

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

QUARTZO VERDE E AMETISTA : FORMAÇÃO DA COR E ESTABILIDADE  
TÉRMICA

Giuliana Meirinho Clerici

Orientador: Prof. Dr. Rainer A. Schultz Güttler

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2010/22)

SÃO PAULO

2010

TF  
C629  
GM.q

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

QUARTZO VERDE E AMETISTA : FORMAÇÃO DA COR E ESTABILIDADE  
TÉRMICA

Giuliana Meirinho Clerici



Orientador: Prof. Dr. Rainer A. Schultz Gütler

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA  
(TF-2010/22)

DEDALUS - Acervo - IGC



30900028432

SÃO PAULO

2010

TP  
CG29  
GM.Q

БИБЛІОТЕКА УДАРНІХ ВІДДІЛІВ  
МІНІСТЕРСТВА ОБОРОНИ



БІБЛІОТЕКА ОДНАКОВОГО ВІДДІЛУ  
(ХІМІЧНИЙ)

ОДНАКОВО  
ХІМІЧНИЙ

## **Agradecimentos**

A família Garlett de Ametista do sul pela hospitalidade e amostras cedidas durante a viagem de campo.

Ao engenheiro de Minas, Anderson Oliveira da Silva, funcionário da COOGAMAI pela atenção e tempo despendido à apresentação dos locais visitados.

Ao geólogo Cyro T. Enokihara funcionário do IPEN pelo tratamento de irradiação das amostras deste trabalho e pela solicitude demonstrada.

Ao Prof. Dr. Rainer A. Schultz Gütler por ampliar meus conhecimentos do magnífico mundo dos minerais e gemas e por me acompanhar na realização deste trabalho.

A todos os mestres e funcionários que participaram de minha formação.

Aos colegas da graduação e em especial para Fura, Dá, Marcelo, Sara, Farol, Atoladinha, Gemida, Wally, Vesga, Pinhão e Mocotó.

Ao incrível “time” de campo de mapeamento geológico, Juba e Go Go Boy.

Ao melhor colega, companheiro de campo, graduação e TF, Marcel Trabulsi.

Aos companheiros de ótimas caronas e horas de trânsito, Soraia, Renato e Anderson.

As amigas que me acompanharam durante a graduação e para todas as festas do outro lado da cidade.

Ao meu pai, Luiz Clerici por tornar minhas manhãs e minha rotina sempre mais agradável.

A minha mãe Ilda e ao meu irmão Luiz Felipe.

A todos, obrigado pela viagem!

Tonhão

## Resumo

O Brasil é uma das maiores províncias gemológicas do mundo e possui quartzo em abundância nas diversas cores deste mineral em qualidade gemológica e industrial.

Nos dias de hoje o mercado gemológico está repleto de produtos que necessitam de certos cuidados para manter a cor produzida através de tratamentos térmicos e de irradiação.

As variedades do quartzo, ametista e quartzo verde, de Ametista do Sul – RS e Artigas – Uruguai estudados neste trabalho, apresentam material de qualidade para estes tipos de tratamentos.

A cor em ametista e quartzo verde é causada por defeitos na estrutura cristalina onde ocorre substituição de Si por íons de Fe e/ou Al além de Na e OH ou H que ao serem excitados pela radiação produzem centros de cor. A intensidade da cor varia conforme a composição química da amostra e conforme a quantidade de centros de cor existentes.

A reproduibilidade da cor verde produzida pela radiação gama em quartzo incolor e a recuperação da cor roxa nas ametistas destas regiões mostrou bons resultados. Porém a cor verde é muito sensível ao calor, necessitando cuidados especiais no manuseio de jóias.

Palavras-Chave: ametista, quartzo verde, tratamento, radiação gama, cor.

## Abstract

Brazil is one of the largest gemological provinces in the world and has quartz in abundance in many colors with industrial and gemological quality.

Nowadays the gemological market is full of products that require certain precautions to keep the color produced by heat treatment and irradiation.

The varieties of quartz, amethyst and green quartz from Ametista do Sul - RS and Artigas - Uruguay studied in this work, have quality material for these types of treatments.

The color of amethyst and green quartz is caused by defects in the crystalline structure where occurs substitution of Si by ions of Fe and / or Al and also Na, OH or H which, when excited by radiation produces color centers. The color intensity varies according to the chemical composition of the sample and the amount of color centers existent.

The reproducibility of the green color produced by gamma irradiation in colorless quartz and the recovery of purple amethyst from these regions showed good results. However the green color is very sensitive when exposed to heat, demanding special care when handling jewelry.

Keywords: amethyst, green quartz, treatment, gamma radiation, color.

## Índice Geral

1.	Introdução .....	1
2.	Metas e Objetivos .....	2
3.	Levantamento Bibliográfico .....	2
3.1.	Quartzo .....	2
3.2.	Prasiolita e Quartzo Verde .....	3
3.3.	Ametista .....	4
3.4.	Ocorrências de Ametista e Quartzo .....	4
3.5.	Geologia Regional de Ametista do Sul e Artigas .....	5
3.6.	Gênese dos Geodos .....	6
3.7.	Tratamento de Gemas .....	8
3.7.1.	Tratamento Térmico .....	8
3.7.2.	Tratamento por Irradiação .....	8
3.7.3.	Difusão .....	8
3.7.4.	Outros Tratamentos .....	9
3.8.	Processos de Irradiação .....	9
3.9.	Irradiador de Multipropósito de Cobalto-60 IPEN-CNEN/SP .....	11
3.10.	Unidades relacionadas a Radiação .....	12
3.11.	Causas de Cor .....	13
3.11.1.	Teoria do Campo Cristalino .....	14
3.11.2.	Centros de Cor .....	14
3.11.3.	Causa de Cor Relacionada a Irradiação .....	16
3.12.	Irradiação de Quartzo .....	17
3.13.	Cor .....	18
3.13.1.	Cores .....	19
3.13.2.	Sistemas de Classificação de Cores .....	20
4.	Trabalho de Campo .....	21

5. Exportação.....	27
6. Materiais e Métodos .....	28
6.1. Amostras Trabalhadas.....	28
6.1.1. Ametista .....	28
6.1.2. Quartzo Verde.....	28
6.1.3. Amostras adquiridas em campo.....	29
6.2. Irradiação das Amostras.....	29
6.3. Tratamento Térmico .....	31
6.4. Classificação da Cor .....	33
6.4.1. Classificação das Amostras segundo o sistema CMYK.....	34
7. Desenvolvimento do Trabalho.....	38
8. Resultados Obtidos .....	38
8.1. Resultados da Classificação das Cores .....	38
8.2. Resultados do Aquecimento de Quartzo Verde .....	43
8.3. Resultado da Irradiação das amostras de campo.....	45
9. Interpretação e Discussão dos Resultados.....	45
10. Conclusões.....	46
11. Referências Bibliográficas.....	47

## Índice de Figuras

Figura 01. Mapa Geológico simplificado da província basáltica da Bacia do Paraná, hospedeira das mineralizações de geodos, indicando as regiões de Ametista do Sul e Artigas. ....	6
Figura 02. Modelo, vista de cima de um morro mineralizado com geodos de ametista, em Ametista do Sul. ....	7
Figura 03. Penetração e interação das radiações com a matéria: (a) raios gama provenientes dos radioisótopos, (b) feixe de elétrons e (c) raios X, provenientes dos aceleradores industriais de elétrons. ....	11
Figura 04. Formação de centro de cor quando submetido a irradiação. ....	15
Figura 05. Substituição de Si por Fe ou Al. ....	15
Figura 06. Espectro eletromagnético com detalhe do espectro visível. ....	19
Figura 07. Cores Primárias. ....	19
Figura 08. Círculo das cores de Newton. ....	20
Figura 09. Sistema de cores de Munsell. ....	20
Figura 10. Sistema de Classificação das cores CMYK. ....	21
Figura 11. Acesso a Ametista do Sul. ....	22

## Índice de Fotos

### No Texto

Foto 01. Amostra com quartzo verde na base e ametista no topo, de Ametista do Sul, coletada em campo. .... 3

Foto 02. Geodo com preenchimento de quartzo verde de Artigas. .... 4

Foto 03. Quartzo irradiado com qualidade para lapidação. .... 4

Foto 04. Vista da parede e do altar da igreja de Ametista do Sul. .... 23

Foto 05. Entrada do salão do museu para as galerias da mina. Exposição dos materiais utilizados na extração dos geodos. Geodos abertos nas paredes da galeria e detalhe de geodo fechado em um dos pilares da galeria. .... 24

Foto 06. Morros com entradas de garimpos e suas pilhas de rejeito. .... 24

Foto 07. Entrada da galeria do garimpo visitado. Detalhe do espaço para movimentação de pessoas e retirada dos geodos. Detalhe da organização de ventilação e fiação. .... 25

Foto 08. Garimpeiro retirando geodos. Detalhe dos geodos. .... 25

Foto 09. Detalhe das marcas deixadas na rocha pelo martelete. .... 26

Foto 10. Contato do derrame maciço mineralizado e do teto quebradiço, marcado por linha preta na foto. .... 26

Foto 11. Exemplo de “capelas”. .... 27

Foto 12. Irradiador de Multipropósito do IPEN. .... 29

Foto 13. Porta do Irradiador aberta e detalhe de sua espessura. .... 30

Foto 14. Piscina onde se localizam as canetas de Cobalto-60 e detalhe das canetas dentro d’água. .... 30

Foto 15. Sacos de metal utilizados para colocar amostras dentro d'água junto às canetas de Cobalto-60. ....30

Foto 16. Forno redondo de bancada. ....32

Foto 17. Amostras de Ametista do Sul divididas em três grupos. ....34

Foto 18. Amostras de Artigas, divididas em dez grupos conforme intensidade da cor. ....35

Foto 19. Amostras de Artigas divididas em cinco grupos conforme intensidade da cor. ....36

Foto 20. Amostras de quartzo verde de Ametista do Sul divididas em sete grupos. ....36

Foto 21. Amostras de quartzo verde de Artigas divididas em dois grupos. ....37

No Anexo

Foto 22. Exemplo de 1 dos 4 cristais de quartzo com centro de ametista e borda incolor, irradiado com 250kGy teve a cor do centro acentuada e a da borda fortemente esverdeada.

Foto 23. Cristais de quartzo incolor com brilho gorduroso que ganharam tons esverdeados ou tons fumê após irradiação.

Foto 24. Amostra com base incolor e pontas fracamente roxas que após irradiação teve sua coloração modificada para base esverdeada e pontas medianamente roxas.

Foto 25. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso que após irradiação tornou-se verde forte.

Foto 26. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso que após irradiação tornou-se verde forte.

Foto 27. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso que após irradiação tornou-se verde forte.

Foto 28. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso que após irradiação tornou-se fumê.

## Índice de Gráficos

Gráfico 01. Calibração do forno Rinnai Pratic. ....	32
Gráfico 02. Calibração do forno de bancada. ....	33
Gráfico 03. Variação da intensidade da cor das ametistas de Ametista do Sul, antes do tratamento de irradiação. ....	39
Gráfico 04. Variação da intensidade da cor das ametistas de Ametista do Sul, após tratamento de irradiação. ....	39
Gráfico 05. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artiga. ....	40
Gráfico 06. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artigas após irradiação. ....	40
Gráfico 07. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artigas. ....	41
Gráfico 08. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artigas após irradiação. ....	41
Gráfico 09. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Ametista do Sul após primeiro tratamento de irradiação. ....	42
Gráfico 10. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Ametista do Sul após segundo tratamento de irradiação. ....	42
Gráfico 11. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Artigas. ....	43
Gráfico 12. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Artigas após irradiação. ....	43
Gráfico 13. Variação do Tempo de descoloração Total X Temperatura das amostras de Artigas. ....	44
Gráfico 14. Variação do Tempo de descoloração X Temperatura das amostras de Ametista do Sul. ....	44

## Índice de Tabelas

### No Texto

Tabela 1. Comparações entre as diferentes formas de irradiação em gemas. ....10

Tabela 02. Unidades radiológicas. ....13

Tabela 03. Os 12 tipos de cor em minerais. ....13

### No Anexo

Tabela 04. Calibração do forno Rinnai Pratic.

Tabela 05. Calibração do forno de bancada.

Tabela 06. Aquecimento das amostras de quartzo verde de Artigas.

Tabela 07. Aquecimento das amostras de quartzo verde de Ametista do Sul.

### No Texto

Tabela 08. Classificação de cor das amostras de ametista de Ametista do Sul. ....34

Tabela 09. Classificação de cor das amostras de ametista de Ametista do Sul após irradiação sem tratamento térmico para diminuição dos tons de preto. ....34

Tabela 10. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas. ....35

Tabela 11. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas após irradiação. ....35

Tabela 12. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas. ....36

Tabela 13. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas após irradiação. ....36

Tabela 14. Classificação das amostras de quartzo verde de Ametista do Sul após irradiação. ....37

Tabela 15. Classificação das amostras de quartzo verde de Ametista do Sul após descoloração e nova irradiação. ....	37
Tabela 16. Classificação de cor das amostras de quartzo verde de Artigas. ....	37
Tabela 17. Classificação de cor das amostras de quartzo verde de Artigas após descoloração e nova irradiação. ....	37
Tabela 18. Cronograma das atividades realizadas. ....	38

## 1. Introdução

O quartzo é um dos minerais mais abundantes na crosta terrestre, sendo encontrado em rochas ígneas, metamórficas e sedimentares. Existem diversas variedades de quartzo gemológico como quartzo fumê, citrino, quartzo rosa, cornalina, etc. Neste trabalho estudam-se as variedades ametista e quartzo verde.

As amostras estudadas são provenientes de geodos presentes nos derrames de basalto da Formação Serra Geral da Bacia do Paraná.

Foi observado que a maior parte dos geodos encontrados estão preenchidos por minerais de sílica (predominantemente ametista, porém ocorrem também preenchimentos de quartzo incolor e quartzo verde), e minerais secundários como calcita (como capa que recobre os minerais de sílica ou como cristais bem formados), além de diversos argilominérias identificados por Duarte (2008) como pertencentes ao grupo das esmectitas.

O tratamento de amostras de ametista e quartzo incolor das regiões de Ametista do Sul e Artigas, com irradiação gama pelo Cobalto-60, causa a intensificação da cor roxa nas ametistas e o aparecimento da cor verde nos cristais incolores de quartzo.

Após o tratamento de radiação, as amostras são submetidas a tratamento térmico, para obtenção de cores e brilhos mais intensos, pois em alguns casos a irradiação pode provocar uma coloração mais escura e até mesmo próxima do preto.

O tratamento térmico tem como finalidade alterar a cor e sua intensidade conforme a necessidade e o objetivo de uso do quartzo.

A ametista quando aquecida à temperaturas de aproximadamente 300 ou 400°C perde sua coloração roxa e passa para incolor (Nassau & Prescott 1977, Rossman 1994). Já o quartzo verde perde sua coloração e passa a incolor quando aquecido à temperaturas entre 150 até 200°C (Güttler 2007).

O estudo das cores conseguidas através destes tratamentos e da resistência destas ao calor pode contribuir para que o mercado gemológico e as lojas de pedras e minerais brasileiros possam adquirir e transmitir este conhecimento aos seus clientes.

A disseminação destas informações é importante tanto para os profissionais que trabalham com jóias e peças artesanais que utilizam ametista e quartzo verde, quanto para as pessoas que utilizam estas jóias, evitando assim perda da cor por exposição contínua ao sol, luz ou a calor excessivo.

Entretanto, este trabalho não tem como objetivo identificar e relacionar os elementos causadores de cor em ametista e quartzo verde, não tendo sido realizadas análises químicas das amostras estudadas. E este tipo de dado será retirado, se necessário, de trabalhos publicados na Literatura.

## 2. Metas e Objetivos

O presente trabalho de formatura tem como objetivo o estudo de amostras de ametista e quartzo verde das regiões de Ametista do Sul-RS e Artigas-Uruguai submetidas a tratamento térmico e de irradiação gama com o intuito de estabelecer um comportamento de formação da cor após as amostras serem irradiadas e da estabilidade da cor perante o tratamento térmico.

## 3. Levantamento Bibliográfico

### 3.1. Quartzo

O quartzo é um mineral que ocorre em rochas magmáticas, sedimentares e metamórficas e pertence ao Grupo  $\text{SiO}_2$  da subclasse dos Tectossilicatos, onde estão representados os minerais mais abundantes da crosta terrestre.

Constituídos por tetraedros de  $\text{SiO}_4$ , formam uma estrutura tridimensional de maneira que todos os vértices ocupados por um oxigênio são compartilhados com os tetraedros vizinhos, dando origem a uma estrutura fortemente unida e estável com relação Si:O de 1:2 (Dana 1974).

Suas formas cristalinas principais, também denominadas polimorfos são: quartzo, tridmita, cristobalita, coesita, keatita, stishovita, vidro de sílica e sílica criptocristalina. Cada uma destas formas possui estruturas cristalinas distintas com campo de estabilidade bem definido sob condições de equilíbrio sendo a transformação de uma para outra lenta. Cada uma destas formas cristalinas possui um polimorfo  $\alpha$  de simetria trigonal e  $\beta$  de simetria hexagonal que representam baixa e alta temperatura respectivamente (Deer et al 1966).

O quartzo tem composição química  $\text{SiO}_2$  com elementos traço como Li, K, Na, Al, Fe, Mn e Ti que presentes na estrutura cristalina, distinguem suas variedades gemológicas (Dana 1974).

Schumann (2006) separa as variedades de quartzo em dois grupos: macrocristalino e microcristalino sendo:

Os macrocristalinos (cujos cristais se observam a olho nu) são a ametista, cristal de rocha, citrino, prasiolita, quartzo enfumaçado, quartzo róseo.

Os microcristalinos (cujos cristais são microscópicos) são as calcedônias, que incluem a ágata, a madeira petrificada, crisoprásio, heliotróprio, jaspe, cornalina e ônix.

Dana (1932) divide o Quartzo em fenocristalino e criptocristalino e Klein (2002) divide em macrocristalino (com as mesmas variedades ametista, cristal de rocha, etc) e microcristalino

com variedades fibrosas (calcedônia, cornalina, crisoprásio, madeira petrificada) e granulares (sílex, chert, jaspe).

O quartzo possui densidade de 2,65 e sua dureza na escala de Mohs é 7. Tais características se aplicam a todas as variedades.

### 3.2. *Prasiolita e Quartzo Verde*

Diversos autores tratam o quartzo verde pelo nome de "Prasiolita", "Ametista verde" ou "Greened Amethyst" (Duarte 2008). Porém Güttler (2007), Henn & Güttler (2009), evidenciam que o quartzo originalmente incolor, proveniente de regiões do sul do Brasil e do oeste de Minas Gerais que adquirem a coloração verde através da irradiação com radiação gama de Cobalto-60 deve ser tratado como quartzo verde e não Prasiolita.

Historicamente o nome Prasiolita foi empregado para o quartzo verde produzido através da queima da ametista, e no Brasil, a única jazida que produz este material está em um vilarejo chamado Montezuma, no norte de Minas Gerais.

Schumann (2006), faz a distinção do nome prasiolita para a ametista queimada que dá origem ao quartzo verde e relata não só a região de Montezuma, mas também o Arizona (EUA) como produtor de material de qualidade para lapidação.

A identificação e separação da prasiolita do quartzo verde pode ser feita de uma maneira simples (Güttler 2007): através do filtro Chelsea, usado pelos gemólogos, onde o quartzo verde produzido por irradiação de quartzo incolor mostra-se vermelho ou avermelhado sob a luz incandescente enquanto a "Prasiolita" derivada da queima da ametista mostra-se esverdeada.

O quartzo verde natural pode ser encontrado na base dos cristais de ametista como mostra a Foto 01 ou preenchendo geodos inteiros como mostra a Foto 02, porém normalmente tem cor fraca e amostras desta variedade são encontradas em quantidade muito pequena. Entretanto a Foto 03 mostra quartzo incolor tratado com radiação que adquiriu tons fortes de verde e gerou material de grande qualidade para lapidação.



Foto 01. Amostra com quartzo verde na base e ametista no topo, (amostra de 7x4 cm ), de Ametista do Sul, coletada em campo.



Foto 02. Geodo com preenchimento de quartzo verde de Artigas (Duarte,2008).



Foto 03. Quartzo irradiado com qualidade para lapidação (Embrarad-Empresa brasileira de radiação).

### 3.3. *Ametista*

A ametista é a variedade do quartzo de coloração roxa, de mesma composição química, sistema cristalino e dureza. Ocorre em geodos como prismas bem formados sendo o mineral de sílica predominante, com diversos tons de roxo, desde muito claro, praticamente rosado até tons de roxo violeta. Em pegmatitos ocorre em aglomerados como prismas ou intercalado com quartzo leitoso em lâminas ou estrias criando aspecto “zebrado” (Schumann 2008).

### 3.4. *Ocorrências de Ametista e Quartzo*

O Brasil é uma das maiores províncias gemológicas do mundo e possui quartzo em abundância nas diversas cores possíveis deste mineral e com qualidade gemológica e industrial (Castañeda et al. 2001, Monteiro 2001).

Da Província Gemológica Brasileira, são extraídos por volta de 100 tipos diferentes de gemas, com destaque para a produção de turmalinas, topázio, variedades de quartzo (ágata, ametista e citrino) e esmeralda. Além do fato de ser praticamente fonte única na

produção de topázio imperial e "turmalina Paraíba" e produzir em pequena escala diamante, rubi e safira (Barreto & Bittar 2006).

Segundo Limaverde (1980), a grande província gemológica do Brasil pode ser subdividida em quatro subprovíncias: Nordeste, Central, Leste e Sul. Sendo a área pesquisada situada nesta última.

A Sub-província Nordeste divide-se entre área meridional que abrange o distrito mineiro da Bahia com produção de esmeralda, ametista, citrino, quartzo hialino, entre outras e a área setentrional que abrange as mineralizações pegmatíticas do Planalto da Borborema e do Estado do Ceará com produção de elbaíta, águas-marinhas, granada e morganita, e o Piauí com produção de opala nobre.

A Sub-província Central que abrange os estados do Pará, Mato Grosso e Goiás, com produção de diamante, esmeralda, ametista e minerais de pegmatitos.

A Sub-província Leste que é composta pelos estados de Minas Gerais, Espírito Santo e parte do Rio de Janeiro com produção de gemas associadas a pegmatitos e veios hidrotermais, depósitos de aluviões e coluviões e áreas com produção de diamante.

A Sub-província Sul é subdividida nas porções meridional, que abrangem áreas dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, onde tem jazidas de ametista, citrino (provenientes da queima da ametista) e ágata, ligadas ao basalto; e setentrional que ocupa parte do Mato Grosso do Sul (ametista), Paraná (diamante) e São Paulo (minerais de pegmatitos).

Segundo Lamachia 2006, o Rio Grande do Sul é um dos produtores mundiais mais importantes de ágata e ametista, além de citrino (proveniente da queima de ametista).

Estes minerais totalizam mais de 95% do valor da produção gemológica do Estado, sendo produzido também em pequena escala, cristais de rocha, madeira fóssil (xilólito), calcedônia, serpentinito e jaspe além de peças de coleção de ametista, ágata com ametista, calcita em geodos, selenita e de minerais do grupo das zeólitas (Barreto & Bittar 2006).

A extração de minerais no Brasil é realizada por milhares de garimpeiros e por poucas empresas de mineração, o que acarreta em controle oficial pouco eficiente do Estado sobre a produção e comercialização real de gemas.

### **3.5. *Geologia Regional de Ametista do Sul e Artigas***

Os geodos de ametista ocorrem disseminados em rochas vulcânicas da Formação Serra Geral cujos derrames se iniciaram no Cretáceo Inferior (Melfi et al 1988). Esta unidade ocupa partes do território brasileiro, uruguai, argentino e paraguaio.

Os dois distritos mineiros de grande importância econômica (com notável qualidade de gemas, peças de coleção e volume de material explorado) estão localizados na região do município de Ametista do Sul e no nordeste do Uruguai, próximo a Artigas (Duarte 2008).

No Rio Grande do Sul, as principais áreas que apresentam geodos preenchidos com ametista ficam no norte do Estado, região denominada Alto Uruguai, que abrange parte dos municípios de Iraí, Frederico Westphalen, Ametista do Sul, Planalto e arredores (Juchem et al 1994).

No Uruguai, a região de Artigas que faz fronteira com a cidade de Quaraí no Brasil, tem como principais locais de ocorrências de geodos mineralizados os derrames chamados de Catalán e Cordillera, e a Formação correspondente ao Serra Geral chama-se Formação Arapey (Duarte 2008).

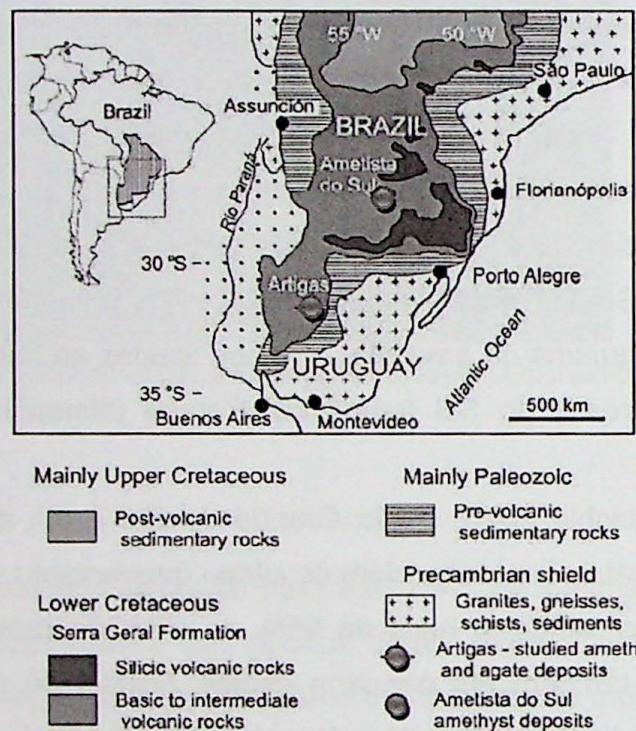


Figura 01. Mapa Geológico simplificado da província basáltica da Bacia do Paraná, hospedeira das mineralizações de geodos, indicando as regiões de Ametista do Sul e Artigas (modificado de Duarte et al 2008).

### 3.6. Gênese dos Geodos

As cidades de Ametista do Sul e Artigas constituem pólos de exploração de geodos de ametista. Estas cidades situam-se sobre os basaltos da Formação Serra Geral, composta por uma enorme sequência de derrames, que sobrepõem a Formação Botucatu constituída por centenas de metros de arenito (Hartmann 2008).

Hartmann (2008) e Duarte (2008) acreditam que o vulcanismo contínuo que gerou aproximadamente 1.000m de espessura de basaltos que se dividem em derrames maciços e fraturados, e a presença do volumoso aquífero Guarani na Formação Botucatu,

contribuíram para a formação dos geodos gigantes preenchidos com cristais de ametista, quartzo incolor, quartzo verde, gipsita, selenita e calcita de Ametista do Sul e Artigas.

Os derrames com temperaturas entre 1.150-1.200°C, teriam esquentado as águas do aquífero Guarani a 100-150°C e este processo teria ocasionado a ascensão destes fluídos por fraturas presentes no basalto, alterando-o e aumentando suas pressões e seu empuxo, criando uma porosidade secundária e levando assim soluções aquosas ricas em sílica por fraturas maiores, provavelmente atingindo os 1.000m de basalto e chegando a formar o cimento de ágata dos arenitos encontrados sobre as rochas do vulcanismo.

Os estudos de Hartmann (2008) na região de Ametista do Sul, com colaboração de garimpeiros e da Cooperativa de Garimpeiros do Médio e Alto Uruguai-COOGAMAI proporcionaram informações suficientes para a conclusão de que os morros onde se localizam os derrames mineralizados, possuem características que evidenciam claramente os melhores locais para a extração dos geodos.

As clareiras, açudes e banhados nos topos dos morros da região, possuem formas hexagonais que corresponderiam aos topos das fraturas, portanto são classificados como gossans (feições que caracterizam rocha transformada em solo por intemperismo onde se localizam acúmulos minerais que podem representar indícios de mineralização subterrânea) como mostra a Figura 02.

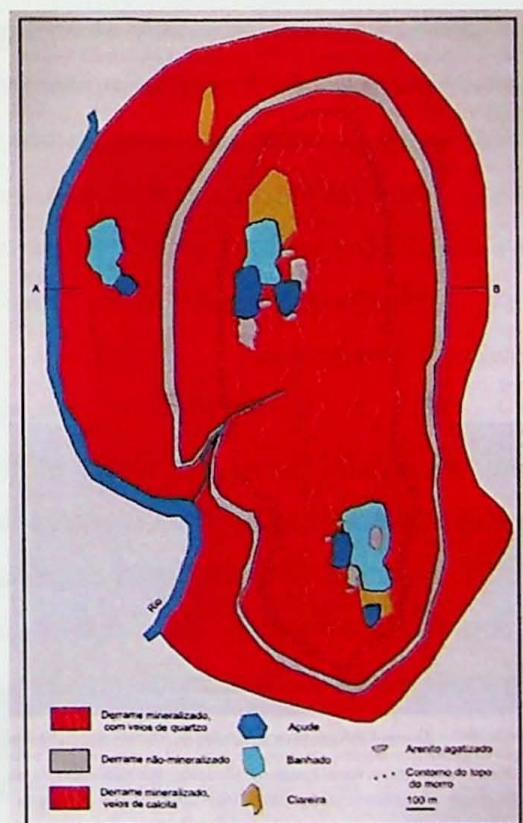


Figura 02. Modelo, vista de cima de um morro mineralizado com geodos de ametista, em Ametista do Sul (Hartmann 2008).

O basalto altera para solo rico em esmectita, que sendo uma argila expansiva mantém o solo úmido, saturado, e faz com que a vegetação de mata atlântica da região não

se estabeleça nesse ambiente e forme assim banhados e lagos. Os morros têm derrames mineralizados principalmente nas cotas de 400-460m acima do nível do mar onde se localizam a maior parte dos garimpos e alguns nas altitudes de 340-360m e 260-290m, indicando que provavelmente existem áreas mineralizadas mais profundas (Hartmann 2008).

A geomorfologia da área pode ser explicada então pelos morros sustentados por veios de quartzo e áreas mineralizadas ricas em sílica e arenitos agatizados em meio aos vales da região erodidos por não apresentarem tais condições de resistência.

### **3.7. *Tratamento de Gemas***

Existem diversas técnicas disponíveis e a comercialização de gemas tratadas é amplamente aceita no mercado gemológico. Muitas destas técnicas não tem seus processos conhecidos em detalhe já que as empresas e laboratórios que as utilizam declaram estas informações privadas (Ashbaugh III 1988).

#### **3.7.1. *Tratamento Térmico***

O tratamento térmico provoca alterações em uma gema através da aplicação de calor. Os objetivos deste tratamento vão desde a uniformização, melhoramento, mudança ou adição da cor até a dissolução de inclusões e desenvolvimento ou eliminação de asterismo.

As principais gemas tratadas termicamente são: coríndon, turmalina, berilo, quartzo e topázio (Castañeda et al 2001).

#### **3.7.2. *Tratamento por Irradiação***

Segundo Castañeda et al (2001), os processos atômicos que provocam as mudanças de cor, causados pela radiação não são ainda completamente entendidos, porém tanto o tratamento de irradiação quanto o térmico seriam apenas a aceleração de um processo que poderia ter ocorrido na própria natureza.

As principais técnicas de tratamento por irradiação explicadas detalhadamente mais adiante, são os raios-X, raios gama, nêutrons e aceleradores de elétrons e as principais gemas que utilizam estes tratamentos são: quartzo, topázio, berilo, turmalina e diamante.

#### **3.7.3. *Difusão***

É um tratamento termoquímico que consiste na introdução de impurezas na gema, por processos de difusão de óxidos sob altas temperaturas e durante períodos de tempo variáveis conforme o tipo de gema. O processo cria uma camada fina, colorida sobre a gema e é usado para uniformização de cor em rubis e safiras sintéticas, indução de inclusões em coríndon sintético entre outros. A aceitação de gemas que utilizam este tratamento é muito baixa no mercado gemológico (Shigley & McClure 2009).

Estas gemas possuem normas de comercialização que devem indicar o tipo de tratamento utilizado (Castañeda et al 2001).

### 3.7.4. Outros Tratamentos

Além dos tratamentos mencionados Castañeda et al (2001) relaciona os seguintes métodos:

- o tingimento: que utiliza corantes para intensificação, uniformização ou modificação das cores (muito utilizado em ágatas);
- o clareamento: que utiliza produtos químicos para clarear ou remover cores indesejadas;
- a aplicação de laser: que junto com produtos químicos adequados proporciona a retirada de inclusões indesejadas (muito utilizada nos diamantes),
- a impregnação: que utiliza introdução de óleos incolores, cera, resina natural e produtos sintéticos em gemas fissuradas ou porosas para melhoramento de cor e/ou transparência;
- HPHT (*High Pressure e High Temperature*): que utiliza alta pressão e altas temperaturas para remoção dos centros de cor em diamantes.

### 3.8. Processos de Irradiação

A aplicação de radiação em gemas naturais incolores ou levemente coloridas, como topázio, quartzo, berilo, turmalina, espodumênio e diamante, tem contribuído no aumento da exportação de gemas com cores exuberantes e na produção em série de jóias. Dentre as técnicas de beneficiamento existentes, três envolvem radiação e atuam comercialmente na indústria de gemas (Favacho 2007): Radiação gama ( $Co^{60}$ ), Aceleradores de elétrons (*electron beam*), e Reatores Nucleares listadas a seguir.

#### -Radiação Gama

A fonte de radiação deste método é o isótopo Cobalto-60. As principais gemas submetidas a este processo são quartos incolores naturais que passam a cores verdes,

verde-amarelados, amarelos, amarelo-amarronzados, laranja, fumê, ametista; berilos incolores que passam a morganitas, berilo verde, heliodoro, espodumênio e kunzita; além de topázios incolores que passam para azuis e turmalinas rosa e vermelha, que tem sua cor acentuada.

É uma técnica disponível no Brasil (ex. EMBRARAD) e que apresenta disponibilidade para tratamento de alguns quilos a toneladas, sendo cobrado por quilo e não por quilate. As gemas tratadas por Cobalto-60 não precisam de licenças de exportação, pois o método é comprovado cientificamente como inofensivo e não vinculado às leis da *Nuclear Regulatory Commission* (NRC).

#### -Acelerador de Elétrons

O acelerador linear é usado principalmente em topázios incolores que passam para azuis, berilos incolores que passam a verdes e amarelos, e diamantes incolores naturais que passam a diamantes coloridos. É uma técnica que não está disponível no Brasil e em geral o tratamento é cobrado por quilate e está sob as regras da NRC.

O Brasil é um dos maiores fornecedores de matéria-prima para este processo.

#### -Reator Nuclear

Utiliza nêutrons como fonte de radiação e tem como principais gemas tratadas os topázios incolores que passam a azuis e diamantes incolores naturais que passam a coloridos. Trata-se de uma técnica que atua no núcleo dos átomos e não somente na eletrosfera dos mesmos, motivo pelo qual este tratamento deixa resíduos radioativos nas gemas. É um método que necessita de um período de quarentena para se esperar o decaimento radioativo residual total e de uma análise antes de sua comercialização ou retorno ao cliente.

Castañeda (2001), compara as vantagens e desvantagens dos métodos de irradiação como mostra a Tabela 1.

Irradiação	Vantagens	Desvantagens
Raios X	Maior disponibilidade para pesquisas iniciais de causas de cor em gemas	Baixo poder de penetração Inviável comercialmente Baixa uniformidade na cor
Raios Gama	Viável comercialmente Poder de penetração comercialmente alto Não deixa resíduos radioativos na gema Boa uniformidade na cor	Menores taxas de doses requerem atmosfera inerte
Nêutrons	Viável comercialmente (quando passa pela	Deixa resíduos radioativos

	quarentena) Alto poder de penetração Boa uniformidade na cor	
<b>Aceleradores de elétrons</b>	Emissão controlável Não possui radioatividade residual Uso de energia elétrica (a máquina pode ser desligada)	Baixa penetrabilidade A aplicação de doses mais elevadas é muito complicada

Tabela 1. Comparações entre as diferentes formas de irradiação em gemas (Casdañeda 2001).

Segundo Calvo (2005), os raios gama, os feixes de elétrons e os raios X são radiações ionizantes, utilizadas no processamento de materiais em escala industrial. Os raios gama e raios X são radiações eletromagnéticas, com propriedades básicas de absorção representadas pela diminuição exponencial nas intensidades das radiações que ao passarem pela matéria, propiciam maiores poderes de penetração, se comparadas aos feixes de elétrons como mostra a Figura 03.

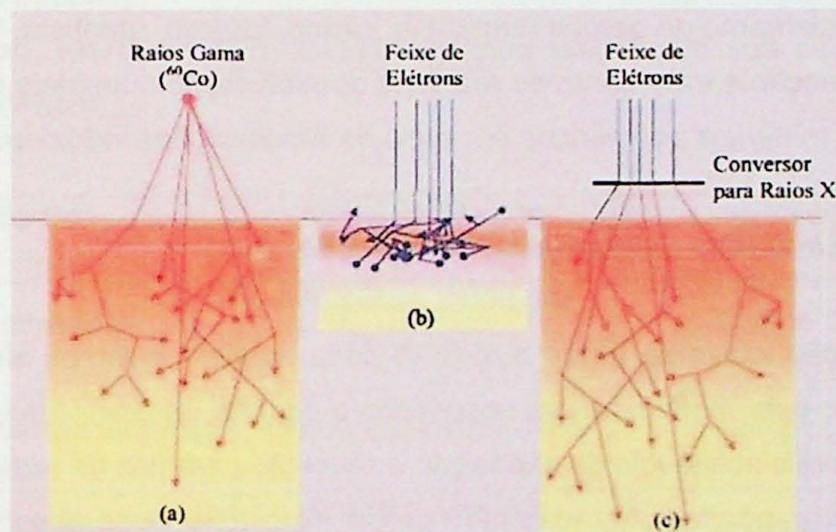


Figura 03. Penetração e interação das radiações com a matéria: (a) raios gama provenientes dos radioisótopos, (b) feixe de elétrons e (c) raios X, provenientes dos aceleradores industriais de elétrons (Calvo 2005).

### 3.9. Irradiador de Multipropósito de Cobalto-60 IPEN-CNEN/SP

O Irradiador de Multipropósito de Cobalto-60 do Instituto de Pesquisas Nucleares e Energéticas-Comissão Nacional de Energia Nuclear de São Paulo IPEN-CNEN/SP, construído no período de 2001 a 2005, é do tipo compacto e possui 32 fontes de Cobalto-60.

Este irradiador localiza-se no Centro de Tecnologia das Radiações-CTR do IPEN e permite o processamento de lotes adequados para estudos de otimização de produção em

escala industrial como também o treinamento de coordenadores de operação e manutenção e supervisores de radioproteção (Calvo 2005).

A radiação gama emitida por radioisótopos transferem suas energias, por meio de interações com os elétrons das órbitas dos átomos que constituem os produtos ou amostras, provocando a excitação desses elétrons para níveis de energia superiores ou os arrancando de suas órbitas (ionização), com energia para interagirem com elétrons orbitais de outros átomos. Os produtos da ionização (íons, elétrons secundários, átomos e moléculas excitadas) são os responsáveis pelos efeitos físicos, químicos e biológicos nos materiais irradiados (Calvo 2005).

Calvo (2005), define possíveis usos para o irradiador, dentre eles:

- esterilizar produtos médicos, cirúrgicos, biológicos e farmacêuticos;
- desinfestação e preservação de produtos alimentícios, plantas ornamentais e frutas;
- produtos de aplicação na agricultura (grãos e cereais);
- esterilização de tecidos biológicos para implantes cirúrgicos;
- beneficiamento de gemas (turmalina, citrino, topázio, ametista, variedades de quartzo);
- desinfecção e tratamento de resíduos domésticos e industriais e lixo hospitalar e
- novos materiais poliméricos por meio de modificações induzidas pela radiação.

### **3.10. Unidades relacionadas a Radiação**

A radiação ionizante (raios X,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) pode causar diversos efeitos quando aplicada a matéria. Por este motivo, fez-se necessário a criação de grandezas para quantificar efeitos, tempos e níveis aceitáveis de exposição a radiação para fins de radioproteção.

Existem grandezas utilizadas para definir exposição, dose absorvida e dose equivalente. Neste estudo utiliza-se a grandeza para dose absorvida que é definida como a quantidade de energia depositada pela radiação ionizante na matéria num determinado volume conhecido (Costa et al 1986).

As unidades aplicadas para dose absorvida são:

- Sistema internacional de unidades: J/kg
- Unidade antiga: *rad* (*Radiation Absorbed Dose*)
- Unidade nova: *Gray* (Gy)

A Tabela 02 relaciona as unidades de grandeza radiológicas.

Grandezas	Símbolo	Unidade Antiga			Unidade Nova			A unidade antiga vale	A unidade nova vale
		Nome	Símbolo	Valor	Nome	Símbolo	Valor		
Exposição	X	Roentgen	R	$2,58 \times 10^{-4}$ C/kg	Coulomb quilograma	C/kg	1C/kg	$2,58 \times 10^{-4}$ C/kg	$3,88 \times 10^3$ R
Dose Absorvida	D	rad	rad	$10^{-2}$ J/kg	Gray	Gy	1J/kg	$10^{-2}$ Gy	100rad
Dose Equivalente	H	rem	rem	$10^{-2}$ J/kg.Q.N	Sievert	Sv	J/kg.Q.N	$10^{-2}$ Sv	100rem

Tabela 02. Unidades radiológicas (Costa et al 1986).

### 3.11. Causas de Cor

Nassau (1978) define 4 teorias físicas para a formação das cores nos minerais: Campo cristalino, Orbital molecular, Teoria das Bandas e Física Óptica. Classificação esta que vai além do tradicional idiocromático (self-colored causado por um elemento predominante), alocromático (other-colored causado por uma impureza), e pseudocromático (false-colored causado por efeitos ópticos).

Na tabela abaixo, Nassau (1978) relacionou cada teoria com sua causa de cor e os minerais correspondentes.

Causa de Cor	Minerais Típicos	Teoria
Metais de transição	Almandina, Malaquita, Turquesa	Campo Cristalino
Impurezas de metais de transição	Citrino, Esmeralda, Rubi	Campo Cristalino
Centros de Cor	Ametista, Fluorita, Quartzo Fumê	Campo Cristalino
Transferência de carga	Safira, Crocoita, Lazurita	Orbital Molecular
Materiais Orgânicos	Âmbar, Coral, Grafite	Orbital Molecular
Condutores	Cobre, Ferro, Prata	Teoria das Bandas
Semicondutores	Galena, Proustita, Piritita, Enxofre	Teoria das Bandas
Semicondutores "dopados"	Diamante azul e amarelo	Teoria das Bandas
Dispersão	"Fogo" nas gemas facetadas	Física Óptica

Esparlhamento	Pedras-da-lua, "Estrelas" e "Olhos"	Física Óptica
Interferência	Calcopirita iridescente	Física Óptica
Difração	Opala	Física Óptica

Tabela 03. Os 12 tipos de cor em minerais (Nassau 1978).

### 3.11.1. Teoria do Campo Cristalino

A teoria do Campo cristalino explica as cores idiocromáticas e alocromáticas, sendo a cor relacionada a influência do campo cristalino sobre elementos com elétrons desemparelhados (elementos de transição), presentes como elementos predominantes ou como impurezas e também a formação dos centros de cor.

### 3.11.2. Centros de Cor

Centros de cor envolvem dois átomos, onde um dos elétrons é retirado originando um elétron sem par que produz cor pela absorção da luz em estados de excitação, que não precisa se localizar em um íon de elemento de transição, pois sob certas circunstâncias pode estar localizado em um elemento não transitório impuro ou em um defeito cristalino como uma vacância.

Se um elétron está presente em uma vacância, chama-se "electron" centro de cor e se está faltando um elétron onde geralmente há um par de elétrons, chama-se "hole" centro de cor, ou seja, centro de cor tipo elétron e centro de cor tipo buraco (Nassau 1978).

Para que exista um centro de cor, é necessário que haja um "hole" centro de cor, ou seja que expulsou um elétron e um centro de cor receptor para assim originar um "electron" centro de cor. A irradiação portanto emite energia suficiente para mover o elétron do elemento que produz a cor para o "hole" centro de cor. Se esta situação não ocorrer, o elétron excitado, retorna ao lugar de origem e o material permanece sem mudança de cor (Nassau 1980).

O quartzo possui estrutura cristalina constituída por íons de Si e O, com elétrons emparelhados com níveis de energia preenchidos como mostra a Figura 04 da formação de centro de cor no quartzo quando submetido à irradiação.

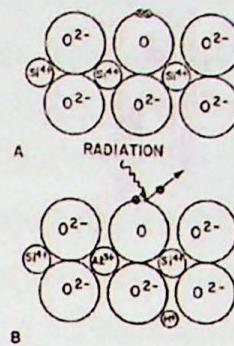


Figura 04. Formação de centro de cor quando submetido a irradiação (Nassau 1978).

O ganho de cor em quartzo está ligado a substituição de  $\text{Si}^{4+}$  por  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{OH}^-$  ou  $\text{H}_2\text{O}$  (Figura 05). Tal substituição gera desequilíbrio eletrônico devido as diferentes valências, o que causa um restabelecimento de equilíbrio por íons monovalentes como  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{H}^+$  que compensam eletronicamente (Rossman 1994).

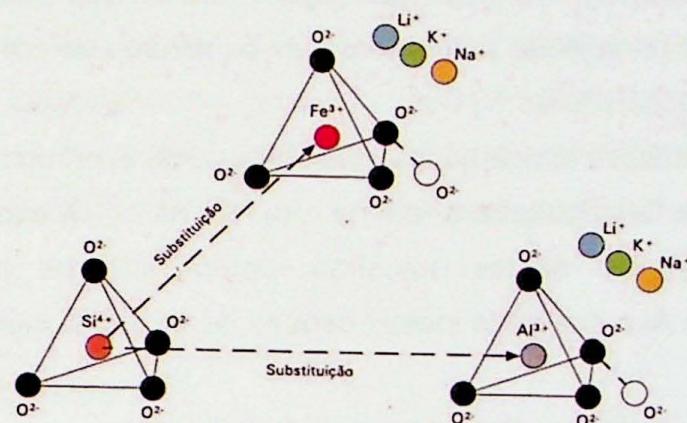
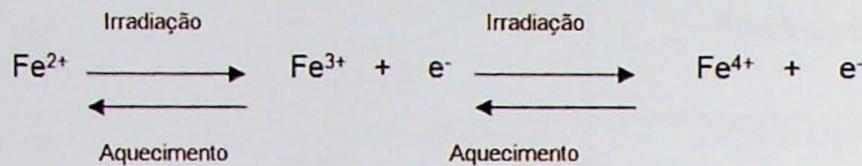


Figura 05. Substituição de Si por Fe ou Al (Castañeda et al 2001).

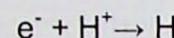
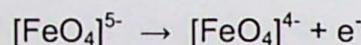
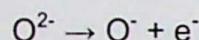
O sódio e o potássio relacionam-se principalmente as causas de cor em quartzos sintéticos enquanto o lítio e o hidrogênio são os elementos que junto do ferro e do alumínio, causam cor às variedades naturais de quartzo como ametista, citrino e quartzo fumê (Rossman 1994).

Na maior parte dos quartzos naturais, o Al é o elemento transitório, porém não produz cor desde que hajam elétrons sem par. Este quartzo exposto a irradiação tanto artificial (raios x, raios gama, neutrons, etc.) quanto a radiação natural, no seu meio geológico, durante alguns milhares de anos, poderá fazer com que os elétrons fiquem sem par (Nassau 1978).

O centro de cor da ametista deve-se a substituição de  $\text{Fe}^{3+}$ . A reação apresentada a seguir mostra as mudanças causadas pela irradiação e pelo aquecimento.



O quartzo incolor que adquire a coloração roxa ao ser irradiado sofre uma oxidação que transforma  $[\text{FeO}_4]^{5-}$  em  $[\text{FeO}_4]^{4-}$  que absorve luz e age como centro de cor. As equações a seguir mostram como o quartzo desenvolve a cor roxa.



Nassau (1978) chama a atenção para o fato de que mesmo níveis baixos de radiação como os da luz ultravioleta podem produzir os centros de cor e que algumas cores não são estáveis se expostas à luz.

Güttler et al 2009 indica que a coloração verde é produzida por substituição de OH ou por ligações de O, e ressalta o fato de que não há ainda explicações detalhadas para tons de cinza presentes nestas amostras, porém análises químicas mostraram grandes quantidades de Al o que pode indicar centros de cor deste elemento.

### 3.11.3. Causa de Cor Relacionada a Irradiação

Segundo Favacho (2007), não há até o momento apenas uma maneira de explicar a cor em gemas quando submetidas a qualquer tipo de radiação. Porém a combinação de três tipos de mecanismos tem sido identificados como causadores de cor nas gemas irradiadas: Íons metálicos dispersos, Transferência de carga e Centros de cor.

#### -Íons metálicos dispersos

A presença de impurezas, quantidades de átomos que não fazem parte da composição química global de um determinado mineral, em sítios na estrutura é o que determinará a origem de certas cores após a irradiação.

Os mais comuns encontrados em gemas são: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Al, Co, Ni e Cu. Nos quartzos irradiados, o Fe e o Al são fundamentais.

#### -Transferência de Carga

Existem diversas maneiras nas quais os elétrons podem saltar de um átomo para outro e assim resultar em cores exuberantes em minerais irradiados. Em síntese, o que ocorre são reações naturais de simples troca de elétrons por parte dos íons na tentativa de restabelecer o balanço eletrônico frente a causas como irradiações naturais das rochas ou artificiais em laboratórios, calor e até mesmo incidência da luz natural (raios UV) são responsáveis por este fenômeno.

Duas variedades gemológicas são relacionadas a este: o heliodoro e a ametista. Nas ametistas irradiadas, o mecanismo sugere que o violeta resulta da absorção devido a transferência de carga existente entre  $O^{2-}$  e  $Fe^{3+}$ , dando origem a um ferro de valência incomum ( $Fe^{4+}$ ) após irradiação natural ou artificial.

#### -Centros de Cor

Neste fenômeno, a absorção da luz no espectro visível não está intrinsecamente ligada aos elétrons, mas sim a defeitos causados pela ausência dos mesmos, o que se denominam vacâncias. Tais vacâncias são resultantes da radiação natural sobre certos minerais gemológicos que estejam localizados em depósitos contendo isótopos radioativos de U, Th, e K. Em laboratórios, através da radiação artificial, podem-se ativar estas vacâncias.

Resumindo, centro de cor é um defeito que causa absorção da luz e que é afetado pela irradiação.

### **3.12. Irradiação de Quartzo**

Segundo Kohn & Benjamin (1961), em seus experimentos com minerais de sílica irradiados por radiação gama de cobalto-60, a cor depende da presença de defeitos na estrutura com uma ou mais impurezas de íons trivalentes, como por exemplo, o Al e o Fe.

As ágatas bandadas tem seu bandamento acentuado, pois as partes opacas permanecem brancas e as transparentes tornam-se fumê. As opalas mesmo quando ricas em Fe não ganham cor, peridoto e obsidiana também não são afetados e não ganham cor.

Amostras de quartzo hidrotermal do Brasil, normalmente se tornam fumê ou citrino e amostras de ametista e quartzo fumê de variadas regiões, quando descoloridas por aquecimento e submetidas a irradiação, recuperam sua coloração original.

Kohn & Benjamin (1961), afirmam ainda que todas as amostras submetidas a radiação gama que adquirem cor, quando expostas a luz ultravioleta começam a clarear e perder a cor. No caso de ametistas naturais, períodos de uma semana de exposição à luz ultravioleta causam um clareamento parcial.

Segundo Rossman & Hebert (2008), nos estudos sobre o quartzo verde da Mina de Ametista de *Thunder Bay* no Canadá, o quartzo verde escuro tem maiores quantidades de água que sua variedade verde mais clara, o incolor e a ametista. E o aparecimento de picos de hidroxila no infravermelho se limita às variedades incolor e ametista.

O quartzo desta mina é de origem hidrotermal e sua variação verde está restrita a uma área de 10m de diâmetro na zona leste da mina onde os autores acreditam que seja a localização da entrada dos fluídos que preencheram a falha existente no local e a mineralização segue gradualmente com quartzo incolor a tons de quartzo verde, verde acinzentado, passando novamente por incolor e tons de verde com tons de roxo até o roxo forte.

Nos experimentos de aquecimento e irradiação das amostras de quartzo incolor, quartzo verde, ametista e do quartzo verde com tons de cinza rico em  $H_2O$ , não houve a recuperação da cor roxa, mas sim o desenvolvimento de tons de fumê, tom acinzentado ou um pálido roxo.

Rossman & Hebert (2008), evidenciam o fato de que a ametista da mina de *Thunder Bay* aquecida não produz quartzo verde e que esta cor seria resultante de características intrínsecas do sistema de cristalização da mina. A presença de impurezas de Al no quartzo verde produz tons amarronzados o que estaria ligado a variações do quartzo fumê.

Enfim os autores ressaltam a importância do ambiente nas cores resultantes dos cristais de quartzo e que a cor verde não é resultado secundário de aquecimento de cristais de ametista, mas sim uma variação da cor do quartzo, resultante da radiação do ambiente, características químicas, quantidade de exposição à radiação e moléculas de água presentes na constituição dos cristais.

### 3.13. Cor

Historicamente as cores tem grande significado nas diferentes culturas e através do tempo. A cor roxa ou violeta, por exemplo, por não ser facilmente produzida na antiguidade, costumava ser utilizada para o tingimento de roupas de faraós e do sacerdócio, representando poder, riqueza e ligação com o divino (Pedrosa 1989).

Para alguns, a cor é simplesmente uma percepção visual causada por um feixe de fôtons na retina, porém para os gemólogos a cor é a característica que mais chama a atenção nas gemas e nos minerais, representando beleza, raridade e esplendor.

Está ligada a diferentes comprimentos de onda do espectro eletromagnético e é percebida pelas pessoas no espectro visível (Figura 06).

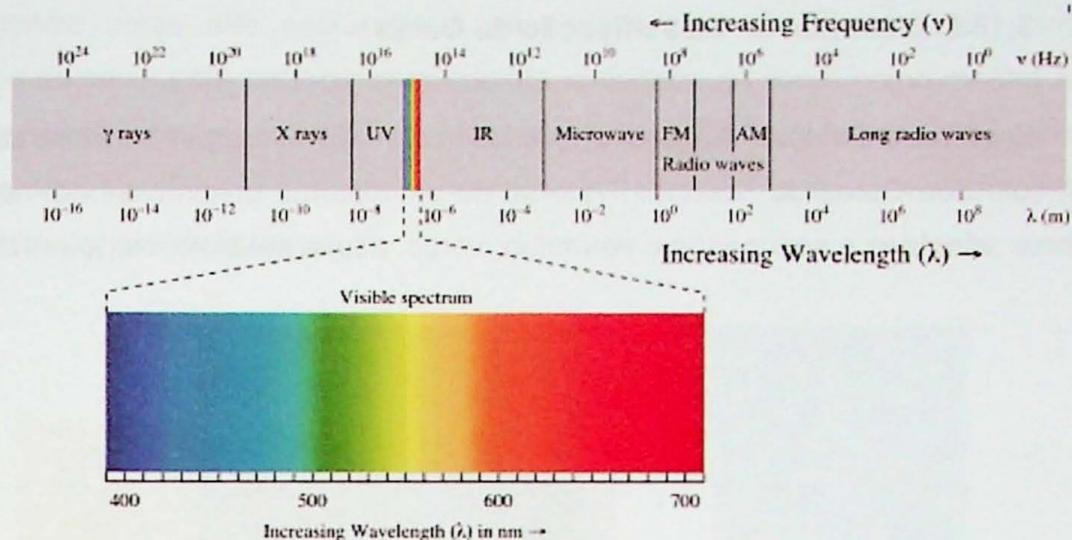


Figura 06. Espectro eletromagnético com detalhe do espectro visível.

### 3.13.1. Cores

#### - Cores Primárias

São cores indecomponíveis que misturadas umas as outras em proporções variáveis, formam todas as cores do espectro.

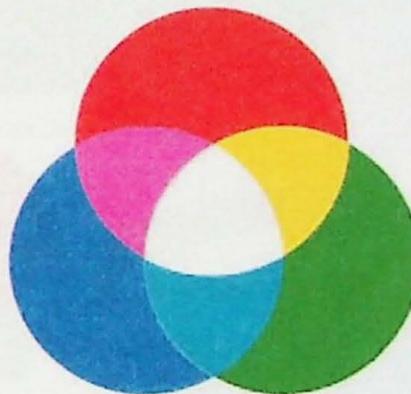


Figura 07. Cores Primárias (Pedrosa 1989).

#### - Cores Secundárias

São cores formadas em equilíbrio óptico por duas cores primárias.

#### - Cores Terciárias

São cores intermediárias entre uma cor secundária e qualquer cor primária que lhe dê origem.

#### - Cores Quentes

Compostas pelo vermelho, amarelo e as demais cores em que estas predominem.

#### - Cores Fria

Compostas pelo azul, verde e as demais cores em que estes predominem.

### 3.13.2. Sistemas de Classificação de Cores

O primeiro sistema de classificação das cores foi criado por Newton, sendo denominado Círculo das Cores de Newton. Trata-se de um sistema unidimensional representado pelas cores primárias e secundárias: vermelho, verde, azul e amarelo, ciano e magenta.

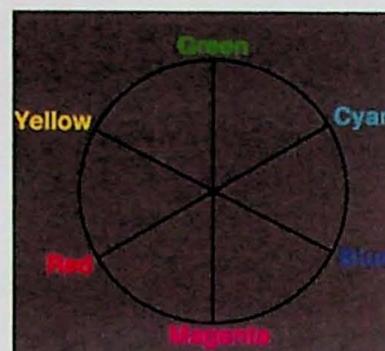


Figura 08. Círculo das cores de Newton (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/newtcol.html>).

Em meados do século 20, Albert H. Munsell adotou o conceito de espaço da cor e criou um sistema com variação de brilho e saturação dos tons.

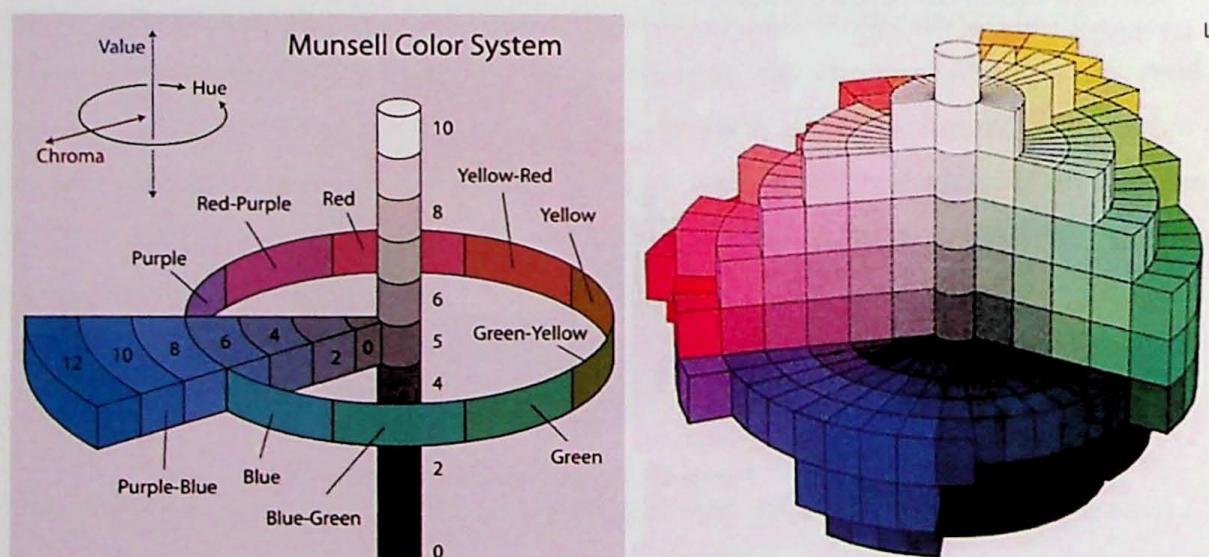


Figura 09. Sistema de cores de Munsell ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_cores\\_de\\_Munsell](http://pt.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_cores_de_Munsell)).

Este sistema possui uma enorme variação de cores devido a combinação da claridade, graduada de 0 a 10 (do preto ao branco) e da saturação dos tons (de claro a escuro) como se pode observar na Figura 09.

Outro sistema de Classificação existente é o CMYK que classifica as cores segundo a quantidade de unidades de ciano (C), magenta (M), amarelo (Y) e preto (K) que dão origem a cor observada. Este sistema é largamente utilizado na área gráfica, impressoras e fotocopiadoras por reproduzir a maior quantidade de cores do espectro visível.

Estas quatro cores são sobrepostas umas as outras em quantidades variadas e combinações diversas para produzir uma enorme variedade de cores como mostra a Figura 10. Portanto se uma gema possui 60 unidades de ciano (C), 60 unidades de magenta (M) e 30 unidades de preto (P), significa que 3 camadas independentes de cor estão sobrepostas para produzir a cor exata da gema.

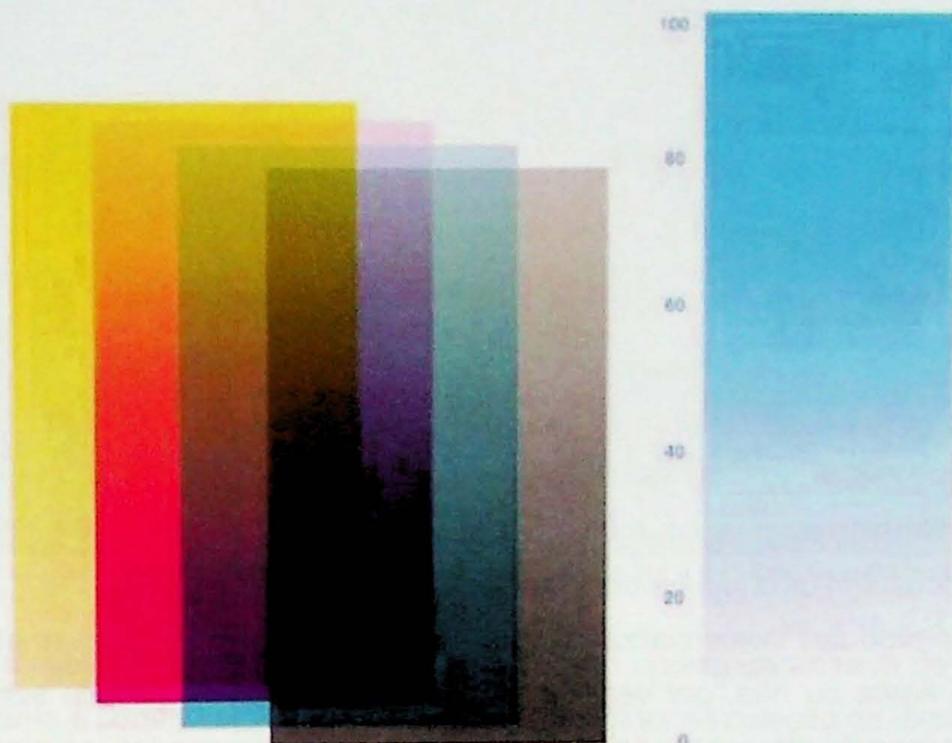


Figura 10. Sistema de Classificação das Cores CMYK (Emery 1994).

#### 4. Trabalho de Campo

O trabalho de campo foi realizado somente na cidade de Ametista do Sul-RS, no período de 6 a 11 de julho de 2010.

O acesso à Ametista do Sul (Figura 11), partindo-se de São Paulo, faz-se pela Rodovia Régis Bittencourt - BR 376, BR 101, SC 470 até Gaspar de onde se pega a SC 470, BR 282 até Chapecó, BR 480, SC 468 em direção a Nonoai, RS 322 em direção a Planalto e o acesso à cidade de Ametista do Sul é feito por Planalto por estradas de terra sem nenhum tipo de sinalização e que estão em obra de pavimentação.



Figura 11. Acesso a Ametista do Sul (<http://maps.google.com/maps>).

A economia da cidade gira em torno do comércio e do turismo. Segundo a COOGAMAI, mais de 95% dos moradores estão ligados a exploração, beneficiamento e comércio de ametista. Diversas famílias que são donas de garimpo, possuem firmas para o beneficiamento dos geodos (que precisam ser serrados, polidos, etc) e muitas vezes também possuem uma loja na cidade ou uma exportadora.

Os produtos comercializados são principalmente geodos de ametista, citrino, com borda de ágata ou não, por vezes com cristais de calcita e selenita sobre os cristais de quartzo, peças de artesanato com pedaços quebrados dos geodos, com pontas dos cristais de quartzo (ametista ou citrino), com quartzo (ametista ou citrino) polido, peças de diversos tipos de rochas da região. Há algumas peças de coleção, pedras lapidadas tanto ametista e citrino quanto variadas pedras trazidas por comerciantes de Minas Gerais que as trocam por mercadoria da região.

A cidade recebe muitos turistas, curiosos, esotéricos, religiosos interessados na igreja que tem suas paredes cobertas por mais de 40 toneladas de cristais de ametista, citrino e quartzo incolor (Foto 04), e também excursões de turmas de geologia da UFRJ e UFRGS.

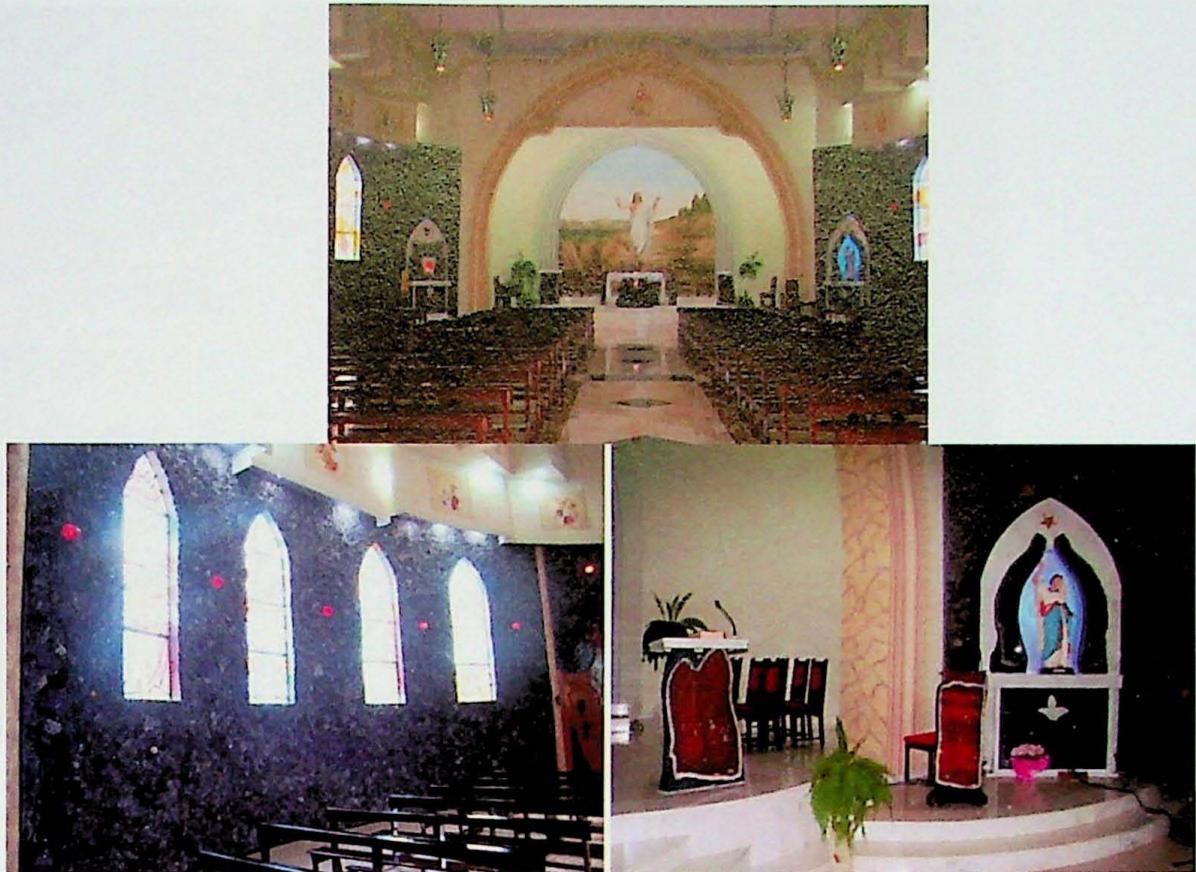


Foto 04. Vista geral do salão da igreja de Ametista do Sul e detalhes da parede e do altar.

O “Ametista Parque Museu” localizado do lado oposto da entrada da cidade possui um interessante e pequeno acervo de minerais e amostras de coleção da região e do mundo e tem entrada para galerias desativadas onde se pode observar os materiais utilizados na exploração e retirada de geodos, geodos nas paredes das galerias (Foto 05) e a saída do museu dá acesso a um mirante de onde se observam algumas entradas de minas vizinhas, todas na mesma cota, e pilhas enormes de rejeito jogado nas encostas dos morros (Foto 06).

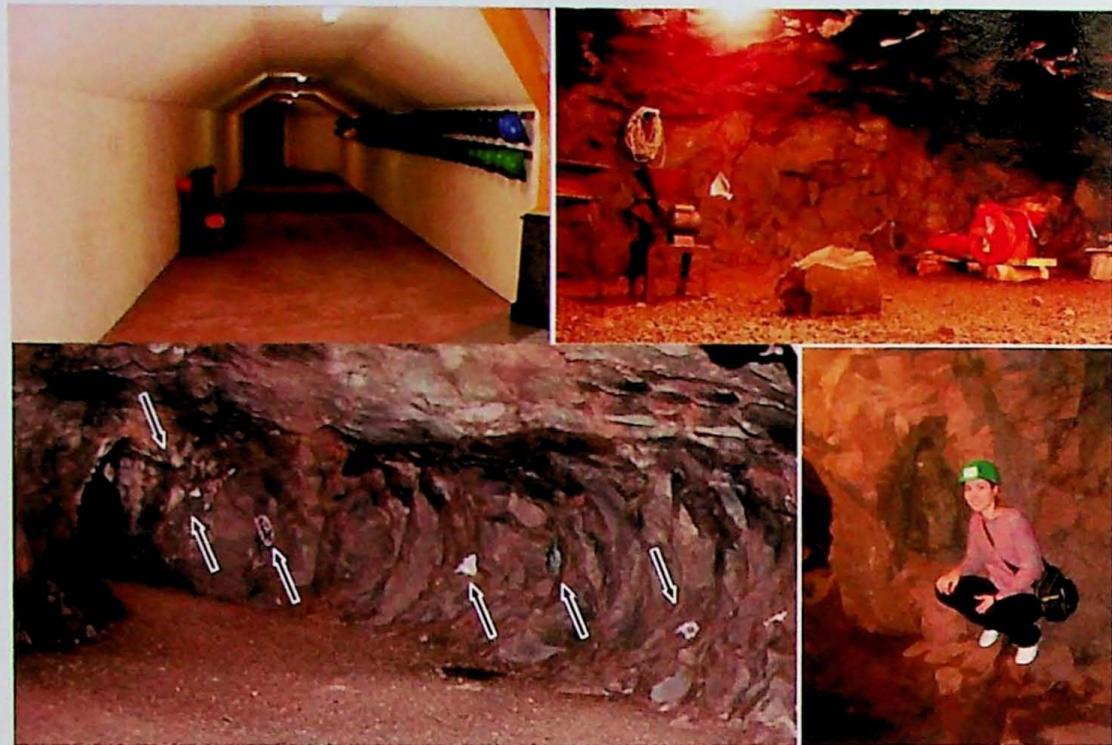


Foto 05. Entrada do salão do museu para as galerias da mina. Exposição dos materiais utilizados na extração dos geodos. Geodos abertos nas paredes da galeria e detalhe de geodo fechado em um dos pilares da galeria.



Foto 06. Morros com entradas de garimpos e suas pilhas de rejeito.

Com o apoio do Engenheiro de Minas da GOOGAMAI, Anderson Oliveira da Silva, foi possível a visita de um dos garimpos exemplares da região, com ventilação, fiação protegida para iluminação, equipamentos mecânicos protegidos, que está sob os cuidados do senhor Valdair Garlett, responsável legal da mina. A Foto 07 mostra as entradas de galerias do garimpo e as galerias percorridas. Neste garimpo trabalham cinco garimpeiros com produção estimada de 1.200 a 1.500kg por mês.

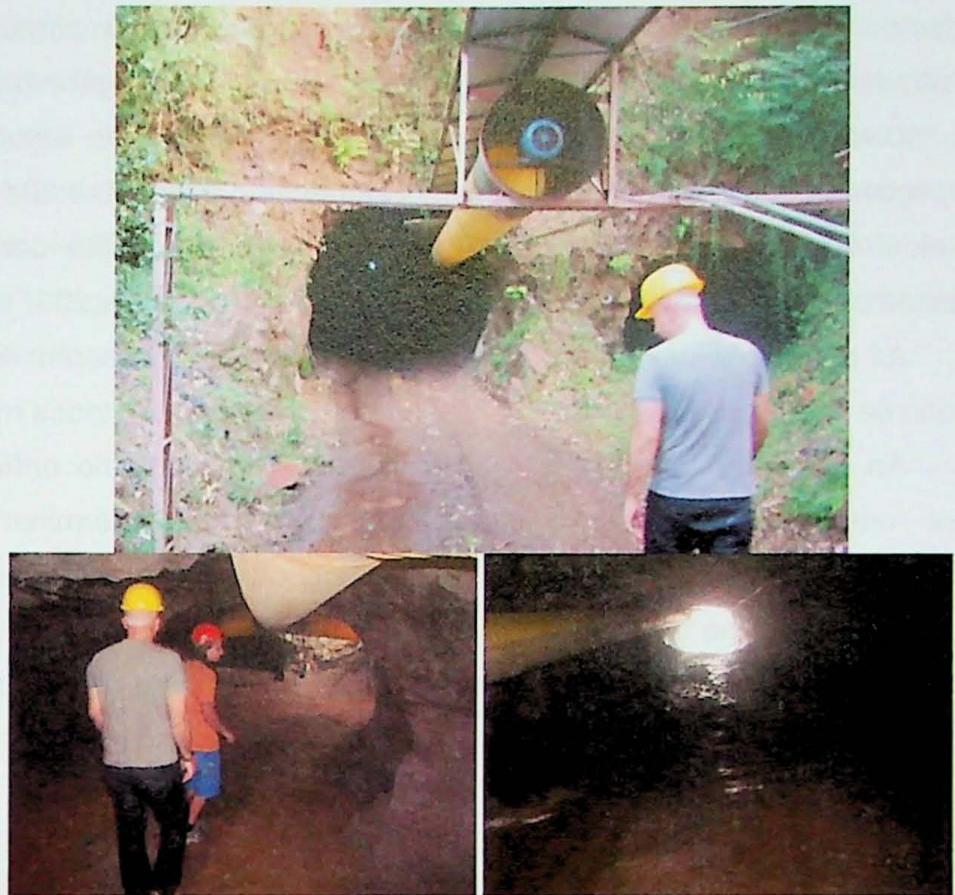


Foto 07. Entrada da galeria do garimpo visitado. Detalhe do espaço para movimentação de pessoas e retirada dos geodos. Detalhe da organização de ventilação e fiação.

Durante a visita foi observado o processo de retirada dos geodos por um garimpeiro. Foi notado, conforme se vê na Foto 08, que o trabalhador não utiliza equipamentos de segurança como protetores auriculares, óculos de proteção e luvas, apesar destes estarem à disposição no próprio garimpo.

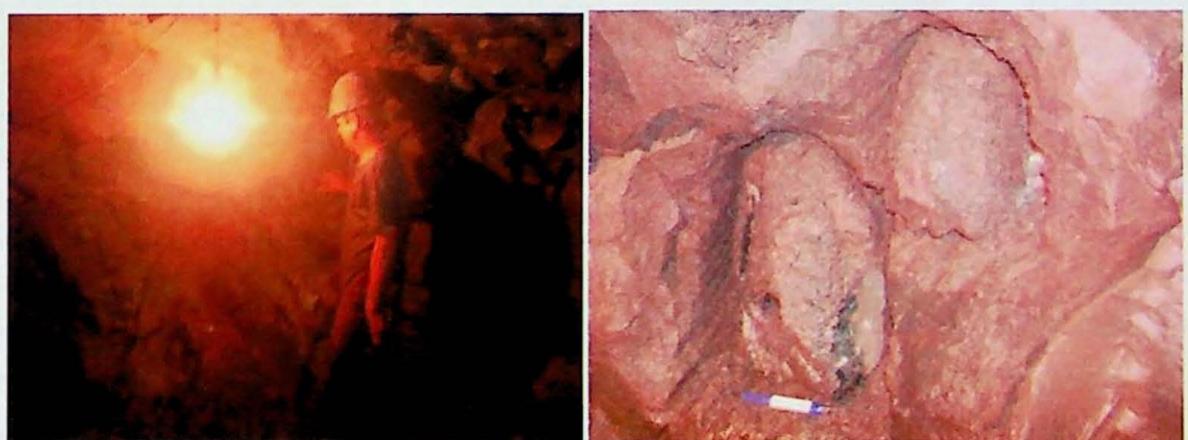


Foto 08. Garimpeiro retirando geodos. Detalhe dos geodos.

Em meio à pilha de rejeitos é possível observar diversos fragmentos de cristais de quartzo incolor, quartzo verde, quartzo levemente arroxeados nas pontas dos cristais e

bordas de geodos de calcedônia e ágata. A maior parte das amostras coletadas em campo foi retirada dos cristais descartados nas pilhas de rejeito deste garimpo.

Cada garimpeiro é responsável por uma “frente”, que seria o final de uma das bifurcações abertas nas galerias. Toda a perfuração para a retirada dos geodos é feita com martelete e água, o que reduz muito a produção de pó de sílica dentro da mina, porém o índice de silicose ainda é um dos mais altos do país (Pagnossin 2007).

As detonações ainda são feitas com pólvora e salitre, porém os garimpeiros tem um período de dois anos para se adaptar às novas regras para métodos mais seguros.

Ao encontrar um geodo, o garimpeiro faz um pequeno orifício em sua parede e insere uma lâmpada para analisar a cor e assim determinar um valor e se é economicamente interessante retirar a peça. Geodos com preenchimento incolor geralmente são abandonados no local. Para retirar o geodo, o garimpeiro o circunda com o martelete formando marcas facilmente reconhecidas posteriormente na rocha como mostra a Foto 09, e a sua extração demora em média de 1 a 3 dias, dependendo de sua proporção.



Foto 09. Detalhe das marcas deixadas na rocha pelo martelete.



Foto 10. Contato do derrame maciço mineralizado e do teto quebradiço, marcado por linha preta na foto.

Nas galerias do mina é possível identificar o contato dos derrames (maciço-mineralizado e quebradiço-teto) e os garimpeiros se guiam por este aspecto geológico (Foto 10).

Não são realizadas vendas na mina, pois a produção já tem destino definido, indo diretamente para a exportação ou para atender pedidos de lojas de outras cidades ou as firmas de beneficiamento de onde seguem também para lojas a varejo, atacado e exportação.

O beneficiamento consiste basicamente na limpeza, corte na melhor proporção, formando as chamadas “capelas” (Foto 11), conserto do orifício feito pelo garimpeiro e polimento das bordas do geodo. Para as peças que normalmente são montadas para ficar em pé, é feito um pé de cimento (o que causa o aumento do peso sendo as peças vendidas por kg). Por último, é feita a pintura da parte externa do geodo, deixando assim a peça com uma cor uniforme e segundo os vendedores, evitando que a fina capa de argila presente ao redor das geodos, expanda e rache ao ser exposta a chuva e sol.



Foto 11. Exemplo de “capelas”.

Não existem dados precisos de quantos garimpos estão ativos e de qual seria a produção total de Ametista do Sul, porém a COOGAMAI estima que sejam produzidas aproximadamente 400 t/mês de material, gerando cerca de 20.000 t/mês de rejeito. Da produção total, 80% é exportada para a China e o restante para Alemanha, Espanha, EUA, Itália e uma pequena parte fica no Brasil.

## 5. Exportação

O Instituto Brasileiro de Gemas & Metais Preciosos - IBGM conceitua a cadeia produtiva de gemas, jóias e afins desde a extração mineral, a indústria de lapidação, artefatos de pedras, a indústria joalheira e de folheados, bijuterias, os insumos, matérias primas e as máquinas e equipamentos usados no processo de produção, até as estratégias de marketing e a incorporação do design aos produtos.

Sendo o Brasil conhecido internacionalmente pela grande variedade de pedras preciosas em seu solo, produzindo em larga escala ametista, citrino, ágata, turmalina, água-marinha, topázio e cristal de quartzo, e representando o segundo maior produtor de esmeraldas, o único de topázio imperial e até recentemente turmalina “Paraíba”, estima-se que o país seja responsável por 1/3 do volume das gemas no mundo, sem considerar o diamante, o rubi e a safira (IBGM 2010). A produção de pedras preciosas é importante nos estados de Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Bahia, Goiás, Pará e Tocantins.

O campo econômico de produção e beneficiamento (artesanato, lapidação, produção de jóias) de material gemológico, tem grandes possibilidades de crescimento no país, porém a

informalidade e os desvios são grandes devido às altas cargas tributárias incidentes sobre o setor. O fato de os produtos terem pequeno volume e possuírem valores altos, e a produção e comercialização ocorrer por meio de pequenos estabelecimentos e indivíduos de variadas regiões do país, fazem com que a fiscalização seja complicada e tenha custos muito altos.

Embora historicamente o comércio de ouro e gemas tenha trazido muito lucro, somente nos últimos dez anos, através de uma parceria da IBGM com a APEX-Brasil e a implementação do Programa Setorial Integrado de Apoio as Exportações de Gemas e Jóias é que se pode agregar mais valor aos produtos.

Ainda segundo a IBGM, as exportações brasileiras em 2009 de pedras brutas foram principalmente para China, Índia, EUA, Alemanha, Tailândia e Japão. Já as pedras lapidadas foram para os EUA, China, Alemanha, Reino Unido, Japão, Suíça, Itália e Índia.

Para os artefatos e obras de pedra, os principais importadores são os EUA, Alemanha, Reino Unido, China, França, Japão, Espanha, Itália, Arábia Saudita e Canadá.

## **6. Materiais e Métodos**

### **6.1. Amostras Trabalhadas**

#### **6.1.1. Ametista**

##### **- Amostras de Ametista do Sul**

São pontas de cristais de ametista, de coloração roxa uniforme e de qualidade extra que denota uma coloração violeta forte. As 35 pontas foram divididas em 3 grupos de acordo com a intensidade da cor.

##### **- Amostras de Artigas**

São 47 pedaços de ametista de qualidade média que denota coloração roxa mediana, divididos em 10 grupos conforme a intensidade da cor. Adicionalmente 25 pedaços de ametista de qualidade média foram divididos em 5 grupos conforme a intensidade da cor.

#### **6.1.2. Quartzo Verde**

##### **- Amostras de Ametista do Sul**

São 120 pedaços de quartzo rolado, adquiridos incolores e irradiados no IPEN, divididos em 7 grupos conforme intensidade da cor.

##### **- Amostras de Artigas**

São 13 pedaços de quartzo rolado, adquiridos já irradiados, divididos em 2 grupos conforme intensidade da cor.

### **6.1.3. Amostras adquiridas em campo**

Dentre as diversas amostras adquiridas em campo, 25 foram escolhidas para serem tratadas com radiação gama no IPEN.

São 18 amostras de quartzo incolor com brilho gorduroso, 3 amostras de quartzo com coloração natural levemente esverdeada e 4 amostras de cristais com ametista de qualidade alta no centro e quartzo com brilho vítreo incolor nas bordas e pontas.

## **6.2. Irradiação das Amostras**

A irradiação das amostras foi feita no IPEN pelo Irradiador de multipropósito do Centro Tecnológico de Radiação do IPEN-CNEN da USP que possui 32 fontes de Cobalto-60, sob responsabilidade do Geólogo Cyro T. Enokihara.

As amostras ou produtos entram no irradiador por um sistema duplo de esteiras o que reduz o tempo de entrada e saída de produtos. As paredes que isolam o irradiador são de concreto assim como a porta giratória que é usada para entrada e saída dos funcionários e operadores.

A piscina de 7m de lâmina d'água onde se localizam as canetas de cobalto-60, isolam a radiação proveniente destas até 1,5m da superfície quando o irradiador é acessado pelos operadores (informação verbal dos funcionários). As Fotos 12, 13 e 14 mostram o irradiador e detalhes da espessura da porta, localização da piscina e das canetas de Cobalto-60.



Foto 12. Irradiador de Multipropósito do IPEN.

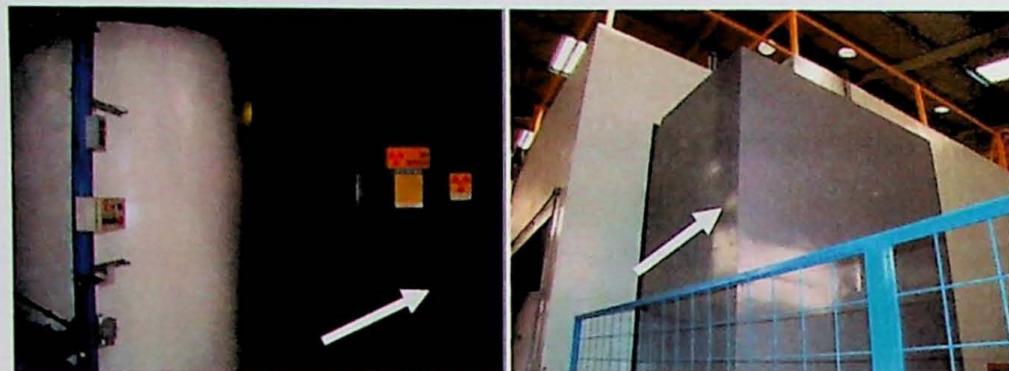


Foto 13. Porta do Irradiador aberta (indicada pela seta) e detalhe de sua espessura (indicada pela seta).

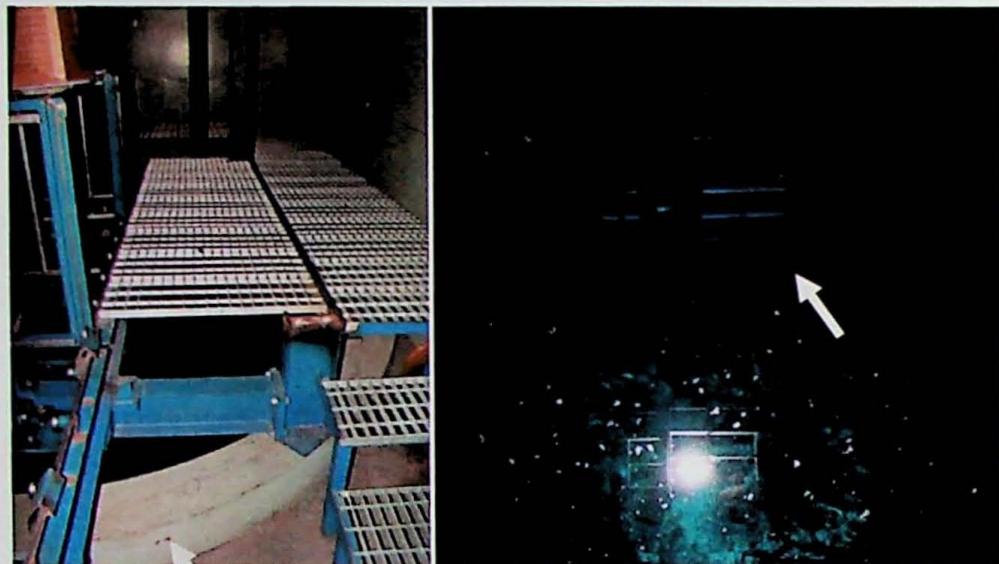


Foto 14. Piscina onde se localizam as canetas de Cobalto-60 (indicada pela seta) e detalhe das canetas dentro d'água (indicada pela seta).

Quando o irradiador está selado e os produtos localizados em seu interior, as canetas são içadas por cabos de aço e assim a radiação afeta os produtos ou amostras, porém estes também podem ser colocados dentro d'água em sacos de metal como mostra a Foto 15 e no caso das amostras tratadas neste trabalho, este foi o procedimento.

A dose de radiação é calculada pelo Geólogo Cyro T. Enokihara conforme o posicionamento dos produtos ou amostras em relação a disposição das canetas de Cobalto-60.



Foto 15. Sacos de metal utilizados para colocar amostras dentro d'água junto as canetas de Cobalto-60.

- Ametista de Ametista do Sul

As ametistas divididas em 3 grupos foram descoloridas no Laboratório de Gemologia da USP e irradiadas com 370 kGy no IPEN e adquiriram novamente as fortes cores roxas, porém com tons de preto que podem ser retiradas através de tratamento térmico.

- Ametista de Artigas

As ametistas divididas em 10 grupos foram descoloridas no Laboratório de Gemologia da USP e irradiadas com 450 kGy e adquiriram novamente a cor roxa característica e alguns cristais ganharam tons mais escuros, puxados para o preto o que pode ser retirado com aquecimento para uniformizar a cor roxa.

As ametistas divididas em 5 grupos foram descoloridas no Laboratório de Gemologia da USP e irradiadas com 370 kGy e adquiriram novamente a cor roxa com algumas amostras com tons marrons que podem ser retirados com aquecimento.

- Quartzo Verde de Ametista do Sul

As amostras de quartzo incolor de Ametista do Sul foram irradiadas no IPEN com 450 kGy e se tornaram verdes. Após serem descoloridas no Laboratório de Gemologia da USP, foram novamente irradiadas com 300 kGy, tornando-se mais uma vez verdes.

- Quartzo Verde de Artigas

O quartzo levemente esverdeado de Artigas foi adquirido já irradiado. Após serem descoloridos no Laboratório de Gemologia da USP, foram irradiados com 460kGy e adquiriram novamente coloração verde.

- Amostras adquiridas em Campo

As amostras adquiridas em campo foram irradiadas no IPEN com 250 kGy e apresentaram reações diversas.

### **6.3. Tratamento Térmico**

O tratamento térmico foi realizado no Laboratório de Gemologia da USP em dois fornos disponíveis: o Rinnai Pratic com temperatura máxima de 330°C e um forno redondo de bancada que atinge até 1.000°C feito no Instituto de Geociências (Foto 16).



Foto 16. Forno redondo de bancada.

Os fornos foram calibrados com um termopar tipo K conectado a um termômetro digital da Minipa MT401A-Digital Thermometer-50~750°C com uma ponta inserida em um cilindro de Berilo perfurado colocado no centro dos fornos para diminuir possíveis oscilações de temperatura.

O forno Rinnai Pratic foi calibrado em todo o seu intervalo de temperatura e o forno de bancada foi calibrado até os 600°C como mostram as tabelas 03 e 04 (no anexo de Tabelas) e os gráficos 01 e 02.

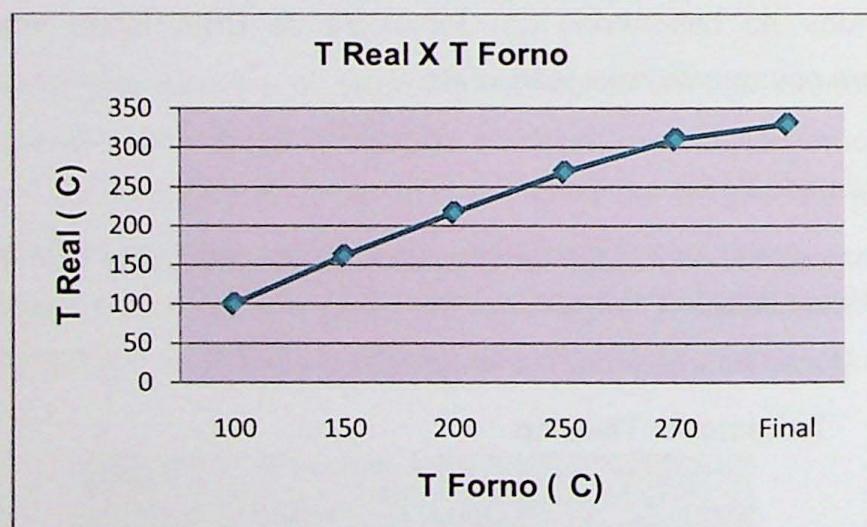


Gráfico 01. Calibração do forno Rinnai Pratic.

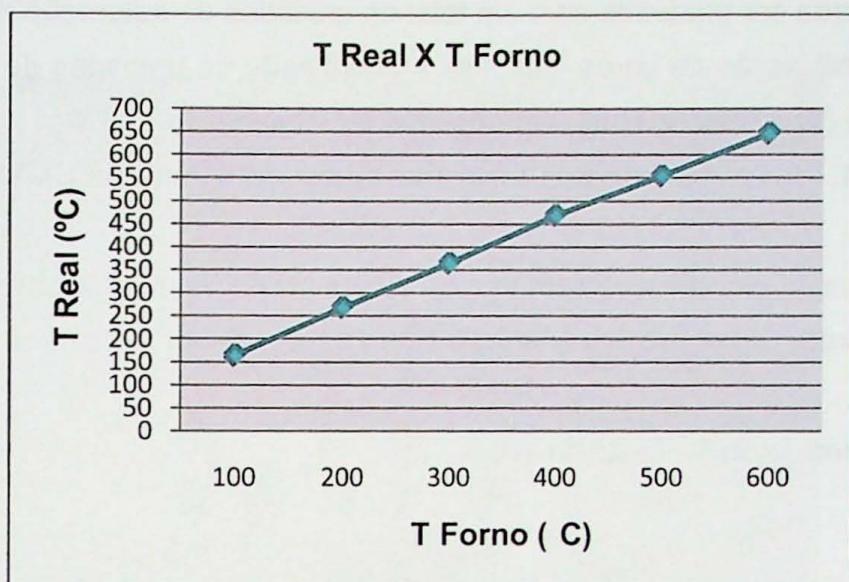


Gráfico 02. Calibração do forno de bancada.

#### - Ametista de Ametista do Sul e Artigas

As amostras de ametista foram submetidas ao aquecimento no forno de bancada até sua total descoloração sempre por volta dos 350-400°C. Este processo foi efetuado com a intenção de irradiar estas amostras incolores para obter a cor roxa novamente e observar e comparar a intensidade das cores.

#### -Quartzo Verde de Ametista do Sul e Artigas

As amostras de quartzo verde foram submetidas ao aquecimento no forno Rinnai Pratic nas temperaturas de 250, 200, 150 e 100°C até sua total descoloração.

Este processo foi efetuado com o propósito de averiguar quanto tempo as amostras levam para perder a cor sob determinada temperatura e conforme sua intensidade de cor. Após descoloração, as amostras foram irradiadas para obter a cor verde novamente e observar e comparar a intensidade das cores.

A Tabela 6 e 7 em anexo mostram o aquecimento das amostras de Artigas e Ametista do Sul respectivamente.

#### 6.4. Classificação da Cor

Existem diversos sistemas de classificação de cor e neste trabalho será utilizado o sistema CMYK, mencionado no item 3.13.2.

A classificação das cores das amostras utilizadas neste trabalho foi feita através do livro Type and Color 2 (Emery 1994) que apresenta uma gama de cores e suas combinações, sendo cada cor graduada com um total de unidades de saturação na própria cor e ao definir uma combinação de cores, defini-se a quantidade de unidades de ciano (C), magenta (M), amarelo (Y) e preto (K) que dão origem a cor observada.

#### 6.4.1. Classificação das Amostras segundo o sistema CMYK

A divisão das amostras em grupos para a classificação das cores foi realizada de acordo com a ordem do grupo de cor mais intensa para o de cor mais fraca.

- Ametista de Ametista do Sul



Foto 17. Amostras de Ametista do Sul divididas em três grupos (tamanho médio de 2cm x 1cm).

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
C	60	60	60
M	80	80	80
K	50	40	30

Tabela 08. Classificação de cor das amostras de ametista de Ametista do Sul.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
C	60	60	60
M	80	80	80
K	60	50	40

Tabela 09. Classificação de cor das amostras de ametista de Ametista do Sul após irradiação sem tratamento térmico para diminuição dos tons de preto.

- Ametista de Artigas



Foto 18. Amostras de Artigas, divididas em dez grupos conforme intensidade da cor (tamanho médio de 4cm x 2cm).

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7	Grupo 8	Grupo 9	Grupo 10
C	60	60	60	49	40	40	40	35	28	10
M	80	80	60	60	60	56	54	40	40	20
K	50	35	20	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 10. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7	Grupo 8	Grupo 9	Grupo 10
C	-	-	55	45	35	35	35	30	25	10
M	-	-	55	55	55	50	50	35	35	15
K	-	-	25	15	10	5	-	-	-	-

Tabela 11. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas após irradiação.

Os grupos 1 e 2 não foram descoloridos e irradiados devido ao fato de possuírem somente uma amostra representante de sua cor.



Foto 19. Amostras de Artigas divididas em cinco grupos conforme intensidade da cor (tamanho médio de 5cm x 2cm).

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
C	60	50	50	50	50
M	80	60	50	46	43

Tabela 12. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5
C	-	25	30	35	18
M	-	40	40	40	40

Tabela 13. Classificação de cor das amostras de ametista de Artigas após irradiação.

O grupo 1 não foi descolorido e irradiado devido ao fato de possuir somente uma amostra representante de sua cor.

- Quartzo Verde de Ametista do Sul



Foto 20. Amostras de quartzo verde de Ametista do Sul divididas em sete grupos (Sendo grupo 1 primeiro a esq.- tamanho médio de 3cm x 2cm).

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7
C	40	40	40	40	40	23	28
Y	100	80	78	70	60	60	37
K	50	40	39	35	30	30	17

Tabela 14. Classificação das amostras de quartzo verde de Ametista do Sul após irradiação.

	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4	Grupo 5	Grupo 6	Grupo 7
C	45	40	35	40	38	20	25
Y	95	85	75	70	58	57	35
K	45	42	37	33	28	27	15

Tabela 15. Classificação das amostras de quartzo verde de Ametista do Sul após descoloração e nova irradiação.

#### -Quarto Verde de Artigas



Foto 21. Amostras de quartzo verde de Artigas divididas em dois grupos (tamanho médio de 2cm x 1cm).

	Grupo 1	Grupo 2
C	20	20
Y	25	20

Tabela 16. Classificação de cor das amostras de quartzo verde de Artigas.

	Grupo 1	Grupo 2
C	30	23
Y	35	23

Tabela 17. Classificação de cor das amostras de quartzo verde de Artigas após descoloração e nova irradiação.

## 7. Desenvolvimento do Trabalho

O projeto proposto neste trabalho visava estudar o comportamento da ametista e do quartzo verde submetidos a tratamentos de radiação gama e térmico. Estes objetivos foram atingidos com sucesso dentro do cronograma. Os trabalhos de campo proporcionaram conhecimento geológico relevante e conhecimento dos aspectos sociais, extremamente importantes no contexto da exploração realizada com a ametista da região.

Houve dificuldade em encontrar estudos presentes na Literatura sobre quartzo incolor que se torna verde após irradiação e mesmo sobre a presença de quartzo verde natural nos locais estudados.

O cronograma final das atividades desenvolvidas neste trabalho é apresentado a seguir:

Atividades	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Revisão Bibliográfica	X	X	X	X	X	X	X	X	X		
Tratamento térmico das amostras			X	X	X	X	X	X	X		
Irradiação de amostras					X	X	X	X			
Viagem de campo						X					
Elaboração do Relatório de Progresso					X	X	X				
Análise dos dados obtidos							X	X	X		
Elaboração da monografia								X	X	X	
Elaboração da Apresentação										X	X

Tabela 18. Cronograma das atividades realizadas.

## 8. Resultados Obtidos

### 8.1. Resultados da Classificação das Cores

- Ametistas de Ametista do Sul

O Gráfico 03 mostra a variação da intensidade da cor nas ametistas de Ametista do Sul. A quantidade de preto (K) determina a coloração mais escura já que as quantidades de magenta (M) e ciano (C) são constantes nos três grupos. Após tratamento de irradiação pode-se observar que as amostras de ametista recuperaram a forte cor roxa que possuíam, porém adquiriram tons de preto mais fortes como mostra o Gráfico 04.

Este aumento de tons de preto pode ser causado pela presença de centros de cor de Al, que causam a cor no quartzo fumê.

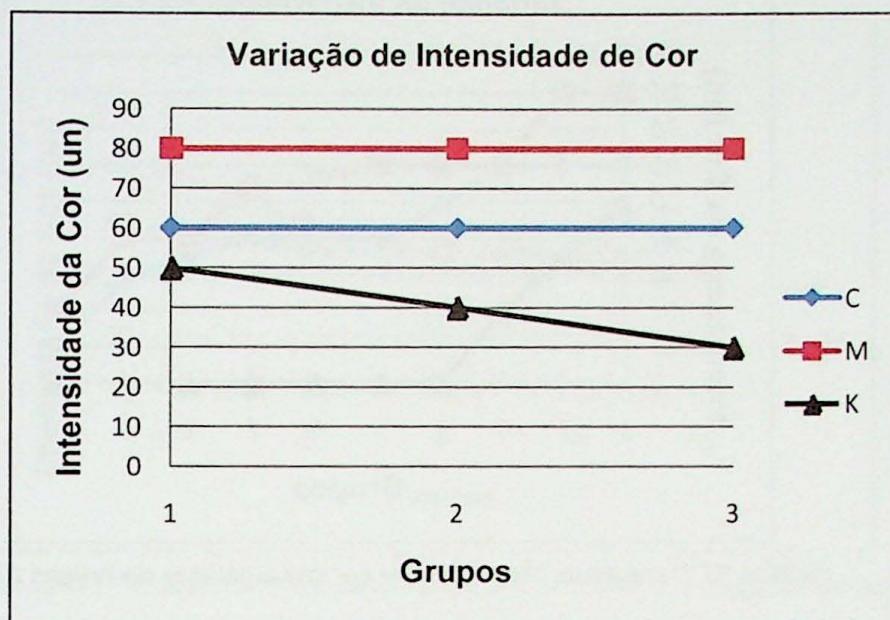


Gráfico 03. Variação da intensidade da cor das ametistas de Ametista do Sul, antes do tratamento de irradiação.

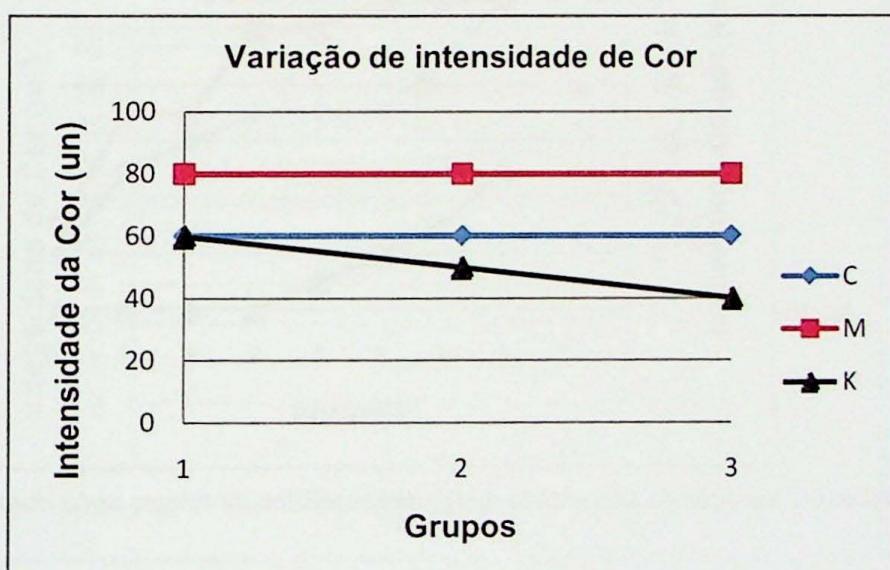


Gráfico 04. Variação da intensidade da cor das ametistas de Ametista do Sul, após tratamento de irradiação.

#### - Ametistas de Artigas

As ametistas de Artigas divididas em 10 grupos possuem grande variação nas quantidades de magenta (M), ciano (C) e preto (K) como mostra o gráfico 05. Após tratamento de irradiação, as amostras adquiriram novamente a coloração roxa porém com uma intensidade menor além de aumentarem seus tons de preto o que pode indicar a ativação de centros de cor de Al, como mostra o Gráfico 06.

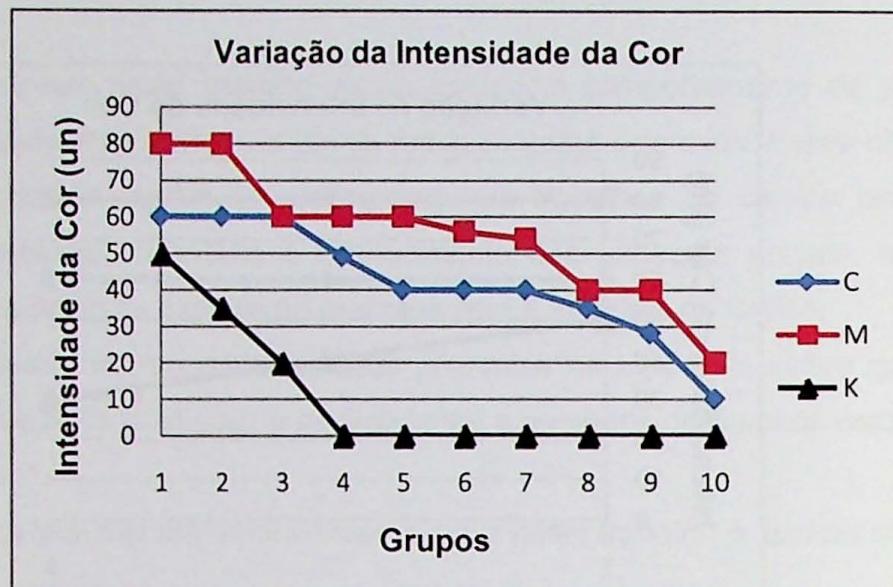


Gráfico 05. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artigas (Grupo com 10).

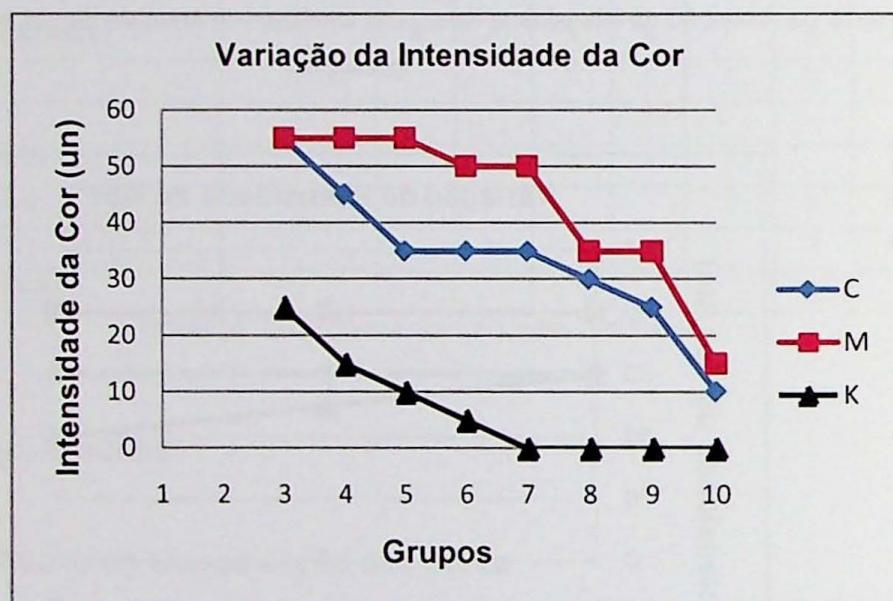


Gráfico 06. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artigas após irradiação (Grupo com 10).

O Gráfico 06 não apresenta resultados dos grupos 1 e 2 pois não havia amostras suficientes destes para descoloração e irradiação. Porém a correlação entre o ciano (C) e o magenta (M) nos dois gráficos é levemente diferente representando boa recuperação da cor.

As ametistas de Artigas divididas em 5 grupos possuem grande variação nas quantidades de magenta (M), ciano (C) e preto (K) comparando os grupos 1 e 2 em relação aos grupos 3, 4 e 5 onde as quantidades são menos variáveis, como mostra o gráfico 07.

Após tratamento de irradiação, as amostras adquiriram novamente a coloração roxa porém com uma intensidade consideravelmente menor de magenta (M) e ciano (C) como mostra o Gráfico 08 e com tons de marrom em algumas amostras que podem ter tido seus centros de cor de Al ativados.

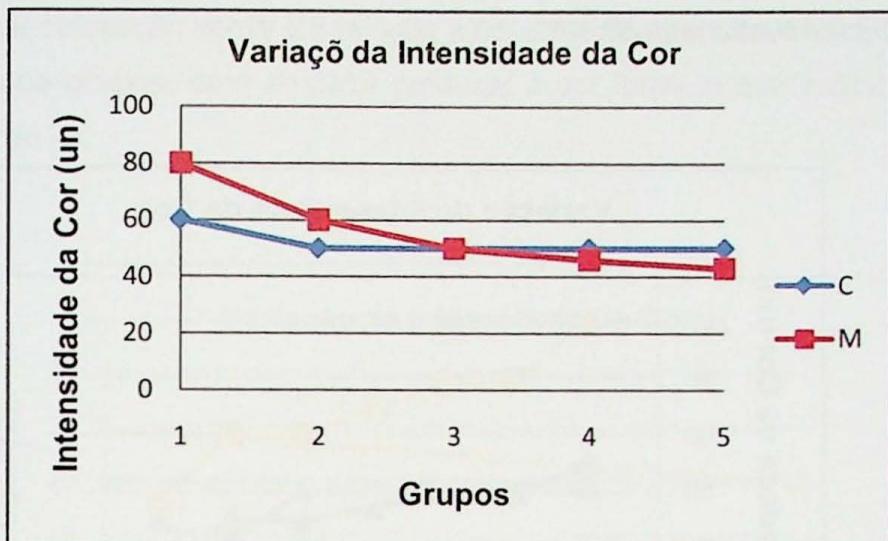


Gráfico 07. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artigas (Grupo com 5).

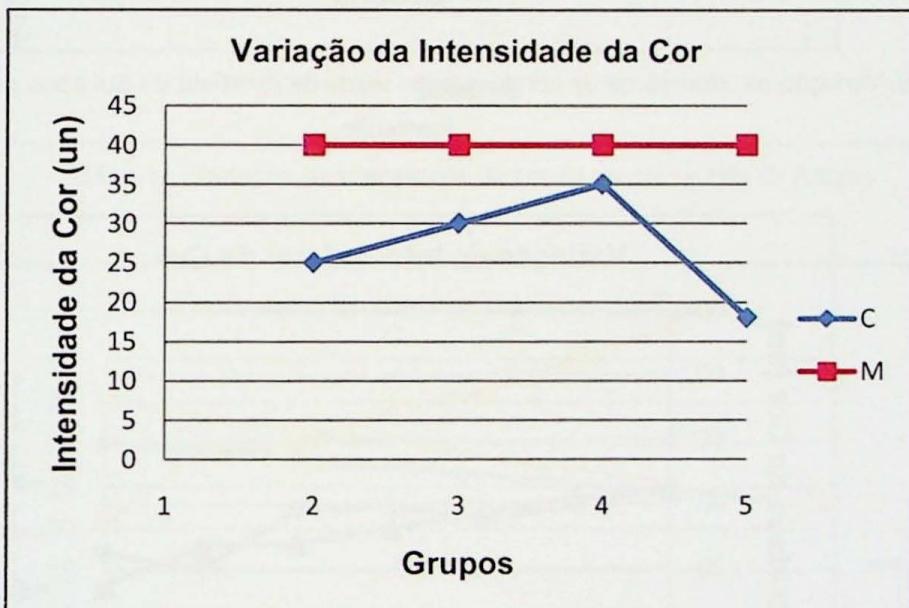


Gráfico 08. Variação da intensidade da cor das ametistas de Artigas após irradiação (Grupo com 5).

O Gráfico 08 não apresenta resultados do grupo 1 pois não havia amostras suficientes deste para descoloração e irradiação.

- Quartzo Verde de Ametista do Sul

O quartzo verde de Ametista do Sul dividido em 7 grupos possui variação gradual das quantidades de amarelo (Y) e preto (K) e praticamente constante da quantidade de ciano (C), como mostra o gráfico 09.

Após tratamento de irradiação, as amostras adquiriram novamente a coloração verde e os resultados da intensidade da cor para amarelo (Y), ciano (C) e preto (K) foram muito similares como mostra o Gráfico 10.

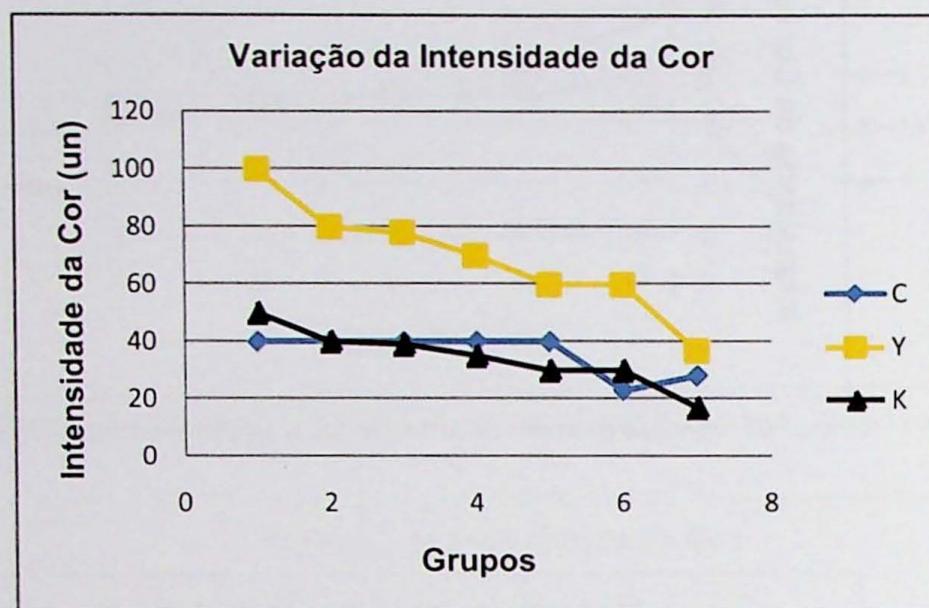


Gráfico 09. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Ametista do Sul após primeiro tratamento de irradiação.

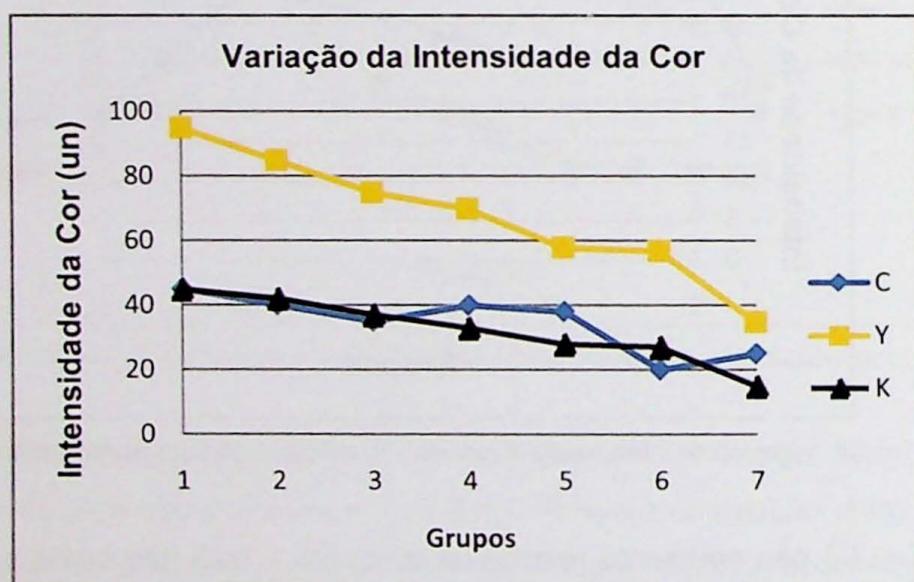


Gráfico 10. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Ametista do Sul após segundo tratamento de irradiação.

#### - Quartzo Verde de Artigas

O quartzo verde de Artigas dividido em 2 grupos possui variação gradual das quantidades de amarelo (Y) e constante da quantidade de ciano (C), como mostra o gráfico 11. Após tratamento de irradiação, as amostras adquiriram novamente a coloração verde e a

intensidade da cor para amarelo (Y) e ciano (C) foi intensificada significativamente em relação a cor original no grupo 1, porém o grupo 2 recuperou a cor mostrando apenas um leve aumento da coloração verde em relação a cor original como mostra o Gráfico 12.

Em ambos os grupos, uma amostra produziu a cor fumê, o que indica a ativação dos centros de cor de Al.

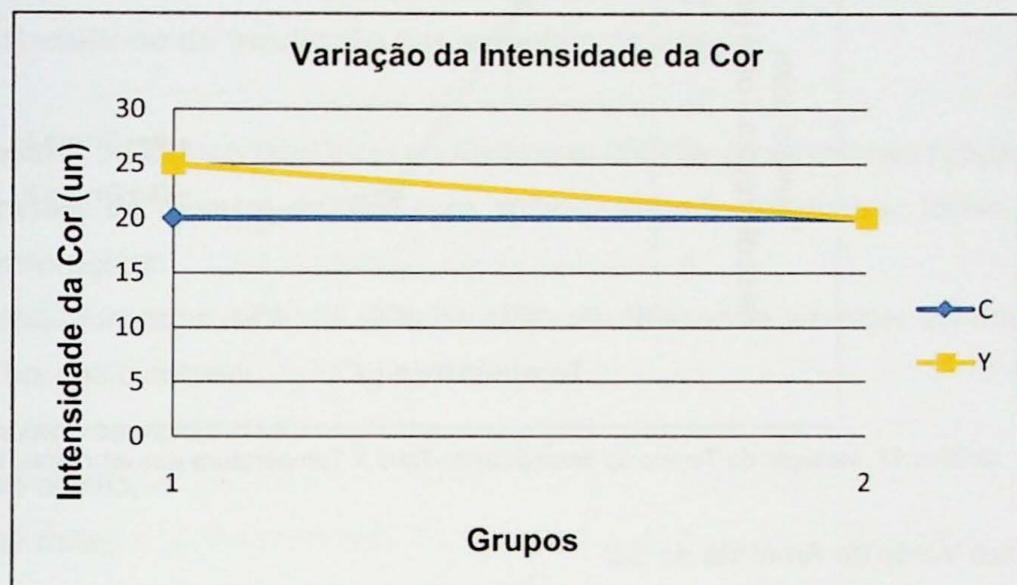


Gráfico 11. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Artigas.

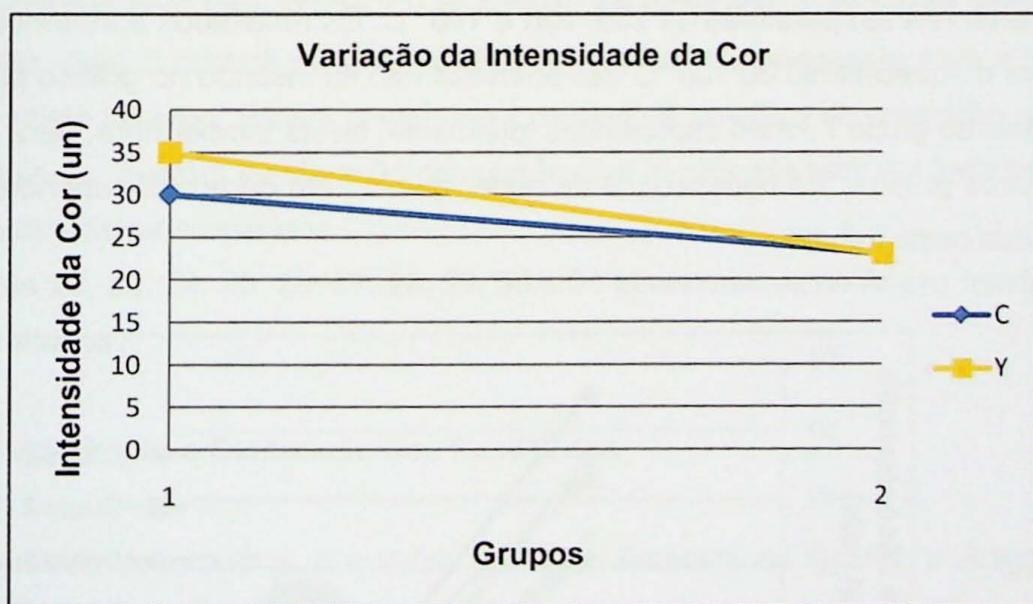


Gráfico 12. Variação da intensidade da cor do quartzo verde de Artigas após irradiação.

## 8.2. Resultados do Aquecimento de Quartzo Verde

- Quartzo Verde de Artigas

O Gráfico 13 mostra o tempo necessário para a perda da cor das amostras dos grupos 1 e 2 nas temperaturas de 250, 200 e 150 °C. Os resultados apresentados na Tabela 06 para o aquecimento a 100 °C não foi inserido no gráfico. Nesta temperatura, a perda da cor necessita durações de aquecimento superiores às 8 horas aplicadas neste trabalho.

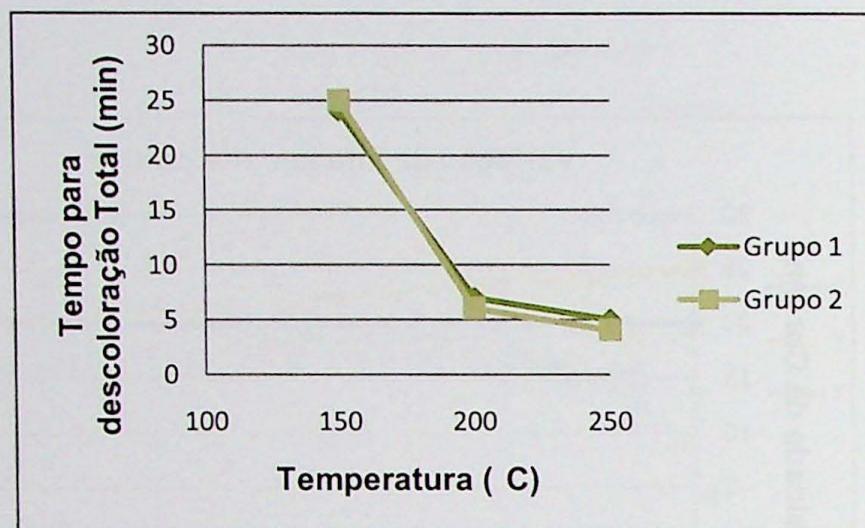


Gráfico 13. Variação do Tempo de descoloração Total X Temperatura das amostras de Artigas.

- Quartzo Verde de Ametista do Sul

O Gráfico 14 mostra o tempo que as amostras dos grupos 1 a 7 levam para descolorir totalmente nas temperaturas de 250, 200 e 150 °C. Os resultados apresentados na Tabela 07 para o aquecimento de 100 °C das amostras não foi inserido no gráfico pois somente as amostras do grupo 7 foram descoloridas totalmente. Nesta temperatura, para a perda da cor nos outros grupos, há necessidade de aquecimento com durações superiores às 15 horas aplicadas neste trabalho.

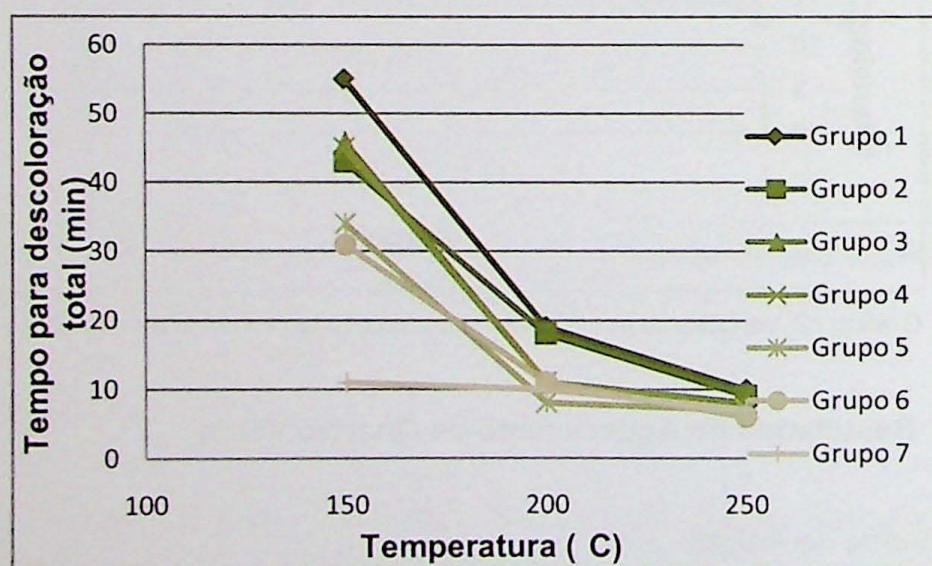


Gráfico 14. Variação do Tempo de descoloração X Temperatura das amostras de Ametista do Sul.

No Gráfico 14 fica claro que quanto maior a intensidade da cor verde, mais tempo é necessário para a perda da cor pelo aquecimento. Esta é uma forte indicação de que para realizar a reação inversa da irradiação, em amostras que teriam um número maior de centros de cor (apresentam cor mais intensa), é necessário uma aplicação de energia mais longa.

### **8.3. Resultado da Irradiação das amostras de campo**

As amostras de campo irradiadas no IPEN com 250kGy apresentaram reações diversas. Dos 16 cristais de quartzo incolor com brilho gorduroso irradiados, foram obtidas as seguintes colorações:

- 6 cristais com tons de fumê e verde claro principalmente em seus centros mantendo em alguns bordas incolores,
- 2 tornaram-se verde claro,
- 3 verde médio,
- 3 verde forte,
- 1 fumê e,
- 1 verde na base e ametista no topo.

Dos 3 cristais com tons verdes ou levemente esverdeados, 1 tornou-se verde oliva e 2 verde médio. Dos 2 cristais de quartzo incolor, 1 tornou-se levemente roxo e 1 verde na base e ametista no topo. E os 4 cristais com centros de ametista de coloração roxa forte, e bordas incolores, tiveram a coloração de suas bordas modificada para um forte verde e seus centros de ametista escurecidos.

As Fotos 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 e 31 apresentadas no Anexo mostram alguns destes resultados.

## **9. Interpretação e Discussão dos Resultados**

As amostras de ametista e quartzo verde de Ametista do Sul-RS e Artigas-Uruguai, foram divididas em grupos conforme a intensidade de suas cores. Estes grupos foram classificados segundo o sistema CMYK que determina a proporção de ciano, magenta, amarelo e preto que origina a composição da cor da amostra.

Após classificação das cores, foi realizado o aquecimento das amostras até a descoloração total para a realização do tratamento com radiação gama no IPEN.

As amostras de Ametista do Sul de quartzo incolor irradiadas com 450kGy adquiriram uma ótima coloração verde e ao serem irradiadas novamente com 300kGy apresentaram

colorações extremamente similares as primeiras. Este fato indica que provavelmente haja um nível de saturação de energia entre estes dois valores de radiação gama que corresponda ao nível necessário para ativar todos os centros de cor dessas amostras.

Em ambos os tratamentos, a variação da cor verde foi de muito claro a muito forte, indicando que pode haver diferenças na composição química dos cristais e que cada cristal possui um número diferente de centros de cor e que quanto mais centros de cor o cristal possui, mais forte será a cor após o tratamento de irradiação desde que haja um nível suficiente de radiação. Este fato pode ser observado nas amostras deste trabalho e claramente na Foto 32 no anexo que mostra um grupo de quartzo incolor de Ametista do Sul do Dr. Rainer A. Schultz Gütler, irradiado com 400kGy onde há cristais quase incolores e cristais com várias tonalidades de verde.

As amostras de quartzo verde de Artigas irradiadas com 460kGy recuperaram a cor verde e uma amostra de cada grupo produziu tons de fumê. Este fato deve-se provavelmente a diferenças químicas dos cristais e ativação dos centros de cor de Al.

As amostras de ametista de Ametista do Sul descoloridas e irradiadas com 370kGy retornam as fortes colorações roxas, indicando que a dose de radiação foi suficiente para total recuperação da cor além de provavelmente ativar centros de cor de Al que originaram tons pretos nas amostras.

Por outro lado a ametista de Artigas com grupos irradiados com 450kGy e grupos irradiados com 370kGy, não apresentou recuperação da cor de suas amostras tão similar as cores originais como as amostras de Ametista do Sul, o que pode significar diferenças na composição química destas amostras.

O tratamento térmico do quartzo verde definiu as durações de exposição ao calor necessárias para perda da cor nas amostras e salientou o fato de que a intensidade da cor corresponde proporcionalmente ao tempo de descoloração.

## 10. Conclusões

Os tratamentos de radiação gama e térmicos podem proporcionar material gemológico de qualidade. O Brasil é um grande fornecedor de matéria prima para outros países que realizam tais tratamentos e seria extremamente vantajoso para o país que estes fossem realizados em empresas nacionais valorizando e agregando valor a matéria prima.

O quartzo incolor que através de tratamento com radiação gama adquire belas cores verdes e a ametista que pode ter sua coloração acentuada, representam material gemológico de qualidade para lapidação.

Estas variedades no entanto necessitam de certos cuidados quando expostos ao calor para não ocorrer perda ou variação da cor. A ametista apresenta resistência a temperaturas

mais altas porém o quartzo verde é sensível a temperaturas a partir de 150 °C e os estudos apresentados sobre a estabilidade térmica desta variedade neste trabalho, devem ser considerados pelo mercado gemológico e pelos consumidores de jóias.

## 10. Referências Bibliográficas

Ashbaugh III C. E. 1988. Gemstone Irradiation and Radioactivity. *Gems & Gemology* p. 196-213.

Barretos S. B. & Bittar S. M. B. 2006. Gemas do Brasil. (<http://scholar.google.com.br/scholar> Acesso-06/08/2010).

Calvo W. A. P. 2005. Desenvolvimento do Sistema de Irradiação em um Irradiador Multipropósito de Cobalto 60 Tipo Compacto. Universidade de São Paulo, IPEN, Tese de Doutorado.

Castañeda C.; Addad, J. E.; Liccardo A. 2001. Gemas de Minas Gerais. Sociedade Brasileira de Geologia – Núcleo Minais Gerais, Belo Horizonte.

Costa C. A. R., Fukumori D. T., Elorza J. H., Sanches M. P., Bellintane S. A. 1986. Noções Básicas de Radioproteção. IPEN-CNEN/SP, Departamento de Proteção Radiológica, material para funcionários, circulação interna.

Dana J. D. 1932. *Dana's Text Book of Mineralogy*, cap. 5 – p. 472-473.

Dana J. D. 1974. *Manual de Mineralogia*, Vol. 2. Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro.

Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. 1966. Minerais constituintes das rochas, uma introdução. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian.

Duarte L. C. 2008. Evolução Geológica, Geoquímica e Isotópica das Mineralizações de Geodos com Ametista, Artigas, República Oriental do Uruguai. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Pós-Graduação.

Duarte L. C., Hartmann L. A., Vasconcellos M. A. Z., Medeiros J. T. N., Theye T. 2008. "Epigenetic formation of amethyst-bearing geodes from Artigas, Uruguay, southern Paraná basaltic province". In *Evolução Geológica, Geoquímica e Isotópica das Mineralizações de Geodos com Ametista, Artigas, República Oriental do Uruguai*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese de Pós-Graduação.

Emery R. 1994. Type and Color 2. Ed. Casa Ono.

Favacho M. 2007. Gemas Irradiadas. Diamond News, Ano 8, n°28: 21-28.

Gibbs G. V. Silica: Physical Behavior, Geochemistry and Materials Applications. *Rev. Mineral*, 29:443-467.

Güttler R. A. S. 2007. Quartzo verde ou Prasiolita?. Diamond News, Ano 8, n°28:19.

Güttler R. A. S., Enokihara C. T., Rela P. R. 2009. Characterization of Color Centers in Quartz Induced By Gamma Irradiation. *Internacional Nuclear Atlantic Conference – INAC 2009*, Rio de Janeiro.

Hartmann L. A. 2008. Geodos com ametistas formados por água quente no tempo dos dinossauros, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul.

Henn & Güttler 2009. Color-enhanced quartz and its identification – green, violet-blue and yellow-green quartz from Brazil. *Canadian Gemmologist*, Vol 30, n°2, p.46-54.

Juchem P. L., Brum T. M., Leite C. A., Svisero D. P., Gemas Ornamentais Associadas a Ametista na Região do Alto Uruguai-RS. In. *Cong. Bras. Geol.*, n°38, Camboriú-SC. Resumos, Camboriú: SBG, 1994. P. 193-194.

Klein C. 2002. *Manual of Mineral Science*, New York. John Wiley, 22 ed., p. 475-545.

Kohn H. W. & Benjamin B. M. 1961. Radiation Coloration of Silica Minerals. *American Mineralogist*, 46: 218-225.

Lamachia F. 2006. *Pedras Preciosas do Brasil / Brazilian Precious Stones*, Ed. Do Autor, São Paulo.

Limaverde J. A. 1980. Produção, Comercialização e Comércio de Gemas no Nordeste. Fortaleza: Série estudos econômicos e Sociais, Vol.10.

Melfi A. J., Piccirilo E. M., Nardy A. J. R. 1988. Geological and Magmatic Aspects of The Paraná Basin-An Introduction. In. "The Mesozoic flood volcanism of the Paraná basin:petrogenetic and geophysical aspects". Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo.

Monteiro, C. V. 2001. Caracterização das Ametista Brasileiras em Face aos Efeitos da Radiação Gama e seu Tratamento Térmico. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.

Nassau K. & Prescott B. E. 1977. A unique green quartz. *American Mineralogist*, 62:589-590.

Nassau K. 1978. The origins of colors in minerals. *American Mineralogist*, 63:219-229.

Nassau K. 1980. Gemstone Enhancement. Ed. Butterworths, Santa Monica, USA, p-55-58.

Pagnossin E. M. 2007. A atividade Mineira em Ametista do Sul / RS e a incidência de silicose em garimpeiros. Universidade Federal de Santa Maria. Dissertação de Mestrado.

Pedrosa I. 1989. Cores. In: Da Cor a Cor Inexistente, Ed. Universidade de Brasília, p-115.

Rossman G. R. 1994. Colored Varieties of the Silica Minerals. *Reviews in mineralogy*, Mineralogical Society of America, 29:433-467.

Rossman G. R. & Herbert L. B. 2008. Greenish quartz from the Thunder Bay amethyst Mine Panorama, Thunder Bay, Ontario, Canada. *The Canadian Mineralogist*, 46:111-124.

Schumann W. 2006. Gemas do Mundo, Ed. Ao Livro Técnico.

Schumann W. 2008. Guia dos minerais, Ed. Disal.

Shigley J. E. & McClure S. F. 2009. Laboratory Treated Gemstones. In. *Elements*, Vol 5 p. 175-178.



## **ANEXOS**

**FOTOS**



Foto 22. Exemplo de 1 dos 4 cristais de quartzo com centro de ametista e borda incolor (esq.), irradiado com 250kGy teve a cor do centro acentuada e a da borda fortemente esverdeada (dir.).



Foto 23. Cristais de quartzo incolor com brilho gorduroso (esq.) que ganharam tons esverdeados ou tons fumê após irradiação (dir.).

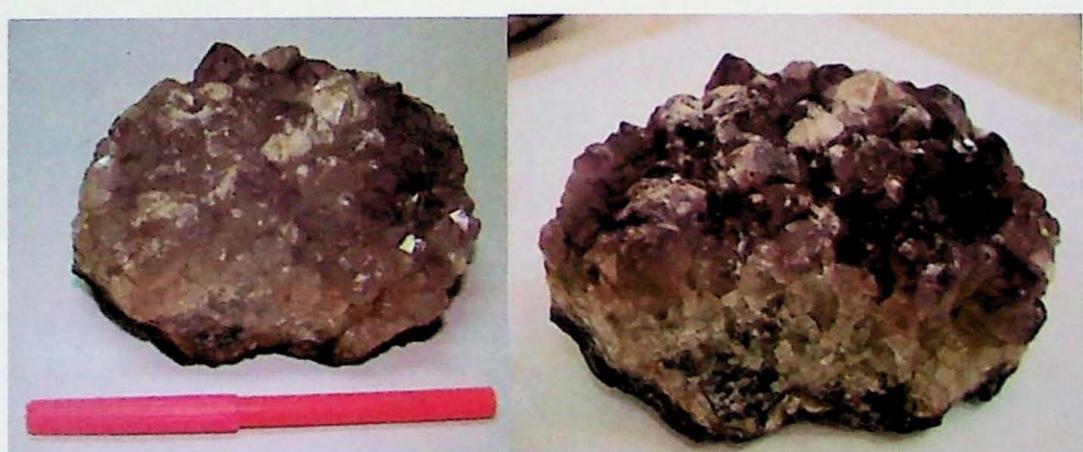


Foto 24. Amostra com base incolor e pontas fracamente roxas (esq.) que após irradiação teve sua coloração modificada para base esverdeada e pontas medianamente roxas (dir.).

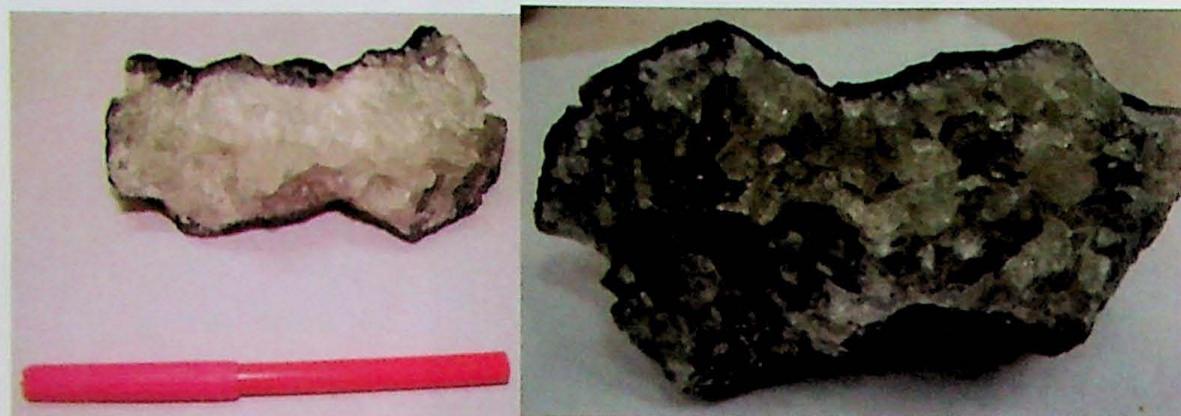


Foto 25. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso (esq.) que após irradiação tornou-se verde forte (dir.).



Foto 26. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso (esq.) que após irradiação tornou-se verde forte (dir.).

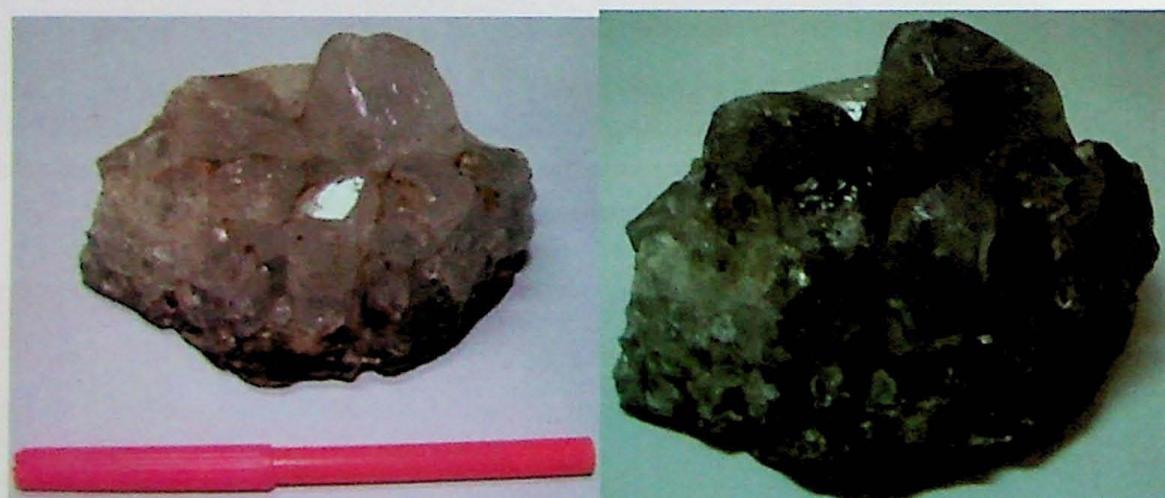


Foto 27. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso (esq.) que após irradiação tornou-se verde forte (dir.).



Foto 28. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso (esq.) que após irradiação tornou-se fumê (dir.).



Foto 29. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso (esq.) que após irradiação tornou-se verde médio (dir.).



Foto 30. Amostra de quartzo incolor de brilho gorduroso (esq.) que após irradiação tornou-se verde médio (dir.).



Foto 31. Amostra de quartzo levemente esverdeado (dir.) que após irradiação tornou-se verde forte (esq.).



Foto 32. Amostra de quartzo incolor de Ametista do Sul que após irradiação com 400kGy produziu diversas tonalidades de verde.

## **TABELAS**

Forno (°C)	Termômetro (°C)
100	101
150	162
200	217
250	269
270	310
Final	330

Tabela 04. Calibração do forno Rinnai Pratic.

Forno (°C)	Termômetro (°C)
100	163
200	268
300	364
400	469
500	554
600	647

Tabela 05. Calibração do forno de bancada.

Grupo	Nº de amostras	Temperatura (°C)	Tempo para descoloração total (min)
1	3	250	5
		200	7
		150	24
		100	>500
2	3	250	4
		200	6
		150	25
		100	>500

Tabela 06. Aquecimento das amostras de quartzo verde de Artigas.

Grupo	Nº de amostras	Temperatura (°C)	Tempo para descoloração total (min)
1	3	250	10
		200	19
		150	55
		100	> 920
2	3	250	9
		200	18
		150	43
		100	> 920
3	3	250	8
		200	11
		150	46
		100	> 920
4	3	250	7
		200	11
		150	45
		100	> 920
5	3	250	7
		200	8
		150	34
		100	> 920
6	3	250	6
		200	11
		150	31
		100	> 920
7	3	250	7
		200	10
		150	11
		100	360

Tabela 07. Aquecimento das amostras de quartzo verde de Ametista do Sul.

De acordo:

giuliana Clerici  
Giuliana Meirinho Clerici

Dr. R. Schultz-Güttler  
Prof. Dr. Rainer A. Schultz-Güttler

