutural do quartzo α (esquerdo), no grupo espacial $P3_121$.</p>
	<p>Figura 3.1.2b – Arranjo estrutural do quartzo α (direito), no grupo espacial $P3_221$.</p>

(Heaney, 1994)

O quartzo, um mineral relativamente puro no seu estado natural (se comparado com outros minerais formadores de rochas), podendo conter inclusões sólidas, fluidas e estruturais. As inclusões sólidas e fluidas são aquelas que não ocorrem ligadas à estrutura cristalina do mineral, correspondendo a resíduos sólidos ou líquidos aprisionados pelo mineral durante a sua cristalização. Por sua vez, as impurezas estruturais são aquelas onde os elementos traço ocorrem ligados à rede cristalina.

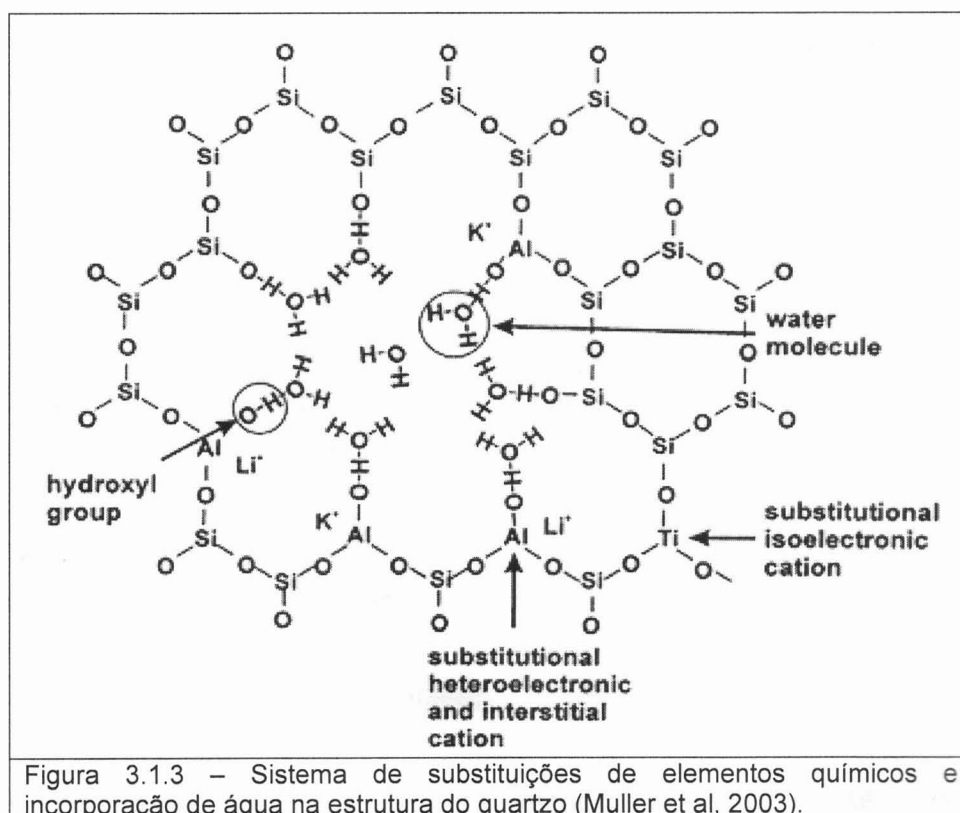
De acordo com Weil (1984, 1993), citado em Götze et al (2004), o pequeno tamanho do íon Si^{4+} ($0,42\text{\AA}$), e a estrutura do quartzo, permitem a incorporação apenas de pequenas quantidades de elementos traço na sua estrutura. Quando isso ocorre, o Si pode ser substituído por Al, Fe, Ti, Ge, Ga, H e P. Se houver déficit de

cargas após a substituição, pode haver uma compensação de carga por cátions localizados nos canais estruturais paralelos ao eixo c. Estes cátions correspondem principalmente a Li^+ , Na^+ , K^+ e H^+ , embora em alguns casos, íons de Cu, Ag, Al, Fe, Ti, Co, Cr e Ni também possam realizar essa compensação.

Desse modo, pode-se dizer que as substituições estruturais são aquelas em que o Si é substituído por um átomo de outro elemento químico, e as substituições intersticiais, são aquelas onde um cátion compensador de carga se incorpora à estrutura nos canais estruturais do quartzo.

As substituições estruturais podem ser de dois tipos: isoeletrônicas e heteroeletrônicas. Substituições isoeletrônicas são aquelas onde o cátion que substitui o Si^{4+} , tem a mesma carga que ele, como por exemplo, o Ti^{4+} . Por outro lado substituições heteroeletrônicas são aquelas onde um cátion de carga diferente do Si^{4+} faz a substituição, como um cátion de Al^{3+} ou Fe^{3+} , por exemplo.

A Figura 3.1.3, extraída de Müller et al (2003), mostra como ocorrem as substituições isoeletrônicas e heteroeletrônicas dentro da estrutura do quartzo, e também a localização das hidroxilas e da água molecular dentro da estrutura. Esta figura mostra também a posição dos cátions de compensação nos canais estruturais do quartzo.



3.2. A teoria da cor e os sistemas de classificação

A cor é um fenômeno psicofísico e a percepção da cor é um juízo subjetivo. No entanto, a cor pode ser medida por vários métodos. Os 4 métodos principais utilizados hoje são: 1. espectroradiometria; 2. temperatura de cor; 3. colorimetria de triestímulo; 4. comparação; (Schneider, 1997).

Espectroradiometria

A forma mais precisa de se classificar uma cor é através da espectroradiometria. A espectroradiometria mede a energia em cada faixa do espectro, através de um corpo cinza que absorve toda a energia dos fótons. Esta energia converte-se em calor, sendo medido então o aumento da temperatura no corpo cinza. Este método é absoluto, porém caro e demorado.

Um método semelhante a esse também pode ser utilizado para classificar a cor de gemas. Trata-se da espectrofotometria, utilizada, por exemplo, no trabalho de Monteiro (2001). Este método de classificação vai medir a quantidade de energia gerada num sensor pelo efeito fotoelétrico, ou seja, a quantidade de elétrons gerados no sensor. É um método mais rápido e barato que a espectroradiometria, embora com menos precisão. Mesmo que a análise seja rápida, a preparação das amostras para análise é muito demorada, envolvendo os processos de laminação e polimento das amostras.

Temperatura de cor

Os sistemas de classificação por temperatura da cor são utilizados apenas para fontes geradoras de luz e calor, como uma lâmpada, por exemplo, não sendo aplicáveis neste trabalho. Este sistema de classificação utiliza o conceito de que se um corpo é aquecido em diferentes temperaturas, a cada diferente temperatura ele irá mudar a intensidade e a cor da luz emitida.

Comparação

Os sistemas de comparação envolvem a determinação visual da cor de um objeto com uma tabela de cores.

O sistema mais simples de classificação de cores são os que envolvem o conceito de comparação.

A classificação das cores por comparação pode então ser feita através de vários sistemas. O primeiro sistema foi criado por Newton, sendo denominado de

Círculo das Cores de Newton. Ele corresponde a um sistema unidimensional representado por um círculo contendo as cores primárias e secundárias, onde cada uma das cores corresponde a um tom (Figura 3.2.1).

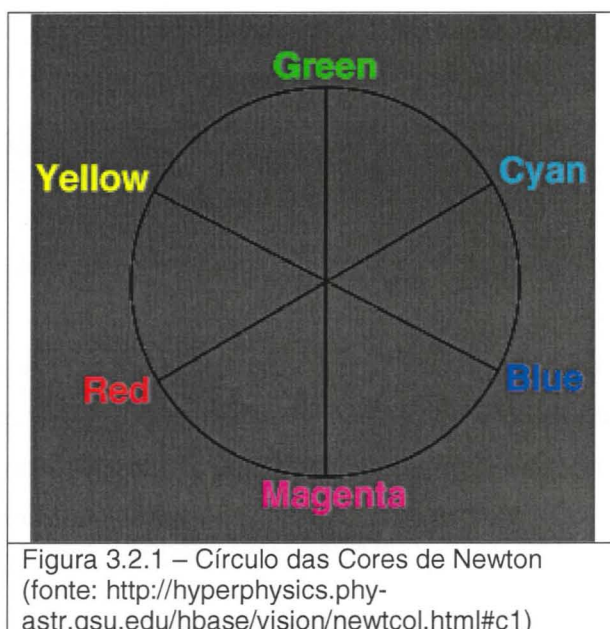
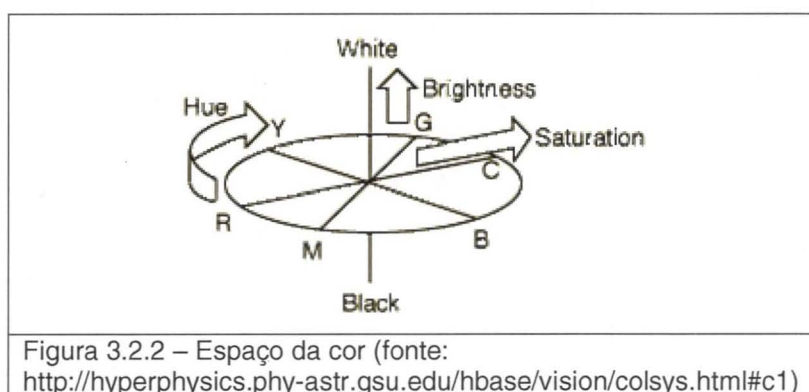


Figura 3.2.1 – Círculo das Cores de Newton
(fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/newtcol.html#c1>)

As cores primárias não são uma propriedade fundamental da luz, mas sim um conceito biológico, baseado na resposta fisiológica do olho humano à luz, através de receptores chamados de “cones”. Tais cones reagem a comprimentos de ondas específicos das cores vermelha, verde e azul. Embora a sensibilidade máxima dos cones não se produza exatamente nessas três frequências de cores, essas cores são consideradas as cores primárias em fontes de luz, sistema RGB (Red, Green and Blue), pois cada uma delas pode estimular os cones de forma praticamente independente, proporcionando uma ampla gama de cores.

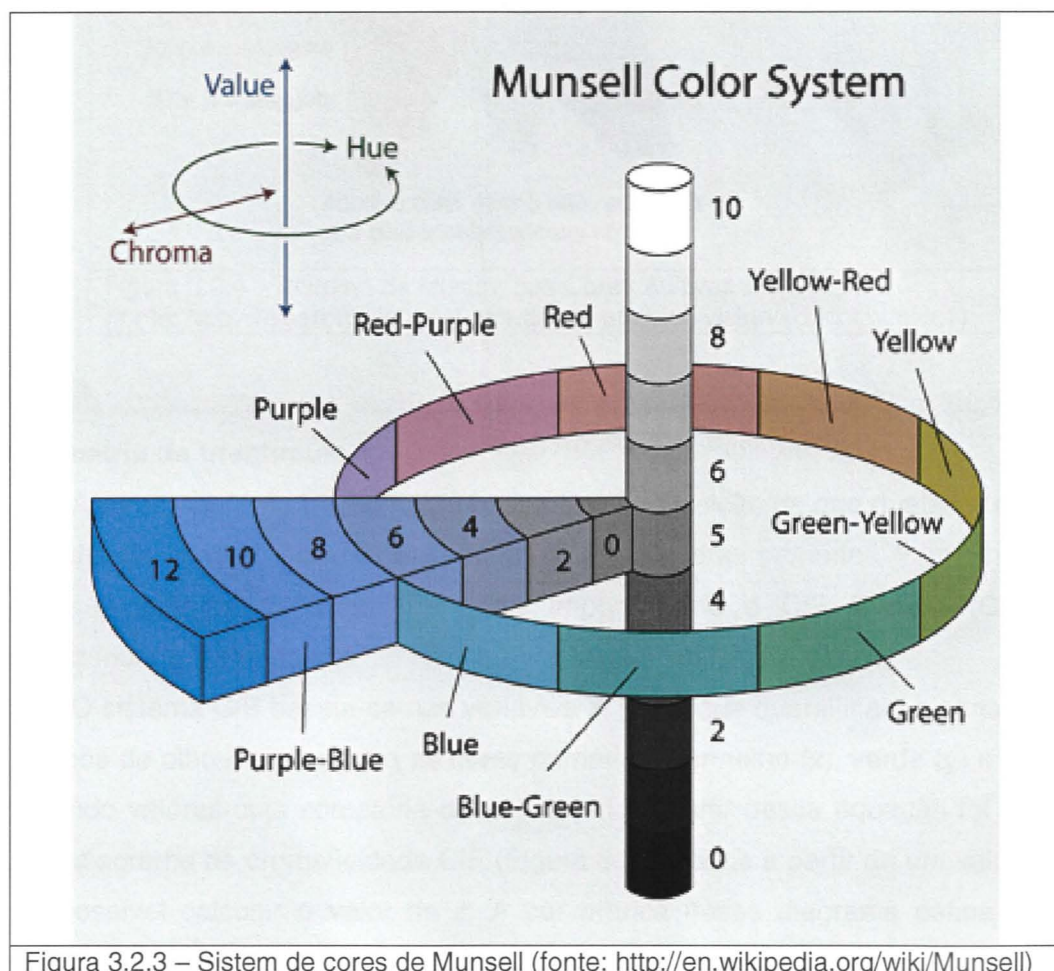
A mistura das cores primárias dá origem às cores secundárias, que no sistema RGB são o magenta (azul + vermelho), o ciano (azul + verde) e o amarelo (vermelho + verde).

Vimos que o Círculo das Cores de Newton classifica as cores apenas de acordo com o tom. As cores, quando analisadas em termos de tom, saturação e brilho, definem um campo tridimensional chamado de espaço da cor (Figura 3.2.2). Na figura *hue* corresponde ao tom, representado pelas cores primárias e secundárias. *Saturation* é a saturação, ou seja, uma medida de intensidade, e *brightness* é o brilho, ou claridade, definido pelo teor de preto e branco.



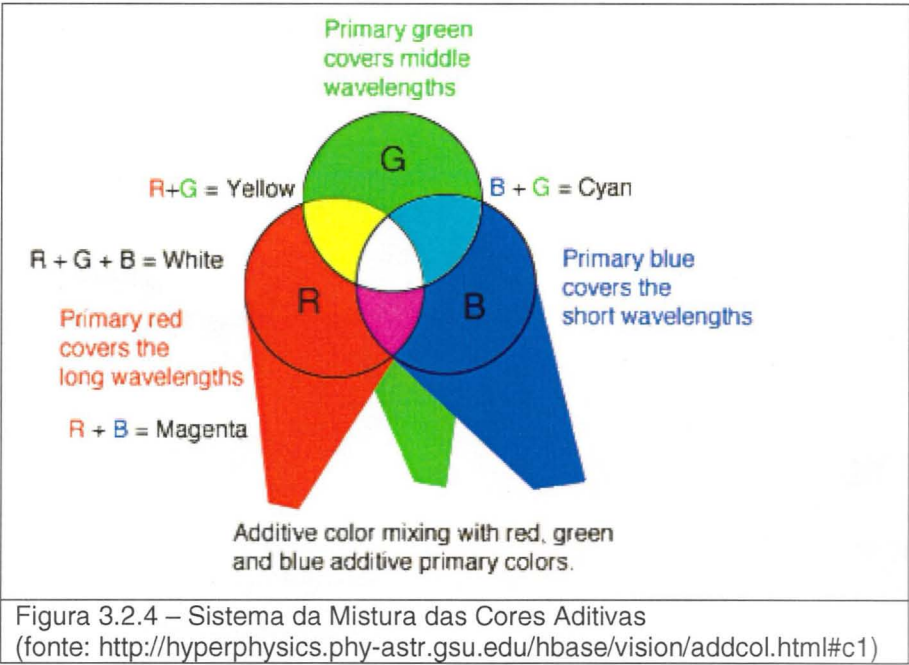
Na primeira década do século 20, Albert H. Munsell adotou o conceito de espaço da cor, e fez uma extensão do círculo das cores de Newton, dividindo o círculo de 6 tons em 100, e inserindo as variáveis de saturação e brilho, tornando o sistema tridimensional. A Figura 3.2.3 mostra o sistema das cores de Munsell.

A classificação de uma cor usando este sistema também é comparativa, e é feita a partir das combinações de um tom (purple-blue, por exemplo), com uma saturação (que assume um valor inteiro de 0 a X, onde X máximo varia de acordo com o tom), e a claridade (que assume um valor inteiro de 0 a 10).



Também derivado do círculo de cores de Newton, existe um outro sistema comparativo chamado de sistema da Mistura das Cores Aditivas, cujo conceito é obter através da mistura das cores primárias (vermelho, verde e azul), as cores secundárias (amarelo, magenta e ciano), vide Figura 3.2.4.

As impressoras, para obter uma gama maior de tonalidades fazem a mistura das cores ciano, magenta e amarelo (que definem o tom), e preto (que define a claridade). A saturação por sua vez, é função da quantidade em porcentagem das cores impressas em relação ao espaço de impressão. Do ponto de vista prático essa classificação pode ser feita comparativamente utilizando as tabelas de cores de Emery (1994), cujo explicação do funcionamento é descrita no item 4.4.

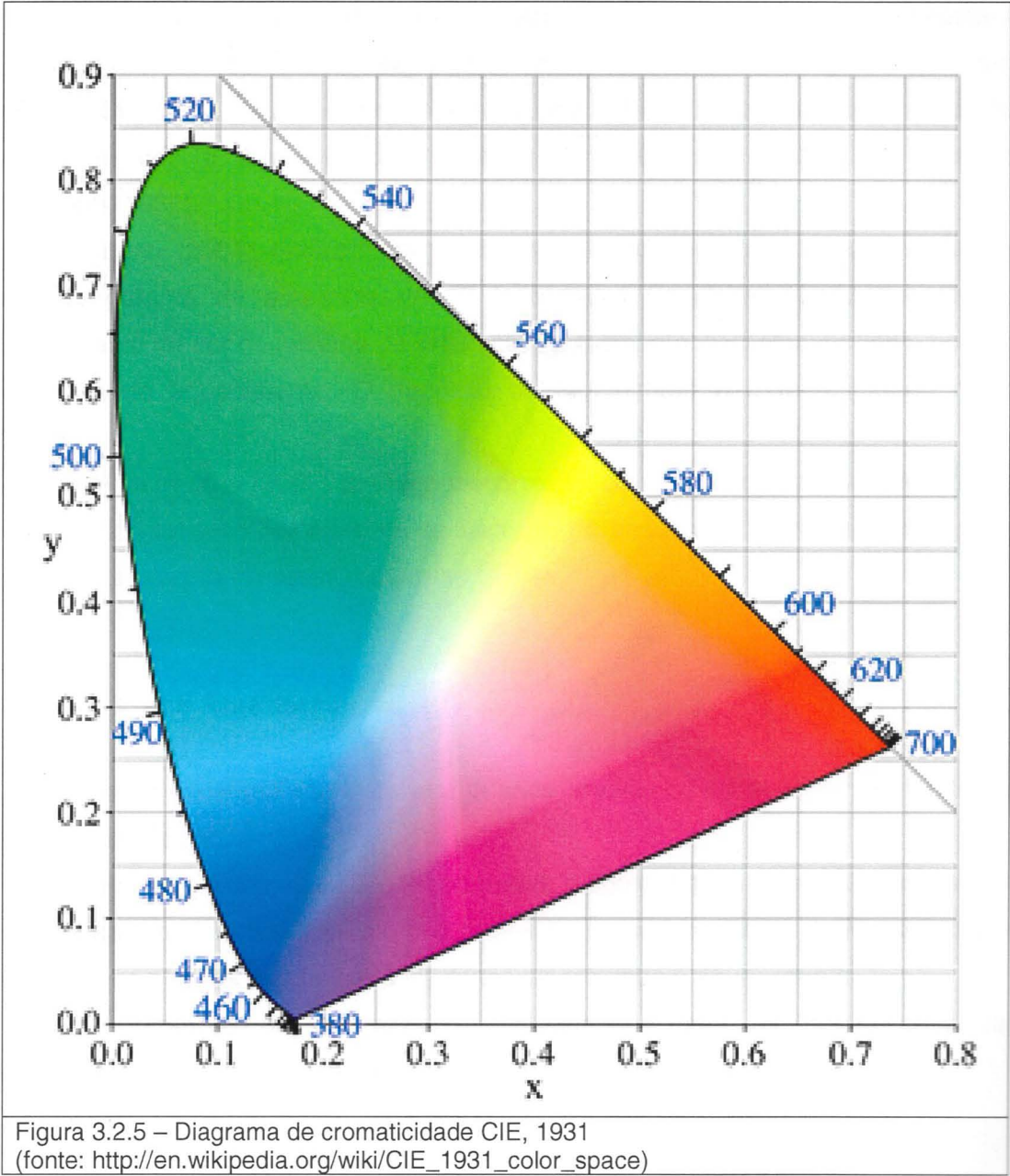


Colorimetria de triestímulo

A colorimetria de triestímulo é baseada na suposição de que qualquer cor pode ser produzida com uma combinação adequada de 3 cores primarias, vermelho, verde e azul. O sistema de triestímulo mais importante é o CIE System (Comissão Internacional de Iluminação).

O sistema CIE baseia-se nas variáveis x, y e z, que quantificam a sensibilidade dos cones do olho humano para as cores primárias, vermelho (x), verde (y) e azul (z), assumindo valores cuja somatória de $x+y+z = 1$. A partir dessa equação foi possível fazer o diagrama de cromaticidade CIE (Figura 3.2.5), onde a partir de um valor de x e y, eh possível calcular o valor de z. A cor branca nesse diagrama define-se para $x=y=z=0,33...$

Na prática a medida da cor de um objeto pelo CIE é feita usando um equipamento chamado de colorímetro, que filtra a luz refletida pelo objeto com 3 filtros ópticos, um vermelho, um verde e um azul. Um fotodetector instalado atrás de cada filtro capta então a quantidade de luz que passa por eles, quantificando-a. O colorímetro é um instrumento simples e dá o resultado imediatamente.



3.3. Métodos de Tratamento de Ametista

Existem inúmeros métodos de tratamento de gemas. Os métodos de tratamento empregados neste trabalho são: o aquecimento, e a irradiação com raios gamma.

O aquecimento de ametistas já é feito a muito tempo, com o objetivo de se melhorar a cor de gemas pouco atrativas. Aquecendo-se os cristais de ametista a algumas centenas de graus, se podem obter amostras amarelas, vermelhas acastanhadas, verdes ou brancas leitosas. Quase todo o citrino presente à venda no mercado e toda a prasiolita são produtos do tratamento térmico da ametista (Schumann, 1985).

Monteiro (2001) realizou um estudo envolvendo ensaios de aquecimento e irradiação gamma de ametistas de 17 localidades brasileiras, onde descreve o escurecimento da cor decorrente da irradiação gamma, e o clareamento das amostras em função do aquecimento. O depósito de Montezuma não foi estudado neste trabalho.

Enokihara et al (2007) também discorre em seu trabalho sobre a mudança de cor do quartzo extraído dos basaltos da Bacia do Paraná. Quando irradiadas com raios gamma, as amostras incolores tornam-se verdes.

3.4. A cor nas Ametistas

Sabe-se experimentalmente que quando irradiamos ou aquecemos ametistas, estas mudam de cor.

Neumann e Schmetzer(1984) estudaram o comportamento ao aquecimento de amostras de ametista de diversas localidades do mundo, inclusive de Montezuma, e descrevem os motivos que levam à mudança de cor após o aquecimento.

As mudanças de cor estariam relacionadas com as trocas catiônicas intersticiais e substitucionais, segundo o modelo descrito pela equação:

$$T \geq 300^{\circ}\text{C}$$



Incolor (precursor do centro de cor)

centro de cor violeta

onde,

(S) = substituição do silício

(S₁) = substituição do silício com compensação de carga por um íon de metal alcalino

(S₂) = substituição do silício com compensação de carga por um íon de hidrogênio

(I_4) = canal intersticial da simetria tetraédrica

No caso da prasiolita, a cor verde seria gerada pelo centro de cor $\text{Fe}^{2+}(I_6)$, ou seja, Fe^{2+} nos sítios dos canais estruturais de simetria octaédrica. O $\text{Fe}^{2+}(I_6)$ é no entanto formado por uma mudança na valência e migração do Fe^{3+} dos canais intersticiais de simetria tetraédrica (I_4), para os sítios dos canais intersticiais de simetria octaédrica (I_6), sendo então o $\text{Fe}^{3+}(I_4)$, o precursor do centro de cor da prasiolita.

A Figura 3.4.1 mostra os canais estruturais I_6 , de simetria octaédrica e paralelos ao eixo c, e também os canais estruturais I_4 , de simetria tetraédrica, paralelos ao eixo a. Os canais I_6 têm um raio maior que os canais I_4 . Os círculos verdes e azuis correspondem a átomos de oxigênio em diferentes posições do espaço. O arranjo espacial desses átomos de oxigênio gera os canais estruturais I_6 e I_4 .

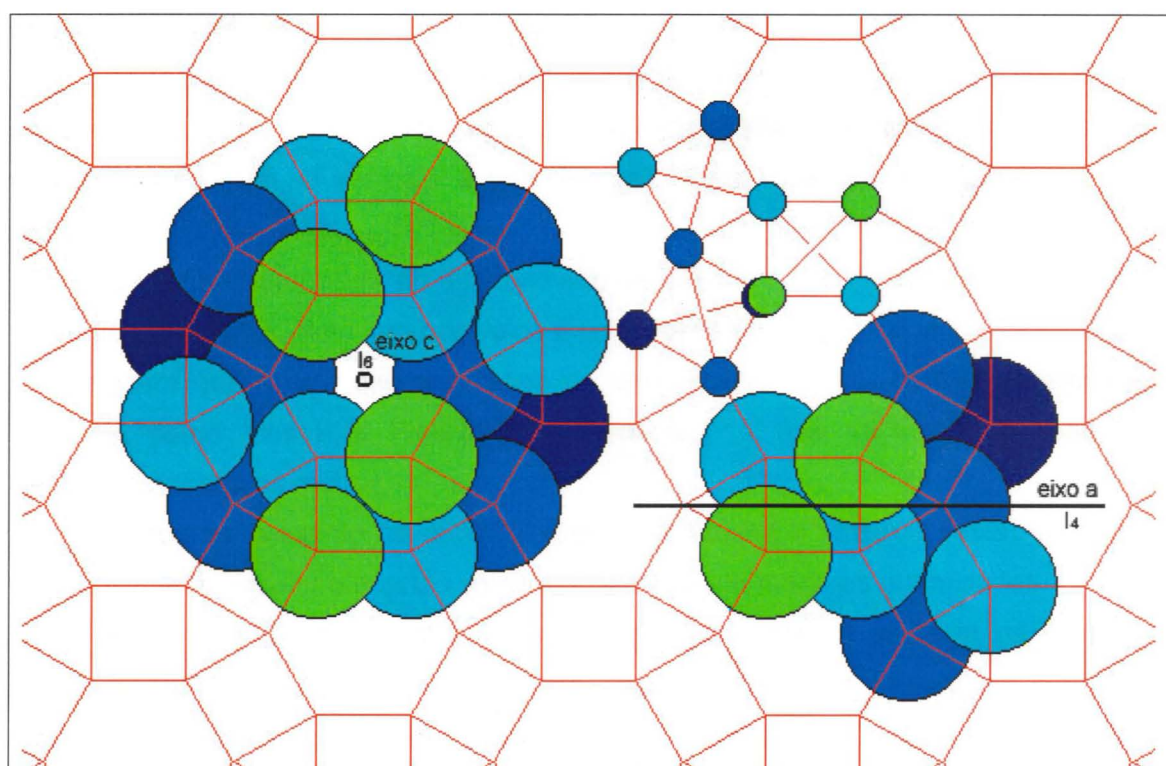


Figura 3.4.1 – Posição dos canais estruturais I_6 e I_4 na estrutura do quartzo. (fonte: <http://www.uwgb.edu/dutchs/petrolgy/quartzstruc.htm>)

Sobre o escurecimento dos cristais após a irradiação com raios gamma, Rossman (1994) menciona que a cor do quartzo fumê está associada com os centros de cor do Al^{4+} substitucional. Estes centros podem ser gerados pela combinação dos processos de irradiação e aquecimento.

De qualquer forma, ficam em aberto para investigações futuras, trabalhos que estudem com mais detalhes os motivos que levam os cristais de ametistas de

Montezuma, a ficarem marrons arroxeados e pretos após a irradiação gamma, e azulados após o tratamento térmico desse material irradiado.

3.5. Caracterização geológica regional da Mina de Montezuma, MG

A Figura 3.5.1, extraída de Lima et al, 2002, mostra o mapa geológico do setor nordeste da Faixa Araçuai (modificado de Pedrosa-Soares et al, 2001), onde é localizado o depósito de ametistas de Montezuma.

O depósito está localizado no contato entre os quartzitos do Supergrupo Espinhaço (Pré-neoproterozóico), e as formações proximais do Grupo Macaúbas (Neoproterozóicas), compostas de quartzitos e metassedimentos de baixo grau metamórfico (xisto verde).

O contato é marcado por diversas falhas de cavalgamento N-S, que concedem um ambiente propício para a formação de veios de quartzo. Na jazida, os pacotes de quartzito encontram-se verticais a sub-verticais, como mostram as Figuras 3.5.2 e 3.5.3.

Os veios de ametista no depósito são de origem hidrotermal, formados em até 5 eventos diferentes, visto que nos veios é possível observar zoneamentos nos cristais que indicam que houve diversas fases de cristalização. Os veios são usualmente maciços, como mostra a Figura 3.5.4, com largura que varia de dezenas de centímetros a alguns metros.

O quartzo presente no depósito é em sua maioria a ametista (roxa), havendo também quartzo incolor e quartzo verde acinzentado em menores quantidades.

Ainda não foi feito nenhum estudo específico sobre a geologia da jazida e arredores, não havendo desse modo informações detalhadas disponíveis sobre as litologias existentes, e também sobre aspectos estruturais. Desse modo, fica em aberto para um trabalho futuro, o mapeamento da região da jazida de Montezuma.

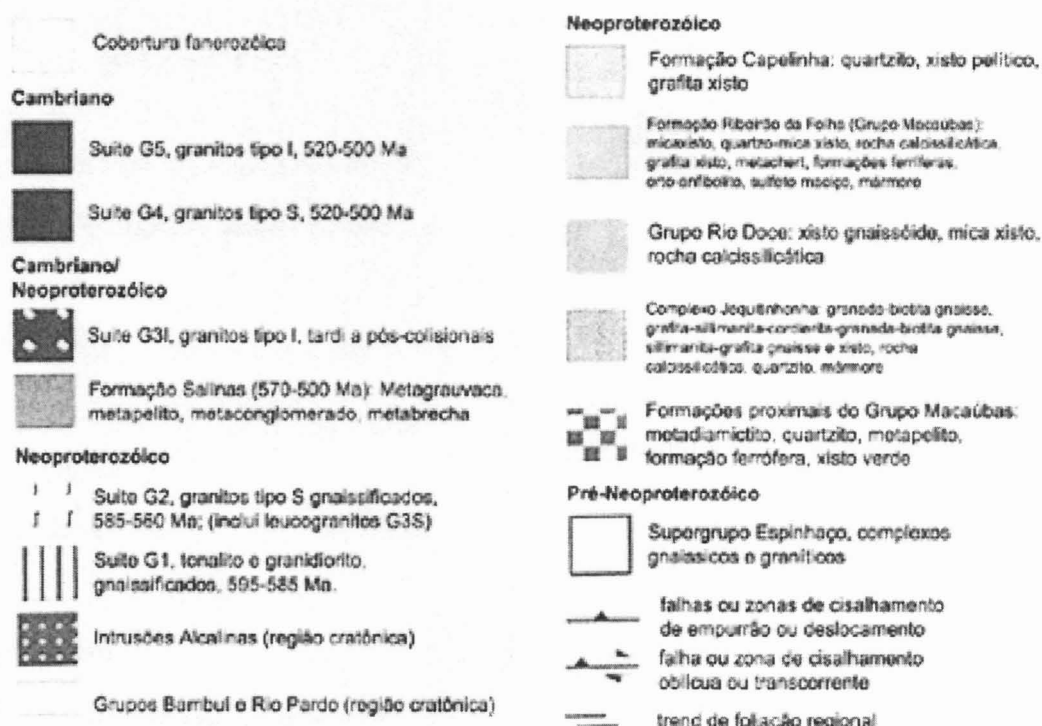
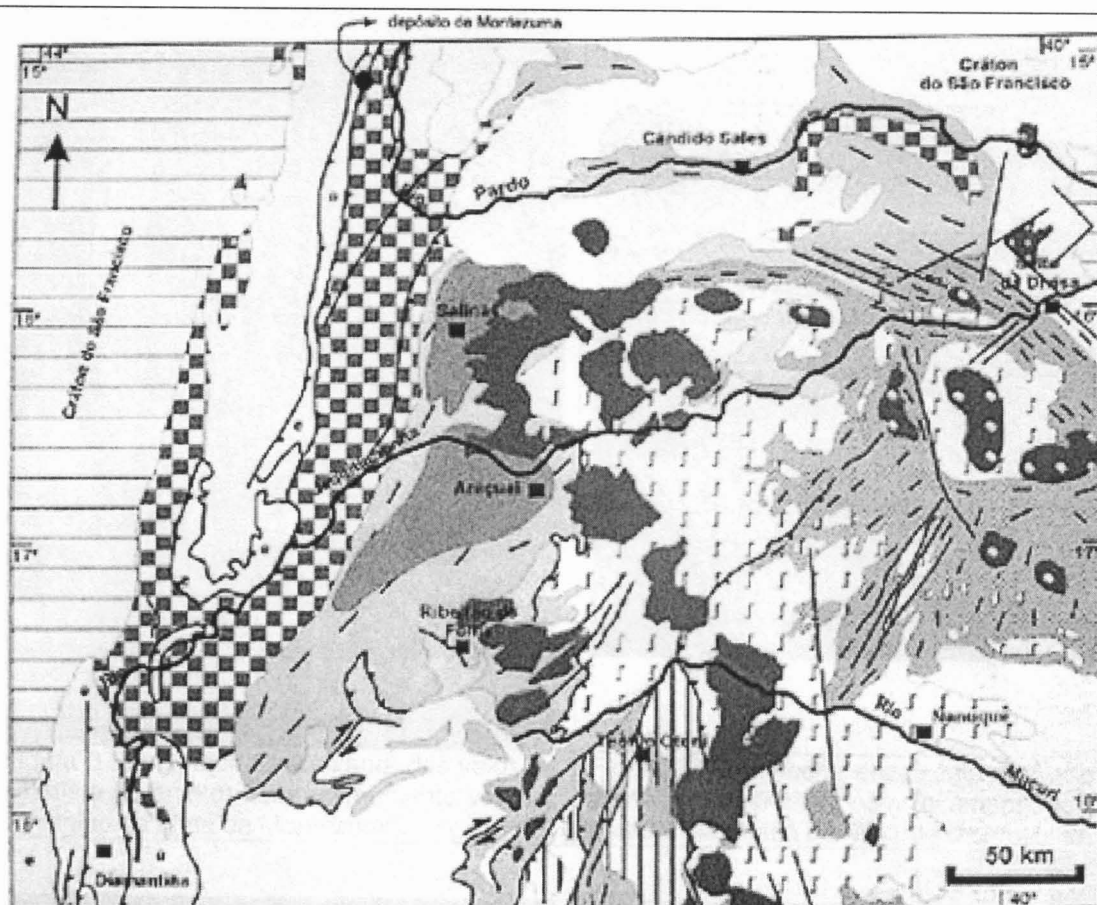


Figura 3.5.1 – Mapa Geológico do setor norte da Faixa Araçuaí (Lima et al, 2002).



Figura 3.5.2 – Rocha encaixante dos veios de ametista (quartzito) com acamamento vertical, na região da Mina de Montezuma.



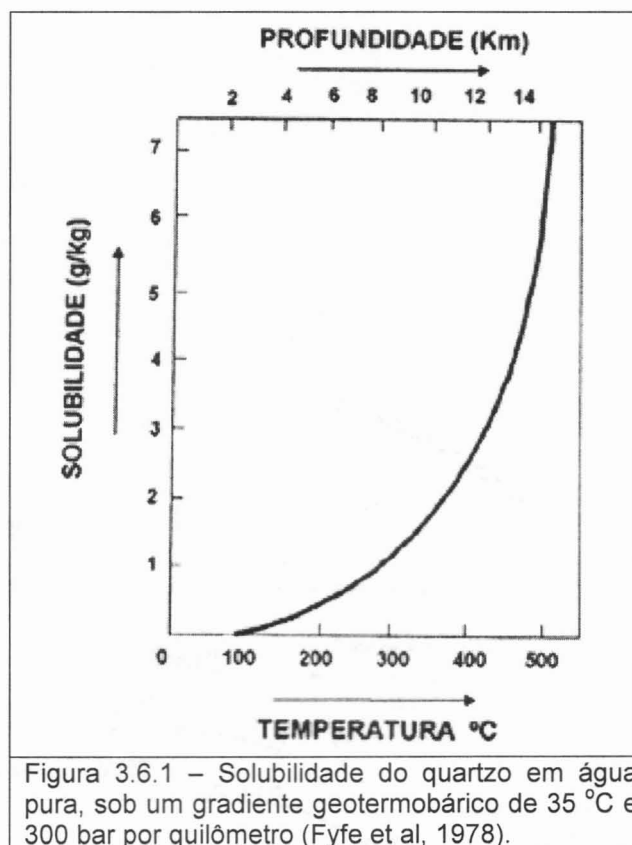
Figura 3.5.3 – Rocha encaixante dos veios de ametista (quartzito) com acamamento sub-vertical, na região da Mina de Montezuma.



Figura 3.5.4 – Veio de ametista dentro da mina subterrânea de Montezuma.

3.6. Gênese dos Depósitos de Quartzo Hidrotermal

Depósitos hidrotermais de quartzo formam-se, por definição do próprio nome, pela ação da água e da temperatura. O diagrama da Figura 3.6.1, extraído de Fyfe et al (1978), mostra a variação do coeficiente de solubilidade do quartzo em função da temperatura.



Para os veios de quartzo da Serra do Espinhaço, Favacho-Silva (2000) menciona um modelo que prevê a existência de fluidos quentes e saturados em sílica, que ascendem através de fraturas ou zonas de falhas até regiões mais frias, precipitando a sílica quando as condições de temperatura e pressão tornam-se favoráveis. Veios mais extensos e regulares são então formados a maiores profundidades, onde a temperatura é maior, e a sílica dissolvida nos fluidos também. A Figura 3.6.2 mostra um perfil esquemático que resume o modelo descrito acima.

Observa-se nos veios de ametistas do depósito de Montezuma que os cristais foram formados em até 5 eventos de cristalização. Segundo este modelo isso poderia estar relacionado a eventos tectônicos que provocaram a abertura dos veios.

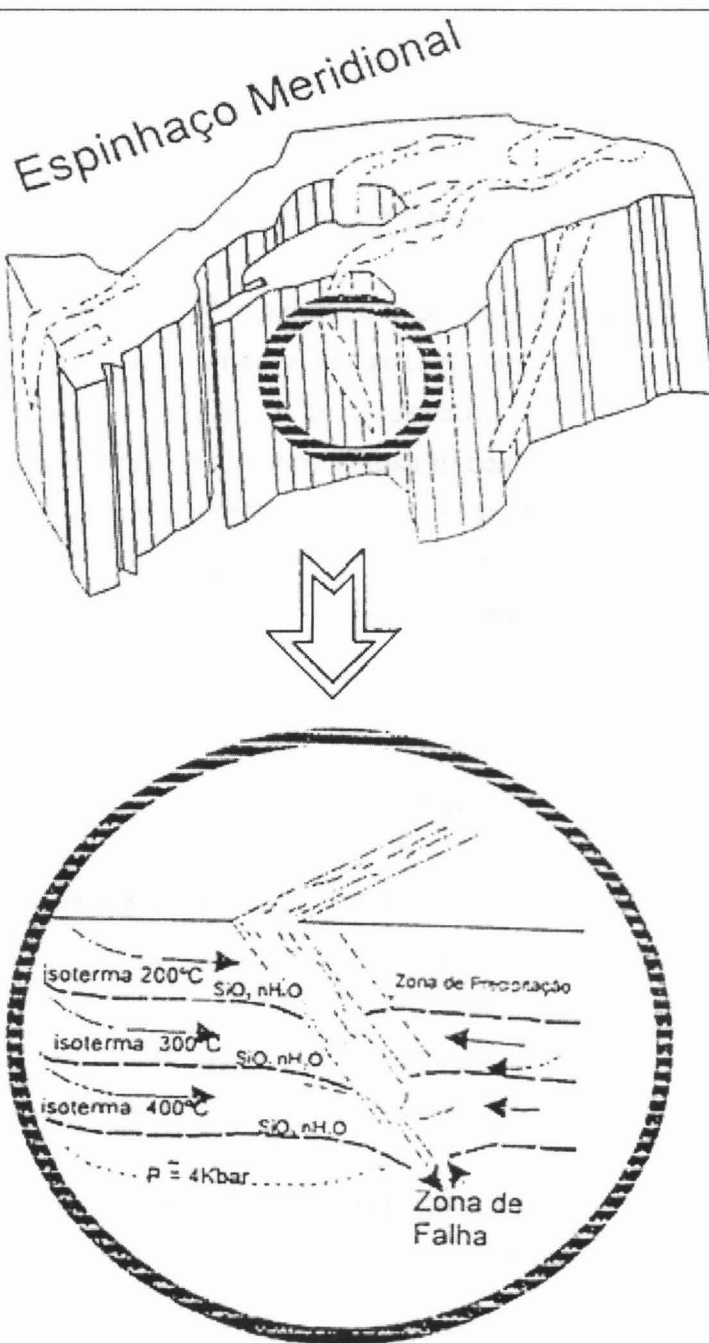


Figura 3.6.2 – Modelo de gênese de depósitos de quartzo hidrotermal na Serra do Espinhaço (Favacho-Silva, 2000).

4. Materiais e Métodos

4.1. Descrição das amostras adquiridas para estudo

Foi obtido na jazida de Montezuma um lote de 1,5 kg de amostras de ametista já queimadas. A 1ª etapa aquecimento, realizada na própria jazida, foi feita entre 380 e 450°C, sem muito controle do tempo e da temperatura.

Dentro do lote foram observadas amostras com diferentes tonalidades de cor: verde claro, verde escuro, verde amarelado, marrom e verde azulado claro. A granulometria das amostras varia entre 10 a 20 mm. A maioria das amostras apresenta zoneamentos de cor, possivelmente geradas durante a cristalização dos cristais.

4.2. Ensaios de irradiação com raios gamma

A radiação gamma é uma onda eletromagnética cuja radiação tem $1,24 \times 10^9$ eV. Em nível de comparação a radiação de luz visível tem normalmente uma energia de 3,184 eV (elétron Volt).

Todos os ensaios envolvendo irradiação gamma, com os cinco grupos de amostras, foram feitos no Centro de Tecnologia de Radiação (CTR) do IPEN-CNEN/SP, utilizando-se um irradiador de ^{60}Co .

As amostras foram inseridas num cesto de aço, que foi fixado a uma estrutura também de aço. Isso foi então submerso na piscina de irradiação que contém 13 barras de Co^{60} .

A dose total de radiação fornecida às amostras varia de acordo com a distância das amostras às barras e também do tempo de exposição. A dose de radiação foi então medida com um medidor de radiação gamma "Red Perspex 4034", em todos os ensaios realizados.

As medidas são feitas na unidade Gray (Gy). Esta unidade representa a quantidade de energia absorvida por unidade de massa de tecido humano. A dose de 1 Gy equivale a 1 joule de energia irradiada absorvida por 1Kg de tecido.

4.3. Ensaios de aquecimento

Em todas as etapas de aquecimento das amostras foi utilizado um forno de marca Cobel, modelo SH-1 (Figura 4.3.1).

No entanto, inicialmente observou-se que o forno estava desregulado, ou seja, as leituras do potenciômetro não correspondiam à temperatura real dentro do forno, e observou-se também que o termostato não deixava a temperatura constante uma vez que a tampa fosse aberta. Sendo assim optou-se pelo uso de um termopar tipo K, com medidor de marca IMIT, para medir a temperatura absoluta no centro do forno onde ficariam concentradas as amostras. A temperatura máxima medida por este medidor é de 350°C.

As amostras, por sua vez, foram mantidas mergulhadas em areia branca, numa tigela de porcelana, em todas as etapas de aquecimento, para que a temperatura se mantivesse mais homogênea. Além disso, as amostras foram posicionadas em volta da ponta do termopar, para que a temperatura medida por ele fosse mais próxima possível da temperatura real das amostras.

Observou-se também, que uma vez estabilizada a temperatura dentro do forno, a variação da temperatura do centro da tigela de porcelana, para os cantos, é inferior a 2°C. Este valor foi determinado posicionando-se a ponta do termopar em diferentes pontos da tigela, abrindo-se a tampa o mínimo possível para impedir a perda de calor.

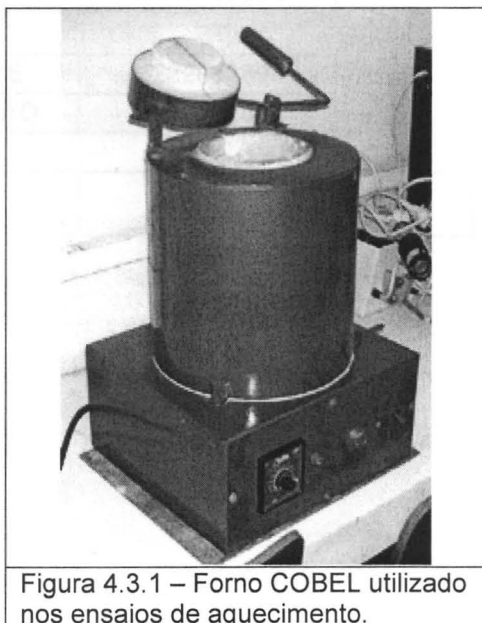


Figura 4.3.1 – Forno COBEL utilizado nos ensaios de aquecimento.

Para verificar que o medidor IMIT utilizado estava devidamente regulado, foi feito um ensaio de calibração fundindo chumbo dentro do forno. O chumbo funde a 327,3°C, a mesma temperatura registrada pelo medidor.

No entanto, visto que a 3ª etapa de aquecimento previa um aquecimento superior a 380°C, foi necessário utilizar um termopar tipo J (ferro-constantan) que medisse essa temperatura com precisão. Este novo termopar foi então acoplado a um medidor digital Minipa (ET-2070), e os valores apresentados por este, calibrados com base nas medidas do medidor IMIT. A Tabela 4.3.1 mostra os dados obtidos durante a calibração do termopar tipo J e a projeção do medidor digital para 380°C. A Figura 4.3.2 mostra a curva de calibração.

Tabela 4.3.1 – Dados referentes à calibração do termopar tipo J para o 3º aquecimento.			
MEDIDOR IMIT	MEDIDOR MINIPA (Termopar tipo J)	RETA	ERRO %
104	171,5	173,73	1,3023
145	225	223,84	-0,5159
221	320	316,72	-1,0256
245	347	346,05	-0,2742
272	377	379,04	0,5424
292	403	403,49	0,1208
328 (fusão Pb)	446	447,48	0,3323
340	463	462,15	-0,1842
380		511,03	
CORRELAÇÃO		0,999827832	
PENDENTE		1,222091894	
INTERSEÇÃO		46,63588535	
CURVA		$Y = 1,222091894 + 46,63588535$	

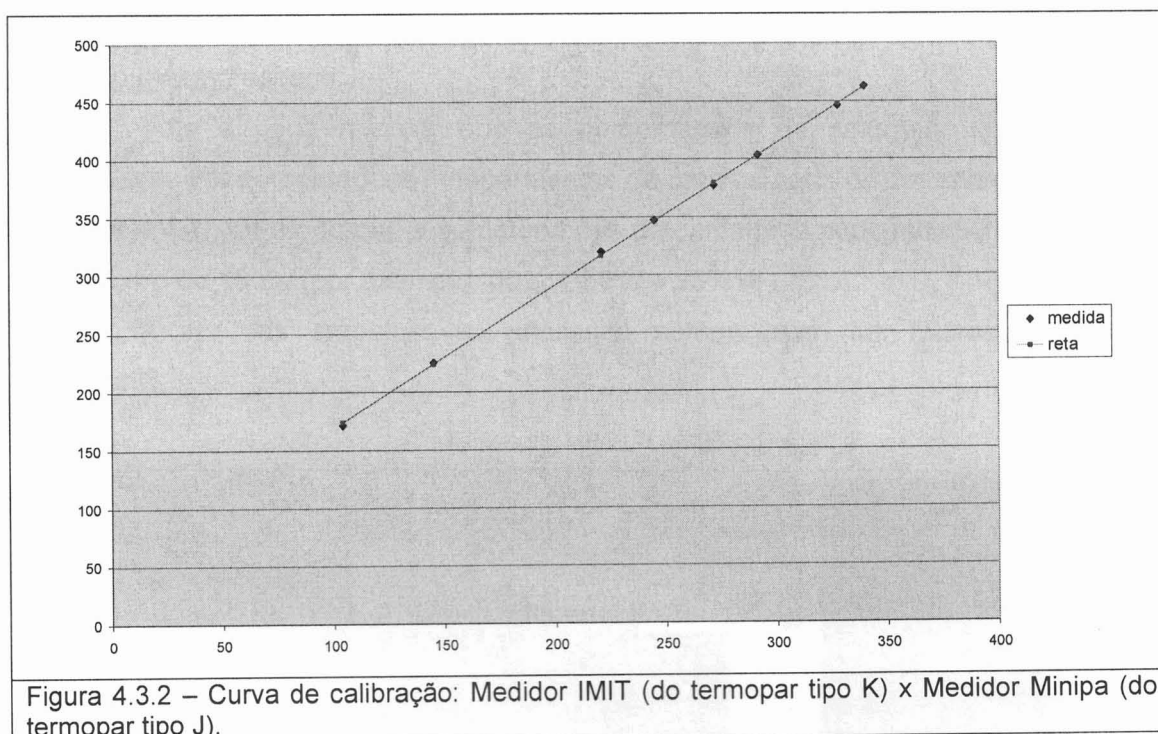


Figura 4.3.2 – Curva de calibração: Medidor IMIT (do termopar tipo K) x Medidor Minipa (do termopar tipo J).

4.4. Funcionamento do método gráfico de classificação das cores

No âmbito deste estudo, os métodos mais precisos para se classificar a cor das amostras seriam através por espectrofotometria ou colorimetria de triestímulo. A espectrometria exigiria um enorme investimento de tempo no polimento e preparo das amostras, não sendo viável em relação para o cronograma deste trabalho. No caso da colorimetria, não há um aparelho disponível. Optou-se finalmente por utilizar o método comparativo.

Sendo assim, após cada etapa do projeto, seja de irradiação ou aquecimento, a cor das amostras será classificada visualmente com o auxílio da tabela de cores de Emery (1994), para que as mudanças de cor possam ser de alguma maneira, quantificadas.

Esta tabela de cores segue o Sistema da Mistura das Cores Aditivas, onde as camadas das cores, amarelo, magenta, ciano e preto, com porcentagens de saturação de 0 a 100% (em relação ao espaço de impressão), são sobrepostas para a geração das outras cores (Figura 4.4.1). O resultado é então expresso em porcentagens de saturação independentes de cada uma das 4 cores.

Então, por exemplo, se a cor de uma gema é expressa por [ciano 30%; amarelo 60%; preto 35%], isso significa que 3 camadas independentes compõem essa cor, havendo uma camada com 30% de saturação de ciano para 100% de espaço,

outra com 60% de amarelo para 100% do mesmo espaço, e outra com 35% de preto para o mesmo espaço.

Vale a pena reforçar que as porcentagens de saturação das cores são expressas por porcentagens independentes de uma camada de cor sobre a outra (vide Figura 4.4.1), de modo que a somatória das porcentagens pode facilmente ultrapassar o número de 100% (por exemplo, 30% + 60% + 35% = 125%).

A cor das amostras foi analisada sempre com luz fluorescente branca incidente.

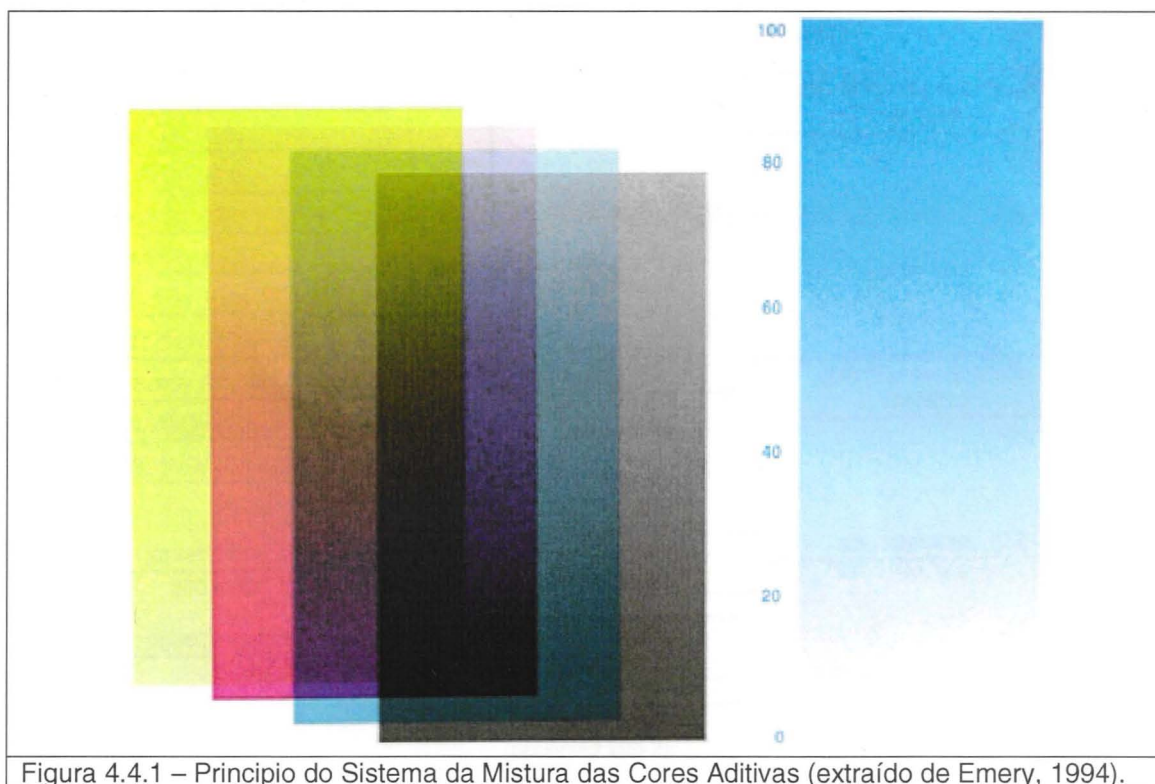


Figura 4.4.1 – Princípio do Sistema da Mistura das Cores Aditivas (extraído de Emery, 1994).

Optou-se em trabalhar com este sistema de classificação devido à simplicidade do seu método e à maior gama de combinações de cores possíveis. O Sistema de Munsell, mesmo utilizando um conceito semelhante de classificação, possui um número limitado de 100 tons, além do fato de que as quantidades de preto só podem ser medidas com numa escala limitada de 1 a 10.

Mesmo que o sistema de classificação da mistura das cores aditivas não seja o mais preciso para classificar as cores das amostras, já é o suficiente para se documentar e comparar as mudanças de cor ocorridas após as etapas de tratamento. De qualquer forma, o testemunho dos ensaios será preservado para investigações futuras onde poderão ser realizados testes de espectrofotometria ou colorimetria nessas amostras.

5. Desenvolvimento do Trabalho

O fluxograma da Figura 5.1 mostra de maneira esquemática todas as etapas do processo de tratamento das gemas realizadas neste trabalho.

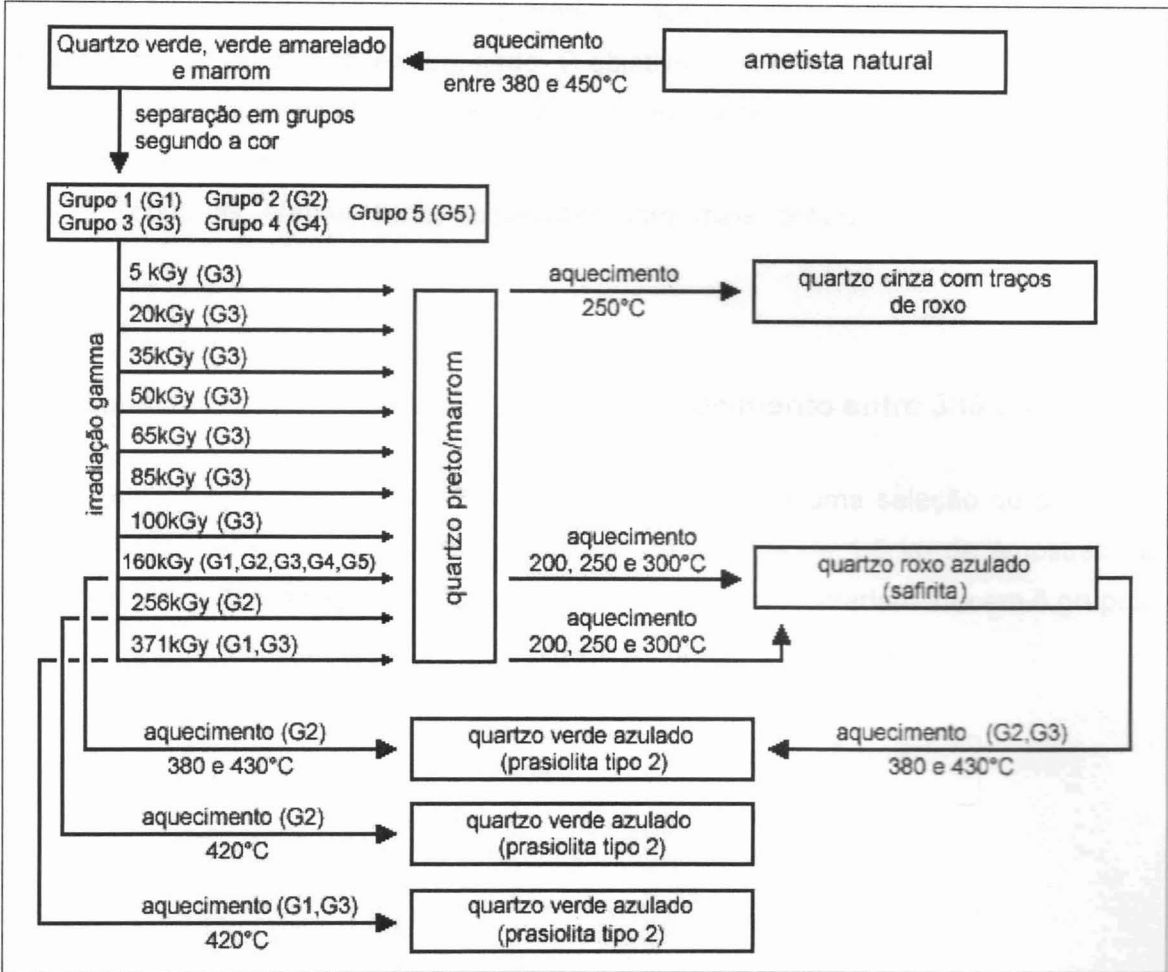


Figura 5.1 – Fluxograma dos ensaios de tratamento realizados nas amostras de ametista de Montezuma.

Inicialmente, todas as amostras de ametista natural são queimadas na jazida dando origem às variedades de quartzo comercialmente chamadas de prasiolita, quartzo pardo e quartzo green gold, e também uma quarta variedade sem nome comercial definido de quartzo azulado claro.

Todas essas variedades foram separadas em 5 grupos. Posteriormente foram feitos ensaios de irradiação gamma com dosagens entre 5 e 371kGy, resultando na mudança da cor das amostras para a cor preta ou marrom escura arroxeada.

Após a etapa de irradiação o Grupo 5 não foi mais utilizado nos experimentos, devido à pouca quantidade de material disponível para realização dos testes de aquecimento. Os outros grupos foram submetidos às etapas de aquecimento com 200,

250 e 300°C, resultando em quartzo roxo azulado, com exceção das amostras que foram irradiadas com apenas 5kGy, que após o aquecimento a 250°C produziu um quartzo de cor cinza.

A ultima seqüência de testes correspondeu ao aquecimento de amostras dos Grupos 1, 2 e 3 em temperaturas mais elevadas de 380, 420 e 430°C. Algumas amostras foram aquecidas a partir do produto chamado de safirita, e outras aquecidas diretamente do quartzo recém irradiado. O objetivo era verificar se após esta etapa de aquecimento era possível obter amostras com um verde mais intenso que a prasiolita produzida antes da irradiação.

Todas as etapas serão explicadas com mais detalhes no decorrer deste capítulo.

5.1. Separação das Amostras (após o 1º aquecimento entre 380 e 450°C)

A primeira etapa do trabalho consistiu em se fazer uma seleção de amostras para estudo. Foi obtido na jazida de Montezuma um lote de 1,5 kg de amostras de ametista já queimadas, que por sua vez foram separadas arbitrariamente em 5 grupos, de acordo com a sua tonalidade e intensidade de cor (Figura 2.3.1):

	Coloração	Nomenclatura Comercial
Grupo 1	Verde clara	prasiolita (tipo 1)
Grupo 2	Verde amarelado	quartzo green gold
Grupo 3	Verde escuro	prasiolita (tipo 1)
Grupo 4	Marrom	quartzo pardo
Grupo 5	Verde azulado	-----

A cor foi o critério de separação, partindo do pressuposto de que as diferenças na tonalidade dos cristais poderão estar relacionadas ao teor de elementos traço presentes.

A 1ª etapa de aquecimento, realizada na própria jazida, foi feita entre algo em torno de 380 e 450°C, sem muito controle do tempo e da temperatura. Estes limites foram estabelecidos de acordo com o aspecto das amostras que variam em tons de verde, indicando temperatura normal de queima para produção da prasiolita, e algumas leitosas, indicando temperaturas mais elevadas, indesejáveis. O forno que eles possuem é de grande porte, havendo um gradiente de temperatura que varia muito do centro para as bordas.

Como já foi visto, a prasiolita é o quartzo tratado de coloração verde. No entanto, duas tonalidades de verde foram obtidas neste trabalho: uma mais amarelada, denominada de prasiolita tipo 1, e outra mais azulada, denominada de prasiolita tipo 2. A classificação da coloração das prasiolitas tipo 1 e 2 serão descritas no capítulo 6.

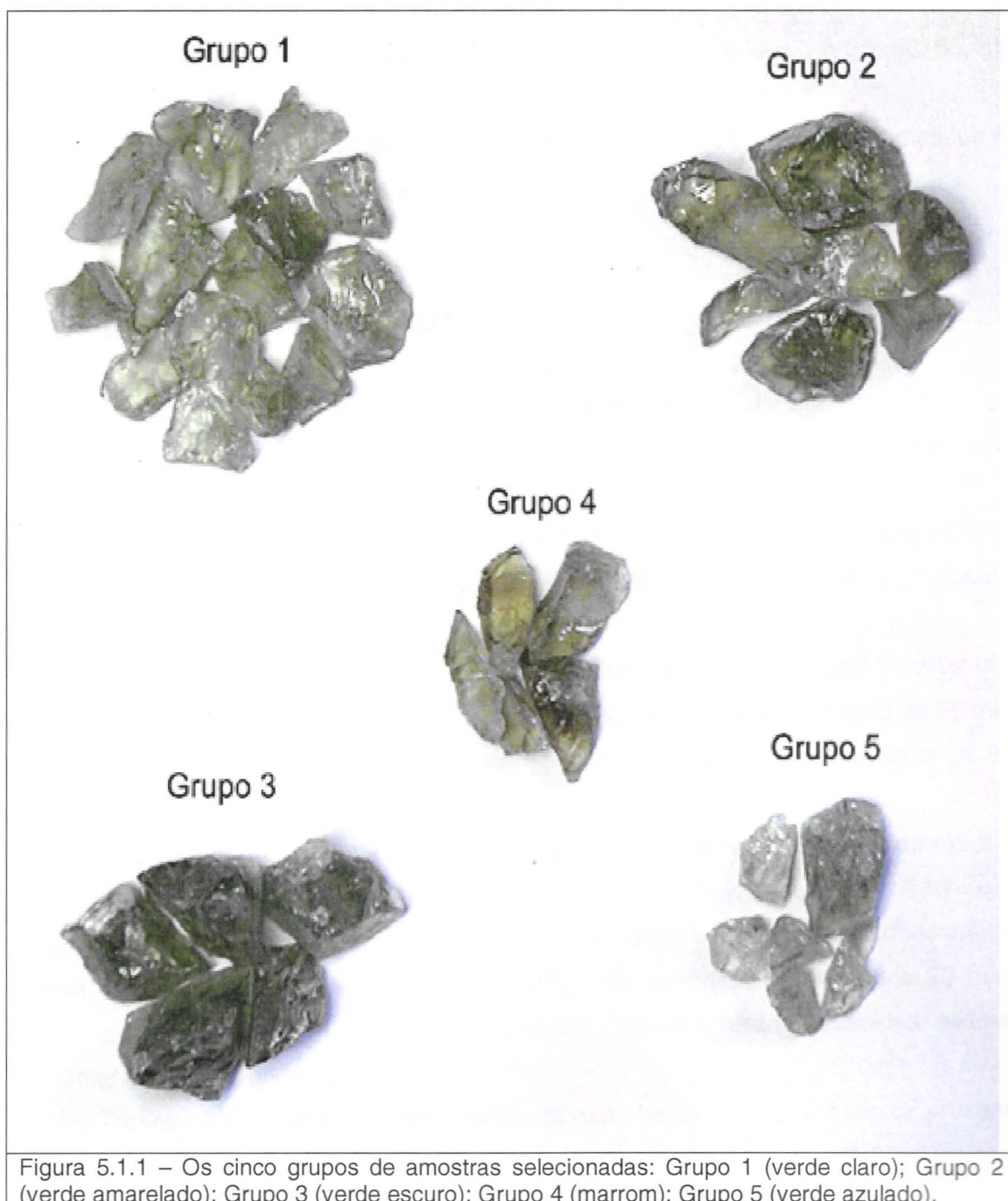


Figura 5.1.1 – Os cinco grupos de amostras selecionadas: Grupo 1 (verde claro); Grupo 2 (verde amarelado); Grupo 3 (verde escuro); Grupo 4 (marrom); Grupo 5 (verde azulado).

5.2. Irradiação com raios gamma

No primeiro ensaio de irradiação as amostras dos 5 grupos foram submetidas a uma irradiação de 160kGy.

Posteriormente realizou-se uma bateria de testes de irradiação com amostras do Grupo 3, que foram submetidas a uma irradiação crescente de 5, 20, 35, 50, 65, 85 e 100kGy.

No terceiro teste um grupo de amostras dos Grupos 1 e 3 foram submetidos a 371kGy e amostras do Grupo 2 a 256kGy.

5.3. Aquecimento entre 200 e 300°C

Neste conjunto de testes envolvendo aquecimento, foi feito um ensaio de aquecimento controlado nos grupos 1, 2, 3 e 4. O grupo 5 foi deixado de lado devido à pequena quantidade de material disponível.

As amostras dos grupos 1, 2, 3 e 4 que tiveram sido irradiadas com uma dosagem de 160kGy, foram então aquecidas a 200, 250 e 300°C durante intervalos de tempo de 30, 60 e 90 min.

Em cada ensaio (Grupo 1 – 200°C, por exemplo) um grupo de amostras era colocado no forno. Após 30 min, um terço das amostras era retirado. Depois de 60 min o segundo terço era retirado, e o restante permanecia no forno até completar os 90 min.

Posteriormente, foram então feitos 3 ensaios adicionais de aquecimento em amostras dos Grupo 3, a 250°C, irradiadas com 5kGy e 371kGy, para verificar se a quantidade de radiação fornecida às amostras interfere no resultado do aquecimento nessa temperatura. Estes ensaios foram feitos nos intervalos de 30, 60 e 90 min. Amostras do Grupo 1, irradiadas com 371kGy, também foram aquecidas nessas mesmas condições (vide Figura 5.1).

Os resultados deste ensaio serão apresentados e discutidos no próximo capítulo.

5.4. Aquecimento entre 380 e 430°C (após a etapa de irradiação)

A safirita não é o único produto com valor comercial produzido a partir dos cristais de ametista de Montezuma. A prasiolita também tem valor de mercado e uma cor muito apreciada.

A prasiolita pode ser produzida diretamente pelo aquecimento da ametista natural entre 380 e 450°C (prasiolita tipo 1), ou pelo mesmo aquecimento após a etapa de irradiação (prasiolita tipo 2).

O primeiro teste foi realizado com amostras de safirita dos Grupos 2 e 3, resultantes do aquecimento a 250°C, nos intervalos de 30, 60 e 90 min. Estas amostras foram aquecidas a 380°C durante uma hora, e depois reaquecidas a 430°C durante 30 min. O mesmo teste foi realizado diretamente com amostras do Grupo 2 irradiadas com 160kGy (sem aquecimento prévio a 250°C).

Depois foram feitos dois aquecimentos a 420°C por 60 min, um com amostras do Grupo 2, irradiadas com 256kGy, e o outro teste com amostras dos Grupos 1 e 3 irradiadas com 371kGy. A Figura 5.1 ilustra esquematicamente todas as etapas de aquecimento descritas acima.

5.5. Análises Químicas Semi-Quantitativas

Devido a problemas de sobrecarga dos laboratórios de Fluorescência de Raios X e de Química, do Instituto de Geociências da USP (IGc/USP), e da falta de padrões adequados não foi possível analisar os quartzos e seu conteúdo em elementos traços neste trabalho. Porém existem dados semi-qualitativos.

Em agosto de 2006, uma análise qualitativa de fluorescência de raios-X, de uma amostra de safirita, produzida a partir de um cristal de ametista de Montezuma, foi realizada pelo Laboratório de Fluorescência de Raios-X da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), com o objetivo exploratório de se identificar os elementos traço presentes nestas ametistas. Não se sabe a qual grupo pertencia a ametista que foi transformada em safirita.

Outra análise semi-quantitativa foi realizada em outubro de 2007, no Laboratório de Fluorescência de Raios X do IGc/USP, de uma amostra de prasiolita "tipo 1" pertencente ao Grupo 1 (coloração verde claro). Foi feito o escaneamento dos elementos presentes, onde aqueles com mais de 2σ sobre o background (ruído) foram transformados em porcentagem através de um software rotineiro do laboratório.

Os resultados de ambas as análises estão apresentados no item 6.5.

6. Resultados Obtidos e Discussão dos Resultados

6.1. Resultados obtidos após 1º aquecimento entre 380 e 450°C

A Tabela 6.1.1 apresenta a classificação das cores dos grupos 1, 2, 3 e 4 após o 1º aquecimento, realizado na própria jazida. Os produtos dessa etapa de aquecimento podem ser a prasiolita tipo 1, o quartzo green gold e o quartzo pardo.

De um grupo para o outro se observam diferenças significativas na composição das cores e seus teores. Em média as amostras do Grupo 1 possuem a menor porcentagem de amarelo e preto dentre os 4 grupos (46,9% e 18,5% respectivamente). O Grupo 2 possui a maior porcentagem de amarelo (60,3%). O Grupo 3 as maiores porcentagens médias de ciano e preto (27,4% e 43,2% respectivamente), e o Grupo 4 é o único cuja cor é resultado da combinação de amarelo com magenta.

Acredita-se que as diferenças nas cores resultantes após o aquecimento estejam relacionadas com a composição química das amostras, visto que dentre um mesmo grupo de amostras, estas apresentaram comportamentos diferentes nas mesmas condições de aquecimento.

6.2. Resultados obtidos após a etapa de irradiação com raios gamma

Esta irradiação foi programada inicialmente para aproximadamente 5 sessões, cada uma de 48 hs, totalizando 100 kGy de radiação recebida pela amostra em cada sessão.

Acreditava-se que depois de irradiadas, as amostras já se tornariam azuis. No entanto, na primeira seção estas amostras receberam 160kGy de radiação gamma, e com isso já adquiriram a coloração marrom escura arroxeada/preta (Figura 6.2.1).

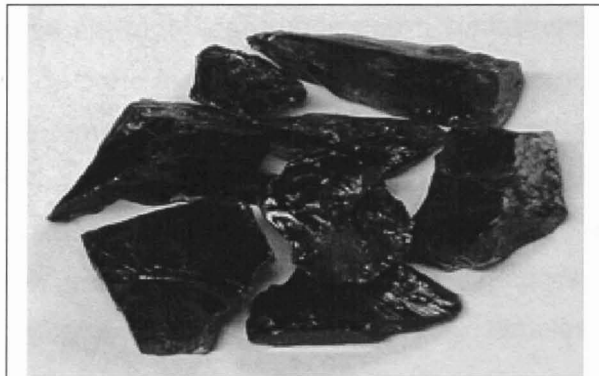


Figura 6.2.1 – Amostras do Grupo 5 após serem irradiadas com uma dose de 160kGy.

Para testar a hipótese de se era possível obter amostras de quartzo azul logo após a 1ª irradiação, foram feitas uma seqüência de ensaios adicionais em amostras de ametistas (queimadas) do Grupo 3 para cargas de irradiação cada vez menores (100, 85, 65, 50, 35, 20 e 5 kGy). Independente da quantidade de radiação fornecida (tanto com 5 quanto 160 kGy) as amostras ficaram com a mesma saturação de preto ou marrom.

Na tentativa de clarear as amostras pretas, foram feitos ensaios de aquecimento, cujos resultados serão descritos a seguir.

Após terem sido obtidos os primeiros resultados dos testes de aquecimento, achou-se necessário irradiar mais amostras com 256kGy e 371kGy, para verificar se há diferenças na cor dos produtos finais (safirita 1 e prasiolita 2) em amostras irradiadas com 160, 256 e 371kGy.

Todas as amostras irradiadas, independente do grupo e da quantidade de radiação recebida (seja 5kGy ou 371kGy), apresentaram as mesmas características após esta etapa do tratamento. A porcentagem da cor preta das amostras ficou sempre superior a 90%.

6.3. Resultados obtidos após as etapas de aquecimento entre 200 e 300°C

O objetivo deste ensaio foi clarear as amostras pretas, na tentativa de ressaltar o tom azul.

Depois de aquecidas e resfriadas, a cor resultante das amostras dos 4 grupos foi classificada com a tabela de cores. As Tabelas de 6.3.1 a 6.3.4 (ver anexo tabelas) contêm os valores em porcentagem das cores das gemas após esta etapa do tratamento. As Fotos de 1 a 4 (ver anexo figuras) correspondem às fotografias tiradas desse material.

A 200°C observou-se em todos os grupos que o clareamento foi muito fraco, com porcentagens médias de preto ainda acima de 63%, e traços de ciano e magenta inferiores a 10%. Notou-se também na grande maioria das amostras, uma tendência de diminuição da cor preta em função do aumento do tempo decorrido.

No entanto, é somente a partir de 250°C que as amostras apresentaram um comportamento significativo em relação ao clareamento. Os gráficos das Figuras 6.3.1 a 6.3.4 foram construídos a partir dos valores das tabelas citadas acima, respectivamente.

De modo geral, observa-se a redução da cor preta em função do tempo decorrido e do aumento da temperatura, embora a exposição mais prolongada ao calor também possa clarear o tom azul, o que não é desejável.

Neste caso, determina-se que a condição ideal para o clareamento (temperatura e intervalo de tempo) é aquela onde a diferença entre as intensidades de ciano e preto é a maior possível. Esta diferença pode ser observada diretamente nos gráficos.

Para os grupos 1 e 2, observa-se que a condição ideal de aquecimento é a 250°C durante 60 minutos, enquanto que para os grupos 3 e 4, a condição ideal é de 250°C durante 90 minutos.

Durante o aquecimento observou-se um fato curioso, que as amostras quando eram retiradas do forno quentes, apresentavam um tom azul mais intenso do que quando resfriadas, de modo que à medida que elas resfriam, a cor mudava gradativamente do azul para o roxo.

Verificou-se que o tempo de resfriamento não interfere nessa mudança de cor, já que num teste com 2 amostras aquecidas a 250°C, onde uma foi resfriada instantaneamente e a outra durante várias horas, ambas ficaram roxas.

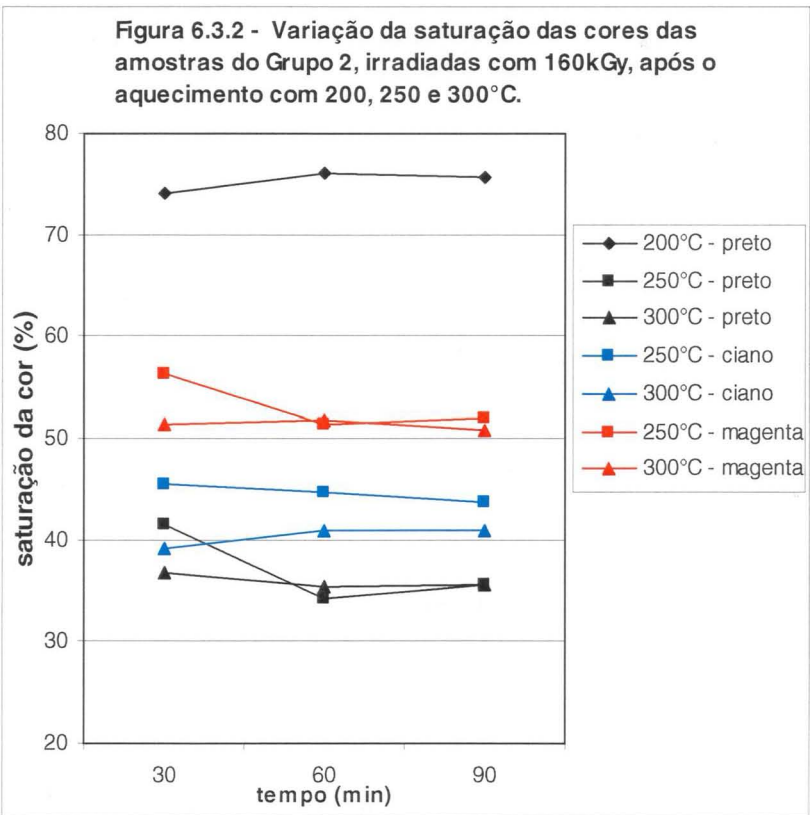
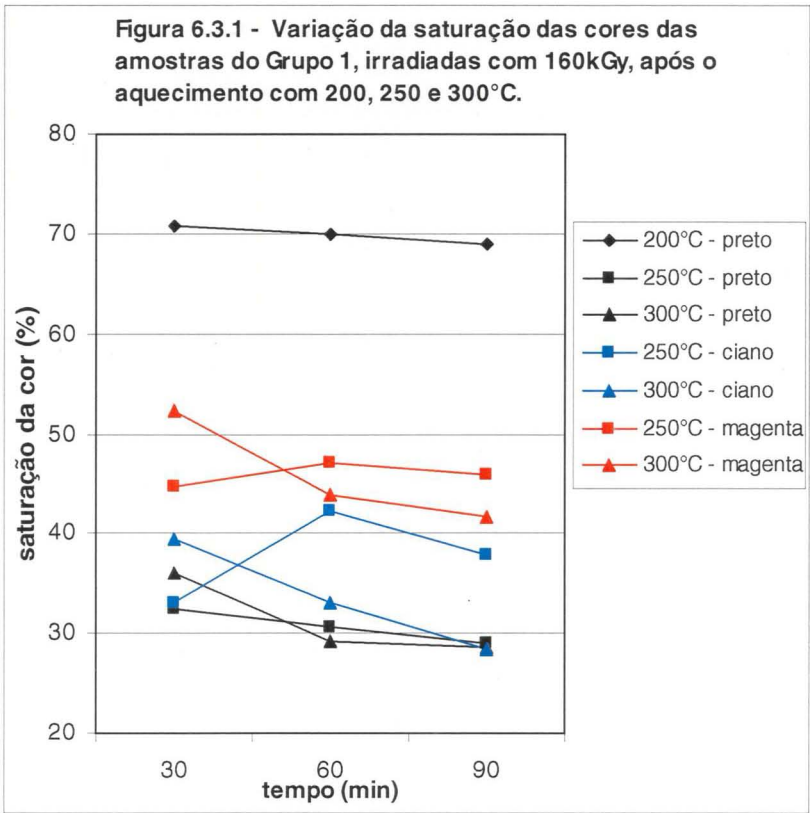
O produto resultante desta etapa de aquecimento posterior à etapa de irradiação é a chamada safirita.

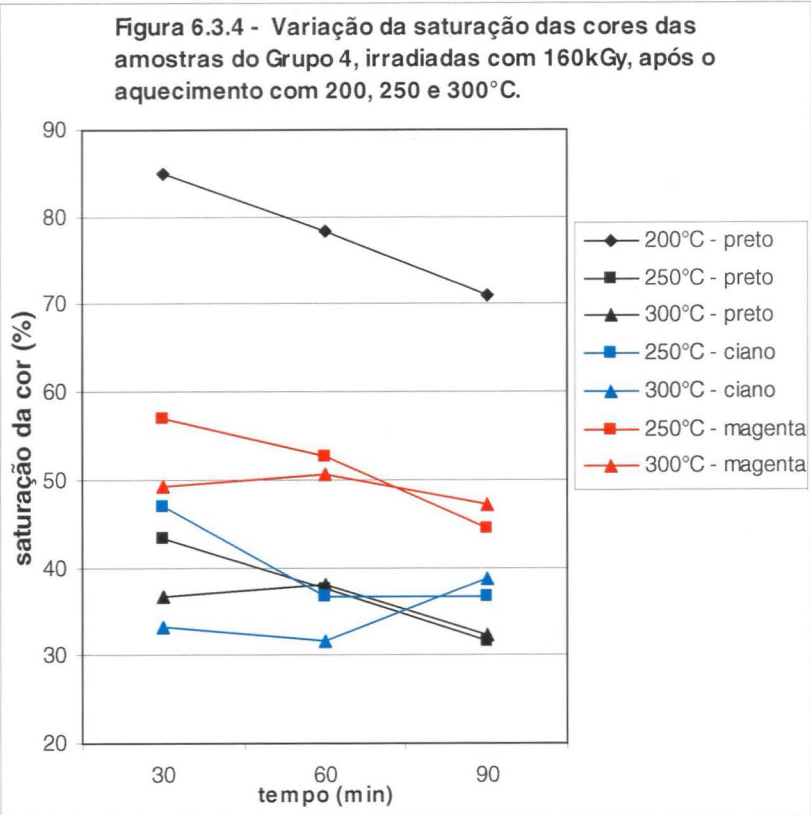
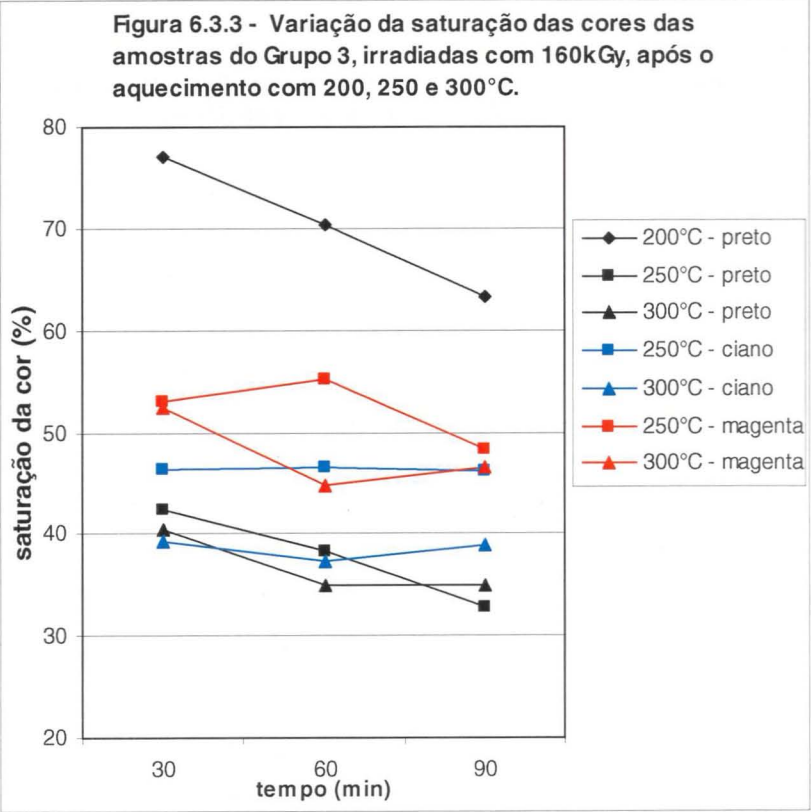
A Tabela 6.3.5 apresenta os resultados obtidos no ensaio de aquecimento a 250°C, das amostras de ametista do Grupo 3 irradiadas com 5kGy. O ensaio foi realizado nos intervalos de 30, 60 e 90 min, e em todos os intervalos de tempo foram obtidas amostras de cor cinza com pequenos traços de magenta e ciano, mostrando que 5kGy é uma quantidade de radiação insuficiente para produzir a safirita.

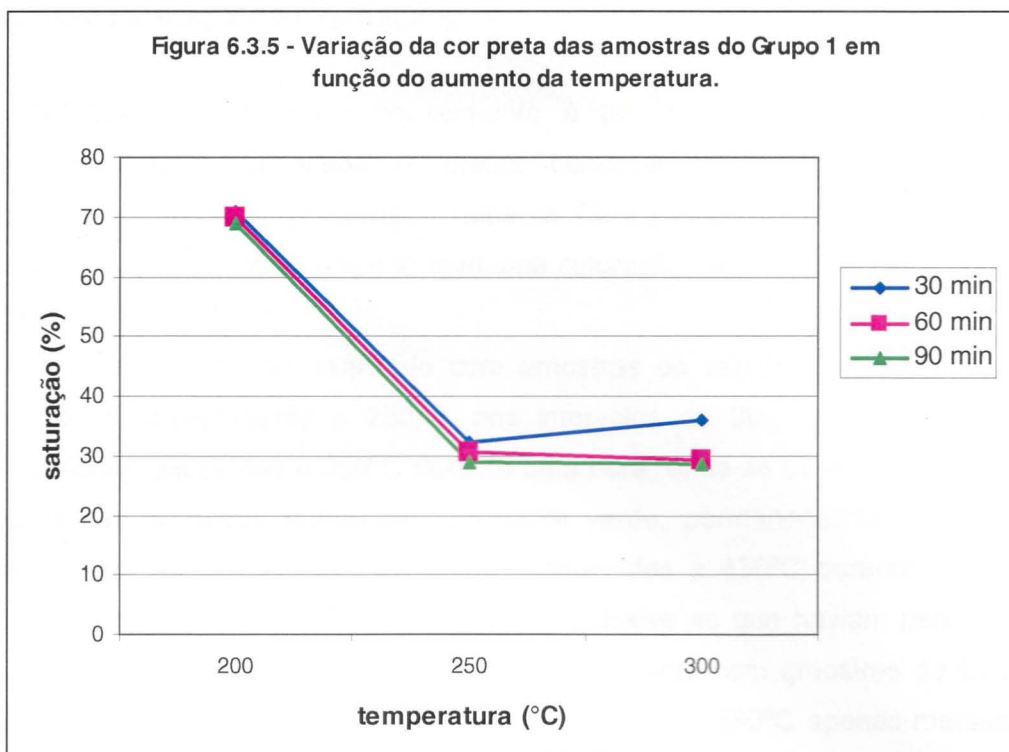
Levando em consideração que a safirita produzida anteriormente (a partir de cristais de ametista irradiados com 160kGy) ainda apresenta porcentagens de magenta superiores aos de ciano, foi feito um novo ensaio de aquecimento com cristais de ametista dos grupos 1 e 3, irradiados com 371kGy. Este ensaio consistiu no

aquecimento das amostras a 250°C durante os mesmos intervalos de 30, 60 e 90 min. As Tabelas 6.3.6 e 6.3.7 apresentam os resultados destes testes, onde não se observou diferenças significativas na saturação das cores entre as amostras de irradiadas com 160kGy e 371kGy, aquecidas na mesma temperatura e nos mesmos intervalos de tempo. As tabelas de 6.3.5 a 6.3.7 estão inseridas nos anexos de tabelas.

Outra observação importante pode ser feita sobre o clareamento. A Figura 6.3.5 mostra a variação da saturação da cor preta com o aumento da temperatura. Se comparada com a variação da saturação da cor preta em função do tempo (para uma mesma temperatura), observa-se que o clareamento é muito mais sensível a temperaturas entre 200 e 250°C. Entre 250 e 300°C, a variação da saturação praticamente se estabiliza, variando levemente. Para este intervalo de temperatura o aumento do tempo de aquecimento mostra-se uma variável mais sensível ao clareamento do que o aumento da temperatura.







A Figura 6.3.6 mostra todas as principais variações de tonalidade obtidas nestes ensaios de aquecimento, indo de um tom mais violeta (amostras 1, 2, 3 e 4) para um tom mais azul (amostras 5 e 6), e inclusive casos pouco comuns de clareamento quase total, representado pela amostra 7.



Figura 6.3.6 – Variações na tonalidade da safirita.

6.4. Resultados obtidos após os aquecimentos entre 380 e 430°C (posteriores à etapa de irradiação)

O objetivo deste novo aquecimento é tentar realizar a reação reversa, transformando tanto as amostras pretas como a safirita (produzida após o aquecimento a 250°C) em prasiolita novamente. Desse modo, pretende-se verificar se é possível produzir a prasiolita tipo 2, com uma coloração de verde mais azulada que a prasiolita tipo 1.

O primeiro teste foi realizado com amostras de safirita dos Grupos 2 e 3, resultantes do aquecimento a 250°C, nos intervalos de 30, 60 e 90 min. Estas amostras foram aquecidas a 380°C durante uma hora, onde se observou que apenas a metade das amostras tornou-se novamente verde, permanecendo roxa a outra metade. Todas as amostras foram então reaquecidas a 430°C durante 30 min. A 430°C todas as amostras tornaram-se verdes, inclusive as que haviam permanecido roxas a 380°C. O mesmo teste foi realizado diretamente com amostras do Grupo 2 irradiadas com 160kGy, onde observou-se também que a 380°C apenas metade das amostras muda de preto para verde.

A Tabela 6.4.1, contida nos anexos de tabelas, apresenta os resultados obtidos com o aquecimento das amostras do Grupo 2, irradiadas com 160kGy, nas temperaturas de 380 e 430°C. Calculando-se as médias das porcentagens de ciano e amarelo da prasiolita tipo 2 obtida neste ensaio, é possível fazer uma comparação com a prasiolita tipo 1 produzida pelo aquecimento anterior à irradiação gamma:

Prasiolita tipo 1	Amarelo (%)	Ciano (%)	Preto (%)
Valor médio	60,3	20,1	32,3
Prasiolita tipo 2	Amarelo (%)	Ciano (%)	Preto (%)
Valor médio	47,0	27,6	25,2

Observa-se então que há uma diferença relevante entre as porcentagens de amarelo e ciano, que definem a diferença na tonalidade da prasiolita. A prasiolita tipo 2 apresentou uma porcentagem menor de amarelo e maior de ciano, concedendo-lhe realmente uma cor mais azulada que a prasiolita tipo 1, como se observa na Figura 6.4.1.



Outro aspecto importante que se observa é que a coloração da prasiolita tipo 2 fica mais intensa, quando o aquecimento é feito utilizando as amostras de quartzo preto, ou seja, o produto direto da irradiação. Sendo assim, não é conveniente produzir prasiolita tipo 2 a partir da safirita.

Na Tabela 6.4.2 (em anexo tabelas) estão os resultados dos testes do aquecimento a 420°C (por 1h) das amostras dos Grupos 1 e 3 (irradiados com 371kGy), e do Grupo 2 (irradiado com 256kGy). O aquecimento desta vez foi feito apenas com as amostras produto direto do processo da irradiação. O objetivo, no entanto, é observar a qualidade da prasiolita "tipo 2" que se pode produzir com cada um dos grupos de amostras.

A melhor tonalidade obtida foi com as amostras do Grupo 3, onde a porcentagem de ciano foi 47,3%, contra 51% de amarelo.

A Foto 5 contida nos anexos de figuras mostra a fotografia do produto do aquecimento dessas amostras irradiadas com dosagem mais alta.

6.5. Resultados das análises químicas

A análise semi-quantitativa feita em agosto de 2006, no Laboratório de Fluorescência de Raios-X da Universidade Federal de Minas Gerais, apontou a presença de Zn, Fe, Ni, Co, Ti e K como elementos traços. A maior concentração detectada foi de Zn (388 ppm), seguido de Fe (188 ppm) e Ni (98 ppm).

Quanto a amostra do Grupo 1 analisada pelo Laboratório de Fluorescência de Raios X do IGc/USP, foram detectados 99,30% de SiO_2 , 0,59% de Fe_2O_3 , 0,11% de Al_2O_3 e traços de zinco.

7. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho pode-se concluir que, de modo geral, a radiação gamma e o aquecimento produzem modificações na cor dos cristais de ametista e/ou de prasiolita do depósito de Montezuma, e que estas modificações aparentemente variam em função da composição química das amostras.

O tratamento das amostras com raios gamma provoca em todos os casos o escurecimento das amostras, a tal ponto de tornar algumas delas opacas e pretas. As amostras translúcidas apresentaram, quando observadas com luz de fundo, coloração cinza escuro ou marrom escuro arroxeado.

Dos experimentos envolvendo aquecimento, concluiu-se que todas as etapas de aquecimento provocam o efeito de clareamento das amostras, ou seja, diminuição da saturação da cor preta, mudando também o tom da cor das amostras. Isso sugere que o aquecimento provoca uma reação oposta à da irradiação.

Prasiolita

Dois tipos de prasiolita podem ser produzidas através do aquecimento: a prasiolita tipo 1 e a prasiolita tipo 2. A prasiolita tipo 1 pode ser produzida pelo aquecimento direto da ametista natural entre 380 e 450°C, resultando num material com um tom verde amarelado. Irradiando a prasiolita tipo 1, e aquecendo o produto resultante da irradiação entre 380 e 420°C, obtém-se a prasiolita tipo 2, com uma coloração verde azulada.

Durante os testes de produção da prasiolita tipo 2, observou-se que existe uma temperatura mínima para fazer o clareamento das amostras. Esta temperatura pode

variar justamente entre 380 e 420°C. Aparentemente a temperatura mínima para que ocorra a reação do clareamento também está relacionada com as diferenças composicionais das amostras. Algumas amostras já a 380°C passaram de pretas para verde azuladas, enquanto que outras precisaram de temperaturas mais elevadas para adquirir essa coloração.

Dentre todas as amostras de prasiolita produzidas, as que obtiveram a melhor coloração (em aspectos comerciais) vieram do tratamento das amostras do Grupo 3, tanto para prasiolita tipo 1 quanto para prasiolita tipo 2.

Safirita

Para produzir a safirita faz-se necessária uma etapa de irradiação das amostras de prasiolita tipo 1 com raios gamma, com posterior aquecimento entre 250 e 300°C. Se essa etapa de aquecimento atingir temperaturas próximas a 380°C já se começa a produzir a prasiolita tipo 2.

Os ensaios de aquecimento controlados mostraram que as condições ideais para a produção da safirita são de 250°C durante 60 min para os grupos 1 e 2, e 250°C durante 90 min para os grupos 3 e 4.

Comprovou-se também que não é possível produzir a safirita diretamente a partir da irradiação gamma, pelo menos com doses superiores a 5kGy.

Os ensaios de aquecimento adicionais a 250°C, mostraram também que 5kGy é uma dosagem de radiação muito baixa para a produção da safirita, e que a dosagem de 371 kGy é mais que o necessário, estabelecendo-se que 160kGy é a dosagem ideal para a produção da safirita dentro do que foi observado nos experimentos realizados neste trabalho.

Em decorrência da impossibilidade de se obter mais análises químicas, e, especialmente, análises quantitativas, não foi possível estabelecer uma correlação entre as mudanças de cor das amostras com as suas prováveis diferenças nas composições químicas.

8. Referências Bibliográficas

- CASSEDANNE J. P.; CASSEDANNE J. O. (1977). *Axinite, hydromagnesite, amethyst, and other minerals from near Vitória da Conquista (Brazil)*. Mineralogical Record, Vol. 8, p. 382-387.
- EMERY, R. (1994). *Type & Color 2*. Rockport Publishers , Inc. 141p.
- ENOKIHARA, C. T.; GÜTTLER, R. A. S.; RELA, P. R. (2007). *Gamma irradiation of quartz from Parana Basin, South America*. INAC 2007
- FAVACHO-SILVA, M. D. (2000). *Variedades gemológicas de quartzo em Minas Gerais: geologia, mineralogia, causas de cor, técnicas de tratamento e aspectos econômicos*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências - UFMG (Belo Horizonte) 182p.
- FYFE, W. S. et al. (1978). *Fluids in earth's crust*. New York: Elsevier. 325p.
- GÖTZE J.; PLÖTZE M.; GRAUPNER T.; HALLBAUER D.K.; BRAY C.J. (2004). *Trace elements incorporation into quartz: A combined study by ICP-MS, electron spin resonance, cathodoluminescence, capillary ion analysis, and gas chromatography*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. Vol. 68, Nº18, p. 3741-3759
- GÜTTLER, R. A. S. (2006a). *Safirita: the brazilian blue quartz*. *Diamond News*. Vol. 25, p. 45
- GÜTTLER, R. A. S. (2006b). *Treated violetish blue to violet quartz from Brazil*. *Gem News International – Gems and Gemology*. Vol. 42(4), p. 285-286
- HEANEY P. J. (1994). *Structure and chemistry of the low-pressure silica polymorphs*. *Reviews of Mineralogy*. Vol. 29, p. 1-32
- HURLBUT C.S. & DANA J. D. (1970). *Manual de Mineralogia*. Tradução de Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico. 642p.
- LIMA S. A. A.; MARTINS-NETO M. A.; PEDROSA-SOARES A. C.; CORDANI U. G.; NUTMAN A. (2002). *A Formação Salinas na área-tipo, NE de Minas Gerais: uma*

proposta de revisão da estratigrafia da Faixa Araçuaí com base em evidências sedimentares, metamórficas e idades U-Pb Shrimp. Ver. Brás. Geoc. Vol. 32, P. 491-500

MONTEIRO, C. V. (2001). *Caracterização das ametistas brasileiras em face aos efeitos da radiação gamma e seu tratamento térmico*. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas - UNESP (Rio Claro). 65p.

MULLER A.; WIEDENBECK M.; VAN DEN KERKHOF A. M.; KRONZ A.; SIMON K. (2003). *Trace elements in quartz – a combined electron microprobe, secondary ion mass spectrometry, laser-ablation ICP-MS, and cathodoluminescence study*. Eur. J. Miner. Vol. 15, p. 747-763

NEUMANN, E.; SCHMETZER K. (1984). *Mechanism of thermal conversion of colour and colour centres by treatment of amethyst*. N. Jb. Miner. Mh. Jg. 1984, H. 6, P. 272-282

ROSSMAN, R. R. (1994). *Colored varieties of the sílica minerals*. Reviews of Mineralogy. Vol 29, p. 433-467

SCHUMANN, W. (1985). *Gemas do Mundo*. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico. 3ª edição. 625p.

SCHNEIDER, W. E. (1997). *The Photonics Design and Applications Handbook*. Laurin Publishing. 561p.

ANEXOS

TABELAS

Tabela 6.1.1 - Classificação da cor das amostras dos Grupos 1, 2, 3 e 4 após o 1º aquecimento entre 380 e 450°C

Grupo 1 - Verde Claro			
Amostra	Ciano (%)	Amarelo (%)	Preto (%)
1	24	57	28
2	28	40	20
3	26	42	22
4	20	45	15
5	28	40	20
6	29	39	19
7	30	55	35
8	21	62	32
9	20	50	5
10	25	45	8
11	30	42	5
12	25	50	5
13	25	50	25
14	27	40	20
média	25,6	46,9	18,5

Grupo 2 - Verde Amarelado			
Amostra	Ciano (%)	Amarelo (%)	Preto (%)
1	17	72	30
2	12	60	30
3	20	65	35
4	20	51	42
5	21	63	33
6	24	58	28
7	24	58	28
8	23	55	32
média	20,1	60,3	32,3

Grupo 3 - Verde Escuro			
Amostra	Ciano (%)	Amarelo (%)	Preto (%)
1	25	58	45
2	22	58	48
3	38	55	35
4	30	56	40
5	22	58	48
média	27,4	57,0	43,2

Grupo 2 - Marrom			
Amostra	Amarelo (%)	Magenta (%)	Preto (%)
1	70	20	28
2	80	20	50
3	75	10	38
4	74	12	35
média	74,8	15,5	37,8

Tabela 6.3.1 - Classificação da cor das amostras do Grupo 1 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300 °C

Grupo 1 - Verde Claro – 160kGy

Temperatura = 200 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	60
2	< 10	< 10	70
3	< 10	< 10	65
4	< 10	< 10	75
5	< 10	< 10	75
6	< 10	< 10	80
média	< 10	< 10	70,8

Temperatura = 250 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	30	32	18
2	25	13	20
3	57	43	42
4	54	40	35
5	46	34	40
6	48	32	40
7	53	38	32
média	44,7	33,1	32,4

Temperatura = 300 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	53	38	31
2	53	40	35
3	53	40	35
4	57	43	44
5	46	36	35
média	52,4	39,4	36

Temperatura = 200 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	50
2	< 10	< 10	45
3	< 10	< 10	90
4	< 10	< 10	80
5	< 10	< 10	85
média	< 10	< 10	70

Temperatura = 250 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	52	43	30
2	53	47	32
3	51	49	29
4	55	50	39
5	58	50	46
6	38	36	33
7	25	30	15
8	34	28	19
9	57	48	32
média	47	42,3	30,6

Temperatura = 300 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	60	54	36
2	52	48	30
3	47	33	40
4	30	15	20
5	20	10	20
6	54	38	30
média	43,8	33	29,3

Temperatura = 200 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	75
2	< 10	< 10	82
3	< 10	< 10	61
4	< 10	< 10	60
5	< 10	< 10	58
6	< 10	< 10	78
média	< 10	< 10	69

Temperatura = 250 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	40	40	35
2	30	15	20
3	54	50	32
4	52	48	30
5	54	46	36
6	53	37	28
7	53	41	33
8	30	25	18
média	45,8	37,8	29

Temperatura = 300 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	53	40	35
2	25	15	20
3	56	30	40
4	22	15	15
5	52	42	33
média	41,6	28,4	28,6

Tabela 6.3.2 - Classificação da cor das amostras do Grupo 2 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300 °C

Grupo 2 - Verde Amarelado – 160kGy

Temperatura = 200 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	78
2	< 10	< 10	80
3	< 10	< 10	60
4	< 10	< 10	70
5	< 10	< 10	82
média	< 10	< 10	74

Temperatura = 250 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	55	45	37
2	56	44	40
3	59	41	46
4	57	50	43
5	55	45	40
6	57	43	45
7	56	50	40
média	56,4	45,4	41,6

Temperatura = 300 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	54	46	44
2	53	40	35
3	55	45	40
4	57	43	45
5	38	22	20
média	51,4	39,2	36,8

Temperatura = 200 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	53
2	< 10	< 10	90
3	< 10	< 10	90
4	< 10	< 10	80
5	< 10	< 10	60
6	< 10	< 10	85
7	< 10	< 10	75
média	< 10	< 10	76,1

Temperatura = 250 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	51	49	30
2	54	37	33
3	40	40	35
4	51	45	30
5	50	50	38
6	56	44	40
7	54	50	35
8	54	46	35
9	52	41	32
média	51,3	44,7	34,2

Temperatura = 300 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	55	46	40
2	57	43	45
3	53	40	32
4	56	50	40
5	38	26	20
média	51,8	41	35,4

Temperatura = 200 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	82
2	< 10	< 10	78
3	< 10	< 10	70
4	< 10	< 10	80
5	< 10	< 10	70
6	< 10	< 10	74
7	< 10	< 10	75
média	< 10	< 10	75,6

Temperatura = 250 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	57	43	43
2	55	45	40
3	54	46	36
4	58	50	46
5	53	50	30
6	35	28	18
média	52	43,7	35,5

Temperatura = 300 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	54	46	36
2	54	40	35
3	55	38	36
4	40	40	35
média	50,8	41	35,5

Tabela 6.3.3 - Classificação da cor das amostras do Grupo 3 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300 °C

Grupo 3 - Verde Escuro – 160kGy

Temperatura = 200 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	80
2	< 10	< 10	70
3	< 10	< 10	80
4	< 10	< 10	78
média	< 10	< 10	77

Temperatura = 250 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	60	50	50
2	55	50	60
3	55	45	40
4	56	50	40
5	52	43	30
6	40	40	35
média	53	46,3	42,5

Temperatura = 300 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	58	42	46
2	44	35	38
3	48	32	40
4	60	48	38
média	52,5	39,3	40,5

Temperatura = 200 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	90
2	< 10	< 10	87
3	< 10	< 10	54
4	< 10	< 10	50
média	< 10	< 10	70,3

Temperatura = 250 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	59	50	48
2	60	50	50
3	53	47	32
4	56	50	40
5	52	42	30
6	52	40	30
média	55,3	46,5	38,3

Temperatura = 300 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	40	40	35
2	40	32	35
3	54	40	35
média	44,7	37,3	35

Temperatura = 200 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	52
2	< 10	< 10	55
3	< 10	< 10	75
4	< 10	< 10	82
5	< 10	< 10	52
média	< 10	< 10	63,2

Temperatura = 250 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	50	50	25
2	57	50	46
3	52	50	30
4	52	48	33
5	40	40	35
6	39	39	28
média	48,3	46,2	32,8

Temperatura = 300 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	53	40	35
2	53	40	35
3	40	35	35
4	40	40	35
média	46,5	38,8	35

Tabela 6.3.4 - Classificação da cor das amostras do Grupo 4 (com 160kGy) após o aquecimento entre 200 e 300 °C

Grupo 4 – Marrom – 160kGy

Temperatura = 200 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	100
2	< 10	< 10	75
3	< 10	< 10	80
média	< 10	< 10	85

Temperatura = 250 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	60	50	50
2	56	46	40
3	55	45	40
média	57	47	43,3

Temperatura = 300 °C Tempo = 30 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	55	30	40
2	53	30	35
3	40	40	35
média	49,3	33,3	36,7

Temperatura = 200 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	68
2	< 10	< 10	85
3	< 10	< 10	82
média	< 10	< 10	78,3

Temperatura = 250 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	54	37	34
2	53	40	34
3	55	30	40
4	55	45	40
5	47	32	40
média	52,8	36,8	37,6

Temperatura = 300 °C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	41	30	36
2	53	40	33
3	58	25	45
média	50,7	31,7	38

Temperatura = 200 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 10	< 10	60
2	< 10	< 10	78
3	< 10	< 10	75
média	< 10	< 10	71

Temperatura = 250 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	60	46	36
2	52	40	31
3	30	28	20
4	40	40	35
5	40	30	36
média	44,4	36,8	31,6

Temperatura = 300 °C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	37	28	15
2	51	42	44
3	54	46	38
média	47,3	38,7	32,3

Tabela 6.3.5 - Cor das amostras do Grupo 3 (irradiadas com 5kGy) após aquecimento de 250°C

Grupo 1 - Verde Escuro - 5kGy - 250°C

Temperatura = 250°C Tempo = 30 min				Temperatura = 250°C Tempo = 60 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)	Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 5	< 5	50	1	< 5	< 5	70
2	< 5	< 5	60	2	< 5	< 5	50
3	< 5	< 5	60	3	< 5	< 5	50
4	< 5	< 5	60	4	< 5	< 5	45
5	< 5	< 5	70	5	< 5	< 5	40
média	< 5	< 5	60	média	< 5	< 5	51

Temperatura = 250°C Tempo = 90 min			
Amostra	Magenta (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	< 5	< 5	60
2	< 5	< 5	50
3	< 5	< 5	60
4	< 5	< 5	40
5	< 5	< 5	60
média	< 5	< 5	54

Tabela 6.3.6 - Cor das amostras do Grupo 1 (irradiadas com 371kGy) após aquecimento de 250°C

Grupo 1 - Verde Claro - 371kGy - 250°C

Temperatura = 250°C Tempo = 30 min				Temperatura = 250°C Tempo = 60 min			
Amostra	Amarelo (%)	Ciano (%)	Preto (%)	Amostra	Amarelo (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	24	32	15	1	52	42	30
2	25	25	10	2	54	46	35
3	40	40	25	3	50	35	30
4	57	50	45	4	38	28	28
média	36,5	36,75	23,75	média	48,5	37,75	30,75

Temperatura = 250°C Tempo = 90 min			
Amostra	Amarelo (%)	Ciano (%)	Preto (%)
1	22	25	5
2	53	40	32
3	52	42	30
4	30	30	40
média	39,25	34,25	26,75

Tabela 6.3.7 - Cor das amostras do Grupo 3 (irradiadas com 371kGy) após aquecimento de 250°C

Grupo 3 - Verde Claro - 371kGy - 250°C

Temperatura = 250°C Tempo = 30 min			
Amostra	Amarelo	Ciano	Preto
1	54	46	36
2	40	30	30
3	53	40	32
4	58	50	45
média	51,25	41,5	35,75

Temperatura = 250°C Tempo = 60 min			
Amostra	Amarelo	Ciano	Preto
1	54	46	35
2	53	41	32
3	30	30	15
4	52	43	30
5	52	41	30
média	48,2	40,2	28,4

Temperatura = 250°C Tempo = 90 min			
Amostra	Amarelo	Ciano	Preto
1	57	50	42
2	51	49	30
3	52	48	35
4	52	39	31
5	57	43	45
média	53,8	45,8	36,6

Tabela 6.4.1 - Resultados do aquecimento das amostras de safirita do Grupo 2 a 380 e 430°C			
Grupo 2	160kGy	385°C/1h + 430°C/30min	
Direto após a irradiação	Amarelo	Ciano	Preto
1	50	25	25
2	55	30	35
3	55	40	35
4	56	30	40
média	54	31,3	33,8
Aquecidas previamente a 250°C - 30min	Amarelo	Ciano	Preto
1	40	28	21
2	54	35	33
3	30	20	5
média	41,3	27,7	19,7
Aquecidas previamente a 250°C - 60min	Amarelo	Ciano	Preto
1	65	20	33
2	48	26	24
3	40	28	20
média	51	24,7	25,7
Aquecidas previamente a 250°C - 90min	Amarelo	Ciano	Preto
1	40	28	20
2	45	28	25
3	40	25	20
média	41,7	27	21,7

Tabela 6.4.2 - Resultados do aquecimento das amostras de safirita do Grupo 3 a 380 e 430°C			
Grupo 3		160kGy	385°C/1h + 430°C/30min
Aquecidas previamente a 250°C - 30min	Amarelo	Ciano	Preto
1	38	29	19
2	0	5	0
3	35	25	18
média	24,3	19,7	12,3
Aquecidas previamente a 250°C - 60min	Amarelo	Ciano	Preto
1	50	19	41
2	54	40	35
3	42	28	21
média	48,7	29,0	32,3
Aquecidas previamente a 250°C - 90min	Amarelo	Ciano	Preto
1	52	45	30
2	45	22	39
3	43	24	37
4	10	5	15
média	37,5	24,0	30,3

Tabela 6.5.2 - Resultados do aquecimento a 420°C dos Grupos 1, 2 e 3			
Grupo 1		371kGy	420°C/60min
Amostra	Amarelo	Ciano	Preto
1	35	30	18
2	44	27	23
3	40	30	5
média	39,7	29,0	15,3
Grupo 2		256kGy	420°C/60min
Amostra	Amarelo	Ciano	Preto
1	50	38	20
2	60	22	30
3	44	26	23
média	51,3	28,7	24,3
Grupo 3		371kGy	420°C/60min
Amostra	Amarelo	Ciano	Preto
1	50	50	25
2	52	42	30
3	51	50	30
média	51,0	47,3	28,3

ANEXOS

FIGURAS

Grupo 1

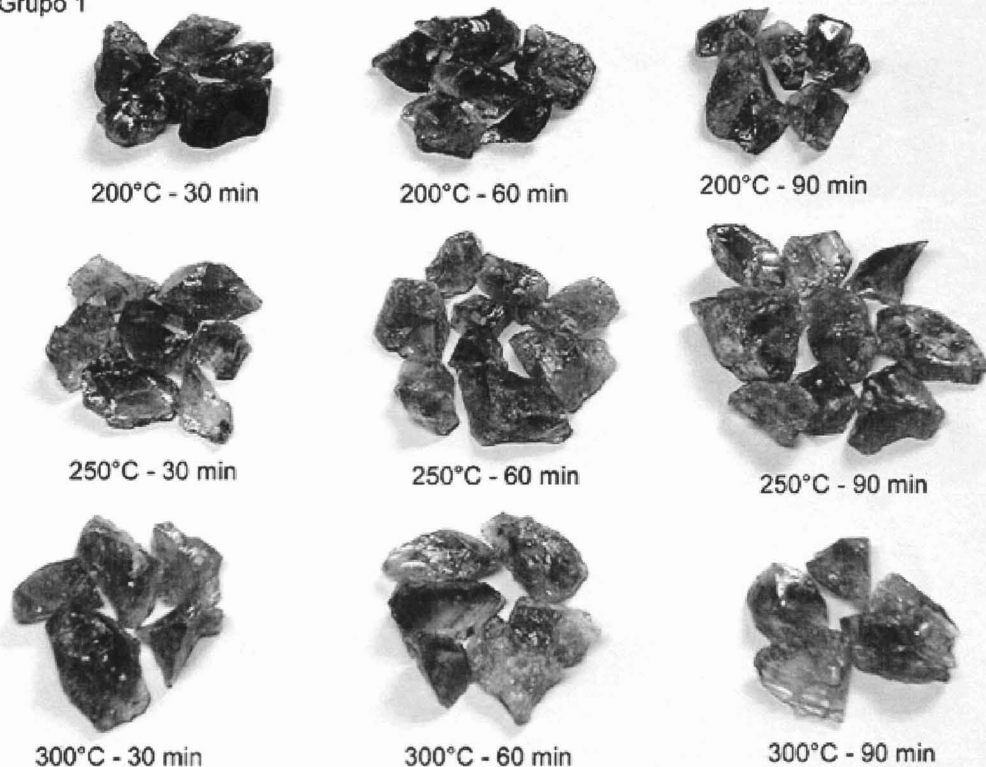


Foto 1 – Amostras do Grupo 1, irradiadas com 160kGy, após o tratamento térmico de 200, 250 e 300°C nos intervalos de 30, 60 e 90 min.

Grupo 2

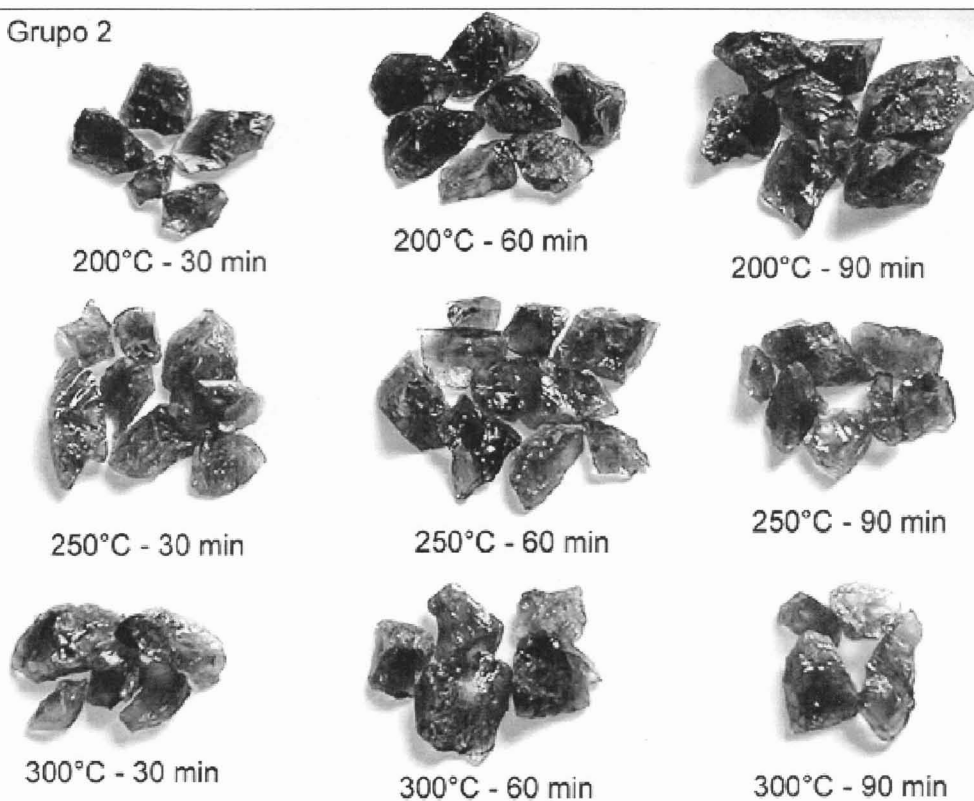
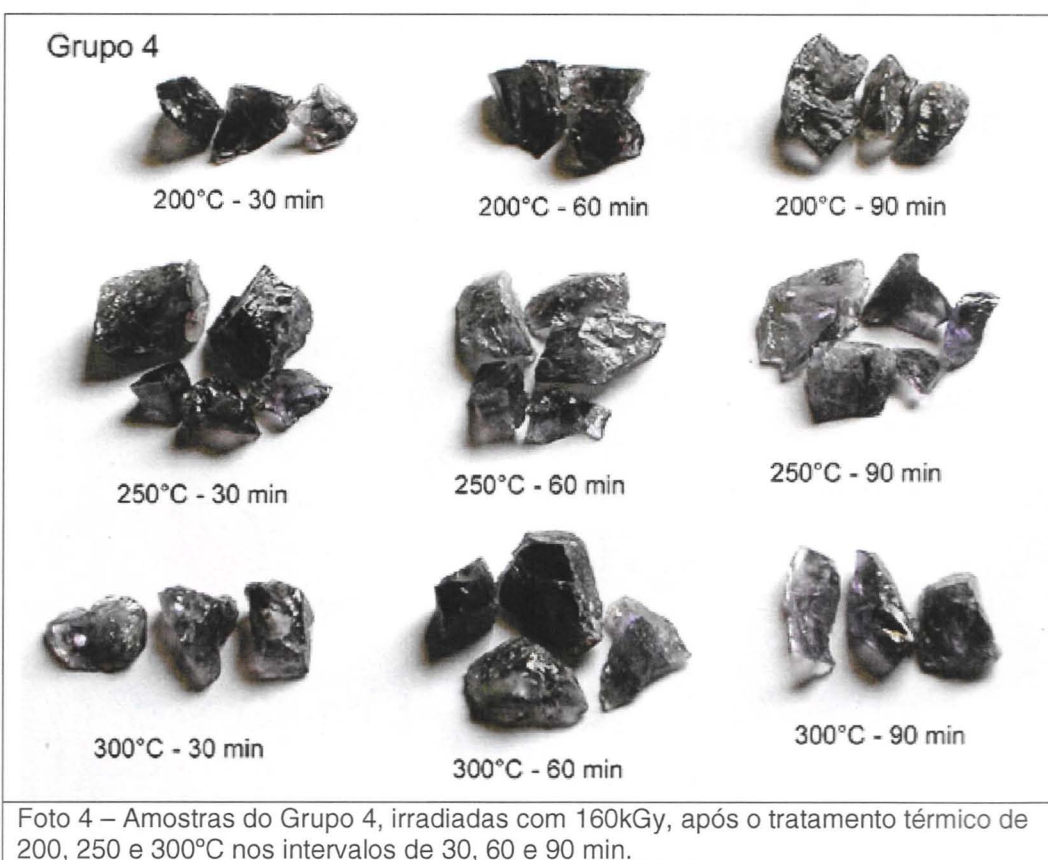
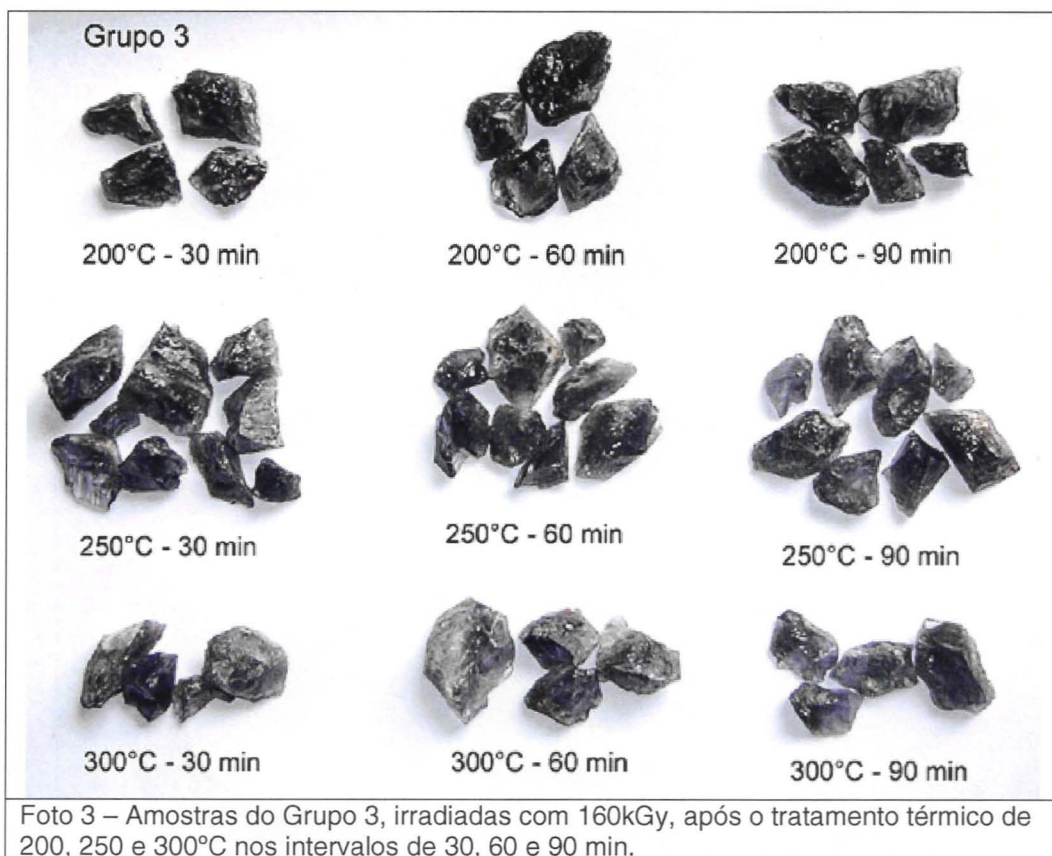


Foto 2 – Amostras do Grupo 2, irradiadas com 160kGy, após o tratamento térmico de 200, 250 e 300°C nos intervalos de 30, 60 e 90 min.





Grupo 1 - 371kGy - 420°C/60min




Grupo 2 - 256kGy - 420°C/60min



Grupo 3 - 371kGy - 420°C/60min

Foto 5 – Amostras resultantes do aquecimento a 420°C após terem sido irradiadas com raios gamma em dosagens de 256 e 371kGy.

São Paulo, 7 de Novembro 2007



André Francisco Munhoz Helfenberger
Autor



Prof. Dr. Rainer Schultz Güttler
Orientador

DOAÇÃO
<i>IGC-057</i>
Data: <i>07/05/08</i>