



PGDESIGN | Programa de Pós-Graduação
Mestrado | Doutorado



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
FACULDADE DE ARQUITETURA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESIGN

Felipe Foerstnow Szczepaniak

**IRRADIAÇÃO GAMA (^{60}Co) HOMOGÊNEA E SELETIVA EM QUARTZO ROSA
VISANDO O DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS**

Dissertação de Mestrado

Porto Alegre

2016

FELIPE FOERSTNOW SZCZEPANIAK

Irradiação gama (^{60}Co) homogênea e seletiva em quartzo rosa visando o design de materiais gemológicos

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Design da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Design.

Orientadores: Prof. Dr. Pedro Luiz Juchem
Prof. Dra. Lauren da Cunha Duarte

Porto Alegre

2016

Ficha Catalográfica

- S996i Szczepaniak, Felipe Foerstnow
 Irradiação gama (60Co) homogênea e seletiva em quartzo rosa visando o
design de materiais gemológicos / Felipe Foerstnow Szczepaniak. – 2016.
 182 f. : il. color.
 Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul,
Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Design, Porto Alegre,
BR-RS, 2016.
 Orientadores: Pedro Luiz Juchem e Lauren da Cunha Duarte.
1. Gemas. 2. Quartzo. 3. Design de joias. I. Juchem, Pedro Luiz, orient.
II. Duarte, Lauren da Cunha, orient. III. Título.

CDU: 553.8(043)

Felipe Foerstnow Szczepaniak

**IRRADIAÇÃO GAMA (^{60}Co) HOMOGÊNEA E SELETIVA EM QUARTZO ROSA VISANDO
O DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Design, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS.

Porto Alegre, 21 de março de 2016.

Prof. Dr. Régio Pierre da Silva

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Design da UFRGS

Banca Examinadora:

Orientador: **Prof. Dr. Pedro Luiz Juchem**

Departamento de Mineralogia e Petrologia, DEMIPE

Orientadora: **Prof. Dra. Lauren da Cunha Duarte**

Departamento de Engenharia de Materiais, DEMAT

Prof. Dra. Ângela Raffin Pohlmann

Departamento de Artes Visuais – Examinadora Externa

Dra. Ana Maria Xavier

Diretoria de Radioproteção e Segurança Nuclear – Examinadora Externa

Prof. Dra. Liane Roldo

Departamento de Engenharia de Materiais, DEMAT – Examinadora Interna

Aos meus orientadores
Pedro L. Juchem e Lauren Duarte

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, desenvolver uma pesquisa, seja ela qual for, é sempre uma experiência pessoal, valiosa e única. Por isso, inúmeros avanços pessoais e também profissionais foram concebidos. Neste período de tempo, do Mestrado em Design da UFRGS, alcancei um elevado grau de autoconhecimento, conheci outras pessoas, caminhos e descaminhos. Por isso, agradeço...

À minha família.

Às “pedras no caminho” que me fortaleceram, às indecisões que me fizeram esperar e ao tempo transformador de tudo.

Ao Mestrado em Design da UFRGS pela oportunidade e aos professores deste curso.

Aos orientadores Pedro Luiz Juchem e Lauren da Cunha Duarte por incentivar o tema da pesquisa e pela paciência.

À banca de qualificação e banca de defesa desta dissertação Liane Roldo, Ruth Hinrichs, Nádia Senna, Ana Maria Xavier e Ângela Pohlmann.

Ao pessoal do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN Fernando Soares Lameiras, Luiz Carlos Duarte Ladeira, Márcio Pereira, Maritza Gual, Cleide Rocha, Lorrane Goveia, Helena Cristina de Matos Silva e operadores da irradiação Antônio Timóteo e Omar.

Aos Laboratórios da UFRGS LdSM, LABOGEM, LabFIS, LACER e seus funcionários.

Ao pessoal do estudo da física Marcelo Pereira e Edulfo Eduardo Diaz.

Ao pessoal da geologia Tânia Mara de Brum e Heinrich Theodor Frank.

Aos colegas Danieli Nejeliski, Marina Wilm, Eloisa Almeida, Mariana Pohlmann, Wagner Rossi, Elisa Ashton, Ana Luisa Maldonado, Andressa Richetti, Eliana Calegari, Frances Danckwardt e João Rogério Pereira.

Ao pessoal das minas de extração, Bagatini Pedras e em especial ao Sandro Ferreira.

Às demais pessoas que colaboraram indiretamente com a pesquisa, incluindo Cassandra Terra, Lúcia Weymar, Vitória Caron, Gustavo Toniello, Viviane Pestano e Mariana Almeida.

Às oportunidades surgidas do ensino, pesquisa e extensão da UFRGS as quais me possibilitaram um crescimento pessoal e profissional.

Este trabalho foi realizado com o apoio da CAPES pela bolsa de Mestrado e do CNPQ pelo projeto 454183/2014-3.

RESUMO

SZCZEPANIAK, F. F. **Irradiação gama (^{60}Co) homogênea e seletiva em quartzo rosa visando o design de materiais gemológicos.** 2016. 182f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

O quartzo é um mineral abundante na crosta terrestre e pode ser valorizado através do design. A cor é um importante elemento de design e algumas gemas são incolores ou possuem cores e tonalidades pouco atrativas, necessitando de tratamento para serem revalorizadas. O intuito desta pesquisa é usar o recurso tecnológico da irradiação industrial para estudar parâmetros desse processo, a fim de gerar contribuições aos desenvolvedores de materiais gemológicos exclusivos e diferenciados ou de joias de arte (design autoral). Para isso, foram realizados experimentos com fonte panorâmica de Cobalto-60 estocada a seco, com aproximadamente 33398,34 TBq de atividade. Foram selecionadas variedades de quartzo de diferentes regiões brasileiras a fim de gerar materiais bicolors para futuro estudo do desenvolvimento de desenhos pela técnica de irradiação seletiva. A pesquisa foi dividida em duas etapas: 1) A primeira etapa consistiu no desenvolvimento de diretrizes, seleção de materiais e experimentos piloto. Foram testados principalmente variedades de quartzo provenientes do Rio Grande do Sul, 2) A segunda etapa consistiu na irradiação homogênea e seletiva do quartzo rosa de Águas vermelhas-MG e rosa-pálido límpido de Pedra Lavrada-PB. Com relação à irradiação homogênea, foi estudada a variação de tonalidade de cor obtida após a irradiação em amostras com diferentes espessuras e dose mínima e máxima da irradiação para alteração cromática; já com relação à irradiação seletiva, foi estudada a relação da espessura de amostras de chumbo para atenuação da irradiação, contraste de tonalidade resultante da atenuação, espessura de fresta entre as amostras de chumbo, afastamento da amostra em relação à atenuação provocada pelo chumbo, altura do experimento em relação à fonte de irradiação e sobreposição de doses para o desenvolvimento de efeito estético “xadrez”. A irradiação seletiva foi realizada através da atenuação da radiação gama com amostras de diferentes espessuras de chumbo, 20, 10, 5 e 3 cm. As espessuras das fatias polidas de quartzo para visualização da cor foram de 2 mm e 4 mm. Os resultados foram analisados por sistema de cores *hue, saturation* e *brigh* (HSB) de modo experimental, por espectrometria no Infravermelho (FTIR) e na região de luz visível (UV-Vis). Nesta pesquisa pôde-se destacar alguns parâmetros para a irradiação seletiva do quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, PB, pois as outras variedades de quartzo não apresentaram aspectos tão interessantes.

Palavras-chave: Design de gemas. Quartzo. Irradiação gama seletiva.

ABSTRACT

SZCZEPANIAK, F. F. **Irradiação gama (^{60}Co) homogênea e seletiva em quartzo rosa visando o design de materiais gemológicos.** 2016. 182f. Dissertação (Mestrado em Design) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

Quartz is an abundant mineral in the earth's crust and can be enhanced by design. The color is an important design element and some gems are colorless or have unattractive colors and shades, requiring treatment to be enhanced. Among various ways to change or improve the color of a gem, gamma irradiation Cobalt-60 has been approved in the world trade. The purpose of this research is to use the installed resources of Brazilian industrial irradiation, to study parameters of this process to apply in design, in order to generate contributions to develop unique gemological materials or art jewelry (authorial design). For this, experiments were conducted with a dry stored panoramic source of Cobalt-60, with approximately 33,398.34 terabecquerel (TBq) activity. Different quartz varieties of several Brazilian regions were selected in order to produce bi-colored materials, for development of future drawing studies by selective irradiation techniques. The research was separated into two stages: 1) The first step was the development of guidelines, materials selection and pilot experiments, being tested mainly quartz varieties from Rio Grande do Sul, 2) The second step was of homogeneous and selective irradiation of massive pink quartz of Águas Vermelhas-MG and clear pale pink quartz of Pedra Lavrada-PB. In the homogeneous irradiation studies, the variation in shade obtained after irradiation (in different thicknesses of samples) and maximum and minimum dose of radiation to color change was analyzed; In the selective irradiation, it was studied the relation between the thickness of lead samples to the radiation attenuation, the final color tone contrast attenuation, thickness gap between the lead samples, the sample distance from the lead, in relation to the radiation attenuation, elevations of the experiment samples relative to the irradiation source, and overlapping doses to the development of a “chess” aesthetic effect. Selective irradiation was performed through the attenuation of gamma radiation with lead samples of thickness of, 10, 20, 5 and 3 cm. The thicknesses of quartz polished slices for color visualization was of 2 mm and 4 mm. The results were analyzed by experimental color systems that include hue, saturation and bright (HSB) analysis, by Infrared (FT-IR) and visible light region (UV-Vis) spectrometry. In this research it was possible to point out some parameters for selective irradiation of pale pink quartz of Pedra Lavrada-PB, once the other quartz varieties tested did not present such interesting results.

Keywords: Gems design. Quartz. Selective gamma irradiation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de materiais gemológicos naturais bicolores e multicoloridos.	21
Figura 2 – Exemplos de desenhos naturais gemológicos.	22
Figura 3 – Possíveis resultados da irradiação gemológica.	23
Figura 4 – Quartzo tratado com irradiação gama e tratamento térmico.	24
Figura 5 – Localização dos locais dos materiais gemológicos utilizados na pesquisa.	25
Figura 6 – Espectro eletromagnético.	35
Figura 7 – Interação da radiação gama com o átomo.	36
Figura 8 – Exemplos de espectros de espectrofotômetro infravermelho portátil.	41
Figura 9 – Ilustração de um cristal de quartzo idealizado.	42
Figura 10 – Esfera de quartzo fumê (enfumaçado) fotografada em diversas posições.	43
Figura 11 – Exemplos de utilização do quartzo rosa-leitoso de Minas Gerais.	45
Figura 12 – Exemplos de quartzo rosa.	45
Figura 13 – Comparação entre os sistemas de cores RGB e CMYK.	50
Figura 14 – Aquecimento.	55
Figura 15 – Amostras de quartzo rosa maciço de Águas Vermelhas (MG) irradiadas com 100 KGy.	56
Figura 16 – Exemplo de guarnição de fonte: haste de aço com cartuchos de ^{60}Co .	59
Figura 17 – Comparação entre poder de ionização e penetração entre partículas alfa, beta e raio gama em um meio-material ilustrativo.	63
Figura 18 – Gráfico mostrando as energias para as quais existem dominantes processos de interação da irradiação gama com a matéria.	64
Figura 19 – Relação de partículas e ondas e blindagens: papel, plástico, humano, aço, chumbo e parafina.	66
Figura 20 – Resultado da interação de raios X com material com configuração diferenciada.	68
Figura 21 – Detalhe de equipamento de gamagrafia: realizando gamagrafia de peça metálica com radiação gama.	69
Figura 22 – Gamagrafia.	69

Figura 23 – Irradiação gama seletiva em camundongos.	70
Figura 24 – Colimadores de radiação.	71
Figura 25 – Exemplo de interação da radiação com condição real, sem colimação.	72
Figura 26 – Amostras de quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG selecionadas para estudo de irradiação gama homogênea e seletiva.	76
Figura 27 – Amostras brutas de quartzo rosa (anédrico), com diferentes tonalidades, provenientes de Pedra Lavrada, PB.	78
Figura 28 – Amostras representativas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, Pb cortadas e polidas antes da irradiação homogênea (com diferentes doses).	79
Figura 29 – indicação para irradiação seletiva nas amostras padronizadas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada (sem polimento final).	80
Figura 30 – Esquema simplificado da irradiação gama seletiva utilizada na câmara panorâmica do CDTN.	81
Figura 31 – Laboratório de Irradiação Gama – LIG.	86
Figura 32 – Maquete eletrônica da câmara de irradiação do LIG/CDTN.	89
Figura 33 – ilustração em corte da câmara de irradiação do CDTN.	87
Figura 34 – Esquema mostrando o resultado das medições de temperatura de cinco pontos da câmara de irradiação.	90
Figura 35 – Medidores das radiações ionizantes: à esquerda medidor Geiger, à direita medidor digital.	97
Figura 36 – Três telas da ferramenta “seletor de cores” do Adobe Photoshop® indicando os parâmetros do sistema HSB.	100
Figura 37 – Legendas.	101
Figura 38 – Resultados qualitativos das primeiras irradiações homogêneas em diversas variedades de quartzo do Rio Grande do Sul.	105
Figura 39 – Lascas de quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG irradiadas de modo homogêneo.	109
Figura 40 – Quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG fatiados com 2 mm de espessura e irradiados com diferentes doses.	110
Figura 41 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa de Águas Vermelhas irradiadas com diferentes doses homogêneas.	114
Figura 42 – Irradiação gama seletiva em quartzo rosa de Águas Vermelhas.	115

Figura 43 – Irradiação gama seletiva em quartzo rosa.	116
Figura 44 – Irradiação gama seletiva com fresta de 3 mm no quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG.	117
Figura 45 – Irradiação gama seletiva com sobreposição deslocada de doses.	118
Figura 46 – Irradiação gama em vidro.	119
Figura 47 – Irradiação gama homogênea (de 1KGY a 200KGY) nas amostras selecionadas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada.	122
Figura 48 – Amostras brutas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, com diferentes dimensões, irradiadas com apenas 3KGY (irradiação homogênea).	126
Figura 49 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo-rosa pálido de Pedra Lavrada, PB.	127
Figura 50 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo-rosa pálido de Pedra Lavrada, PB.	128
Figura 51 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama seletiva.	130
Figura 52 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama seletiva (amostra bicolor).	131
Figura 53 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, PB.	132
Figura 54 – Amostras extras de vidro sodo-cálcico utilizadas junto aos experimentos de irradiação gama seletiva (amostras controle).	132
Figura 55 – Detalhe de uma amostra de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, PB irradiada seletivamente.	133
Figura 56 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, PB.	134
Figura 57 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama seletiva.	136
Figura 58 – Resultados das irradiações seletivas com sobreposição de doses no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada (1) e no quartzo rosa de Águas Vermelhas – sem polimento e com polimento, respectivamente (2 e 3).	137
Figura 59 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com diferentes doses homogêneas.	138

Figura 60 – Espectros da região do infravermelho (FTIR) das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama em diferentes doses.	139
Figura 61 – Resultados dos testes de lapidação profissional em amostras, com diferentes posicionamentos, de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com 10KGy (irradiação gama).	142
Figura 62 – Gema “xadez”.	148
Anexo A – Relatório de ensaio (lado “a”) da Falcão Bauer referente a garantia do grau de pureza do chumbo adquirido para o experimento de irradiação gama seletiva.	180
Anexo B – Relatório de ensaio (lado “b”) da Falcão Bauer referente a garantia do grau de pureza do chumbo adquirido para o experimento de irradiação gama seletiva.	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) nas amostras de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG brutas, com espessura de 6 mm e não irradiadas para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	111
Tabela 2 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 1KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	112
Tabela 3 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 5KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	112
Tabela 4 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 15KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	113
Tabela 5 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 25KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	113
Tabela 6 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 1KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	123
Tabela 7 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 5KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	123

Tabela 8 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	124
Tabela 9 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 25KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	125
Tabela 10 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polida, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 3 cm de chumbo para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	129
Tabela 11 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polida, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 5 cm de chumbo para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	129
Tabela 12 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 10 cm de chumbo e fresta de 5 mm para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	135
Tabela 13 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polida, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 10 cm de chumbo e fresta de 3 mm para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.	135

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Organização da dissertação.	18
Quadro 2 – Partículas e fótons liberados pelo Cobalto-60 com suas respectivas emissões de energias e intensidades.	58
Quadro 3 – Exemplos de doses utilizadas em diferentes estudos, experimentos com quartzo em destaque.	62
Quadro 4 – Resumo das doses utilizadas nesta pesquisa em diferentes variedades de quartzo selecionadas.	82
Quadro 5 – Estimativa de espessura para atenuação da radiação gama (⁶⁰ Co) calculada com a calculadora Rad Pro com fator <i>Buildup</i> e coeficiente de atenuação linear atualizado da NIST.	84
Quadro 6 – Estimativa de espessura para atenuação da radiação gama (⁶⁰ Co).	84

Quadro 7 – Simulação de valores máximos e mínimos de distância e tempo de exposição em relação a dose de irradiação gama da fonte panorâmica.	104
Quadro 8 – Resultados qualitativos das primeiras irradiações homogêneas em diversas variedades de quartzo do Rio Grande do Sul do LABOGEM/UFRGS.	106
Quadro 9 – Resultados qualitativos das irradiações homogêneas em diversas variedades de quartzo e de vidro.	107
Quadro 10 – Diretrizes básicas para a irradiação de minerais.	145
Quadro 11 – Diretrizes básicas para a irradiação seletiva de minerais.	146
Quadro 12 – Compilação dos resultados do sistema HSB sobre as diferentes doses de irradiação gama no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada.	147

LISTA DE ABREVIATURAS

⁶⁰Co	Cobalto-60
Bq	Becquerel
CDTN	Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Ci	Curie
CMYK	Ciano, magenta, amarelo e preto
EDS	Espectroscopia por energia dispersiva de raio-X
eV	Elétron-volt
FT-IR	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier
HSB	Matiz, saturação e brilho
KGy	Quilogray
LABOGEM	Laboratório de Gemologia
LdSM	Laboratório de Design e Seleção de Materiais
LIG	Laboratório de Irradiação Gama
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
RGB	Vermelho, verde e azul
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UV-Vis	Ultravioleta-visível

SUMÁRIO

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
1.1	INTRODUÇÃO	19
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	22
1.3	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	25
1.4	OBJETIVO GERAL	26
1.5	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
1.6	JUSTIFICATIVA	26
1.7	MÉTODOS DE PESQUISA	30
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1	DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS: INTRODUÇÃO	31
2.2	RADIAÇÕES	34
2.3	A COR DOS MINERAIS	36
2.4	QUARTZO	41
2.5	SISTEMAS DE CORES DO DESIGN	47
2.5.1	Calibração de cores	48
2.5.2	Sistema “LAB”	48
2.5.3	Sistema Pantone	49
2.5.4	Sistema CMYK	49
2.5.5	Sistema RGB	50
2.5.6	Sistema HSB	51
2.6	RADIAÇÕES IONIZANTES	51
2.7	IRRADIAÇÃO GEMOLÓGICA	52
2.7.1	Nomenclatura	54

2.7.2	Tratamento térmico	54
2.7.3	Laser	55
2.8	RAIOS GAMA (^{60}Co)	57
2.8.1	Doses	60
2.8.2	Interação com a matéria	62
2.8.3	Blindagens	65
3	MATERIAIS E MÉTODOS	73
3.1	MATERIAIS	73
3.1.1	Amostras e preparação das amostras	73
3.1.1.1	Estudo piloto A	74
3.1.1.2	Estudo piloto B	75
3.1.1.3	Irradiação gama homogênea e seletiva no quartzo rosa de Pedra Lavrada	77
3.1.2	Placas de chumbo	82
3.2	MÉTODOS	85
3.2.1	Câmara de irradiação gama	85
3.2.1.1	Medidas de temperatura da câmara de irradiação gama	88
3.2.1.2	Mesa de apoio	90
3.2.2	Irradiação gama gemológica homogênea e seletiva	91
3.2.3	Diretrizes para irradiação gemológica	93
3.2.4	Medidas da radiação	97
3.2.5	Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raio-X (EDS)	98
3.2.6	Ultravioleta-visível (UV-Vis)	98
3.2.7	Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR)	99

3.2.8	Medidas de densidade	99
3.2.9	Matiz, saturação e brilho (HSB) e legenda de cor	100
3.2.10	Câmera fotográfica	101
3.2.11	Lapidação	101
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	103
4.1	ESTUDO PILOTO A	103
4.2	ESTUDO PILOTO B	108
4.3	RESULTADOS OBTIDOS NO QUARTZO ROSA DE PEDRA LAVRADA	121
5	DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS: COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS	143
6	FINALIZAÇÃO	149
6.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS: DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS	149
6.2	CONCLUSÕES	150
6.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	153
	REFERÊNCIAS	154
	GLOSSÁRIO	174
	ANEXO	180

ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está estruturada em seis capítulos (Quadro 1).

Quadro 1 – Organização da dissertação.

1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	O primeiro capítulo é um texto introdutório o qual visa situar o leitor no contexto da pesquisa. Nele, são especificados a delimitação do tema, os objetivos, justificativa, método de pesquisa e conteúdo dos capítulos.
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	O segundo capítulo, compreende a fundamentação teórica. Nele é desenvolvido o embasamento teórico da dissertação, a partir do estudo de conceitos pertinentes à sua temática e de resultados de investigações correlatas à pesquisa.
3	MATERIAIS E MÉTODOS	No terceiro capítulo, é exposto o procedimento experimental. Os materiais utilizados são caracterizados, assim como a descrição dos ensaios realizados. Inicialmente foi feita irradiação homogênea experimental em amostras de quartzo e opala de diferentes procedências no Brasil; A partir desses experimentos, foram selecionadas amostras para realizar os experimentos de irradiação seletiva no quartzo rosa.
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	No quarto capítulo, os resultados dos experimentos de irradiação gama homogênea e seletiva são expostos e discutidos.
5	DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS	No quinto capítulo, os resultados gerados são compilados para os profissionais que desejam ter mais informações.
6	FINALIZAÇÃO	No sexto capítulo, são concebidas as considerações finais e as conclusões.

Fonte: Autor.

1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

1.1 INTRODUÇÃO

À priori, ressalta-se que neste trabalho o design¹ de gemas, minerais e rochas é compreendido como algo além de somente dar forma ao material (lapidação, usinagem, etc.), pois existe a possibilidade de alterar ou criar o próprio material deixando o acabamento final (outras opções de beneficiamento) para outros designers e artistas (ver tópico design de materiais gemológicos).

As gemas, os minerais-gema e as rochas, como constituintes da natureza, fazem parte da história geológica da Terra e da história humana, uma vez que indícios antiquíssimos de sua utilização provam que elas sempre deslumbraram homens e mulheres pela sua beleza e utilidade (SCHUMANN, 2006). As principais características dos minerais admiradas pelos indivíduos e muitas vezes ditadas pela moda são o brilho, formato, transparência, raridade, cor, textura e possível significado afetivo. Assim, seu apelo pode ser simbólico, visceral ou funcional².

Além de serem montadas em joias, adornam e valorizam óculos, sapatos, relógios, canetas, roupas, celulares, lustres, bolsas, portas, biombos, vidros de perfume, dentre vários outros produtos. São classificadas em gemas naturais (encontradas na natureza), artificiais (produzidas em laboratório sem equivalentes na natureza), sintéticas (produzidas na natureza com correspondentes na natureza), de imitação (materiais que imitam outras gemas), compostas (união de duas ou mais partes de outras gemas) e tratadas (com qualidade realçada) (JUCHEM, BRUM, S/D; BRANCO, 2014). Para transformar este material bruto em valioso objeto, são necessários conhecimentos técnico-científicos, o uso de tecnologia e da criatividade por gemólogos, artesãos, designers, etc. Com isso, muitas vezes consulta-se a física, química, engenharia, geometria, design e outras áreas da ciência e a subjetividade.

Existem diversos recursos tecnológicos para despertar maior interesse por parte do consumidor sobre os minerais. Tais soluções são denominadas de tratamento ou melhoramento e beneficiamento (*treatment* e *enhancement*); inclui-se a diferenciação permitindo a particularização frente à concorrência, ou seja, apenas a diferenciar sem agregar maior valor (IBGM, 2009; WILM *et al*,

¹ Ver glossário.

²Norman (2008) trata destas questões como design emocional.

2014). Segundo Branco (2014), gema realçada é aquela que teve uma de suas propriedades melhoradas de modo artificial, geralmente a cor.

Cerca de 70% das gemas comercializadas passaram por algum tipo de beneficiamento de cor ou pureza (CGEE, 2010). No passado algumas gemas já foram tratadas de forma rudimentar, com o passar do tempo, evoluiu-se, por exemplo, para a irradiação gama com ^{60}Co (cobalto com massa atômica 60, também referido na literatura como cobalto-60) associado ou não ao tratamento térmico. Estes processos são aplicados a fim de induzir ou intensificar colorações em materiais gemológicos (NASSAU, 1984).

As gemas podem ser tratadas ou beneficiadas envolvendo todo o seu material, somente sua superfície externa (parte superior, inferior e laterais), somente suas superfícies internas³ ou somente determinadas partes. Segundo o IBGM (2009), o tratamento gemológico de superfície significa o processo de preparação, acabamento ou recobrimento de superfícies de gemas, com a finalidade de combater a corrosão, modificar propriedades mecânicas e destacar a estética. Existem diversas maneiras e tecnologias para beneficiar minerais, assim como o design de superfície possibilita ornamentações padronizadas e nova identidade (SZCZEPANIAK *et al*, 2014). Avanços tecnológicos continuam a surgir ou reaparecer em novos contextos, movimentando o comércio de minerais.

Na natureza ocorre o crescimento de minerais com diversas texturas visuais e colorações. Destacam-se os bicolors e multicoloridos com zonações de cor ou bandas de cor (Figura 1). O zoneamento de cor é um padrão de distribuição de cor no cristal que segue a orientação cristalográfica. Já as bandas de cor ocorrem somente em agregados minerais (conjunto microscópico). A distribuição irregular de cor é a mancha livre que não segue orientação cristalográfica. A separação entre as cores podem ser abrupta ou gradual (distribuição gradual da cor) que pode ser evidenciada conforme a lapidação (BONEWITZ, 2013).

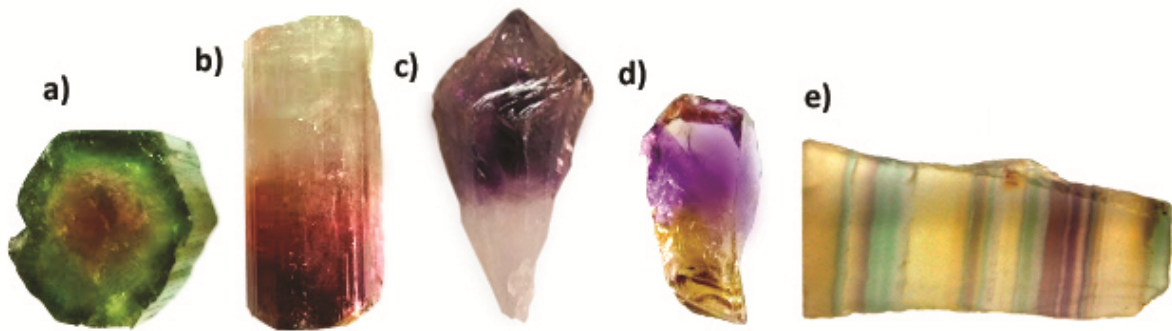
Gemas como turmalina, ametista (variedade violeta de quartzo), fluorita e ametrino⁴ (variedade de quartzo com cor violeta e amarela) podem expor cores contrastantes e tons encantadores. A turmalina exibe uma gama de misturas cromáticas como nenhum outro mineral e é comum apresentar zonação de cor

³Ao fatiar uma gema, no caso de gemas compostas (duplas ou *doublets e triplas ou triplets*), são obtidos determinado número de superfícies internas de acordo com o número de fatias.

⁴ É também conhecida por ametista-citrino ou bolivianita; pode ser natural ou artificial (Balitsky *et al.*, 2000).

(Figura 1a), bem como gradação de cor (Figura 1b). Já a ametista, é comumente encontrada com gradação de cor (de incolor a violeta) ao longo do seu eixo maior (Figura 1c), podendo também exibir zonação de cor. O ametrino (Figura 1d) exibe manchas de cor violeta e amarela aleatoriamente espalhadas ao longo do cristal (distribuição irregular de cor). A fluorita pode exibir zonação de cor ou bandamento de cor quando em agregados microcristalinos, como na Figura 1e.

Figura 1 – Exemplos de materiais gemológicos naturais bicolores e multicoloridos. a) turmalina vista de topo com zonas de cor ($\varnothing 15$ mm), b) turmalina vista lateral com distribuição gradual de cor (11x25 mm), c) ametista com distribuição irregular de cor (25x48 mm), d) ametrino com distribuição irregular de cor (15x30 mm) e e) fluorita com bandas de cor (36x19 mm).

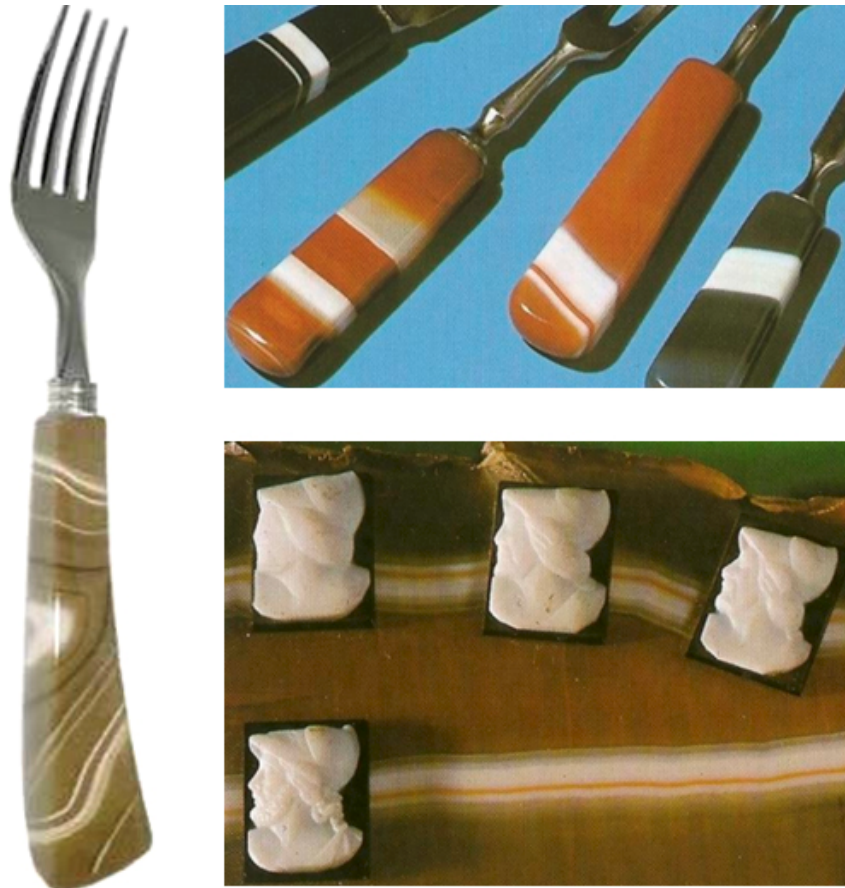


Fonte: Autor

Bandamentos de faixas paralelas de cor nos minerais, como a ágata (variedade de quartzo) ou união da opala⁵ branca e calcedônia, são utilizados para a produção de camafeus, uma vez que a diferença cromática possibilita um contraste na peça entalhada. Tais bandamentos ornamentam também cabos de talheres fabricados com este mineral, no entanto, como se trata de um material único, os cabos possuem grafismos diferenciados uns dos outros, ou seja, sem padronização (Figura 2). Em relação aos cabos dos garfos, trata-se de desenhos naturais únicos, os quais são determinados a partir do corte do material gemológico. Diversos materiais são escolhidos para ornamentar joias e outros objetos por possuírem tais configurações visuais ao acaso como na ágata, mas em alguns casos é necessário ou interessante padronizar os elementos visuais, deixando-os semelhantes ou idênticos. Por exemplo, o desenvolvimento de gemas idênticas listradas desenvolvidas por irradiação gama seletiva. Os camafeus são um exemplo da tentativa, muitas vezes frustrada, de tentar padronizar o contraste das bandas por suas espessuras.

⁵ A opala é uma variedade de sílica hidratada com 1 a 20% de teor de água.

Figura 2 – Exemplos de desenhos naturais gemológicos. Garfos com cabo em ágata (esquerda e superior esquerda) e camafeus em ágata e opala (inferior direita).



Fonte: Adaptado de Schumann (2006).

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Dentre os minerais mais comuns do planeta está o quartzo (FRONDEL, 1962; ANDERSON, 1984), que pode ser encontrado como gemas límpidas, incolores e transparentes até minerais-gemas policristalinos com texturas visuais coloridas e misturado a outros minerais. As variedades incolores e algumas coloridas, podem ser irradiadas com ^{60}Co , resultando em colorações mais valorizadas comercialmente, denominadas prasiolita (verde), *green gold* (verde-amarelo), oliva, limão, *beer* (amarelo), *whisky* (amarelo-laranja), *smoky* (enfumaçado ou fumê), *morion* ou *black* (preto), *rose d'France* (rosa) e azul (Figura 3) (CGEE, 2010). Esses materiais podem posteriormente ser aquecidos ou receber

irradiação UV na tentativa de gerar outras colorações ou tonalidades, além das induzidas pela irradiação gama. Cristais de quartzo passíveis à irradiação podem ser encontrados em diferentes regiões geográficas e são resultado do ambiente geológico em que se formaram e dos diversos elementos químicos presentes nos fluidos que originam os minerais (FAVACHO, 2001; CORREA, 2010).

Figura 3 – Possíveis resultados da irradiação gemológica. Irradiação gama (seta azul) em quartzo incolor, em comunhão com a irradiação térmica (seta vermelha) e UV (seta lilás).

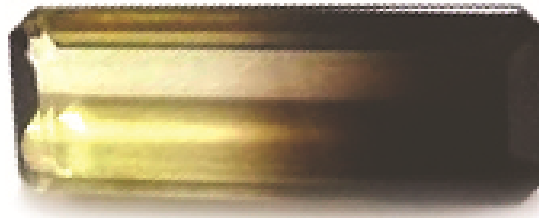


Fonte: adaptado de Alkmin (2012).

Sabendo que a escolha do consumidor por determinada cor é uma questão cultural, neste trabalho acredita-se no potencial de todas as cores e intensidades, pois há sempre a possibilidade de valorizar alguma cor ou intensidade que esteja fora do mercado tradicional (GROSMAN, WISENBLIT, 1999). Tendências de moda e o próprio *marketing* são opções de intervenção no comércio. Neste sentido, muitos materiais com respostas à radiação com cores, intensidades e translucidez fora do padrão vigente são deixados de lado podendo ser retrabalhados de outras maneiras.

No mercado de gemas e joias é possível observar a comercialização de gemas bicolores naturais principalmente lapidadas no formato retangular. Atualmente é comercializada uma variedade de quartzo de coloração parcialmente verde-amarelo e fumê, com a passagem de uma cor para a outra em gradiente, de origem natural ou resultado de irradiação gama não seletiva e tratamento térmico parcial (Figura 4). Os valores destes materiais variam entre R\$15,00 a R\$150,00 cada peça (valores de 2014 consultados em feiras e sites de comércio internacional durante esta pesquisa).

Figura 4 – Quartzo tratado com irradiação gama e tratamento térmico. Coloração parcialmente verde-amarelo e fumê com a passagem de uma cor para a outra em degradê, 25x10mm, lapidação retangular. Gema adquirida na feira Exposol 2014 em Soledade, RS.



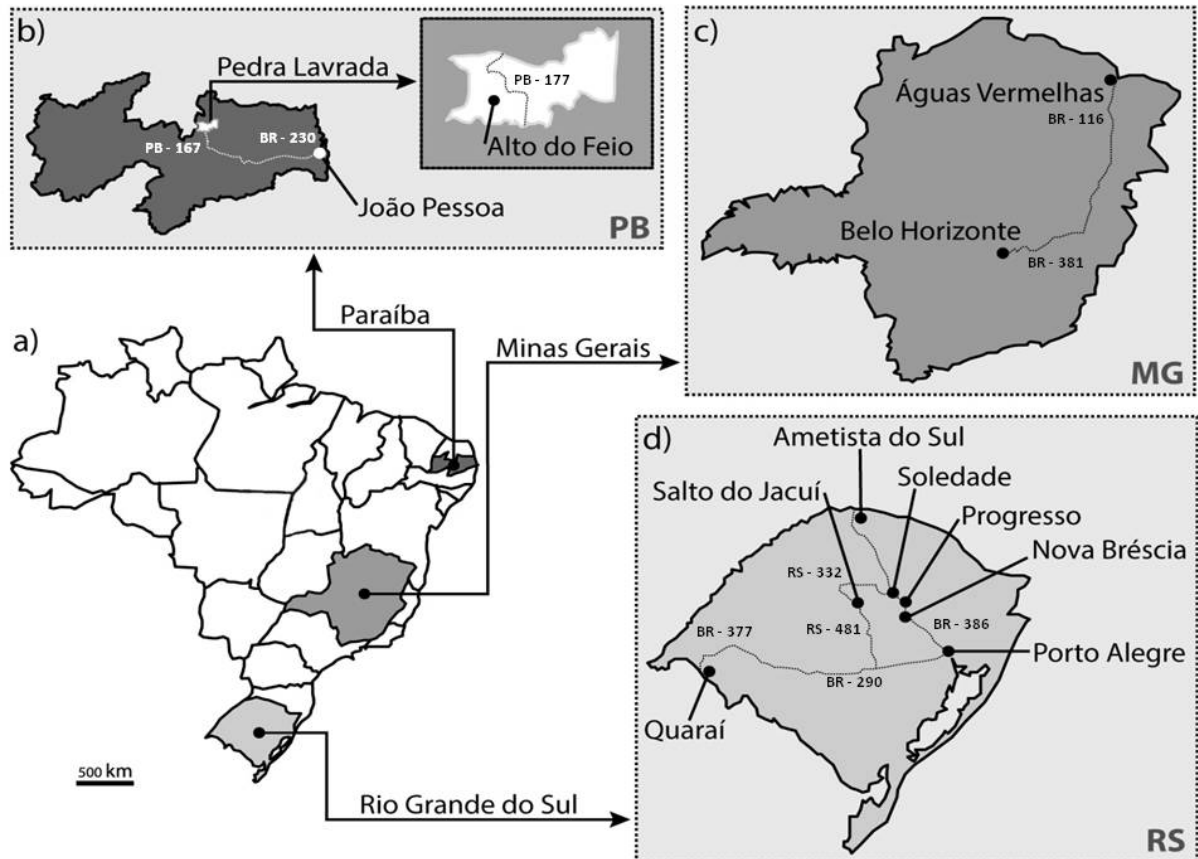
Fonte: Autor

Contudo, por receio de não concretizar a venda da gema, infelizmente alguns vendedores se contradizem, não revelam a procedência do material (muitas vezes por desconhecimento) e ainda tentam não comentar sobre o tratamento⁶ – caso recorrente na aquisição de gemas para estudo nessa pesquisa.

Isto posto, mostra-se a transformação cromática que a irradiação gama produz nos minerais como possibilidade de desenvolvimento de trabalhos autorais, necessitando abordagens investigativas. Ressalta-se que a escolha por cristais de quartzo para irradiação seletiva, para estudo nessa pesquisa, passou por algumas etapas até a definição do uso do quartzo rosa – que intitula a dissertação. Os materiais irradiados nesta dissertação são provenientes de diferentes cidades de regiões do Brasil (Figura 5): 1) Rio Grande do Sul (Quaraí, Salto do Jacuí, Progresso, Nova Bréscia e Ametista do Sul), 2) Minas Gerais (Águas Vermelhas) e 3) Paraíba (Pedra Lavrada).

⁶ Ação conhecida por *disclosure* ou esclarecimento (CGEE, 2010).

Figura 5 – Localização dos locais dos materiais gemológicos utilizados na pesquisa. a) mapa do Brasil indicando os estados: Paraíba-PB, Minas Gerais-MG e Rio Grande do Sul-RS. b) representação do estado da Paraíba indicando a capital João Pessoa-PB e a cidade de Pedra Lavrada-PB. No mapa de Pedra Lavrada está indicado o Alto do Feio. c) representação do estado de Minas Gerais indicando a capital Belo Horizonte-MG e Águas Vermelhas-MG. d) representação do estado do Rio Grande do Sul indicando a capital Porto Alegre-RS e as cidades Quaraí-RS, Salto do Jacuí-RS, Ametista do Sul-RS, Soledade-RS, Progresso-RS e Nova Bréscia-RS.



Fonte: Adaptado do Google Maps.

A seguir, são expostas a formulação do problema, o objetivo geral e objetivos específicos desta dissertação.

1.3 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

Como induzir grafismos cromáticos ou bicoloração em materiais gemológicos (quartzo) com a irradiação gama (^{60}Co) em câmara panorâmica⁷?

⁷ Câmara panorâmica é um ambiente (devidamente blindado) com fonte de irradiação centralizada a qual emana irradiação por todos os lados.

1.4 OBJETIVO GERAL

Conhecer o processo de indução de bicoloração em quartzo rosa por irradiação gama (^{60}Co) para projetar material gemológico visando o seu design.

1.5 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Conhecer a irradiação gama (^{60}Co) e sua atenuação para desenvolver o experimento;
- b) Experimentar a irradiação gama homogênea em quartzo brasileiro, selecionando uma variedade dentre as melhores;
- c) Definir parâmetros da irradiação gama homogênea e seletiva em quartzo brasileiro selecionado (quartzo rosa) conforme o contraste de tonalidade ou cor obtida;
- d) Avaliar os resultados de cor e tonalidade das irradiações à luz do design.

1.6 JUSTIFICATIVA

Diversos fatores contribuem para a justificativa desta pesquisa, dentre eles:

- a) A natureza oferece abundância de materiais para serem explorados como gemas e há uma forte demanda por estes materiais ao redor do mundo. O Brasil, por exemplo, é reconhecido internacionalmente por abrigar uma das principais Províncias Gemológicas do planeta, resultando em uma diversidade de gemas de qualidade. Avalia-se que o país seja responsável pela produção de cerca de um terço do volume das gemas de cor, excluindo o rubi e a safira (MACIEL, FERNANDES, 2004; IBGM, 2013; SILVA, 2015), destacando-se como regiões de produção, Minas Gerais, Rio Grande do Sul, Goiás e Bahia (IBGM, 1998; ZANATTA, 2014);
- b) De acordo com IBGM (2013), o Brasil é um grande exportador de material gemológico tanto bruto quanto lapidado e dentre os principais países de destino

de suas exportações estão China, Hong Kong, Índia, Estados Unidos, Alemanha, Tailândia, Israel, Itália, Formosa e Japão; e em relação à exportação de obras e artefatos produzidos com gemas, inclui-se França, Canadá, Austrália, Emirados Árabes Unidos e Reino Unido. Neste sentido, mais de 350 mil empregos diretos foram criados em 2012 no setor de gemas e joias incluindo garimpo, indústria e varejo (IBGM, 2013);

c) A pesquisa de materiais é essencial para o design, uma vez que os materiais são a substância do design (ASHBY, JOHNSON, 2011). Nela, são exploradas as características dos materiais, dentre elas, a estética. Com a possibilidade de desenvolvimento de novos e incríveis materiais, é sugerida uma inversão no modo de projetar do designer, passando aos materiais a ditarem a forma do produto (ASHBY, JOHNSON, 2011). Com isso, os materiais ganham destaque no processo, sendo muitas vezes o primeiro elemento a ser considerado, como no caso do design de gemas e joias;

d) Para fortalecer a economia brasileira, os materiais gemológicos brutos devem ser tratados ou beneficiados e convertidos em produtos ainda na região de origem (município, estado ou país), principalmente quando o objetivo é a exportação, fortalecendo a identidade de território (ZANATTA, 2014). Mas infelizmente, muitas vezes ocorre o contrário, pois o Brasil importa com alto valor agregado produtos cuja matéria-prima é sua e que foram beneficiados no exterior. Estima-se que apenas 20% da produção brasileira de gemas brutas e lapidadas permaneçam no país (WATKINS *et al*, 2009). Isso precisa ser revertido, a fim de fortalecer a economia das áreas produtoras de materiais gemológicos. De outro modo, a carência de design no setor de gemas e joias é um dos motivos pelos quais o leva a defasagem econômica e estética;

e) É de fundamental importância na indústria gemológica a reintrodução de produtos ou processos, assim como a moda de vestimenta o faz, ou a introdução de produtos novos ou substancialmente melhorados, métodos de produção e *marketing*, dentre outras maneiras de inovar, a fim de competir com o mercado exterior (OCDE, EUROSTAT, 2007). Neste sentido existem diversas maneiras de diferenciar, valorizar e revalorizar produtos; uma das possibilidades pode ser o desenvolvimento da irradiação gama de modo seletivo visando a diferenciação estética do material;

f) A ornamentação de superfícies com grafismos, manchas de cor ou texturas é uma prática antiga que vem agregando valor a objetos, pois ao alterar o desenho superficial de algo, ele é renovado e conseqüentemente revalorizado (JONES, 2010). A cor também é um importante elemento de design e segundo o estudo de

Heller (2012), esse artifício destaca os objetos, afeta os indivíduos e é associada a diferentes sentimentos. Inúmeras gemas quando extraídas da natureza não possuem cor intensa ou são incolores; isto faz com que sejam pouco valorizados no comércio, exceto o diamante que quanto mais claro é mais valorizado. No entanto, isto pode ser revertido com a utilização de tratamento ou beneficiamento gemológico a fim de valorizar as gemas no início de sua cadeia de produção;

g) O interesse por processo de irradiação de diversos produtos é crescente e bem utilizado no Brasil e no mundo, deste modo pode-se aproveitar este recurso para o beneficiamento gemológico. A irradiação gama no Brasil é utilizada para o tratamento de diversos produtos (frutas, materiais hospitalares, obras de arte), entretanto como proposto por Omi (2006), já se pode projetar irradiadores exclusivos para gemas. Apesar do surgimento de aceleradores de elétrons (técnica também de alteração de cor das gemas) para irradiação gemológica e o uso de capeamentos com filmes coloridos (recurso que possibilita alterar superficialmente a cor das gemas), estudos demonstram a eficácia e diversidade cromática obtida ao irradiar com ^{60}Co , como por exemplo, o quartzo no Brasil (DRUMMOND *et al*, 2010). Segundo Enokihara (2013),

Não se tem notícias de uso comercial e rotineiro de acelerador de elétrons, instalado no Brasil, para beneficiamento do quartzo. O tratamento com acelerador de elétrons apresenta algumas desvantagens como a geração de alta temperatura, que [...] podem provocar quebras ou fraturas nas pedras, sendo necessários tratá-las no interior de um sistema de resfriamento com água. No acelerador de elétrons de alta energia, acima de 10MeV⁸, pode ocorrer a indução da radioatividade no cristal, tornando o mineral radioativo.

h) Materiais irradiados em aceleradores (geram feixes de elétrons) e reatores (geram nêutrons) necessitam de licença para distribuir e importar material. Já com a irradiação gama com ^{60}Co isto não ocorre (CGEE, 2010). As gemas depois de expostas à radiação gama não se tornam radioativas e o mercado consumidor considera a gema irradiada ainda como natural (NASSAU; 1984; FAVACHO, 2001). Segundo Omi (2006), pesquisas com irradiação de materiais gemológicos omitem etapas do processo a fim de reservar importantes informações, muitos procedimentos são segredos industriais ou de famílias que passam dados de geração para geração justificando a necessidade de pesquisa de doses de irradiação incluindo o tempo de irradiação;

⁸ Megaelétron-volt (MeV). 1 Megaelétron-volt corresponde a 1000000 elétron-volt.

i) Raios X gerados por equipamentos ligados à energia elétrica poderiam ser utilizados na alteração cromática de minerais, mas conforme Pough e Rogers (1947), os minerais submetidos a este tratamento podem desenvolver manchas de cor de modo não uniforme, isso atrapalharia a visualização da irradiação seletiva. Além disso, esses equipamentos são voltados à área primordialmente da saúde, se tornando inconvenientes para desenvolver estudos demorados;

j) A natureza pode demorar milhões de anos para modificar a cor dos materiais, porém na irradiação artificial isto pode chegar a algumas horas ou dias (FAVACHO *et al*, 2001). Sendo assim, materiais gemológicos beneficiados possuem importante valor no mercado de exportação, e portanto é necessário ampliar e concatenar as pesquisas sobre esse tema. Apesar do uso da radiação não ser bem visto no imaginário de grande parte da população, tal prática pode ser um diferencial atrativo a determinado público-alvo;

k) Embora haja tratamentos com tecnologia de ponta como processos de difusão e revestimento, estes revestimentos rasos são muitas vezes facilmente removidos. Os revestimentos podem ser removidos pela ação de solventes, calor, recorte ou abrasivos e a difusão parcial pode ser retirada no recorte ou polimentos (CIBJO, 2014);

l) Embora a radiação gama necessite de cuidados especiais em seu uso, trata-se do uso pacífico da energia nuclear (ELESBÃO, DUARTE, 2010). O projeto de gemas e a pesquisa científica podem esbarrar em questões ecológicas e até mesmo na barreira entre arte e design. Muitas vezes o antiecológico serve de alerta ao ecológico, pois há duas maneiras de se discutir a sustentabilidade: mostrar o certo e mostrar o errado. É importante investigar propostas polêmicas em design para desmistificação. Ressalta-se que nesta dissertação aproveita-se um recurso em uso – a irradiação industrial brasileira para o design-arte (interação entre o design e a arte);

m) A proposta desta dissertação, de estudo da irradiação seletiva em quartzo para o desenvolvimento de gemas exclusivas, é relevante para o campo de beneficiamento de minerais, pois os materiais diferenciados pelo método proposto poderão ser valorizados pelos seus novos *designs* e assim poderão agregar maior valor a objetos como joias, artefatos, utensílios e adornos, dentre outros;

1.7 MÉTODOS DE PESQUISA

Esta pesquisa é experimental⁹ visando à obtenção de dados quantitativos e qualitativos de natureza aplicada, com o objetivo de gerar conhecimento para aplicação prática (GERHARDT, SILVEIRA, 2009). Os procedimentos metodológicos aplicados nesta dissertação estão divididos em seis etapas:

- a) Levantamento de dados a partir de pesquisa exploratória¹⁰, bibliográfica¹¹, documental¹² e saída de campo com observação para a proposta teórica e experimental desta dissertação;
- b) Estudo dos materiais, técnicas e equipamentos necessários ao procedimento experimental e levantamento de diretrizes básicas para as irradiações;
- c) Realização de irradiações homogêneas em diferentes materiais a fim de conhecer a técnica, necessitando de visitas ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) em Belo Horizonte, MG;
- d) Realização de irradiações homogêneas nos materiais selecionados com diferentes doses para estudo da cor/tonalidade à luz do design;
- e) Concepção de experimentos de irradiação gama seletiva, elaboração de síntese das informações coletadas e análise dos resultados.

⁹A pesquisa experimental, desenvolvida em ambiente de laboratório ou em campo, consiste em selecionar variáveis que seriam capazes de influenciar o objeto de estudo, definindo formas de controle e observação dos efeitos (GIL, 2007; GERHARDT, SILVEIRA, 2009).

¹⁰A pesquisa exploratória tem como objetivo proporcionar maior familiaridade do assunto de pesquisa com o pesquisador (GIL, 2007; GERHARDT, SILVEIRA, 2009).

¹¹ “A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites” (FONSECA, 2002, p.32).

¹² “A pesquisa documental recorre a fontes mais diversificadas e dispersas, sem tratamento analítico, tais como: tabelas estatísticas, jornais, revistas, relatórios, documentos oficiais, cartas, filmes, fotografias, pinturas, tapeçarias, relatórios de empresas, vídeos de programas de televisão, etc” (FONSECA, 2002, p.32).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS: INTRODUÇÃO

O conhecimento de gemologia é compartilhado com lapidários, cravadores, joalheiros, ourives, designers e dentre outros. Ao unir conhecimentos de design/arte¹³ aos de gemologia, originam-se os designers de gemas e joias ou, de outra maneira, designers de joias e gemas. Estes designers possuem conhecimento de ambas as áreas, de modo que criam joias e acessórios autorais seguindo seu estilo pessoal e/ou seguindo tendências de mercado. Pode-se fragmentar esse ofício¹⁴, uma vez que pode ser distinguido o design de gemas do design de joias e o design de gemas do design de materiais gemológicos (ver glossário).

Nos próximos capítulos da dissertação estudam-se parâmetros da técnica de irradiação de gemas, com foco na irradiação gama homogênea e seletiva em quartzo visando o design (estética), trata-se de uma técnica dificilmente estudada por designers ou artistas. A partir do conhecimento gerado, permite-se que profissionais da criação possam explorar a técnica com criatividade gerando novidades para o design autoral¹⁵. Neste sentido, nesse tópico são realizadas algumas considerações sobre o design de gemas visando o design de superfície. Ressalta-se que nesta pesquisa se trabalha com o design de materiais gemológicos para que outros profissionais utilizem os dados gerados para conceber o design de gemas e por fim utilizar no design de joias ou afins.

Acredita-se que o design de superfície possa ser um importante fator de atração imediata, pois há um julgamento instantâneo de valor quando o indivíduo entra em contato com o objeto (NORMAN, 2008). A ornamentação da superfície pode beneficiar a gema, de modo que crie uma identidade visual a partir da organização de elementos visuais. Conforme Botton (2007, p.72), “o desenho de qualquer objeto transmite uma impressão das atividades psicológicas e morais que ele defende”.

¹³Na contemporaneidade, distinguir a arte de design é complexo, muitas vezes vale a determinação do autor ou do contexto. Existem propostas artísticas produzidas e ainda comercializadas em série ao mesmo tempo em que existe a customização em massa de objetos de design e sua estreita relação com o artesanato, além disso há também produtos industriais exclusivos enumerados com edição limitada – como uma série de gravuras artísticas.

¹⁴ Ver glossário, design de gemas, materiais gemológicos e de joias.

¹⁵ Ver glossário.

O ato de ornar ou utilizar superfícies remonta à Pré-história, tendo em vista os desenhos descobertos nas cavernas, pinturas corporais e detalhes em cerâmicas antigas. Com o passar do tempo, o uso de elementos visuais, com intenção à repetição, possibilitou ao homem a consciência da criação de ritmos visuais, os quais deram origem à decoração (MANZINI, 1993). Posteriormente, o interesse pela ornamentação aliado às tecnologias de cada época fez crescer inúmeras possibilidades de aplicação desta arte numa perspectiva humanizadora.

A tradição da ornamentação de gemas ou uso de gemas “naturalmente decoradas” é longínquo, tendo em vista exemplares encontrados na região do Iraque com 5.000 anos a.C, além de pinturas em túmulos no vale do rio Nilo exibindo artífices negociando gemas (DANA, HURLBUT, 1969; IBGM, 2009). As primeiras gemas esculpidas ou gravadas artesanalmente surgem com motivos simbólicos, a partir das ferramentas disponíveis da época, como por exemplo, a glíptica, que promoviam grafismos em relevo nas gemas, tanto na parte superior quanto na parte inferior de uma gema (SCHUMANN, 2006; IBGM, 2009).

A especialidade do design que trata de texturas ou desenhos para aplicação em distintas superfícies é denominado design de superfície¹⁶ (RÜTHSCHILLING, 2006). A superfície, segundo Manzini (1993, p.193), se trata de uma camada externa, a “localização do conjunto dos pontos em que acaba o material de que o objeto é feito e começa o ambiente exterior” ou a circunscrição de corpos (WEISZFLOG, 2001). Já Barachini (2002) diferencia a superfície em: 1) superfície de revestir, sendo um envoltório e 2) superfície objeto, sendo o próprio objeto. Em relação aos materiais gemológicos ou gemas eles são o próprio objeto a menos que se tornem um revestimento (por exemplo, transformar um material gemológico em uma placa com desenhos vazados e com pouca espessura).

Para decorar superfícies, os designers seguem alguns princípios na construção de texturas ou padrões gráficos: conceito de módulo, sistema de repetição, linguagem visual e composição, pois geralmente os elementos visuais se repetem harmonicamente ao longo da superfície (RÜTHSCHILLING, 2008). Com relação as gemas, deve-se atentar a sua constituição física, sua superfície que pode ser bruta, polida ou fosca com diferentes graus de rugosidade, sua aceitação com relação a técnica que permitirá ornamentá-las, sua dureza, seus efeitos

¹⁶Conforme Rüttschilling (2006, s/p), “design de Superfície é uma atividade técnica e criativa cujo objetivo é a criação de imagens bidimensionais (texturas visuais e tácteis), projetadas especificamente para a constituição e/ou tratamento de superfícies, apresentando soluções estéticas e funcionais adequadas aos diferentes materiais e processos de fabricação artesanal e industrial”.

ópticos e dentre outros. De modo geral, as possibilidades de manipulação da superfície das gemas são: adicionar grafismos ou texturas visuais, alterar cor, gerar texturas táteis ou relevos, ressaltar “texturas” naturais (zoneamentos de cor, manchas, inclusões...), dentre outras possíveis. Como já mencionado nas considerações iniciais, a superfície da gema pode não ser somente a superfície externa. As gemas podem ser fatiadas e assim criam-se novas superfícies internas as quais podem ser decoradas .

O desenho na superfície pode ser simples ou complexo, repetitivo como uma padronagem ou único como uma fotografia e até mesmo com relevos (SCHUMANN, 2006; SZCZEPANIAK *ET AL*, 2014). Pode ocorrer também a escolha por conservar a superfície bruta da gema como um design natural – proposta da empresa Naturale Stein (IBGM, 2009). As texturas visuais naturais se referem à configuração do material gemológico, ou seja, tamanhos dos grãos, veios, trincas, inclusões, bandamentos, zonações, suas cores, etc. Já as táteis dependem basicamente da formação, crescimento, clivagem e estado de preservação.

Para o desenvolvimento de desenhos para superfícies indica-se Rubim (2004) e Rütshilling (2008). Os conceitos e etapas de desenvolvimento apresentados pelas autoras podem auxiliar no desenvolvimento de desenhos para as superfícies das gemas. Apesar de o design de superfície possuir determinados processos e conceitos, nesta pesquisa eles não são aprofundados, pois são utilizados os conhecimentos de cor (sensação da luz na visão humana), tonalidade ou tons (graduação da cor) e contraste (oposição entre coisas de modo que algo se sobressaia), conforme Ferreira (1988).

Por fim, exemplifica-se as informações citadas acima com a pesquisa sobre design de superfície gemológico (em quartzo) indicando o capítulo de livro de Szczepaniak *et al.* (2014), gerado durante a coleta de dados para essa dissertação. As considerações finais desse tópico são apresentadas no capítulo 6, o capítulo de finalização da dissertação. Antes disso, são compilados os resultados das irradiações nos materiais gemológicos principalmente para profissionais da área do design (design de gemas, design visual, design de joias...).

Em sequência, estudam-se parâmetros da técnica de irradiação de gemas, com foco na irradiação gama homogênea e seletiva em quartzo.

2.2 RADIAÇÕES

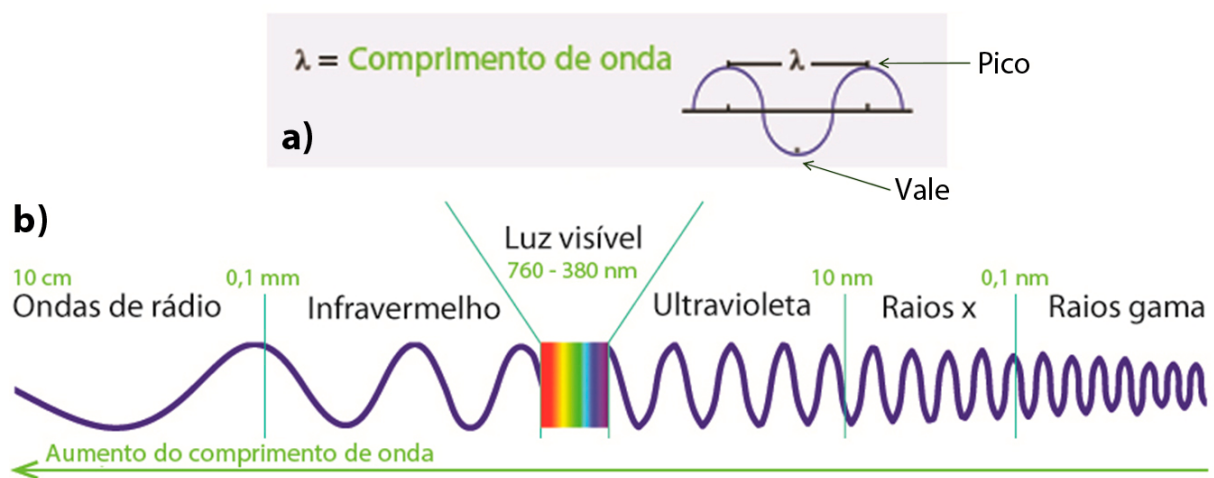
Radiação é a transmissão de energia no espaço enquanto irradiação é a exposição à radiação. O termo radiação se refere a uma forma de energia que se propaga sob a forma de partículas carregadas ou não eletricamente (radiação corpuscular), ou sob a forma de ondas eletromagnéticas, ambas emanadas de uma fonte, num espaço preenchido ou não por matéria (TAUHATA, ALMEIDA, 1984; OKUNO, 1988). Tais partículas são feixes de prótons, nêutrons, elétrons, partículas alfa, dentre outras. Já a radiação eletromagnética é uma forma de energia que se propaga através de ondas transversais, formadas por campos elétricos e magnéticos oscilantes que vibram perpendicularmente à direção de propagação. Essas ondas se propagam no vácuo com velocidade de aproximadamente 300 mil quilômetros por segundo (km/s). O comprimento de onda é a distância entre duas posições consecutivas iguais, por exemplo, a distância entre dois picos ou dois vales da onda (Figura 6a). Essa distância é expressa em nanômetros (nm), sendo que 1 nm equivale a 1 milionésimo de milímetro.

Há diversos tipos de radiações eletromagnéticas as quais correspondem diferentes comprimentos de onda. Na figura 4 observam-se os diferentes tipos de radiação por ordem de maior comprimento de onda: ondas de rádio, infravermelho, luz visível, ultravioleta, raios X, raios gama, dentre outras, que ainda podem ser subdivididas (Figura 6b). Embora existam distintas nomenclaturas, elas são formas do mesmo fenômeno (TAUHATA, ALMEIDA, 1984). Conforme Okuno e Vilela (2005), os raios X e gama são mais compreendidos como fótons (“pacotes” de energia) devido ao pequeno comprimento de onda. Certas energias radioativas são encontradas de modo natural em distintas quantidades tanto na Terra quanto no Universo, inclusive no corpo humano e são necessárias à vida. Elas podem ser sentidas ou percebidas por determinados animais, mas em relação aos seres humanos, de imediato, eles apenas percebem luz e calor. Assim, embora exista a radiação natural dos materiais, para fins de proteção radiologia (transporte de materiais), material radioativo¹⁷ é qualquer

¹⁷Existe diferença entre ser contaminado e ser irradiado, a contaminação é portar elemento radioativo por inalação ou ingestão ou contato e provocar radiação em si e em outros, já quem for irradiado (irradiação gama) não guarda as propriedades radioativas não podendo contaminar outras pessoas. A contaminação superficial em um objeto constitui a presença de substância radioativa em uma superfície em quantidades superiores a $0,4 \text{ Bq/cm}^2$ ($10\text{-}5\mu\text{Ci/cm}^2$) para emissores beta e gama ou $0,04 \text{ Bq/cm}^2$ ($10\text{-}6\mu\text{Ci/cm}^2$) para emissores alfa (CNEN, 1988).

material com atividade específica¹⁸ superior a 70 kilobecquerel por quilograma (kBq/kg) ou aproximadamente 2×10^{-9} Curie por grama (Ci/g) – concentração de atividade superior aos limites de isenção pertinentes estabelecidos pela CNEN (CNEN, 1988). De modo geral, a radioatividade consiste na emissão de partículas e energia por um núcleo atômico instável, para que alcance a sua estabilidade (TILLY JUNIOR, 2010).

Figura 6 – Espectro eletromagnético. a) É representada a tomada de medida do comprimento de onda e a indicação de um pico (seta) e um vale (seta). b) ilustração do espectro eletromagnético com alguns intervalos de comprimentos de onda, destacando o intervalo de luz visível aos humanos (vermelho ao violeta). Da direita para a esquerda o comprimento de onda aumenta (seta).



Fonte: Adaptado de Nassau (2001) e Farina *et al.* (2006).

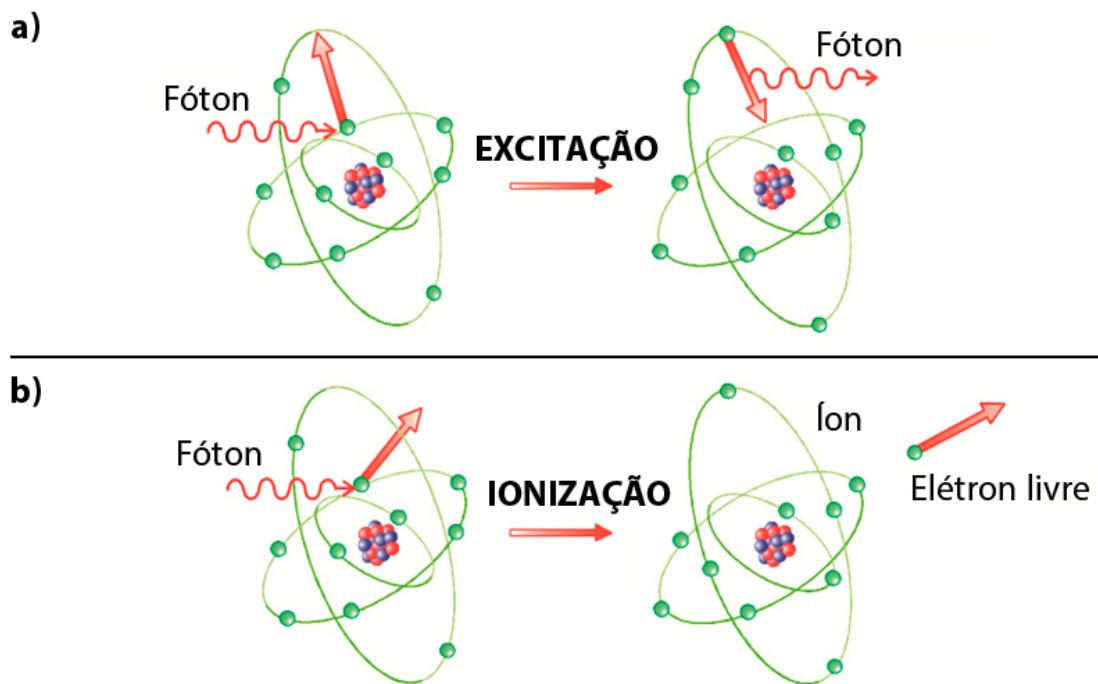
Como pode ser observada na imagem do espectro eletromagnético, a luz visível pode ser subdividida em outros intervalos denominados cores, segundo Farina *et al.* (2006), elas são: violeta (380-450 nm), azul (450-500 nm), verde (500-570 nm), amarela (570-590 nm), laranja (590-610 nm) e vermelha (610-760 nm).

De modo geral, a radiação ultravioleta ou UV originária do sol, fortemente absorvida nas camadas superiores da atmosfera, onde ocorre a formação de ozônio, aproxima-se da superfície terrestre com a variação de comprimento de onda de 280 a 380 nm, podendo desbotar determinados minerais tingidos, irradiados ou que possuem a cor promovida por centro de cor (ver capítulo sobre cor de minerais). A areia reflete 10% dessa radiação; ou enquanto que a água e a neve refletem respectivamente 20% e 85% (OLIVEIRA *et al.*, 2001).

¹⁸“Atividade Específica - atividade de um radionuclídeo por unidade de massa do mesmo. No caso de um material no qual o radionuclídeo está uniformemente distribuído, é a atividade por unidade de massa do material” (CNEN, 1988, p.2).

Já as ondas com menor comprimento de onda, como raios X (com um bilionésimo de metro) e raios gama (com um bilionésimo de milímetro), são mais energéticas, com comprimento de onda menor e alta frequência. As radiações nomeadas ionizantes (UV, raios X e gama), que serão estudadas a seguir, são aquelas que conseguem arrancar, diretamente ou não, um dos elétrons orbitais de átomos neutros, gerando um íon e um elétron, podendo alterar determinadas propriedades dos materiais (Figura 7a) (ver tópico interação com a matéria). Outra forma de interação da radiação com a matéria é a excitação. Isso ocorre quando um elétron não é arrancado (Figura 7b), mas excitado, ou seja, passa de seu nível fundamental para outros de maior energia e ao voltar ao seu nível fundamental, emite radiação eletromagnética como luz (OKUNO, VILELA, 2005; STABIN, 2007).

Figura 7 – Interação da radiação gama com o átomo. a) ocorre o fenômeno de excitação: o elétron apenas salta de camada e retorna. b) ocorre o fenômeno da ionização: ejeção de elétron.



Fonte: Adaptado de http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia_aplic.pdf.

2.3 A COR DOS MINERAIS

Normas internacionais para classificação de cor de gemas só existem para o diamante, entretanto há tendência de criar padrões para a classificação de gemas de

cor¹⁹ (JUCHEM, 2014). A cor em uma gema mineral pode ser uma propriedade diagnóstica quando for constante, distinguindo-a de outras ou pode ser variável, dificultando sua identificação.

Embora os consumidores reconheçam as gemas pela sua cor, uma espécie pode ser encontrada em várias cores, por exemplo, turmalina incolor, azul, róseo, verde, amarelo, preto e marrom, incluindo a turmalina melancia tricolor e outras bicolorações. Os nomes das gemas referem-se geralmente às variedades das cores, como por exemplo, coríndon azul é conhecido por safira e coríndon vermelho é denominado rubi (KLEIN, DUTROW, 2012). As cores dessas e de outros minerais são possíveis principalmente por causa da luz.

Cor e luz são importantes estímulos visuais com conotações culturais distintas (NASSAU, 2001). Em relação aos minerais, suas cores podem remeter a distintos significados místicos. Basicamente três elementos estão envolvidos na percepção cromática de minerais: o mineral, tipo de luz e o olho do observador, que varia de pessoa para pessoa e com o sexo. Conforme Baxter (2011, p.48),

Nós enxergamos um objeto quando a luz emitida pelo mesmo penetra nos olhos e atinge as células fotossensíveis da retina, gerando um impulso elétrico. A imagem, a que chamamos de visão, é a interpretação que o nosso cérebro apresenta sobre um conjunto de pequenos impulsos elétricos, que são gerados nas células da retina e conduzidos até o cérebro por meio das células do sistema nervoso. Essas células dividem a imagem visual em diversos componentes, como linhas, cores e movimentos. Esses componentes da imagem são transmitidos ao cérebro, onde são processados para produzir um significado, podendo ser armazenados na memória para uso futuro.

Quando a luz incide sobre uma gema, pode ser refletida, refratada²⁰, dispersa²¹ ou absorvida. Caso nenhum comprimento de onda da luz seja absorvida, a gema é incolor, caso contrário, se absorver toda luz, a gema é preta. Ao absorver determinados comprimentos de ondas da luz, aqueles que são refletidos (ou transmitidos) formam a cor que chega ao olho (NASSAU, 2001). Cabe lembrar que

¹⁹Na *Confédération Internationale de la Bijouterie, Joaillerie, Orfèvrerie des Diamants, Perles et Pierres* (CIBJO), no ano de 2015, foi discutida a proposta para graduação das cores das gemas, tendo ficado para o ano de 2016 a sua concretização. Uma das propostas foi de Menahem Sevdemish expondo o GemeWizard® system, sistema de cor digital em comunhão com a Gemological Institute of America (GIA), no qual afirmam que é o futuro a digitalização das cores. Atualmente o *software online* está disponível para graduar diamante e outras gemas (CIBJO, 2015).

²⁰Desvio (dentro da gema) que a luz apresenta em relação à sua trajetória inicial.

²¹Por exemplo, a luz branca se decompõe (dispersa) em sete cores ao passar por um prisma.

diferentes fontes luminosas e suas diferentes cores e intensidades alteram a percepção de cor do observador sobre algum objeto, fenômeno que dificulta a determinação exata de cor deste objeto.

Existem diversas causas de cor dos minerais (NASSAU, 1978, 2001). Entretanto, eles podem ser classificados em dois grandes grupos: minerais idiocromáticos e alochromáticos. Minerais que mostram sempre a mesma cor são denominados idiocromáticos, como a pirita (FeS_2). Esses minerais são assim, pois sua coloração é devida aos elementos químicos essenciais de sua composição química. Minerais alochromáticos são a maioria e são os que têm cor variável, como por exemplo o quartzo (incolor na forma pura e rosa, amarelo, violeta, etc.). Neste caso, o que dá as cores são impurezas, presença de diferentes elementos estranhos (átomos de ferro, alumínio, cromo, dentre outros) e não elementos essenciais (BRANCO, 2014).

Alguns minerais se tornam coloridos naturalmente por estarem próximos a elementos radioativos durante sua formação e as cores podem ser modificadas por passarem por aquecimento natural ou luz solar. Por exemplo, a cor da ametista natural é devido à radiação natural (ROSSMAN, 1981). Inúmeros minerais como o quartzo, turmalina, berilo, topázio e diamante são irradiados em indústrias e laboratórios para alterar ou induzir suas colorações. Porém, não são todos os minerais que aceitam o tratamento e cristais de mesma composição, mas provenientes de locais distintos podem gerar diferentes cores, ou seja, a cor depende da constituição do material, isto é, das pequenas impurezas e defeitos da sua rede cristalina provenientes de sua formação e de processos físicos que atuaram por longo tempo (FAVACHO, 2001). Entretanto, existem dezenas de causas de cor nos minerais.

Os cristais são formados na natureza a partir de soluções, fusões e vapores. Seus átomos se organizam na medida em que a temperatura, pressão e suas concentrações são alteradas, iniciando nucleações e formando uma estrutura cristalina com geometria própria (DANA, HURLBUT, 1969; KLEIN, HURLBUT, 2011). Os átomos que compõem um mineral estão situados em uma matriz repetitiva organizada, formando uma estrutura tridimensional denominada rede cristalina. Essa rede, sendo um conjunto de átomos equidistantes e simétricos possui vizinhança idêntica, a menos que haja alguma imperfeição (CALLISTER, 2012). (Alguns materiais podem possuir semelhante composição química, mas possuir diferente organização atômica, por exemplo, a composição química de um vidro de janela – SiO_2 – uma substância amorfa, sem organização estrutural, é a mesma de um quartzo, uma substância cristalina). Segundo Dana e Hurlbut (1969), o arranjo cristalino de um mineral pode ser comparado aos ordenados ladrilhos do

chão, papéis de parede, etc. Em alguns casos não existe uma rede cristalina, mas um sistema semicristalino ou amorfo, como por exemplo, na maioria das gemas orgânicas (DANA, HURLBUT, 1969; KLEIN, HURLBUT, 2011).

As estruturas cristalinas (com ordenamento dos átomos) possuem inúmeras geometrias, geralmente com imperfeições e impurezas, as quais podem ser modificadas para resultar em diferentes propriedades, que podem ter distintas finalidades. Segundo o estudo de Insiripong *et al.* (2012), a irradiação gama não altera a estrutura do quartzo, deste modo o material não é transformado em outro. Diferentes tipos de imperfeições podem ocorrer no arranjo dos átomos que constituem determinado mineral: vacâncias ou buracos, presença de átomos intersticiais ou átomos substitucionais (em ppm – partes por milhão ou menos de 0,1% da massa do mineral), imperfeições da rede cristalina, inclusões, poros, fases líquidas, gasosas, micro cristais, tudo isto pode influenciar a cor (CALLISTER, 2012). A rugosidade da superfície do cristal e sua espessura²² também pode alterar a percepção da cor (DANA, HURLBUT, 1969).

O estudo das cores das gemas é complexo e não totalmente compreendido. Sabe-se que pelos tipos de átomos, íons e pelos traços de impurezas pode-se determinar a cor. Os traços ou elementos-traço constituem menos de 0,1% do mineral e podem servir como determinação da origem de uma rocha, bem como podem ser radioativos, como traços de potássio-40 em granitos. Muitos minerais seriam incolores se não possuíssem impurezas, como por exemplo, a esmeralda é verde por possuir cromo e também vanádio, já a safira é azul por possuir ferro e titânio (PRESS *et al.*, 2006). São minerais alocromáticos.

Certos íons, impurezas, como ferro e cromo absorvem determinados comprimentos de onda do espectro eletromagnético e transmitem outras colorindo minerais incolores. A olivina com presença de ferro absorve todas as cores e transmite apenas o verde, tornando-a verde; por outro lado, a olivina sem ferro é percebida como branca ou transparente (PRESS *et al.*, 2006). Assim, átomos ou íons estranhos à estrutura ou substituídos ou até mesmo elétrons em excesso ou em falta causam diferente absorção de luz e conseqüentemente percepção de cor diferenciada (FRITSCH, ROSSMAN, 1988).

Causas de cor específicas são conhecidas através da determinação de impurezas, uma vez que não se encontram minerais 100% puros na natureza. Cada

²²A intensidade da cor da gema pode ser alterada de acordo com a espessura do material, uma vez que uma gema em formato de cunha demonstrará gradiente de cor (SCHUMANN, 2006).

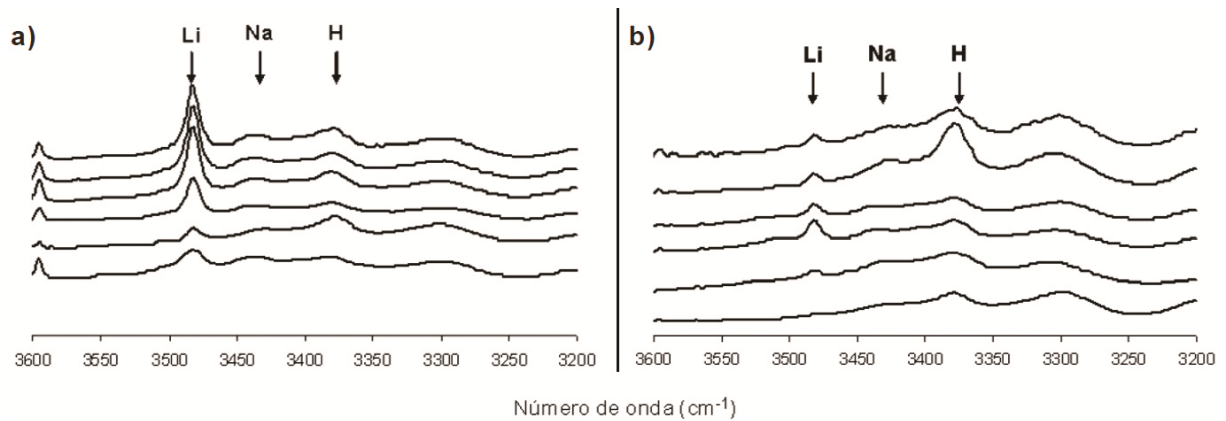
mineral natural é único e é como se tivesse um “DNA” que pode ser verificado através de instrumentos de alta tecnologia, preferencialmente por técnicas não destrutivas, como exposto em Hinrichs *et al.* (2014).

Teorias e causas de cores de minerais foram estudadas por Nassau (1978), sendo umas das causas de cor o “centro de cor” explicado pela teoria do campo cristalino – interação da geometria da rede cristalina com os elétrons das impurezas metálicas. Grande parte das causas de cor em minerais, inclusive dos irradiados, é conhecida por “centros de cor”, que é a denominação para defeitos pontuais em sua estrutura cristalina.

O centro de cor consiste em um elétron removido de uma posição normalmente ocupada, resultando em um centro de cor por buraco pela falta do elétron ou ainda pela presença de um elétron extra, resultando o centro de cor por elétron (NASSAU, 1984). Neste sentido, de acordo com Nassau (1984), existem dois precursores: 1) o “precursor centro por lacuna” pode ser um íon, átomo, molécula, impureza ou outro defeito que contenha um par de elétrons, sendo que um deles pode ser retirado pela irradiação, resultando em um “centro por lacuna” e 2) o “precursor centro por elétron” pode ser um íon, átomo, etc. que pode aprisionar o elétron removido do “precursor por centro de lacuna” produzindo um “centro por elétron”. Logo, o objetivo da irradiação é a transferência de elétrons gerando um “centro de cor por lacuna” e um “centro de cor por elétron”. Caso não houver “precursor centro por elétron”, o elétron removido pela irradiação retorna de imediato à sua posição inicial e não ocasionando a alteração de cor (NASSAU, 1984). Sabe-se, através de experimentos, que o tratamento térmico destrói os centros de cor.

Para saber se o mineral depois de irradiado irá desenvolver alguma cor com valor comercial, amostras sem controle de espessura podem ser analisadas em poucos minutos com um espectrofotômetro infravermelho (equipamento que emite infravermelho) e tal técnica pode ser estudada em Lameiras *et al.* (2006). Por exemplo, em um estudo da possível indução de cor por irradiação em quartzos incolores Lameiras *et al.* (2006) utilizaram o espectrofotômetro infravermelho MB 102 da ABB Bomem Inc. e ao analisar dois lotes diferenciados obtiveram dois espectros (Figura 8). Nesses espectros a impureza de lítio indica a capacidade para a formação de cor com valor comercial. Entretanto, segundo Drummond *et al.* (2010), não existe uma definição segura em relação ao matiz gerado. Portanto, vale-se da irradiação de pequenas amostras para a confirmação.

Figura 8 – Exemplos de espectros de espectrofotômetro infravermelho portátil. a) Quartzo com intensa banda de lítio 3475 cm^{-1} indicando a capacidade para formação de cor com valor comercial, b) Quartzo não indicando a propensão ao desenvolvimento de cor de valor comercial após a irradiação.



Fonte: Adaptado de Lameiras *et al.* (2006).

A intensidade de absorção das bandas é proporcional às doses de irradiação, de acordo com Nunes e Lameiras (2005). Doses de irradiação para o quartzo variam de baixas doses até altas doses (ver tópico doses). Lameiras *et al.* (2006) ainda fizeram testes com amostras de quartzo irradiados e aquecidos, notaram que o pico do lítio diminuiu e do hidrogênio aumentou com a irradiação e no aquecimento os picos são restaurados parcialmente. Segundo este autor, o alumínio é uma impureza comum no quartzo com 80 a 10 ppm. O alto teor de lítio e ainda teores de hidrogênio e sódio possibilitam o desenvolvimento de cores interessantes para a joalheria, principalmente o escurecimento do enfumaçado. Entretanto, cores resultantes não tão interessantes ao comércio tradicional de gemas e joias podem ser exploradas como arte, seguindo a visão do autor, a atemporalidade, como por exemplo, o caso das joias de arte, segundo Corbetta (2007).

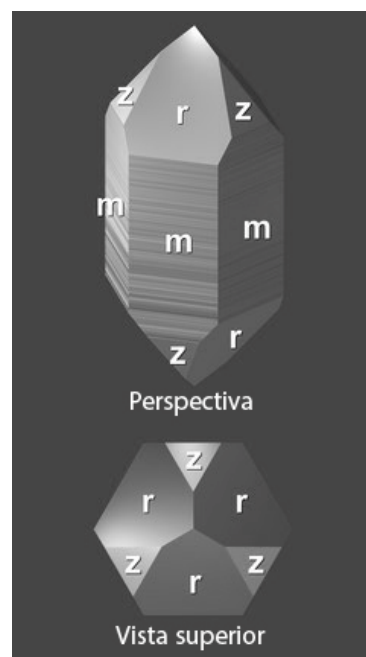
2.4 QUARTZO

O quartzo possui fórmula química SiO_2 e estrutura cristalina trigonal²³ (Figura 9). É um mineral da classe dos silicatos, obtido de ocorrências ou de jazidas naturais ou por crescimento em laboratório (FRONDEL, 1962; ANDERSON, 1984; LUZ, BRAZ, 2000). O quartzo é um dos minerais mais comuns da Terra e por causa de suas características físicas e ópticas especiais, além do aproveitamento

²³ Ver glossário.

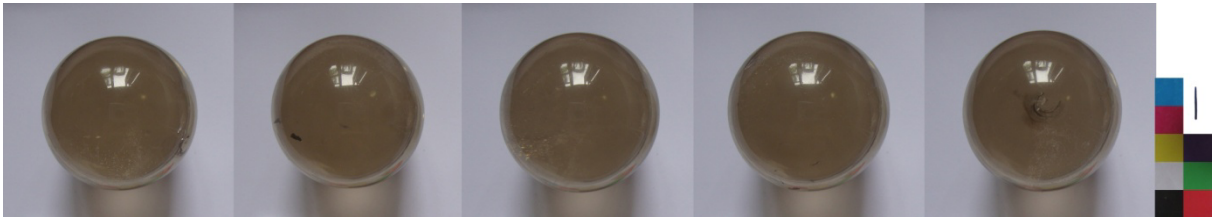
gemológico, pode ser utilizado na indústria óptica, telecomunicação, metalúrgica, construção civil, computação, em relógios, como abrasivos, em instrumentos científicos, como areia para moldes de fundição, areia para construção, vidros, saponáceos, fibras ópticas, etc. (LIMA, 2004; BRANCO, 2014; MUSEU, S/D). Dentre suas propriedades, pode-se salientar ausência de clivagem (planos em que um mineral se parte com mais facilidade), presença de fratura conchoidal, resistência a ataques físicos e químicos, brilho vítreo ou gorduroso, dureza 7 na escala de Mohs, densidade 2,65, ponto de fusão 1705°C e hábito granular ou prismático ou maciço (anédrico, ou seja, sem faces prismáticas); visualmente pode ser transparente, translúcido e opaco, sendo este último o de menor valorização no mercado de gemas e joias (FRONDEL, 1962; DANA, HURLBUT, 1969). Podem ocorrer inúmeros tipos de inclusões neste material, como por exemplo, o rutilo formando o quartzo rutilado, bastante valorizado como gema (KLEIN, HURLBUT, 2011). É difícil a observação de alteração de tonalidade no quartzo quanto ao posicionamento da estrutura cristalina. Por exemplo, ao observar uma esfera de quartzo fumê em diversas posições não é percebida alteração cromática do material (Figura 10).

Figura 9 – Ilustração de um cristal de quartzo idealizado. A letra “m” representa a forma cristalográfica denominada prisma hexagonal, com estrias de crescimento transversais ao alongamento. As letras “r” e “z” são respectivamente um conjunto de três faces maiores e três faces menores nas pontas do cristal (cada conjunto dessas faces é uma forma cristalográfica denominada romboedro), indicando a simetria trigonal do cristal.



Fonte: adaptado de: http://www.quartzpage.de/crs_intro.html.

Figura 10 - Esfera de quartzo fumê (enfumaçado) fotografada em diversas posições. Ao girar o material dificilmente se nota variação de tonalidade ou cor conforme o eixo cristalográfico. Escala da barra vertical 1 cm.



Fonte: Autor.

O Brasil possui uma das principais reservas de quartzo do planeta, com 95% das reservas mundiais, o que equivale a 78 milhões de toneladas (SCHOLZ ET AL, 2012; ROCHA, 2013). As regiões produtoras tradicionais são Minas Gerais, Bahia, Goiás, Tocantins e Rio Grande do Sul, as quais possuem extração a céu aberto e lavras subterrâneas (SCHOBENHAUS *et al*, 1994).

O quartzo é um dos minerais com o maior número de variedades gemológicas (BRANCO, 2014). Possui uma série de variedades²⁴ naturais macrocristalinas com distintas cores, como ametista (violeta), citrino (amarelo a amarelo acastanhado), cristal-de-rocha (incolor a hialino), enfumaçado (cinza, castanho, também denominado *fumê*), morion (cinza escuro a preto), róseo ou rosa, rutilado (com inclusões de rutilo, também denominado cabeleira de vênus), aventurina (com inclusões minerais douradas) e as variedades de aspecto fibroso como olho-de-tigre (castanho amarelado), olho-de-gato (castanho esverdeado/amarelado), olho-de-falcão (tonalidades azuladas) e olho-de-boi (castanho avermelhado). Além das variedades macrocristalinas de quartzo, existem as variedades microcristalinas, classificadas como calcedônia. A calcedônia bandada em diferentes cores é denominada de ágata, a vermelha é chamada de cornalina e quando ocorrem manchas de cores distintas, é denominado de jaspe. A calcedônia verde pode ser denominada de prásio ou crisoprásio e quando ela exibe manchas vermelhas é denominada heliotrópio (SCHUMANN, 2006; JUCHEM, 2014).

O quartzo que possui coloração natural verde é raro, sendo que o primeiro foi encontrado na Polônia no início do século XIX (AKHAVAN, 2014). No entanto,

²⁴Ver glossário.

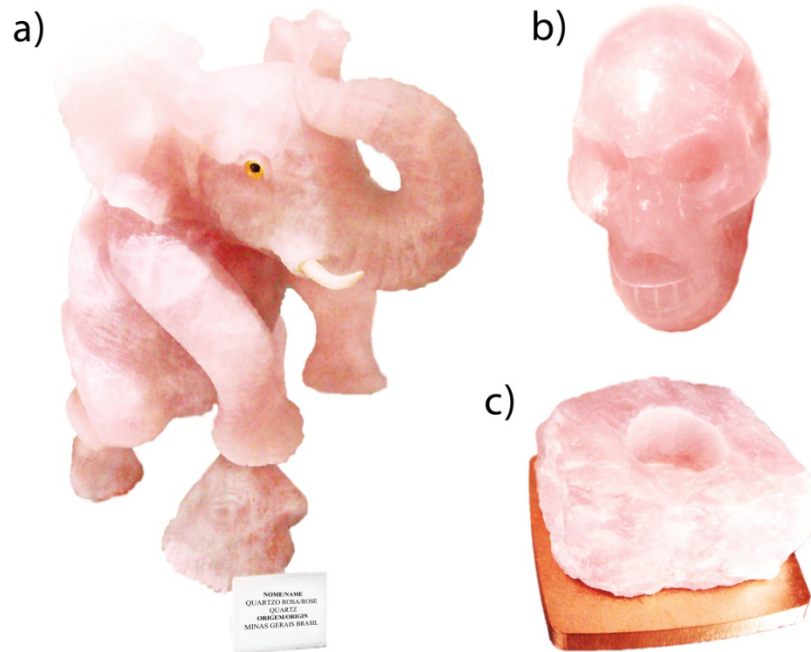
no mercado de gemas e joias é uma gema relativamente abundante, pois a maior parte do quartzo verde comercializado, são cristais que foram submetidos a tratamento térmico ou irradiação. Existem diferentes tons de verde, denominados verde-limão, verde-amarelado, verde-oliva e prasiolita. Existe uma confusão com relação à nomenclatura prasiolita e quartzo verde. Conforme Schultz-Guttler (2007), Henn e Schultz-Guttler (2009), a denominação quartzo verde é dada aos minerais incolores que após irradiados se tornam verdes, provenientes das regiões do Rio Grande do Sul, Paraná, Uruguai e zona oeste de Minas Gerais. Quando uma ametista da região de Montezuma-MG, é aquecida e altera sua coloração para verde, é denominada prasiolita ou erroneamente de ametista verde (ENOKIHARA, 2013). No entanto, observa-se que no comércio muitas vezes qualquer quartzo verde é denominado de prasiolita. Já Alkmin (2012), denomina de prasiolita o quartzo verde acinzentado, cuja cor foi originada por irradiação gama e que ao ser submetido à irradiação ultravioleta, torna-se verde. Encontra-se também no mercado de gemas amostras de quartzito verde²⁵ que são comercializadas como quartzo verde.

O quartzo rosa ou róseo (*pink* ou *rose quartz*) é umas das variedades do quartzo com coloração rosada – do rosa claro ao magenta (BONEWITZ, 2013). Ocorrências de quartzo rosa podem ser encontradas no Brasil, Estados Unidos, Índia, Namíbia, Sri Lanka, Alemanha, Rússia, Japão e Madagascar (WEBSTER, ANDERSON, 1983; CORREA, 2010). Segundo Miranda (2012), o quartzo rosa ocorre principalmente em Minas Gerais, Rio Grande do Norte, Bahia e Paraíba.

Apesar do quartzo rosa comercializado no Brasil ser proveniente das regiões ao norte do país, ele pode ser adquirido em distribuidoras nas regiões sulinas, bem como produtos derivados dele. O quartzo rosa é utilizado na fabricação de porta vela, bastão de massagem, enfeite de mesa (pirâmide, ovo, obelisco), peso de papel, esfera giratória para fonte de água, escultura, luminária, pingente, pulseira, colar de esferas dentre outros, apresentando superfície rústica, fosca e com alto brilho (Figura 11 e 12) (BAGATINI, s/d). Dentre os tipos mais comuns de lapidação deste material destacam-se os cabochões em formato de corações.

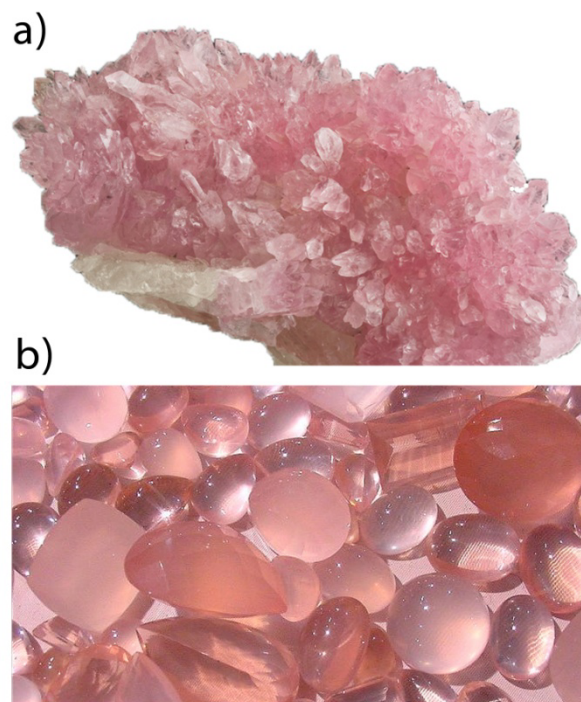
²⁵ Ver glossário.

Figura 11 – Exemplos de utilização do quartzo rosa-leitoso de Minas Gerais. a) escultura de elefante (acabamento fosco), b) peso de papel no formato de caveira (acabamento com polimento) e c) porta vela (acabamento rústico).



Fonte: Peças do Museu de Minerais de Gramado, RS.

Figura 12 – Exemplos de quartzo rosa. a) cristais raros de quartzo rosa de Minas Gerais e b) diversas lapidações em quartzo rosa transparente a translúcido.



Fonte: a) http://www.irocks.com/galleries/vault?Specimen_page=6 e b) R.Weller/Cochise College (<http://skywalker.cochise.edu/wellerr/mingem/gemtl/roseqtz/roseqtz1.htm>).

Wilm *et al.* (2014) estudaram a reutilização de rejeitos de quartzo rosa os quais foram adquiridos em uma distribuidora de Soledade, RS. O rejeito possui formato cilíndrico e é originário do processo de fabricação de porta velas. No trabalho desses autores, foram estudados o fatiamento, a perfuração, o polimento e o corte por jato d'água, culminando no beneficiamento do material por corte de uma forma complexa. Através deste estudo, percebe-se o potencial deste material para utilização tanto no design de gemas e joias quanto no design de produto, fazendo ressalva aos tipos de maquinários empregados no beneficiamento, pois segundo os autores, trincas e fraturas indesejáveis podem ocorrer na intervenção.

Conforme Correa (2010), o quartzo rosa pode ser estudado segundo a sua causa de cor e aparência, deste modo se obtêm: quartzo com aparência maciça²⁶ e intercrescimento de outros minerais; quartzo euédrico (bem formado) e com presença de impurezas metálicas, sendo este último mais raro (BONEWITZ, 2013). Assim, manganês, centros de cor envolvendo titânio, íons de titânio e ferro e inclusive inclusões de dumortierita são apontadas como causas da cor rosa no quartzo (SMITH, *et al.*, 1978; COHEN, MAKAR, 1984; GOREVA, 2001; KIBAR *et al.*, 2007).

O quartzo rosa com aparência maciça e com intercrescimento dos minerais rutilo e dumortierita possui coloração de rosa intenso a rosa pálido e desbota com a luz. Esses minerais são translúcidos, possuem fissuras e ocorrem associados a feldspatos, entretanto consegue-se porções límpidas. Podem apresentar o fenômeno denominado asterismo devido as inclusões de rutilo (VULTEE, 1955; APPLIN, HICKS, 1987; CORREA, 2010). O quartzo rosa é comumente obtido em forma maciça possuindo muitas fraturas, no entanto, consegue-se algumas porções límpidas.

O quartzo rosa de aparência euédrica e com impurezas de fósforo e ferro pode possuir coloração rosa intenso, tendendo ao vermelho quando submetido à irradiação gama, porém são raros na natureza. A causa da cor destes minerais é discutida desde o século XX com divergência de opiniões (SMITH, STRENS, 1976; CASSEDANNE, RODITI, 1991; CORREA, 2010).

Miranda (2012a, 2012b) estudou a interação da irradiação gama e do tratamento térmico no quartzo rosa da Província²⁷ da Borborema (Taboa e Alto

²⁶ Mineral sem forma definida (BONEWITZ, 2013).

²⁷ Província gemológica é uma região geográfica onde são produzidos minerais-gema em volume e variedades excepcionais (BRANCO, 2014).

do Feio). A partir de testes preliminares, constata-se que microfissuras pertencentes ao material desaparecem a olho nu devido ao escurecimento das amostras a altas doses de irradiação (BARRETO *et al*, 2009; MIRANDA, 2012a, 2012b). O estudo, no entanto, é voltado às ciências dos materiais. Essa autora sugere a irradiação gama e o tratamento térmico do quartzo-leitoso da Província da Borborema como alternativa ao beneficiamento destes materiais ao artesanato e a joalheria. O quartzo rosa estudado por Miranda (2012a, 2012b), irradiados com distintas doses de irradiação gama (máximo de 96 KGy), alteraram suas colorações para tonalidades de fumê a preto – a partir de 2 KGy, sendo que alguns materiais apresentaram contraste de manchas, e isto fez com o que a autora indicasse o seu uso em joias. A autora indica a combinação de tratamento térmico de 1000 °C e 50 KGy de irradiação gama para o quartzo rosa de baixa saturação.

Com relação ao quartzo rosa artificial (sintético), desenvolvido pelo método hidrotermal, são exigidas determinadas quantidades de fósforo na solução e posteriormente a sequência de 50 KGy de irradiação e tratamento térmico, resultando na cor rosa (BALITSKY *et al*, 1998).

O tratamento térmico realizado acima de 300 °C restaura a condição do cristal de pré-irradiação, sendo que temperaturas maiores que 537 °C alteram a estrutura cristalina (PREUSSER *et al*, 2009). Gonzaga e Guzzo (2010) atestam que o quartzo rosa de Minas Gerais (Província da Borborema) após ser irradiado com dose de 96 KGy e realizado o tratamento térmico, adquirem novas colorações (rosa-amarelado, amarela e marrom). Conforme esses autores, o centro de cor enfumaçado é perdido a 325 °C retornando à cor rosa ou rosa-pálido, a 300 °C apresentam cor rosa-amarelado, a 275 °C apresentam cor amarela e marrom a 250 °C.

Segundo Miranda *et al*. (2012), a determinação das causas da cor melhor entendida é a do quartzo enfumaçado. Este quartzo é colorido devido às impurezas de alumínio (íons) que substitui a sílica na estrutura cristalina. Essas impurezas são da ordem de 1000 ppm ou 0,1% (NASSAU, PRESCOTT, 1977; ROSSMAN, 1994).

2.5 SISTEMAS DE CORES DO DESIGN

Sistemas de cores ou espaços de cores identificam a cor através de códigos conhecidos internacionalmente, permitindo que pessoas em diferentes partes do planeta consigam visualizar a mesma cor. Sistemas de cor utilizados por muito tempo

por designers podem ser empregados na prática de pesquisa, como por exemplo, CMYK, RGB, HSB, LAB e Pantone, que serão explicados a seguir. Na área de design ou arte, pouco importaria identificar uma cor de uma gema por uma técnica desconhecida (FT-IR ou UV-Vis) e tampouco por técnicas indisponíveis ou pouco acessíveis a tais profissionais.

Em relação aos minerais é difícil obter as medidas de cores, passando a serem analisadas por comparação tanto por cartelas impressas de cor, ou a partir de imagens digitalizadas por *scanners*, fotografia convencional digital, fotografia microscópica ou a olho nu, utilizando *softwares*, como por exemplo, o Photoshop® (GREVE, 2013); houve tentativas no passado de comparação de cores com o desenvolvimento de material sintético colorido artificialmente no formato de gema lapidada (GemSet) do *Gemological Institute of America* (GIA), e cartela de cor (GemDialogue) de Howart Rubin (DNPM, IBGM, 2005). Atualmente existem aplicativos de celular que através da câmera podem capturar a cor e transformar em código (Color Capture, ColorFinder, Image Color Analyzer), no entanto, possui inconsistência de cor, necessitando de calibração, assim como qualquer outro dispositivo (GOOGLE, S/D).

2.5.1 Calibração de cores

Cartelas de cor impressas passam por teste de qualidade e são confiáveis, mas necessitam ficar armazenadas longe da claridade para não desbotarem e monitores digitais necessitam de calibração de cor, pois existem diversos modelos no mercado e também perdem a qualidade com o tempo (SEDDON, 2009). Neste sentido, existem calibradores automáticos com simplicidade de uso, como por exemplo, o Monki Smile. Basta conectar o calibrador ao computador e colocar o pequeno espectrofotômetro que existe sobre a tela do computador e ele calibra a visualização correta da cor. Este recurso é essencial na comparação entre as cores reais de objetos e suas correspondentes cores virtuais. De certo modo, a reprodução exata da cor, visualização ou impressão, por terceiros também dependerá de nova calibração.

2.5.2 Sistema “LAB”

O sistema internacional de medida de cor promovida pela Comissão Internacional de Iluminação (CIE), desde 1931, permite classificar cores

matematicamente com diagrama de cromaticidade X,Y,Z, indicando o formato luminosidade, eixo “A” e eixo “B” (LAB), denominado valores triestímulus. Esse sistema internacional possui normas, como por exemplo, o uso de iluminantes ou fontes de luz nas medidas de cor, como por exemplo, o iluminante “luz do dia” que representa a luz solar (CIE, s/d).

O espaço de cor LAB (gamut) é maior que o RGB que por vez é maior que o CMYK. O LAB é composto por três canais que quando combinados geram uma cor, onde “L” corresponde à luminosidade, “A” corresponde à cor em um eixo do vermelho ao verde e “B” corresponde ao eixo do azul ao amarelo. A grande dificuldade em utilizar este sistema é porque câmeras, impressoras e scanners geralmente não o utilizam (SEDDON, 2009). Entretanto, possui o maior gamut que outros sistemas.

2.5.3 Sistema Pantone

A empresa norte-americana *Pantone Color Institute* inspira os designers, dita tendências mundiais de cores para todos os produtos de design e inclusive pode ser utilizada para projeto de gemas e joias, como proposto pelo *Gemological Institute of America* (GIA) (GIA, s/d). A previsão de cores é realizada através de observações e de pesquisas e a cada ano é determinada a cor do ano. Por exemplo, a cor do ano de 2013 foi inspirada no mineral esmeralda. Em 2015 a cor do ano é denominada Marsala, uma espécie de vermelho-marrom escuro, um motivo a mais para se trabalhar com o quartzo rosa nesta pesquisa.

As cores das cartelas patenteadas da Pantone® são codificadas e basicamente divididas em metálicas, neons, com brilho (*coated*) e sem brilho (*uncoated*) (PANTONE, s/d). O material impresso que utiliza a Pantone possui cores fidedignas. Ressalta-se que embora as cartelas impressas de cores da Pantone sejam as mais usuais, existem as correspondentes cores em banco de dados virtuais, uma vez que o Photoshop® as utiliza.

2.5.4 Sistema CMYK

O sistema CMYK é um sistema adotado em impressões coloridas (onde a cor é devido à pigmentação), uma vez que a cor resultante se trata da sobreposição de camadas de cor, onde: “C” é azul ciano, “M” é magenta, “Y” é amarelo ou em inglês *yellow* e “K” é preto ou em inglês *Black*.

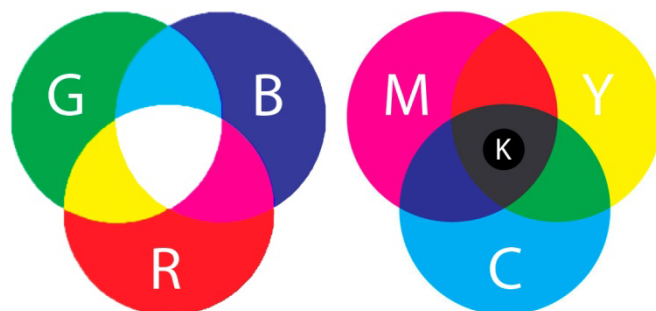
Este código é expresso no formato (C,M,Y,K) e é quantificado, uma vez que cada camada de cor pode receber o valor de saturação de 0 a 100%, como por exemplo, (0,100,0,0) corresponde a cor magenta e (0,0,0,0) corresponde ao branco.

Barbosa (2012) utiliza a comparação da cor de gemas com tabelas de cores de livros de cores, como por exemplo, o livro *Type & Color 2* de Richard Emery. Neste caso as comparações devem ser realizadas sob mesma condição de iluminação e com o cuidado para não haver influências de cores do ambiente – suporte (mesa) e roupa do avaliador. Barbosa (2012) classificou o resultado das cores do quartzo irradiado e aquecido, *green gold*, com o código CMYK gerando gráficos com a variação da saturação de cor pelo tempo de irradiação térmica.

2.5.5 Sistema RGB

Todos os aparelhos que trabalham com luz emitida utilizam o sistema RGB, como por exemplo, monitores coloridos, sendo portanto o sistema mais utilizado. “R” significa vermelho ou *red*, “G” significa verde ou *green*, “B” significa azul ou *blue*, (Figura 13) (SEDDON, 2009). Os valores atrelados a estes canais de cor vão de 0 a 255 e quando misturados (mistura aditiva) produzem branco. Por exemplo, a cor amarela equivale ao código (255,255,0).

Figura 13 – comparação entre os sistemas de cores RGB e CMYK. À esquerda, sobreposições de cores RGB: vermelho, verde e azul; À direita, sobreposições de cores CMYK: ciano, magenta, amarelo e preto. As sobreposições destas três últimas cores CMYK geram o preto fraco ligeiramente marrom, por isso a cor preta é incluída como quarta cor.



Fonte: adaptado de Pedrosa (1982) e Seddon (2009).

Após classificar a cor por algum sistema, é possível convertê-la a outro sistema, mas perdas de qualidade ocorrem, como por exemplo, transformar uma cor RGB em CMYK no Photoshop®; pois o espaço de cor do sistema RGB (gamut) é maior que o espaço de cor do sistema CMYK. Quando a cor de uma gema é quantificada,

pode ser utilizada no meio digital para realizar simulações em 3D. Ressalta-se que Motoki *et al.* (2000) estudaram a aplicação do sistema RGB na caracterização cromática de rochas ornamentais não obtendo bons resultados devido à quantidade de cores encontradas, por isso indicam o sistema HSB.

2.5.6 Sistema HSB

Moik (1980) desenvolveu o sistema HSB com atributos independentes, separando a cor em matiz, saturação e brilho. HSB significa matiz (*hue*), saturação (*saturation*) e brilho (*brightness*). Comparando aos outros sistemas, este é de fácil compreensão e também utilizado no Photoshop®. O valor de matiz varia de 0 a 360°, saturação e brilho variam de 0 a 100%, de modo que os valores de “S” e “B” determinam a tonalidade do matiz “H”. Neste sistema o vermelho puro equivale a (0,100,100), magenta puro (300,100,100), verde puro (120,100,100), amarelo puro (60,100,100), azul puro (240,100,100), branco (0,0,100) e preto (0,0,0) (MOTOKI *et al*, 2000).

Greve (2013) caracterizou as cores do basalto carijó tingido com resíduos do tingimento da ágata a partir do sistema HSB, recurso que permitiu comparações das tonalidades obtidas.

2.6 RADIAÇÕES IONIZANTES

Paul Villard, em 1900 descobriu um tipo de radiação, denominada por ele e por Rutherford de radiação gama, a qual não defletia em campos magnéticos (NASSAU, 1984). Rutherford foi quem determinou que a radiação gama é uma onda eletromagnética semelhante aos raios X, todavia mais energética (OKUNO, 1988; OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

As radiações alfa, beta e gama provêm de radionuclídeos naturais, ou seja, átomos que emitem radiação espontaneamente. Átomos de um mesmo elemento químico, com mesmo número atômico, mas com diferente número de massa, como por exemplo, ^{58}Co , ^{59}Co e ^{60}Co , são denominados isótopos, sendo que este último elemento citado é um exemplo de radioisótopo mais utilizado na indústria, pois emite radiação. Ao emitir determinada quantidade de radiação por determinado tempo, o elemento é transformado em outro estado, ou seja, ocorre o decaimento nuclear até o átomo tornar-se estável, (por exemplo, o ^{60}Co se transforma em Ni estável). A taxa em que isso ocorre é denominada atividade, sua unidade de medida é

o Becquerel “Bq”, sendo que 1Bq é uma desintegração por segundo (OKUNO, YOSHIMURA, 2010). Logo, a atividade de uma fonte é o número de transformações nucleares por unidade de tempo ocorrendo em uma amostra radioativa, sendo a unidade de medida Curie (Ci) equivalendo a $3,7 \times 10^{10}$ Bq (sistema internacional) ou transformações por segundo (STABIN, 2007; TURNER, 2007). O decaimento radioativo se refere ao decréscimo de energia; é um processo aleatório, sem a possibilidade de previsão de quando algum átomo irá decair, ou seja, quando e porque irá emitir radiação (TAUHATA, ALMEIDA, 1984).

Sabendo que a meia-vida de um elemento radioativo é o tempo para que a sua radioatividade seja reduzida pela metade, o seu decaimento é exponencial, uma vez que a cada meia-vida a sua atividade cai pela metade. A meia-vida difere para cada elemento, como por exemplo, a meia-vida do radônio-222 é 3,8 dias, do iodo-131 é 8,05 dias, do cobalto-60 é 5,27 anos, do cézio-137 é 30 anos e do urânio-235 é 700 milhões de anos. O decaimento radioativo produz novos elementos os quais podem ser ainda radioativos, denominados elementos-filho. No caso do urânio, existe uma sequência longa de decaimento, pois os elementos-filho continuam instáveis até chegar ao elemento chumbo estável (ASHBAUGH, 1988). Ressalta-se que ao decair, os valores da radiação podem chegar a níveis tão baixos que se tornam desprezíveis (OKUNO, 1998).

Os materiais radioativos são industrializados no formato de pastilhas ou pó ou líquidos, acondicionados em embalagens específicas seladas ou não seladas para diversos fins. A cápsula selada, por exemplo, é produzida de modo que só pode ser aberta através de sua destruição (CNEN, 1988). Ressalta-se que a tentativa dos pesquisadores modernos é de produzir elementos radioativos com número atômico cada vez maior e com meia-vida curta.

As radiações ionizantes foram e estão sendo utilizadas na preservação de alimentos, esterilização de produtos, diagnóstico de doenças, terapia de enfermidades, aceleração de reações químicas, desenvolvimento de novas cultivares, desenvolvimento de novos materiais, alteração de cor de materiais gemológicos, etc (BIBERGAL *et al*, 1960; OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

2.7 IRRADIAÇÃO GEMOLÓGICA

Segundo Nassau (1984), a irradiação de gemas é iniciada com testes empíricos. F. Bordas enterrou por um mês alguns cristais de coríndon incolores em sais de rádio, obtendo colorações amarelas, alterando o valor das gemas de 2 Francos

para 45 Francos o quilate (1/5 de um grama ou 200 miligramas). Em 1909, W. Crookes descobre a possibilidade de alterar a cor de diamante deixando-os expostos ao rádio, resultando, no entanto, em material radioativo (CGEE, 2010). Segundo Nassau (1984), ainda naquele ano, Delter notou que as cores induzidas por irradiação poderiam desbotar na luz. Em sequência, patentes de irradiação de minerais orgânicos e diamante foram concebidos ainda anteriores aos anos 1960, Nesta época foram realizados experimentos para a colorização de vidros com irradiação os quais se tornam escuros rapidamente (ARTHUR, 1960; BIBERGAL *et al*, 1960; CHOW, 1963).

O setor de gemas e joias a partir de testes empíricos no passado e principalmente a partir dos anos 80²⁸, vem sistematicamente testando e aprovando alternativas para o tratamento cromático de minerais, dentre elas as irradiações. Tais transformações das radiações aguçam, alteram ou atenuam as cores, podendo alcançar da transparência à opacidade, do incolor à cor pura e vice-versa (FAVACHO, 2001).

Dentre os principais tipos de radiação utilizados para alterar ou acentuar as cores das gemas, pode-se citar a radiação térmica, luz solar, ultravioleta, raios x, raios gama, nêutrons e elétrons, uma vez que cada um possui determinados pontos positivos e negativos (ver glossário). Em resumo, irradiação ultravioleta, raios X e gama não geram materiais radioativos, já a irradiação com nêutrons, elétrons, partícula alfa, dentre outras podem ocasionar a ativação de elementos tornando o material irradiado radioativo (NASSAU, 1984).

Os tratamentos de minerais geralmente são planejados para alterar de modo uniforme a superfície ou o material por inteiro, mas também podem ser seletivos como a difusão, radiação gama, aceleração de elétrons, aquecimento térmico e facilmente conseguido com lasers. Alguns métodos podem ser combinados, como por exemplo, a irradiação gama e o tratamento térmico. Contudo, somente alguns minerais permitem total ou parcial modificação cromática, sendo que a radiação gama com Cobalto-60 é um dos métodos mais efetivos e aceito na indústria e no comércio de gemas e joias. O resumo cronológico mostrando a história de empresas de irradiação e de minerais irradiados desde 1986 até 2010 foi desenvolvido em CGEE (2010).

O estudo da irradiação gama homogênea (coloração uniforme) em minerais passíveis de alteração de cor foi discutido por diversos pesquisadores ao longo dos anos, dentre eles Cohen (1956), Nassau (1978), Paradise (1982),

²⁸ Nesta época surgem distribuidoras de gemas irradiadas (CGEE, 2010).

Ashbaugh (1988), Rossman (1994), Favacho (2001), Lameiras e Nunes (2004), Schultz-Güttler *et al.* (2006), Omi (2006), Drummond (2009), Correa (2010), Barbosa (2012), Alkmin (2012), Miranda (2012), Enokihara (2013) e recentemente Duarte *et al.* (2015).

2.7.1 Nomenclatura

A Associação Comercial de Gemas Americanas (*American Gem Trade Association - AGTA*), criou códigos para notificar os tratamentos de gemas, os quais foram também adotados pela Associação internacional de Gemas Coradas (*International Colored Gemstones Association – ICA*). Essa atitude visa criar um sistema universal de notificação de tratamentos, que permita informar ao consumidor final se a gema que ele está adquirindo é tratada ou não ou a que tipo de tratamento foi submetida. Alguns desses códigos utilizados (AGTA, 2012): “I” = Impregnação ou *impregnation*; “R” = Irradiação ou *irradiation*; “C” = recobrimento ou *coating*, etc.

Já a CIBJO (*Confédération Internationale de la Bijouterie, Joaillerie, Orfèvrerie des Diamants, Perles et Pierres*), indica a inclusão do termo artificialmente irradiado ou *artificially irradiated* na nomenclatura das gemas tratadas com irradiação, lembrando que as nomenclaturas sobre tratamento são responsabilidade do vendedor (CIBJO, 2014). Para material irradiado de modo seletivo, indica-se a denominação “irradiado artificialmente de modo parcial” ou “irradiado artificialmente de modo seletivo”. Por exemplo: “Quartzo (var. fumê) artificialmente irradiado de modo seletivo Föerspak²⁹”.

2.7.2 Tratamento térmico

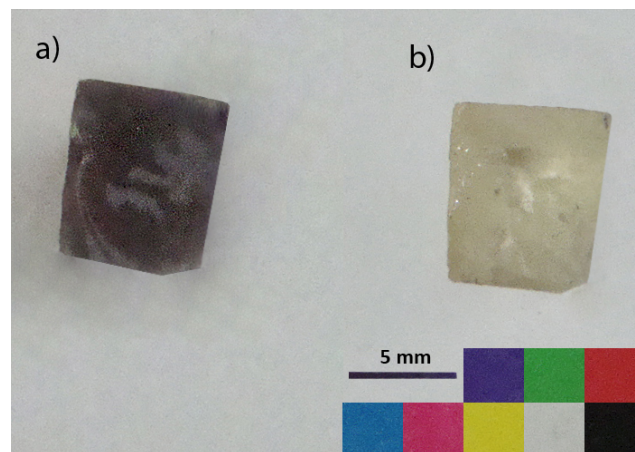
O tratamento térmico, concebido em fornos, pode alterar a cor de uma gema bem como restaurar sua cor original ou até mesmo atenuar tons fortes ou enegrecidos em gemas irradiadas, podendo ultrapassar a média de 400°C e podendo levar de minutos a horas aquecendo (FAVACHO, 2001; CGEE, 2010; ENOKIHARA, 2013).

²⁹Segundo a CIBJO (2014), a marca de empresa ou nome de produtores pode ser identificado junto ao nome do material, pode vir antes ou após o nome. Neste exemplo o nome Föerspak é a marca do autor desta dissertação.

O superaquecimento acidental nos materiais gemológicos por corte ou lapidação pode acarretar em perda da coloração, podendo ser restaurada com a irradiação (NASSAU, 1984). O tratamento térmico não necessariamente é realizado em fornos elétricos, mas também em fornos a lenha, lembrando que o material pode alterar a cor ao entrar diretamente em contato com uma chama de fogo, mas pode trincar e quebrar devido ao aquecimento rápido.

Ressalta-se que foram realizado teste de desbotamento, no material selecionado para essa dissertação, utilizando uma fonte de calor (Figura 14).

Figura 14 – Aquecimento. a) amostra de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada (PB), irradiada com raios gama (dose de 10 KGy) e b) a mesma amostra após passar por perda de coloração em chama de fogo (aproximadamente 200°C) por 55 s.



Fonte: Autor.

2.7.3 Laser

Embora existam diferentes tipos de lasers³⁰, neste trabalho é selecionado o laser de CO₂ como exemplo por ser utilizado em materiais gemológicos (CIDADE, 2012). O instrumento óptico Laser significa amplificação da luz por emissão estimulada de radiação a qual permite cortar e gravar determinados materiais, assim não se trata de uma fonte de energia, mas de um conversor de energia. Esta tecnologia foi baseada no postulado de Einstein em 1917, mas somente em 1960 o primeiro laser foi concebido e demonstrado por Maiman. Trata-se de uma tecnologia rápida e precisa possibilitando o detalhamento superficial de peças (HECHT, TERESI, 1998; BAGNATO, 2008). O feixe é altamente pontual proporcionando o desenho de

³⁰Existe a intenção de gerar laser de raios gama desde 1980, até o presente momento existem estudos sobre esta possibilidade (AGEE, 1987, 2002; KARYAGIN, 2002; ZHANG, 2015).

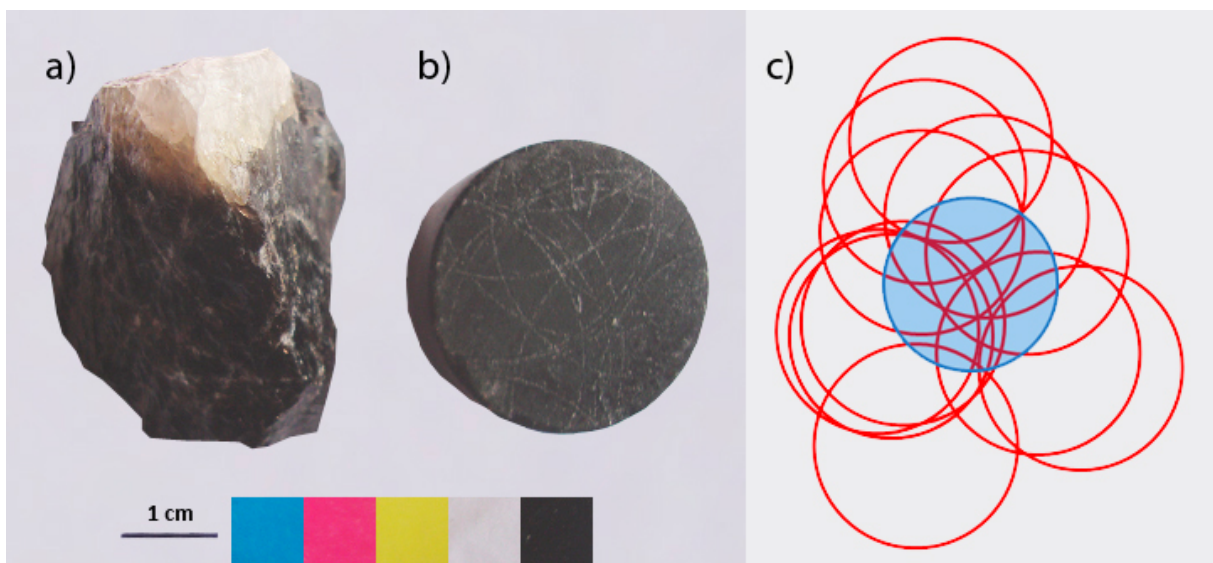
linhas finas por ser uma irradiação intensa, monocromática e altamente seletiva, além disso, pode formar um leque e irradiar por áreas (conjunto de pontos) formando imagens com diferentes tonalidades. Os parâmetros a serem controlados geralmente são: velocidade, potência e foco (altura do material em relação ao feixe).

A interação do laser com minerais resulta na modificação superficial geralmente apresentando configuração esbranquiçada ou escura, resultado da absorção do laser que é transformado em calor (ZHOU, MAHDAVIAN, 2004). Esta pequena interação pode fundir, vaporizar ou recozinhar o material exposto (HAN, CUBENCU, 2008).

Os trabalhos de Cidade (2012), Pichler *et al.* (2013), Barbian *et al.* (2014), Barbian (2015) e Soares *et al.* (2015) são exemplos do uso do laser em minerais orgânicos e inorgânicos. Além de gravar e cortar materiais, Dapper *et al.* (2013) expõe a possibilidade de sinterização seletiva a laser de pó de mineral.

Nesta dissertação, o laser de CO₂ foi testado em amostras de quartzo rosa irradiadas com alta dose de radiação gama e em amostras não irradiadas (Figura 15) para observar o desbotamento da irradiação pelo calor gerado pelo laser. Foi utilizado o equipamento de corte e gravação a laser Mira® Automatisa Laser Draw, do LdSM/UFRGS, utilizando a lente 10 cm x 10 cm e 100 % da potência do equipamento (60 w), velocidade desejada 100 m/min. Foram realizados desenhos circulares inspirados em Cidade (2012).

Figura 15 - Amostras de quartzo rosa maciço de Águas Vermelhas (MG) irradiadas com 100 KGy. a) amostra bruta transformada em bicolor com auxílio de fogo e b) amostra fatiada e com linhas circulares de gravação a laser e c) desenho gerado para a gravação a laser, área utilizada em azul.



Fonte: Autor.

2.8 RAIOS GAMA (^{60}Co)

Raios gama (γ) são radiações eletromagnéticas monocromáticas, não possuem massa nem carga elétrica, são altamente penetrantes, geradas no núcleo instável do átomo e possuem energias entre 2,6 KeV e 7,1 MeV (OKUNO, 1988; STABIN, 2007; TILLY JUNIOR, 2010). De modo geral, raios X e gama possuem as mesmas propriedades físicas ao interagirem ou se propagarem com um material, no entanto são diferenciados quanto à maneira como são gerados (TILLY JUNIOR, 2010).

A radiação gama é uma das radiações mais utilizadas em diversos equipamentos como, gamagrafia na detecção de trincas em materiais, ressonâncias, irradiadores, etc. Trata-se de um tratamento mais utilizado para a indução de cor em materiais gemológicos devido à alta penetrabilidade e uniformidade da cor resultante. O procedimento não deixa resíduos radioativos e não utiliza energia elétrica³¹, porém necessita de extremo cuidado na armazenagem e manipulação (NASSAU, 1980; FAVACHO, 2001). Neste sistema há possibilidade de irradiação a seco ou em tanques com água deionizada, sem íons. Existem desde grandes irradiadores até de pequeno porte para pesquisas, tais equipamentos são classificados como de categoria I, II e III, sendo este último voltado ao comércio de produtos em grande escala e totalmente automatizados (OMI, 2006).

O radioisótopo mais utilizado na indústria para emitir radiação gama de alta energia é o Cobalto-60³², descoberto em 1930 (SATIN, 2002; BUENO, 2008). Este radioisótopo emite, através do decaimento radioativo ou desintegração, partículas beta e raios gama um após o outro em cascata e com energias distintas. A desintegração do ^{60}Co finaliza com sua transformação total em ^{60}Ni estável podendo ser reaproveitado; durante o percurso de tempo são liberadas quatro partículas beta menos (β^-) e sete fótons gama (γ) (Quadro 2). Este processo de decaimento é constante e previsível em relação ao tempo, por exemplo, a meia-vida do ^{60}Co é de $5,272 \pm 0,007$ anos, ou seja, neste período a fonte é reduzida à metade (LEGRAND ET AL, 1974).

³¹Neste trabalho constata-se que embora a radiação gama emitida seja espontânea, irradiadores industriais utilizam energia elétrica para movimentar a fonte e controlar sua atividade e segurança através do uso de computadores. O irradiador de pequeno porte denominado Gamma cell não utiliza energia elétrica, mas o volume máximo a ser irradiado é pequeno em torno de 3 litros (NASSAU, 1984).

³² 1g de ^{60}Co contém cerca de 50 Ci de radioatividade (BUENO, 2008).

As partículas beta são similares aos elétrons, entretanto podem ter carga positiva denominados pósitrons (β^+), ou negativa (β^-). No decaimento (β^-), um nêutron é convertido em um próton e em uma partícula β^- , assim o número atômico aumenta em 1 unidade e a massa conserva-se constante (TILLY JUNIOR, 2010). Por exemplo, o $^{60}_{27}\text{Co}$ se transforma em $^{60}_{28}\text{Ni}$ (LEGRAND *ET AL*, 1974). Isótopos do elemento cobalto-59 com menor número de massa, por exemplo, ^{58}Co , ^{57}Co , decaem e se transformam em ferro, já os isótopos com maior número de massa, por exemplo, ^{61}Co , ^{62}Co decaem e se transformam em níquel (SONZOGNI, s/d).

Quadro 2 – Partículas e fótons liberados pelo Cobalto-60 com suas respectivas emissões de energias e intensidades.

Partícula/fóton	Energia (KeV)	Intensidade (%)
β_1^-	$1,97,7 \pm 1,5$	$\leq 6 \times 10^{-4}$
β_2^-	$317,9 \pm 0,3$	$99,89 \pm 0,06$
β_3^-	$664,8 \pm 0,9$	$\leq 3 \times 10^{-3}$
β_4^-	$1491,1 \pm 0,3$	$0,10 \pm 0,02$
γ_1	$347,0 \pm 0,3$	$\leq 5 \times 10^{-3}$
γ_2	$467,2 \pm 0,6$	$\leq 4 \times 10^{-4}$
γ_3	$826,2 \pm 0,6$	$(4 \pm 2) \times 10^{-3}$
γ_4	$1173,22 \pm 0,05$	$99,89 \pm 0,06$
γ_5	$1332,51 \pm 0,05$	$99,993 \pm 0,002$
γ_6	$2158,7 \pm 1,2$	$(7 \pm 2) \times 10^{-4}$
γ_7	$2505,75 \pm 0,09$	$\leq 3 \times 10^{-5}$

Fonte: Adaptado de Legrand *et al.* (1974).

A partir dos dados do quadro acima, infere-se que o ^{60}Co emite no máximo a energia de 2505,75 KeV, mesmo que raramente. Embora existam diversas energias sendo emitidas pelo ^{60}Co , as mais significativas são 1173 KeV e 1332 keV ou 1.17 MeV e 1.33 MeV³³, uma vez que as partículas beta não contribuirão com a dose, pois são

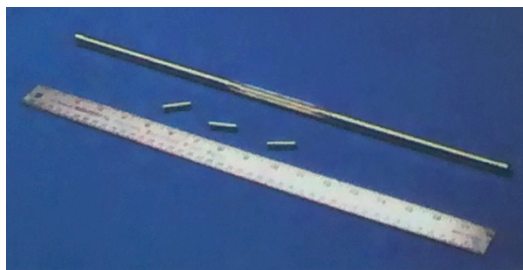
³³ 1 eV = $1,602 \times 10^{-19}\text{J}$ e $1,6 \times 10^{-13}\text{J} = 1\text{MeV}$ – milhão de elétrons volts.

absorvidas na cápsula da fonte selada, ou seja, são blindadas (ASHBAUGH, 1988). Omi (2000) ressalta que é comum estabelecer o valor médio 1.25 MeV como abundância de 100% para o ^{60}Co .

Segundo a Nordion (s/d), a produção do cobalto radioativo ^{60}Co necessita de tempo e energia. O cobalto comum ^{59}Co não radioativo é a matéria-prima, trata-se de um metal semelhante quimicamente ao níquel, com densidade 8,9 e estrutura cristalina hexagonal compacta (CALLISTER, 2012). Este metal, embora tóxico, é amplamente utilizado pela indústria em geral³⁴ (GRAY, 2011).

De acordo com a Nordion (s/d), a matéria-prima (^{59}Co) é extraída do solo e transformada em pó purificado³⁵, por sua vez este pó é comprimido no formato de pastilhas as quais são revestidas com níquel. Logo após, são encapsuladas e montadas em hastes, denominadas lápis, de aço inoxidável para sua introdução no reator nuclear – as hastes possuem 11,1 mm de diâmetro, 45,1 mm de comprimento pesando 0,24 Kg (Figura 16). No reator, o ^{59}Co torna-se ^{60}Co radioativo através da absorção de nêutrons (BIBERGAL *et al*, 1960; TAUHATA, ALMEIDA, 1984). Assim, as hastes podem ser enviadas aos irradiadores dos clientes e são protegidas por cápsula de blindagem. Os metais da cápsula de blindagem, para transporte da radiação, são o chumbo e o aço, uma vez que o aço protege o chumbo de possíveis impactos. Os materiais devem retornar para a empresa depois de concluída a vida útil do material radioativo para serem reutilizados. Os recipientes estão de acordo com os Regulamentos para Transporte Seguro de Materiais Radioativos da Agência Internacional de Energia Atômica – IAEA (ICGFI, 1999).

Figura 16 – Exemplo de guarnição de fonte: haste de aço com cartuchos de ^{60}Co .



Fonte: LIG (s/d).

³⁴O cobalto não radioativo é também utilizado como pigmento (CoO) na indústria de vidros, cerâmicas e tintas, bem como em ligas metálicas, por exemplo, o aço de cobalto utilizado em brocas. O vidro de cobalto, por exemplo, utilizado como garrafas e pratos foi utilizado como isolante de fio de telefone. O azul do cobalto foi também empregado na filtragem óptica seletiva da cor luz amarela extremamente forte emitida pelo sódio em ensaios de chama (GRAY, 2011).

³⁵ Segundo Bibergal *et al*. (1960), a pureza do cobalto não radioativo utilizado para ativação é de 99,5%. Este metal é constituído por impurezas de níquel e ferro, ambas desprezíveis na ativação.

Ressalta-se que o Cobalto-60 substitui o Césio-137, também emissor de raios gama, por apresentar maior rendimento energético e facilidade de manipulação (OMI, 2000). Segundo Fonseca (2003), o Brasil possui grande cadeia produtiva do cobalto, sendo que 80 a 90% é exportado e o restante é comercializado no país. Esta fonte radioativa não emite nêutrons os quais tornariam os materiais radioativos (ICGFI, 1999).

A CBE-Embrarad, Companhia Brasileira de Esterilização, antiga Empresa Brasileira de Radiações, é a principal empresa brasileira de irradiação gama comercial, com duas unidades em São Paulo. A empresa esteriliza diversos produtos além de irradiar gemas. O valor cobrado por quilo de gema (quartzo) é de vinte dólares, em 2015.

Dentre os laboratórios de pesquisa de irradiação, ressalta-se o IPEN, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares que possui reator de irradiação com nêutrons e gama; o CDTN, Centro de Desenvolvimento em Tecnologia Nuclear com irradiador panorâmico a seco e a CNEN, Comissão Nacional de Energia Nuclear disponibilizando inúmeras informações sobre irradiação, em especial sua unidade IRD, Instituto de Radioproteção e Dosimetria que trata de proteção radiológica e dosimetria. Além destes locais, é possível encontrar radiação gama em indústrias que realizam seus próprios diagnósticos com equipamentos de gamagrafia – irradiador portátil de pequeno porte, no entanto, é um equipamento perigoso.

2.8.1 Doses

A radiação ionizante é mensurada a partir da ionização que ela produz, para isso existe a grandeza denominada exposição que mede quanto de radiação o objeto é exposto. Entretanto, ela não reflete o quanto de energia é absorvida pelo material, por isso é utilizada a dose absorvida. Deste modo, é prevista a dose absorvida, unidade gray “Gy” (utilizada a partir de 1975), que significa o quanto o material absorveu de radiação, ela é dada em Joule por Quilograma (TAUHATA ET AL, 2014). Deste modo, 1 Gy equivale a 1 J.Kg^{-1} , 1 Rad (antiga unidade) equivale a 0,01 Gy e 1 Gy equivale a 100 Rad (STABIN, 2007).

Segundo Tauhata *et al.* (2014), a dose absorvida se trata da quantidade de energia cedida à matéria pelas partículas ionizantes por unidade de massa. Entretanto, o conceito de dose possui outras atribuições de acordo com o que se deseja expressar: dose no ar, dose de entrada, dose de saída e dose de entrada em algum receptor ou medidor (TILLY JUNIOR, 2010). A dose no ar é a medida que o feixe

de radiação deposita no ar. A dose de entrada é a dose de entrada à superfície do objeto. A dose de saída é a medida de saída à superfície do objeto, logo onde o feixe deixa o objeto. Essa dose é útil para a avaliação de imagens radiográficas. A dose de entrada em algum receptor ou medidor, como o próprio nome sugere, é a dose coletada após atravessar o objeto. Geralmente essa dose é menor que a dose de saída, pois a radiação diminui antes de alcançá-lo (TILLY JUNIOR, 2010).

Para o efeito biológico, existe a dose equivalente descartada neste trabalho. Scaff (2002, p.82) exemplifica facilmente, com uma analogia, a relação entre as grandezas: “[...] a exposição é a chuva, a dose é o quanto a chuva nos molha e a dose equivalente é o tamanho do resfriado que pegamos”.

O principal parâmetro adotado por pesquisadores e comerciantes para a alteração cromática de minerais é a dose. A unidade gray é utilizada na quantificação de dose absorvida em materiais gemológicos. Os minerais adquirem a dose conforme o tempo de exposição, pois a dose é cumulativa e a distância do mineral à fonte de radiação pode acelerar a aquisição dessa dose – através da lei do inverso do quadrado da distância. A Atividade da fonte influencia na rapidez com que se obtém a dose, possui grandeza definida pelo valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia dividido pelo intervalo de tempo. A unidade do sistema internacional é o inverso do segundo (s^{-1}), denominado becquerel (Bq) (CNEN, 2005).

Cabe ressaltar que as doses utilizadas na irradiação gama gemológica comparadas às doses permitidas aos ser humano são altíssimas, são letais. A dose aguda de 10 Gy gera inflamação dos pulmões e doses maiores geram efeitos no sistema nervoso e cardiovascular, induzindo o indivíduo à morte (OKUNO, YOSHIMURA, 2010). No entanto, “não há limiar de dose para a indução de dano no DNA que resulte em câncer, o que significa que até a dose de radiação ambiental pode causar câncer” (OKUNO, YOSHIMURA, 2010, p.218). A dosagem utilizada em experimentos com minerais pode ser centenas de vezes maiores que em trabalhos com amostras orgânicas (Quadro 3). As doses utilizadas em pesquisas com quartzo natural podem variar entre 0,5 KGy a 3500 KGy. McLaughlin *et al.* (1989) definem intervalos de doses para a área industrial: de 10 Gy a 3 KGy são doses baixas, de 1 KGy a 10 KGy são doses médias e de 5 KGy a 100 KGy são doses altas.

Quadro 3 – Exemplos de doses utilizadas em diferentes estudos, destacando-se os experimentos com quartzo.

OBJETO	DOSE	REFERÊNCIA
Sementes de arroz	1 Gy a 50 Gy	Miranda <i>et al.</i> (2009)
Levedura em suco de laranja	Até 7,5 KGy	Domarco <i>et al.</i> (1996)
Livros com infestação de insetos	0,2 KGy a 0,5 KGy	Magaudda (2004)
Desinfecção de fungos e bactérias	10 KGy	Rela <i>et al.</i> (2008)
Medula óssea	Entre 8 Gy a 10 Gy	Giordani <i>et al.</i> (2004)
Vidro de janela (escurecimento)	Entre 100 Gy a 50 KGy	Zfieng <i>et al.</i> (1997)
Mineral kunzita (de rosa para verde)	5 MGy	Dias (2002)
Mineral turmalina rosa (intensificação)	5000 KGy a 5500 KGy	LIG (s/d)
Quartzo incolor (transformado em ametista)	200 KGy	Drummond <i>et al.</i> (2010)
Quartzo Black (escurecimento)	700 KGy a 900 KGy	LIG (s/d)
Quartzo var. ametista (sintética)	Entre 20 KGy e 60 KGy	Rossmann (1994)
Quartzo incolor (transformado em verde, amarelo e castanho)	Entre 50 KGy a 450 KGy (com tratamento térmico)	Nunes e Lameiras (2005)
Quartzo incolor (transformado em amarelo-esverdeado ou acastanhado)	Entre 65 KGy a 400 KGy	Drummond <i>et al.</i> (2010)
Quartzo incolor (escurecimento)	400 KGy	Nunes <i>et al.</i> (2009)
Quartzo rosa (escurecimento)	Máximo 96 KGy	Miranda (2012)
Quartzo incolor (transformado em verde)	90 KGy	Enokihara (2013)
Quartzo fumê (escurecimento)	10 KGy a 60 KGy	LIG (s/d)
Quartzo incolor (transformado em verde)	200 KGy	Duarte <i>et al.</i> (2015)

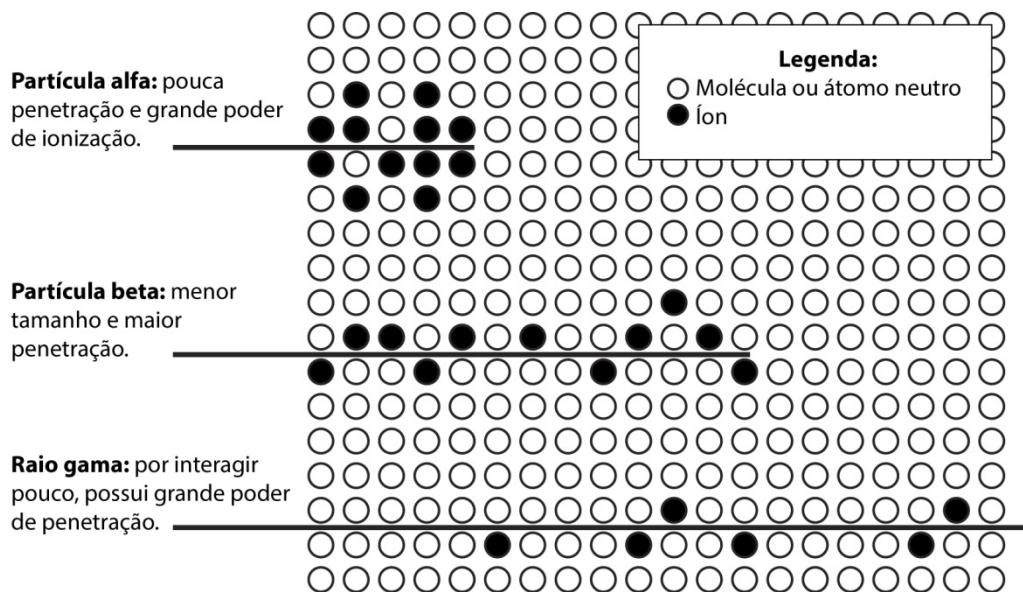
Fonte: Diversos autores (indicados no quadro).

2.8.2 Interação com a matéria

A interação da radiação ionizante com a matéria se dá em nível atômico e resulta na transferência de energia por excitação ou ionização, uma vez que parte desta energia é dissipada na forma de calor (OKUNO, 1988; STABIN, 2007). Ondas eletromagnéticas ao serem transmitidas em qualquer meio diminuem de intensidade exponencialmente, interagindo e depositando energia nesse meio. Conforme a interação entre a energia da onda e o meio, maior ou menor será a sua profundidade

de penetração (Figura 17), isto é, quanto menor o número de interações maior será a profundidade de penetração (OKUNO, VILELA, 2005). Esta profundidade depende da energia do fóton, da distância e da probabilidade de o fóton interagir com o material (TURNER, 1995).

Figura 17 – Comparação entre poder de ionização e penetração entre partículas alfa, beta e raio gama em um meio-material ilustrativo.



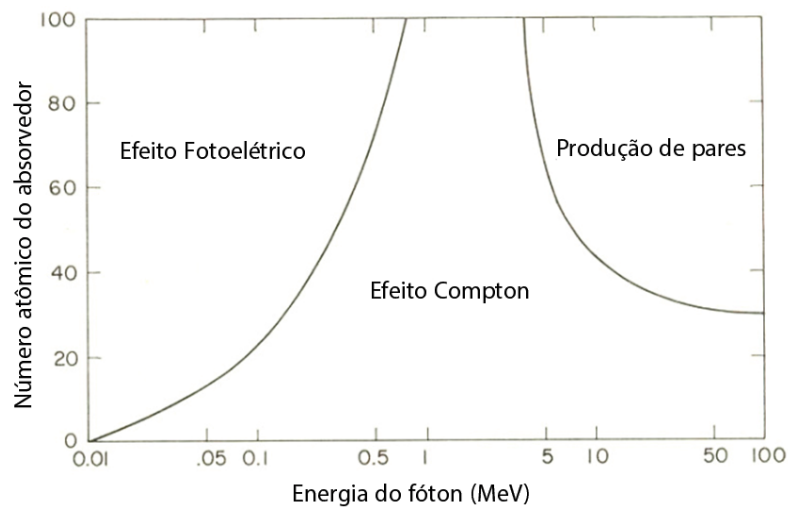
Fonte: Adaptado de Holbert (2005) e Barbosa (2012).

O elétron se desloca pelo meio dissipando sua energia através de sua interação (choques) com outros elétrons encontrados em sua trajetória (NOUAILHETAS, s/d). Ressalta-se que a energia necessária para realizar ionização em moléculas é geralmente maior que em átomos isolados (TILLY JUNIOR, 2010).

Em 1903, Geiger e Marsden realizaram um experimento para provar o modelo atômico de Rutherford proposto em 1911, para isso utilizaram partículas alfa, elas foram direcionadas a uma fina folha de ouro resultando, em sua maioria, no atravessamento e outras foram dispersas (STABIN, 2007). A radiação gama a qual não possui carga elétrica interage com o meio principalmente por colisões com os elétrons dos átomos (TILLY JUNIOR, 2010).

Segundo Okuno (1986, 1988), basicamente três efeitos decorrentes da radiação gama podem ocorrer na interação com a matéria, dependendo da energia do fóton e do número atômico do meio: o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. Ressalta-se que há a possibilidade não ocorrer interação, isto é, o fóton atravessar a zona “oca” do átomo ou ocorrer apenas excitação (TAUHATA ET AL, 2014) (Figura 18).

Figura 18 – Gráfico³⁶ mostrando as energias para as quais existem dominantes processos de interação da irradiação gama com a matéria.



Fonte: Adaptado de Dieses e Vineyard (1957) e Nunes (2008).

Denomina-se efeito fotoelétrico quando o fóton incidente é totalmente absorvido, desaparecendo ao passar sua energia a um elétron das camadas mais externas da eletrosfera expelindo-o. O elétron possuidor da energia pode ionizar ou excitar outros átomos até a dissipação total da energia, tal efeito pode ser compreendido como ionização indireta. Este efeito é dominante em baixas energias (STABIN, 2007).

No efeito Compton, o fóton é desviado por interagir com um elétron orbital das camadas externas passando a ele parte de sua energia e continuando a interagir com outros elétrons, pois ele não é totalmente absorvido nestas primeiras colisões. Este efeito é dominante em materiais com alto e baixo números atômicos e com energia moderada (OKUNO, 1988; STABIN, 2007). A distância em que o elétron secundário irá percorrer dependerá principalmente da energia recebida e da densidade do meio, podendo percorrer desde centímetros a microns de distância. Segundo Tilly Junior (2010), este espalhamento resulta em embaçamento ou *fog*, reduzindo o contraste, em imagens radiográficas. Nas energias entre 200 KeV e 2MeV ocorre prioritariamente o efeito Compton (OKUNO *et al*, 1986).

O efeito denominado produção de pares ocorre quando um fóton com energia moderadamente alta, acima de 2 MeV, interage com o núcleo atômico produzindo um elétron positivo (pósitron) e outro elétron negativo. Assim, a energia

³⁶ Este gráfico pode ser simulado pelo sistema XCOM *on line* do NIST em <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>. Mcalister (2013) utilizou o sistema XCOM no estudo da radiação gama.

do fóton é transformada em massa. Estes elétrons viajam perdendo energia com excitações e ionizações semelhantes ao efeito fotoelétrico (STABIN, 2007).

Turner (2007) salienta outro efeito, a fotodesintegração, semelhante ao efeito fotoelétrico. Neste efeito o fóton interage com o núcleo do átomo. Ele deve possuir vários MeV para ultrapassar a energia de ligação do *nucleon* (partículas: prótons e nêutrons) e ejetar a partícula, deixando o átomo instável e radioativo. Segundo este autor, a probabilidade de ocorrência das reações fotonucleares é menor do que as probabilidades combinadas para o efeito fotoelétrico, efeito Compton, e produção de pares. Deste modo, deve-se tomar cuidado com altas energias dos aceleradores de elétrons que são da ordem de 10 MeV.

2.8.3 Blindagens

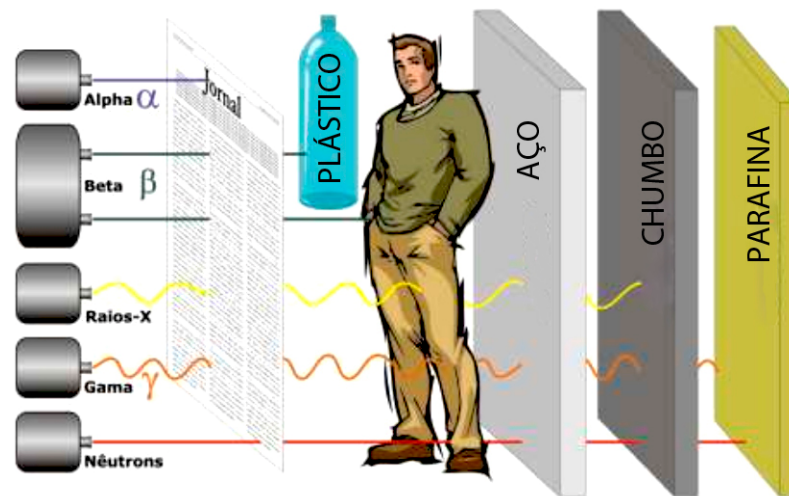
Toda irradiação gama utilizada no Brasil é supervisionada pelas normas da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). A proteção radiológica atua no uso correto das radiações ionizantes em relação ao ser humano e ao seu meio ambiente, tendo como métodos utilizados (TAUHATA, ALMEIDA, 1984):

- a) Blindagem;
- b) Distância entre a fonte e o objeto irradiado;
- c) Tempo de exposição.

A exposição à radiação é cumulativa, ou seja, quanto maior o tempo de exposição maior será a dose. Ao alterar a distância a dose é modificada conforme a lei do inverso do quadrado da distância. A dose diminui com o quadrado da distância, isto é, ao dobrar a distância a dose é reduzida a um fator de quatro (STABIN, 2007). Assim, se um objeto estiver mais próximo da fonte e outro objeto estiver mais afastado e com maior tempo de exposição, pode ser que ambos tenham a mesma dose.

A blindagem é destinada a atenuar ou impedir a passagem de partículas ou de radiações de um ponto a outro (Figura 19) (CHILTON *et al*, 1984). A escolha da blindagem adequada resulta do tipo de radiação e da dose. As blindagens são constantemente estudadas por profissionais de proteção radiológica ou física médica (STABIN, 2007).

Figura 19 – Relação de partículas e ondas e blindagens: papel, plástico, humano, aço, chumbo e parafina.



Fonte: Adaptado de http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia_aplic.pdf.

Diferentes partículas e ondas possuem diferentes penetrações e interações com a matéria. A partícula alfa (núcleos de hélio: dois prótons e dois nêutrons), sendo pesada, possui baixo poder de penetração e são blindadas por uma folha de papel. Em sua interação com o ar, perde em média 33,85 eV de energia por ionização, isto é, sua deposição de energia por unidade de comprimento é grande (OKUNO, 1988).

A partícula beta (elétron de alta velocidade beta menos e pósitrons beta mais) é mais penetrante que a alfa, ioniza menos, possui pequena massa. Para blindar esta energia basta uma placa de alumínio ou 10 mm de acrílico (OKUNO, 1988).

Nêutrons são partículas sem carga, não ionizam diretamente e transferem sua energia para outras partículas que produzem ionização. Estas partículas são muito penetrantes e podem ser blindadas por parafina e água, sendo materiais ricos em hidrogênio (TAUHARA, ALMEIDA, 1984; OKUNO, 1988).

Raios X e gama atravessam o material absorvedor, os raios X são comumente blindados por acessórios de proteção radiológica constituídos por fina camada de chumbo e vidros plumbíferos. Raios X geralmente possuem menor energia que raios gama, mas há alguns raios gama com menor energia que raios X (STABIN, 2007).

Na radiação gama, energia de interesse neste texto, são utilizados chumbo, água, argamassa baritada, concreto, ferro, aço, tungstênio, no caso do equipamento de gamagrafia é também utilizado urânio exaurido (subproduto do processo de

enriquecimento), sendo a maioria materiais densos com alto número atômico (ROCKWELL III, 1956). Além da argamassa baritada, blocos de chumbo são utilizados no revestimento de paredes de câmaras de irradiação e possuem encaixe no formato de cunha dificultando a passagem da radiação. Há também a liga denominada Cerrobend que substitui em muitos casos o chumbo, ela é composta por 50% de bismuto, 13% estanho, 32% chumbo, impurezas e em alguns casos pode possuir cádmio. Em junho de 2015, Farajohalli *et al.* (2015) comprovaram e expuseram que em relação a proteção radiológica não existe significativa distinção entre blocos de chumbo e blocos de Cerrobend.

O metal chumbo, do latim *plumbum*, é encontrado em diversas partes do meio ambiente, ocorrendo em cerca de 60 minerais. É comumente utilizado em baterias de carros, gasolina, tintas, soldas (com estanho), ligas metálicas, proteção radiológica, cosméticos, como recipiente para líquidos corrosivos, isolante acústico, absorvedor de vibrações, recobrimento de cabos elétricos, vidros "cristais" (24%), etc (BRANCO, 2014; MUSEU, S/D). É um material natural extraído principalmente da galena (sulfeto de chumbo, PbS) em minas de extração e pode ser reciclado (EPA, s/d; GIDLOW, 2004). A galena possui 86% de chumbo, ocorrendo como veios em arenito, calcário e dolomito (BRANCO, 2014).

O chumbo é um material tóxico ao ser humano principalmente por ingestão, inalação e também por manuseio durante a fabricação de produtos cerâmicos e tintas, entretanto é durável e de custo reduzido em relação a outros materiais com semelhante densidade (XIE *ET AL*, 1998; MOREIRA, MOREIRA, 2004). Possui ponto de fusão a 327,50°C e forma cristalina cúbica de faces centradas (SHACKELFORD, 2008). É resistente a diversos produtos químicos e corrosão, mas possui baixa resistência mecânica (GOMES FILHO, 1975). Sua alta densidade 11,4g/cm³ e nuvem de elétrons é que permitem o seu uso como blindagem das radiações. Os países que mais consomem chumbo são Estados Unidos, China, Alemanha e Austrália (LOPEZ, 2015). Ressalta-se que segundo Teixeira (2013), o Brasil volta a produzir chumbo metálico a partir de 2014 pelo projeto da Votorantim Metais, em Juiz de Fora, MG, com uma planta para 75.000 t de chumbo metálico por ano.

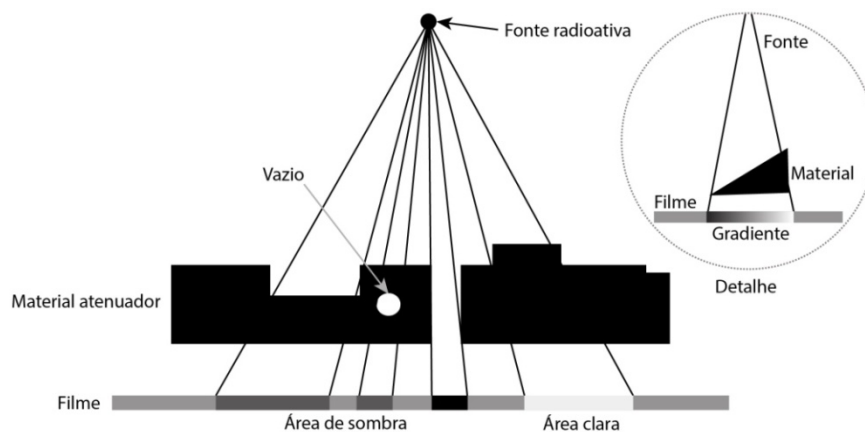
Ressalta-se que diversos materiais podem ser testados como blindagem, por exemplo, testes de comparação entre blindagem de concreto e de ametista foram realizados por Korkut *et al.* (2010) os quais descobriram que o quartzo variedade ametista é melhor que o concreto. Além disso, Bisselle *et al.* (1963) conclui que misturas de materiais, como repetidas camadas de polietileno e chumbo, funcionam melhor que o chumbo sozinho (desde que o material de blindagem tenha a mesma espessura mássica - no caso em vez de 2 cm de chumbo, 23 cm de polietileno).

Entretanto, não se pode bloquear raios gama, mas sim atenuá-los a níveis desprezíveis biologicamente.

Embora os materiais poliméricos pareçam inapropriados para uso em blindagens, atualmente foi desenvolvido e patenteado o material de blindagem polimérico, nanoestruturado e flexível denominado Demron que segundo o fabricante equivale a 5 mm de chumbo (RST, s/d). A NASA, por exemplo, vem pesquisando novos materiais também poliméricos para proteção radiológica através do Programa Experimental da Estação Espacial Internacional denominado MISSE-X (NASA, s/d).

O bloqueio ou atenuação seletiva da irradiação (irradiação seletiva) significa que partes de um objeto irradiado é exposto à fonte e outras partes são protegidas com blindagens (ver tópico irradiação gama gemológica homogênea e seletiva). Esta prática é comumente usada em exames de raios X quando partes do corpo humano são protegidas dos raios. O material atenua a irradiação basicamente conforme sua espessura e massa atômica, proporcionando obstáculos (átomos) aos minúsculos comprimentos de ondas. A geometria do material pode influenciar a passagem de doses a partir de furos, trincas, zonas ocas e desníveis (Figura 20). Assim, caso haja variação de espessura ou descontinuidade no material, ocorrerá variação da dose absorvida (TAUHATA, 2014).

Figura 20 – Resultado da interação de raios X com material com configuração diferenciada. Áreas de sombra, de claridade e de gradiente (detalhe).



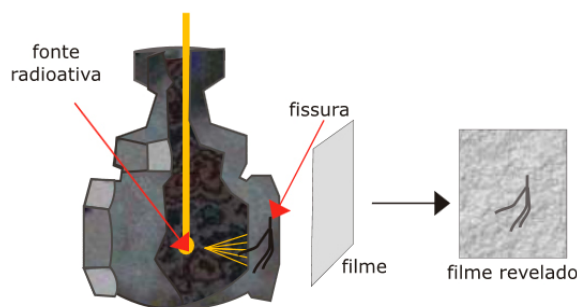
Fonte: Adaptado de Hayes (1998) e Silva *et al.* (2014).

Na Figura 20, o filme sensibilizado pela irradiação demonstra áreas de sombra, área clara e gradiente. Quanto menor é a espessura do material absorvedor maior será a intensidade da sombra, isto ocorre quando há rebaixo na peça ou vazio interno na peça e quando há furo passante a irradiação passa diretamente (HAYES,

1998). A área clara corresponde ao acréscimo de material aumentando sua espessura ou poderá ocorrer à introdução de material com melhor capacidade de atenuação, ou seja, formando um mosaico através da justaposição de materiais diferentes. A área de gradiente corresponde a gradual alteração de espessura do material absorvedor. Nota-se ainda que o afastamento do material absorvedor em relação ao filme amplia as zonas de sombras e clareamento.

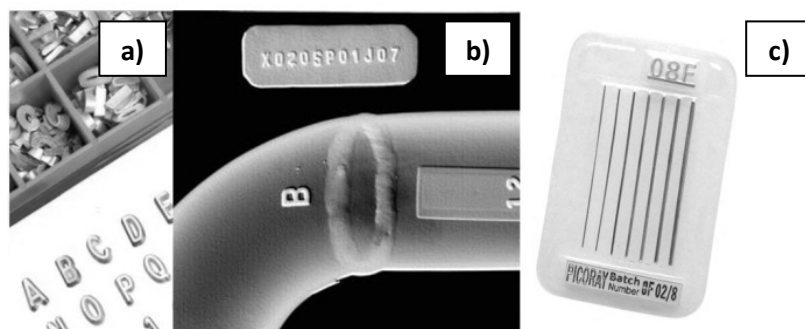
Indústrias de grande porte geralmente utilizam a gamagrafia na busca de possíveis trincas em peças e problemas de solda (Figuras 21 e 22). A aeronáutica utiliza em suas inspeções, por exemplo, nas asas e turbinas de aviões. Este procedimento pode ser comparado a uma “mistura” de estêncil (máscara) com fotografia.

Figura 21 – Detalhe de equipamento de gamagrafia: realizando gamagrafia de peça metálica com radiação gama.



Fonte: http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas/energia_aplic.pdf.

Figura 22 – Gamagrafia. a) letras de chumbo para radiografia, b) exemplo de gamagrafia e c) penetrâmetro.



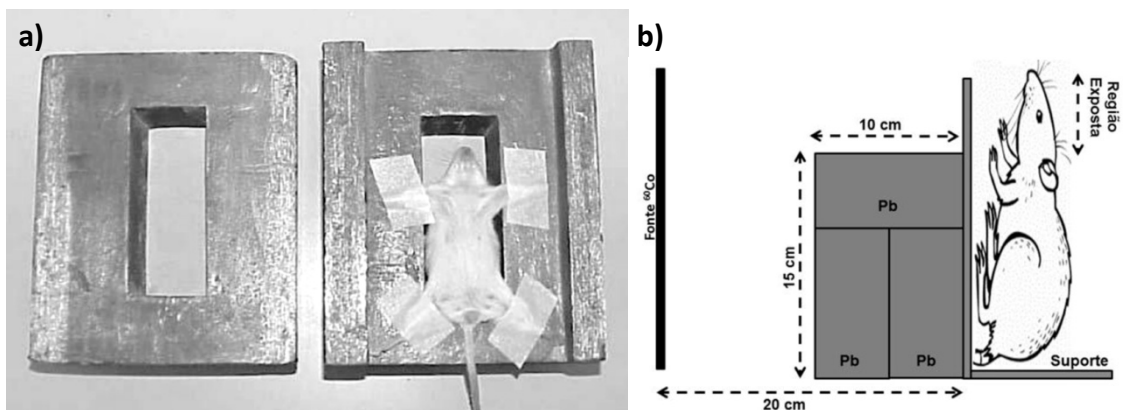
Fonte: Adaptado de: www.omettoequipamentos.com.br.

As letras de chumbo auxiliam na marcação e indicação de detalhes na radiografia. O penetrâmetro, mostrado na Figura 22c, é um instrumento utilizado para medir o poder de penetração de um feixe de radiação, tais artifícios assim como

outros possibilitam a análise da qualidade de imagem (SILVA *et al*, 2014). O penetrâmetro se trata de uma peça construída de material radiograficamente análogo ao material da peça ensaiada, com um formato simples que contém algumas variações de forma bem definidas, como furos ou entalhes, permitindo verificar se o operador usou a técnica correta, principalmente o tipo de filme adequado e a correta energia das radiações (OMETTO, s/d). No entanto, a visualização da irradiação seletiva se dá normalmente em filmes sensíveis a radiação exposta.

A irradiação seletiva é comumente utilizada, de modo experimental, para irradiar determinadas partes de animais, principalmente camundongos. Azevedo (2007) segue a metodologia de Novaes e Brito (2007) para proteger da irradiação apenas as extremidades de camundongos (Figura 23a), neste caso o bloco de chumbo é concebido no formato de uma moldura. Andrade (2014) utilizou blocos maciços de chumbo empilhando-os como barreira para irradiar somente a cabeça do camundongo (Figura 23b).

Figura 23 – Irradiação gama seletiva em camundongos. a) proteção de chumbo para irradiação seletiva de camundongo com 700cGy^{37} baseada em Novaes e Brito (2007) – apenas as extremidades do animal foram preservadas e b) disposição de blocos maciços de chumbo para irradiação seletiva em camundongo.



Fonte: a) Azevedo (2007) e b) Andrade (2014).

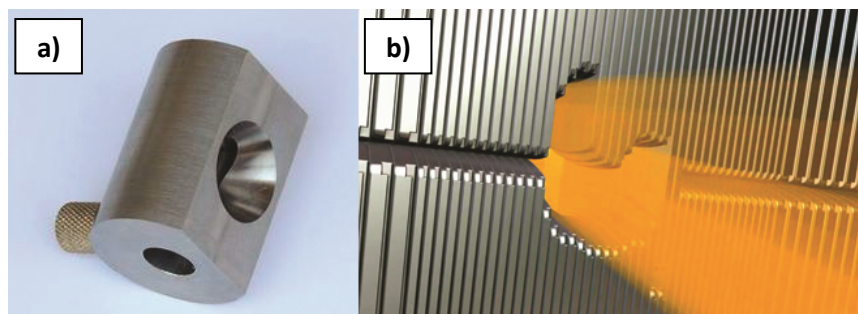
Na área médica, foi desenvolvida uma tecnologia para cura de tumores cranianos, o aparelho denominado Gama Knife se trata de um irradiador com diversas fontes que são colimadas e direcionadas a um ponto (WU *et al*, 1990). A irradiação seletiva e a colimação são realizadas através de liga de tungstênio e chumbo. Já a invenção de Rostoker *et al*. (1997), refere-se à técnica para fabricação de dispositivos semicondutores, fotolitografia, porém transferindo padrões a partir

³⁷ 1 cGy equivale a 1 rad (OKUNO, YOSHIMURA, 2010).

de máscara (irradiação seletiva) com pouca radiação gama, diferentemente da proposta desta dissertação. Silva (2009) expôs um estudo de irradiação seletiva (com raio X e máscara de chumbo) em vidros dopados com óxido de cobre, resultando em um material bicolor.

Elementos radioativos emitem radiação em todas as direções. Na medicina nuclear os equipamentos emissores de radiação tentam colimar ou delimitar o máximo possível a radiação desenvolvendo uma irradiação seletiva para não haver danos aos tecidos biológicos saudáveis. Em relação aos irradiadores industriais, alguns são colimados e outros são do tipo fonte panorâmica. Existem dispositivos os quais são acoplados nas extremidades das fontes para limitar o campo de irradiação, ou seja, o colimador (Figura 24).

Figura 24 – Colimadores de radiação. a) colimador de tungstênio para radiografia industrial e b) colimador multilaminar para medicina nuclear.



Fonte: <http://www.indiamart.com/flowraytechnology/radiography-x-ray-accessories.html>,
http://www.varian.com/euen/oncology/radiation_oncology/unique/millennium_mlc.html.

O colimador direcional de tungstênio (Figura 24a) ou de chumbo limita o feixe com no máximo 60° de abertura e é utilizado na gamagrafia. Já a utilização do colimador multilaminar permite desenhar uma área de abertura conforme desejado, no entanto, trata-se de um segundo colimador as vezes descartado.

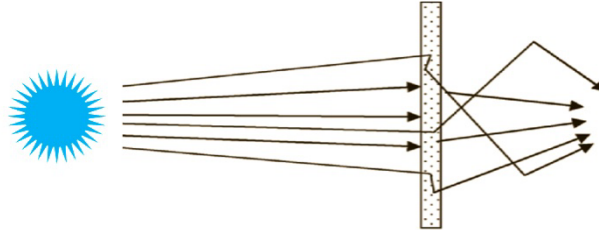
Sendo assim, de modo geral, com relação a uma fonte de raios gama em situação ideal, a intensidade da radiação que perpassa um material decresce espontaneamente com a espessura “x” do mesmo, expressa pela lei exponencial (HUBBEL, 1982; İSHAKO’GLU, BAYTA, 2002; STABIN, 2007; TAUHATA *ET AL*, 2014)³⁸:

$$I = I_0 \cdot e^{-u \cdot x} \quad (1)$$

No entanto, é difícil encontrar uma situação ideal com feixe bem colimado (Figura 25).

³⁸ Número de Neper ou base do logaritmo natural: $e^1 = 2,71828...$

Figura 25 – Exemplo de interação da radiação (com material qualquer) com condição real, sem colimação. A fonte emite raios divergentes os quais alteram suas direções, se espalham.



Fonte: Adaptado de Stabin (2007).

Quando fótons interagem com a matéria eles podem perder toda sua energia em uma única interação ou perder aos poucos variando sua direção e sua distância de trajeto antes de interagir não pode ser prevista (PREISS, 1965; TAUHATA ET AL, 2014).

Deste modo, utiliza-se o fator *buildup* “B” (2). Irradiadores de gamagrafia e irradiadores panorâmicos industriais emanam feixes espessos de radiação, não permitindo a eliminação da radiação secundária. O fator *build-up* “B” tem aplicação particular para a atenuação deste tipo de feixe amplo, é a razão entre o feixe espesso (feixe primário e espalhamento) e o feixe primário em um dado meio material. O fator é maior que 1,0 e são obtidos de modo empírico a partir de mensuração ou simulação (STABIN, 2007). Valores de *build-up* podem ser encontrados em Xavier (2006).

$$I = B \cdot I_0 \cdot e^{-u \cdot x} \quad (2)$$

“I” é a intensidade da radiação após atravessar o objeto de espessura “x”, “I₀” é a intensidade da fonte de radiação, “B” é o fator *build-up* e “u” é o coeficiente linear de atenuação do material em Cm⁻¹. O valor deste coeficiente é a soma dos efeitos fotoelétrico, Compton e produção de pares, pode ser encontrado no *National Institute of Standards and technology* – NIST (STABIN, 2007) através do código XCOM. Os dados do NIST já foram utilizados por Firmino (2010), Buyuk e Tugrul (2014), dentre outros. O valor do coeficiente de atenuação linear e mássico para o chumbo, adotando a energia de 1,25 MeV, é respectivamente de 0,64297cm⁻¹ e 0,0569 cm²/g. A obtenção do coeficiente de atenuação mássico é dada pela multiplicação da densidade do material atenuador pelo coeficiente de atenuação linear (XAVIER, 2006). A partir destas informações pode-se calcular espessuras de material absorvedor de radiações. Há uma calculadora *on line* denominada Rad Pro Calculator que pode auxiliar no cálculo da blindagem (RADPRO, s/d).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são expostos os materiais, tecnologias e procedimentos utilizados nos experimentos. De modo geral, a experiência é dividida em três partes:

a) **Estudo piloto A** se trata da primeira etapa, com procedimento experimental piloto de irradiação gama homogênea em variedades de quartzo do Rio Grande do Sul. Os principais materiais e métodos utilizados nesta etapa são: fonte panorâmica de ^{60}Co , ametista, quartzo incolor, opala branca e quartzo fumê. A pesquisa teve início principalmente a partir de estudos teórico-metodológicos da câmara de irradiação gama panorâmica do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN; incluindo simulações de doses, distâncias e tempos de irradiação;

b) **Estudo piloto B** é a segunda etapa, se trata do procedimento experimental no quartzo rosa de Águas Vermelhas (MG), com irradiação gama homogênea e seletiva. Os principais materiais e métodos utilizados nesta etapa são: quartzo rosa translúcido de Águas vermelhas, chumbo, fonte panorâmica de ^{60}Co e vidro sodo-cálcico incolor e transparente;

c) **Irradiação gama homogênea e seletiva no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada** é a terceira e última etapa. Os principais materiais e métodos utilizados nesta etapa são: quartzo rosa-pálido transparente de Pedra Lavrada (PB), fonte panorâmica de ^{60}Co , vidro sodo-cálcico incolor e transparente e chumbo 99%.

Os materiais e técnicas auxiliares utilizados são: Adobe Photoshop CS5®, câmera fotográfica, FT-IR, UV-Vis, contador Geiger, termômetro a laser, balança hidrostática, fita de papel, cortadora Multimachine com disco diamantado, dentre outros.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Amostras e preparação das amostras

Os materiais utilizados nesta dissertação, apesar de possuírem características distintas (formato, cor e transparência), são variedades de quartzo provenientes de diferentes regiões brasileiras. Estes materiais foram selecionados para os procedimentos experimentais de irradiação com a intenção de obter resultados interessantes para a área do design de gemas, joias e produtos gemológicos, sobretudo ao design-arte. A tentativa é de estudar materiais levantando dados para os profissionais que desejam desenvolver seus próprios projetos exclusivos e

diferenciados (joias de autor ou joias de arte, por exemplo) aproveitando um recurso disponível de irradiação industrial ou para futuras comparações com outras técnicas.

Pelo fato de algumas amostras serem adquiridas de terceiros, não foi possível assegurar, com confiabilidade, os seus locais exatos de origem.

Neste estudo, várias tentativas de irradiação foram realizadas com distintas variedades de quartzo brasileiro. Por causa de limitações técnicas o estudo foi delimitado a um número reduzido de experimentos diferente do pretendido, mas sem comprometer o objetivo.

Amostras das variedades de quartzo selecionadas foram analisadas no EDS do Laboratório de Design e Seleção de Materiais, LdSM da UFRGS. De modo semi-quantitativo, todas as amostras apresentaram picos característicos de Si e O, caracterizando quimicamente o material como quartzo, ver tópico “Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raio-X (EDS)”.

Na análise visual, percebem-se na superfície, marcas de crescimento (estrias) e principalmente as fraturas conchoidais características do material. Foram observadas algumas partes do material com iridescência, principalmente no quartzo de Pedra Lavrada, PB. Os espectros de FT-IR obtidos são compatíveis ao banco de dados RRUFF™ Project (<http://rruff.info>) – ver tópico “Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR)”.

As medidas de densidade das amostras de variedades de quartzo utilizadas nesta pesquisa resultaram em aproximadamente $2,65 \pm 0,02$, sendo a densidade típica do quartzo (ver tópico Medidas de densidade).

Em sequência, nos próximos tópicos são descritos os procedimentos das irradiações, que foram divididos em duas etapas.

3.1.1.1 Estudo piloto A

Nessa etapa foi realizada a irradiação gama homogênea em variedades de quartzo. Esta etapa compreendeu a pesquisa exploratória de modo “prático” consistindo em um estudo piloto experimental e o desenvolvimento de diretrizes básicas para a irradiação. Foram testados diversos materiais gemológicos com a finalidade de alteração cromática ou de tonalidade promovida pela irradiação gama com ^{60}Co em câmara panorâmica estocada à seco, restringindo à variedades de quartzo brasileiro.

Para isso, foram realizadas visitas ao local de entrega de materiais para irradiação (CDTN) e a partir disso, observou-se pedristas da região que levavam materiais para irradiar. Os primeiros materiais irradiados foram quartzo incolor, opala branca e ametista de regiões do Rio Grande do Sul (associados às rochas vulcânicas da Bacia do Paraná³⁹). Eles procedem de Ametista do Sul, Salto do Jacuí, Quaraí, Nova Bréscia e Progresso e foram irradiados com uma dose média de 200KGy. Parte dos resultados foram publicados por Duarte *et al.* (2015).

3.1.1.2 Estudo piloto B

Nessa etapa foi realizada a irradiação gama homogênea e seletiva em quartzo rosa. As amostras de quartzo rosa-leitoso a translúcido e maciço foram adquiridas da distribuidora Bagatini Pedras (em Soledade, RS). Esses materiais foram assegurados pelo fornecedor de que procedem de Águas Vermelhas, MG (Província Mantiqueira, Faixa Araçuaí)⁴⁰. Esse material foi escolhido por poder ser adquirido no Rio Grande do Sul e seu valor está na faixa de R\$ 6,00 a R\$ 12,00 o quilo. Estes materiais foram irradiados com doses de 1Gy a 200KGy (Figura 26). Amostras com 2 mm de espessura foram polidas, fotografadas e analisadas no Photoshop CS5® com sistema HSB e UV-Vis.

³⁹Os principais depósitos de ametista e ágata do Brasil e considerados os maiores do planeta, estão localizados no Rio Grande do Sul, onde ocorrem também associados quartzo incolor e opala (JUCHEM, 2014; BRUM, JUCHEM, 2014). Esses minerais ocorrem preenchendo cavidades arredondadas a ovóides (vesículas e geodos), que tem dimensões variadas, desde alguns centímetros até dois a três metros de comprimento. Essas cavidades ocorrem no interior de rochas vulcânicas que recobrem grande parte da região Sul e Sudeste do Brasil e são denominadas de Grupo Serra Geral. Esse vulcanismo fissural foi ativo entre 127 e 137 milhões de anos atrás (no período denominado de Cretáceo), como consequência de grandes fraturas que se abriram na crosta terrestre durante a separação da América do Sul e do continente Africano (WILDNER, 2004). A lava originada de regiões profundas da crosta foi expelida através de vários sistemas de fraturas e se espalhou pelos dois continentes, ficando a maior parte na América do Sul e uma pequena parte (cerca de 5%) no continente Africano, no noroeste da Namíbia. Os principais depósitos de ametista estão localizados na região de Ametista do Sul (Norte do estado), ocorrendo também importantes depósitos na região de Quaraí – Santana do Livramento e entre Progresso e Nova Bréscia. A região do Salto do Jacuí é conhecida como a mais importante produtora de ágata, podendo também ocorrer quartzo incolor a leitoso associado. Entre essa região e o município de Soledade, encontram-se depósitos de opala, que podem ocorrer associados à ágata no interior das cavidades, mas também preenchendo fraturas e estruturas de fluxo da lava, ou cimentando brechas (JUCHEM, 2014; BRUM, JUCHEM, 2014).

⁴⁰Não foram encontradas pesquisas específicas sobre a geologia e mineralogia do quartzo rosa proveniente de Águas Vermelhas, MG. A informação que se obteve foi fornecida pela Dra. Daniela Newmann, da UFES, que relatou a ocorrência de pegmatitos na região, de onde são extraídos cristais de turmalina; acredita-se que esse quartzo rosa ocorra associado a esses pegmatitos, como nos depósitos de Pedra Lavrada, PB.

Figura 26 – Amostras de quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG selecionadas para estudo de irradiação gama homogênea e seletiva. As doses propostas para irradiação homogênea variam entre 1Gy a 200KGy. Imagem das amostras brutas antes da irradiação. Escala da barra 1 cm.



Fonte: Autor.

Nessa etapa também foi irradiado de modo seletivo uma placa de vidro sodo-cálcico incolor com textura tátil com doses sobrepostas de 4 KGy e 6 KGy. Para o auxílio da avaliação visual da irradiação gama seletiva, caso exista dificuldade ou dúvida no resultado (por causa de possíveis fraturas do quartzo), foram desenvolvidas amostras de vidro incolor transparente (vidro de janela sodo-cálcico) como amostras-controle medindo 6 x 1,5 x 0,3 cm, sendo o tamanho propositalmente maior que as amostras minerais. Estas amostras de vidro foram justapostas em fileira compondo uma amostra maior com 24 x 1,5 x 0,3 cm para a irradiação gradual obedecendo à lei do inverso do quadrado da distância. Ou seja, ao se afastar da fonte a dose diminuirá gerando uma amostra de um lado mais escura do que o outro lado, com a passagem dos tons em degradê. Logo, para obter informações visuais sobre o desempenho da intensidade da radiação conforme a variação da distância foram agrupadas amostras de vidro sodo-cálcico formando três tiras, cada tira possui quatro amostras de 60 x 15 x 3 mm. Elas foram colocadas de

modo perpendicular à fonte na altura de 57,5 cm do piso. As doses foram de 10 KGy e 5 KGy encostado na fonte e a partir de 10 cm de distância.

3.1.1.3 Irradiação gama homogênea e seletiva no quartzo rosa de Pedra Lavrada

Devido ao fato de não obter resultados satisfatórios quanto aos experimentos anteriores nos minerais, amostras de quartzo rosa (com boa parte límpida, de excelente qualidade gemológica) e com diferentes tonalidades foram doadas pelo geólogo Sandro Ferreira para a concretização da etapa 2. Elas são provenientes do Alto do Feio localizado na cidade de Pedra Lavrada⁴¹, PB (Figura 27). Estas amostras possuem poucas fraturas, mas são anédricas, com difícil identificação do eixo de crescimento, eixo C – fato também ocorrido em Alkmin (2012) com o quartzo *green-gold*. O lote possui peças que variam do rosa-pálido transparente ao rosa médio translúcido. Ao cortar as amostras rosa-pálida sua cor passa a ser de difícil percepção resultando em amostras praticamente incolores a olho nu. Essas amostras são provenientes de pegmatito⁴² heterogêneo com zonas de blocos de feldspato e núcleo de quartzo, encaixados em biotita-xisto e em contato com rocha granítica. A área aflorante possui aproximadamente 250 m de comprimento e 60 m de largura (MIRANDA, 2012).

⁴¹A cidade de Pedra Lavrada, Pb está localizada na mesorregião da Borborema com uma área de 389,64Km², sendo 0,70% da área do estado da Paraíba. Possui altitude média de 516 metros acima do nível do mar. O extrativismo mineral é a principal fonte econômica deste município desde a década de 30 do século passado. A prática resulta na produção de calcedônia, mica, calcário, feldspato, quartzo rosa, quartzo branco, granitos, dentre outros. Pedra Lavrada faz parte de uma Província Pegmatítica da Borborema. A sua geologia é formada em maior parte por rochas ígneas ou metamórficas, assim, em sua estrutura geológica há o predomínio de embasamento cristalino (ASSIS, 2011).

⁴²Pegmatito (ver glossário). Segundo Miranda (2012), o quartzo rosa proveniente da região do município de Pedra Lavrada ocorre em pegmatitos inseridos na denominada Província Pegmatítica da Borborema (uma área de aproximadamente 75x150 km, rica em pegmatitos e localizada nos estados da PB e RN). Segundo essa autora, são aproximadamente 750 corpos tabulares, com comprimento variando de dezenas a centenas de metros e larguras de metros a dezenas de metros, encaixados em rochas metamórficas, e que se tornaram conhecidos a partir da 2ª Guerra Mundial por causa das suas reservas de minerais com Nb e Ta. Atualmente produzem também turmalina e berilo, além de matérias-primas para a indústria cerâmica, como quartzo, feldspatos, muscovita e caulim (BEURLEN *et al.*, 2009). O quartzo rosa ocorre em geral no núcleo desses corpos pegmatíticos, na forma de massas anédricas que gradam progressivamente para quartzo branco leitoso. Grande parte desse núcleo de quartzo é descartado como rejeito, sendo as porções com melhor cor e transparência aproveitadas para fins gemológicos.

Figura 27 – Amostras brutas de quartzo rosa (anédrico), com diferentes tonalidades, provenientes de Pedra Lavrada, PB. Algumas amostras possuem excelente transparência. Escala da barra 1 cm.



Fonte: Autor.

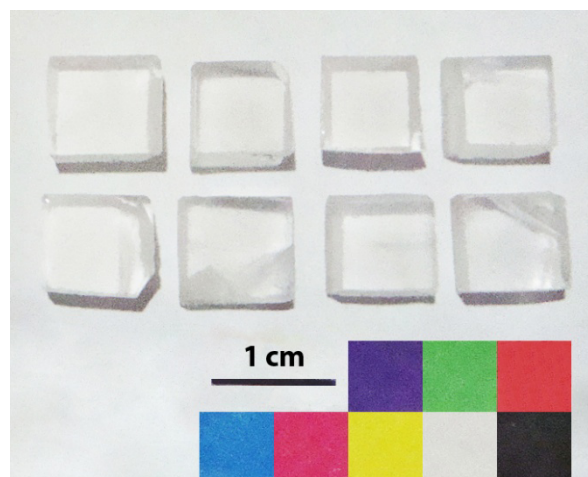
Foram selecionadas lascas (divididas por martelo gemológico) de diferentes partes das amostras, somando 90 lascas as quais foram irradiadas de modo homogêneo para verificação da obtenção de nova cor e da homogeneidade da dose. Essas lascas foram agrupadas para serem irradiadas nas doses de 1KGy, 50KGy e 100KGy inicialmente. Todas as lascas apresentaram alteração cromática para o matiz fumê (enfumaçado), tonalidades diferentes conforme o aumento das doses e não apresentaram bicoloração natural. Em sequência, foram selecionadas as amostras brutas com coloração rosa-pálido do lote de Pedra Lavrada para dar andamento a pesquisa de irradiação seletiva, pois acredita-se que as poucas amostras com coloração rosa intenso adquiridas no lote não necessitam de tratamento, mas podem ser testadas em outra ocasião.

As amostras de quartzo adquiridas são brutas, suas preparações se diferenciam conforme o avanço das etapas; de modo que as etapas iniciais demandaram poucas preparações, apenas limpeza com água e sabão neutro. De modo geral, as amostras brutas foram divididas por martelo gemológico, serradas no

equipamento Multimachine dotado de disco diamantado do LdSM/UFRGS e fatias calibradas com milímetros de espessura foram obtidas com equipamento IsoMet® Low Speed Saw da Buehler do LdSM/UFRGS (refrigeradas com água e líquido refrigerante).

As amostras de quartzo rosa-pálido transparentes foram divididas em grupos: irradiação homogênea gradual com amostras de aproximadamente 6 x 6 x 4 mm (Figura 28), irradiação homogênea gradual com amostras de aproximadamente 10 x 8 x 2 mm e amostras de aproximadamente 30 x 4 x 4 mm (variando $\pm 0,5$ mm na espessura) para irradiação seletiva. Juntamente com essas amostras de irradiação seletiva são irradiadas as lâminas de vidro (amostras-controle). As doses de irradiação homogênea nestes materiais foram de 1K Gy a 200K Gy, conforme estudadas as doses no quartzo rosa de Minas Gerais da etapa 1. Devido a algumas imperfeições das amostras, trincas no corte e sombras na imagem, estas foram melhor padronizadas no *software* Photoshop® para a comparação visual. Ressalta-se que a principal medida a ser padronizada é a espessura da amostra, pois esta influencia na coloração. O tamanho das amostras foi determinado conforme o espaço cedido no equipamento de irradiação, conforme as amostras de chumbo e o tamanho natural das amostras de quartzo adquiridas (selecionando partes com pouca ou nenhuma trinca).

Figura 28 – Amostras representativas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, Pb cortadas e polidas antes da irradiação homogênea (com diferentes doses). Amostras com aproximadamente 6 x 6 x 4 mm.



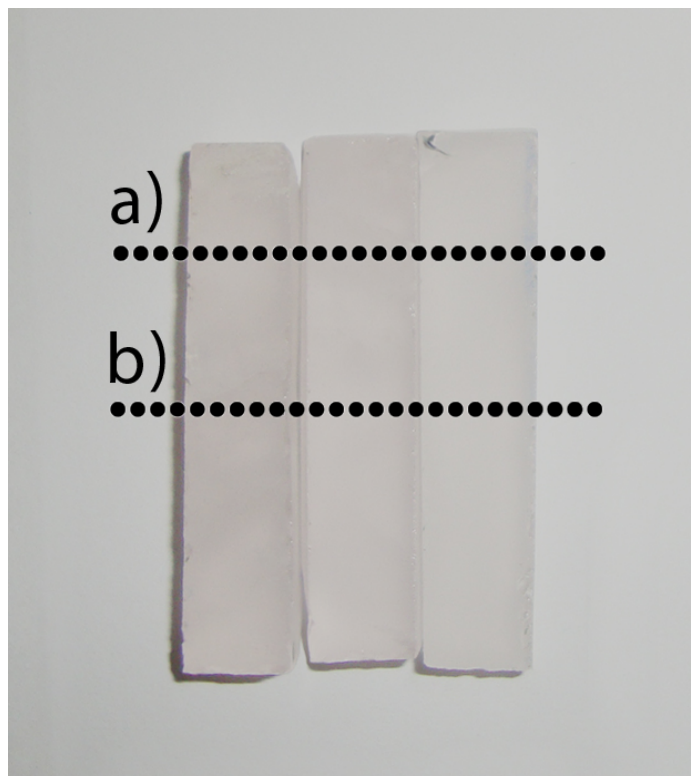
Fonte: Autor.

As irradiações seletivas são executadas na câmara panorâmica de irradiação gama do CDTN. A distância do experimento à fonte é estabelecida a partir do experimento de Andrade (2014) e conforme a irradiação homogênea comercial na câmara, resultando na padronização de 30 cm de distância e alturas de 57,5 cm e 43 cm.

Utilizam-se amostras de chumbo como atenuadores da irradiação e fita Eurocel® Ecopack 10 (papel 25g/m², espessura 0,110 mm) entre a amostra de chumbo e a amostra de quartzo para não contaminar a amostra de quartzo com o chumbo.

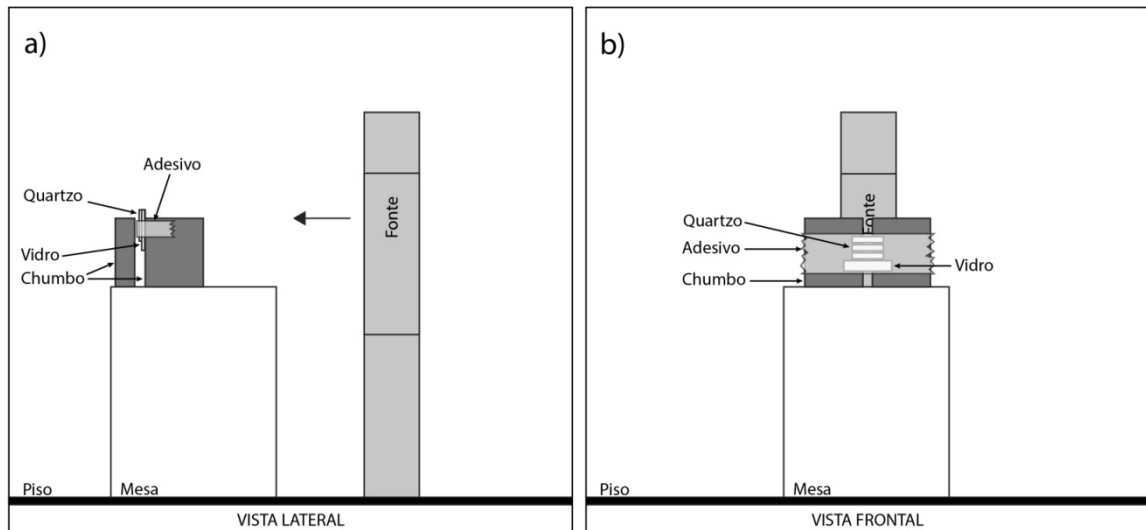
Foram utilizadas quatro espessuras de atenuação para a blindagem da irradiação gama, sendo 3 cm, 5 cm, 10 cm e 20 cm. As doses selecionadas de irradiação gama correspondem a tonalidades fumê determinadas na irradiação homogênea, sendo 5KGy, 10KGy e 15KGy. Frestas, correspondendo a distância entre duas amostras de chumbo, foram determinadas como sendo de 1 mm, 3 mm e 5 mm. Deixa-se aproximadamente 4 mm das amostras (quartzo e vidro) expostas a irradiação sendo as outras partes preservadas. Com relação aos testes com fresta, deixa-se a parte central das amostras em exposição (Figura 29 e 30). As frestas laterais promovidas pela espessura das amostras foram cobertas por outras amostras de chumbo, deixando somente a parte frontal e superior em exposição. Em cada irradiação são utilizadas três amostras de quartzo e uma de vidro.

Figura 29 – Indicação para irradiação seletiva nas amostras padronizadas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada (sem polimento final). Aproximadamente 30 x 4 x 4 mm, a) parte superior a ser irradiada e b) parte central a ser irradiada com fresta.



Fonte: Autor.

Figura 30 – Esquema simplificado da irradiação gama seletiva utilizada na câmara panorâmica do CDTN. a) vista lateral da irradiação das extremidades das amostras e b) vista frontal da irradiação com fresta.



Fonte: Autor.

O polimento ótico do quartzo serrado foi realizado com abrasivo carbureto de silício nas granulometrias 180, 320, 500, 1000, 1200 e alumina 1μ em politriz. Conforme a análise a ser submetida, as amostras passam por limpeza superficial com sabão neutro, água deionizada ou acetona e seca com ar comprimido, conforme especificações do equipamento e do laboratório utilizado.

Amostras representativas das variedades de quartzo utilizadas foram caracterizadas por FTIR e seus espectros foram comparados com a literatura e banco de dados RRUFF, além disso foi utilizado o equipamento de UV-Vis e sistema de cores HSB. Outros dados da literatura foram utilizados tais como número das bandas características para localização de elementos e ligações atômicas nos espectros.

Ao final dos experimentos, os quais obtêm parâmetros para a irradiação seletiva no material selecionado, foi realizada a irradiação seletiva com sobreposição de doses com o intuito de gerar um design de superfície no quartzo de Pedra Lavrada e de Águas Vermelhas.

Por fim, é mostrado no Quadro 4 um resumo das amostras utilizadas nesta pesquisa com as suas respectivas doses de irradiação gama.

Quadro 4 – Resumo das doses utilizadas nesta pesquisa em diferentes variedades de quartzo.

Etapa	Material	Localidade	Dose
Estudo Piloto A	Cristal de ametista	Ametista do Sul (RS)	200 KGy
	Cristal de ametista	Nova Bréscia (RS)	200 KGy
	Cristal de ametista	Progresso (RS)	200 KGy
	Fragmento de geodo com cristais de ametista	Quaraí (RS)	200 KGy
	Opala branca	Salto do Jacuí (RS)	200 KGy
	Cristal de quartzo incolor	Quaraí (RS)	200 KGy
	Cristal de quartzo fumê	Bagatini Pedras	60 KGy
	Vidro sodo-cálcico transparente e incolor	–	1KGy a 200 KGy
	Fragmento de geodo com cristais de quartzo incolor	Ametista do Sul (RS)	300 KGy a 5000 KGy
	Fragmento de geodo com cristais de quartzo incolor	Progresso (RS)	300 KGy a 5000 KGy
	Fragmento de geodo com cristais de quartzo incolor	Salto do Jacuí (RS)	300 KGy a 5000 KGy
Estudo Piloto B	Quartzo rosa maciço	Águas Vermelhas (MG)	1 Gy a 200 KGy
Quartzo rosa de Pedra Lavrada	Quartzo rosa-pálido transparente	Pedra Lavrada (PB)	1 KGy a 200 KGy

Fonte: Autor.

3.1.2 Placas de chumbo

Sete placas padronizadas de laminado de chumbo com 99,97% de pureza, densidade $11,34 \text{ g/cm}^3$, conforme norma ASTM B29, foram adquiridas da distribuidora GRX de São Paulo, SP a qual comercializa material de blindagem para radiações. As amostras possuem as medidas $10 \times 10 \times 5 \text{ cm}^3$ na forma de prisma retangular (superfícies planas e paralelas), com 5,8 Kg; apenas uma das amostras possui a espessura diferenciada com 3 cm. Com essas placas consegue-se as espessuras de 3 cm e 5 cm e por justaposição 10 cm e 20 cm. As espessuras básicas foram selecionadas a partir dos estudos de Wu *et al.* (1990), Azevedo (2007), Andrade (2014) e de simulações expostas no decorrer desse texto.

Segundo o fornecedor, as placas de chumbo passaram por rigorosos testes de qualidade na empresa Falcão Bauer, recebendo certificação de qualidade, com 99,9% de pureza (ANEXO A e B). As amostras de chumbo foram caracterizadas pelo fornecedor por espectrofotometria de absorção atômica (marca Agilent, modelo 240FS) e

espectroscopia de emissão em plasma⁴³ ICP/OES (marca Varian, modelo Vista-MPX). No entanto, com o objetivo de confirmar a veracidade das informações, em cada amostra foi retirada uma pequena lasca para conhecer a sua composição química (método qualitativo e semi-quantitativo) no equipamento EDS do LDSM/UFRGS. Ressalta-se que as placas de chumbo foram devidamente manuseadas no Laboratório de Irradiação Gama – LIG do CDTN, apenas as lascas devidamente protegidas sem saco plástico foram para a análise no EDS.

As pequenas lascas utilizadas no EDS foram aderidas à fita de carbono, sendo um procedimento padrão do LDSM para essa análise. Para segurança de manuseio, por ser um metal tóxico, as amostras de chumbo foram recobertas por uma camada de fita Eurocel® Ecopack 10 (papel 25g/m², espessura 0,110 mm) para o seu transporte, adaptando a sugestão de embalagens de materiais do Laboratório de Irradiação Gama, LIG do CDTN.

As lascas de cada amostra foram analisadas no EDS do Laboratório de Design e Seleção de Materiais, LdSM da UFRGS. De modo semi-quantitativo, todas as sete amostras apresentaram 100% de chumbo na composição, não sendo possível mapear por esta técnica as impurezas em PPM, ver tópico “Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raio-X (EDS)”.

Em dois dos ensaios piloto da irradiação gama seletiva foram utilizados blocos de chumbo do LIG/CDTN. Estes blocos medem 15 x 10 x 5 cm e possuem sistema de encaixe diferenciado – lombada côncava e convexa nas extremidades, não sendo planas e paralelas.

As espessuras da blindagem com chumbo para a irradiação seletiva foram estimadas utilizando a calculadora Rad Pro⁴⁴ e taxas de dose foram estimadas hipoteticamente. Doses máximas e mínimas para a coloração desejada são as informações necessárias ao cálculo da atenuação, conforme a equação (1) citada na fundamentação teórica. Sabendo a dose desejada para a alteração de cor e a dose mais baixa que não altera esta cor, pode-se atenuar com o mínimo de espessura de material atenuador (Quadro 5 e 6).

⁴³ Métodos de análise para determinar qualitativamente e quantitativamente a presença de metais (dentre outros) em diversos tipos de amostras. Os métodos são baseados na detecção da radiação eletromagnética emitida ou absorvida por átomos neutros ou íons excitados nas regiões do espectro visível e ultravioleta. No método de emissão é utilizado o plasma indutivo de argônio que alcança altas temperaturas (em torno de 10.000 K).

⁴⁴ Rad Pro Calculator online (<http://www.radprocalculator.com/>).

Quadro 5 – Estimativa de espessura para atenuação da radiação gama (^{60}Co) calculada com a calculadora Rad Pro com fator *Buildup* e coeficiente de atenuação linear atualizado da NIST. Atenuação de 15KGy/h (1500000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h) para ser utilizado como fonte linear.

Material	Espessura (cm)
Chumbo	9,3
Concreto	55,8
Água	125,1
Ferro	17,7
Tungstênio	5,8
Urânio	4,9
Alumínio	51,4

Fonte: Rad Pro Calculator online.

Quadro 6 – Estimativa de espessura para atenuação da radiação gama (^{60}Co). Calculada com a calculadora Rad Pro com fator *Buildup* e coeficiente de atenuação linear atualizado da NIST, utilizado como fonte linear. Material de atenuação chumbo 99,97% de pureza, densidade $11,34\text{g/cm}^3$.

Atenuação da dose	Espessura (cm)
30KGy/h (3000000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	10,4
15KGy/h (1500000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	9,3
10KGy/h (1000000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	8,6
5KGy/h (500000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	7,4
1KGy/h (100000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	4,5
30KGy/h (3000000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	18,1
15KGy/h (1500000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	16,9
10KGy/h (1000000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	16,2
5KGy/h (500000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	15,1
1KGy/h (100000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	12,4
300KGy/h (3000000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	14,2
200KGy/h (2000000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	13,5
100KGy/h (1000000 R/h) a 100Gy/h (10000 R/h)	12,4
300KGy/h (3000000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	21,8
200KGy/h (2000000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	21,2
100KGy/h (1000000 R/h) a 1Gy/h (100 R/h)	20

Fonte: Rad Pro Calculator online.

A partir dos dados gerados acima, e dos estudos de Wu *et al.* (1990) e Andrade (2014) confirma-se que o chumbo é um dos materiais mais apropriados para a absorção da radiação. No entanto, as espessuras de chumbo necessárias para uma boa atenuação da radiação gama são da ordem de dezenas de centímetros.

Embora necessite de uma grande quantidade de água para atenuar a radiação gama, ela é utilizada em determinadas câmaras como a da CBE-Embrarad. No entanto, materiais com alta densidade demandam menor volume em relação a mesma quantidade de atenuação.

Os dados levantados são apenas uma estimativa de atenuação e foram de grande valia para a determinação da espessura dos anteparos de chumbo utilizados no experimento de irradiação seletiva.

3.2 MÉTODOS

3.2.1 Câmara de irradiação gama

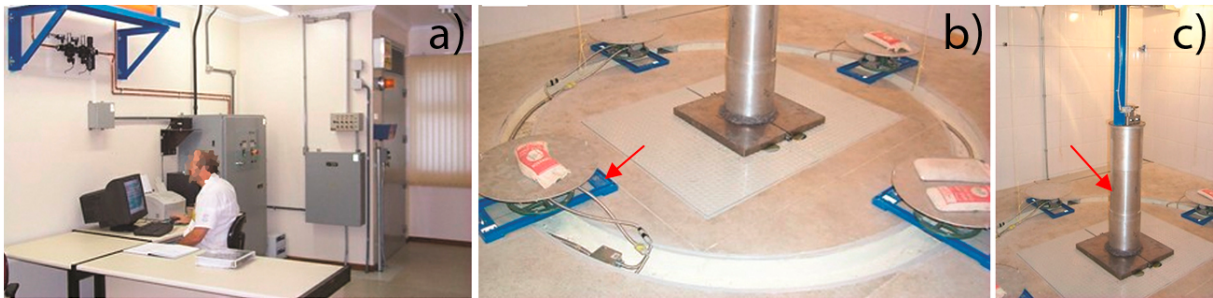
Neste trabalho, as amostras de minerais (quartzo) e metal (chumbo) foram irradiados no Laboratório de Irradiação Gama – LIG do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN⁴⁵. Este laboratório atende em conjunto a comunidade científica e comercial recebendo constantemente demanda de poucas gramas a centenas de quilos de distintos produtos, como alimentos, bebidas, materiais gemológicos e camundongos, dentre outros. As finalidades deste irradiador são: esterilização, envelhecimento, alteração de propriedades de materiais e de produtos nas mais diversas áreas do conhecimento: medicina, nutrição, informática, geologia, biologia, dentre outros. Este laboratório vem se preparando para receber certificação ISO - Organização Internacional de Normalização (SILVA, GROSSI, 2014).

O LIG é equipado com um Irradiador Panorâmico Múltipropósito de Categoria II (Figuras 31 e 32), fabricado pela MDS Nordion no Canadá, Modelo/número de série IR-214 e tipo GB-127, provido de fonte de ⁶⁰Co estocada a seco com atividade máxima de 2.200 TBq ou 60.000 Ci (CDTN, s/d; LABORATÓRIO, s/d). A dose desejada neste equipamento é obtida em uma planilha eletrônica que é calculada e corrigida

⁴⁵ Quanto à visita ao Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear CDTN, a norma CNEN-NN-3.01 prevê algumas questões sobre o controle de visitantes, como por exemplo: menores que 16 anos não entram nas áreas controladas e visitantes devem ser acompanhados por pessoa com conhecimento sobre medidas de proteção radiológica para a área visitada.

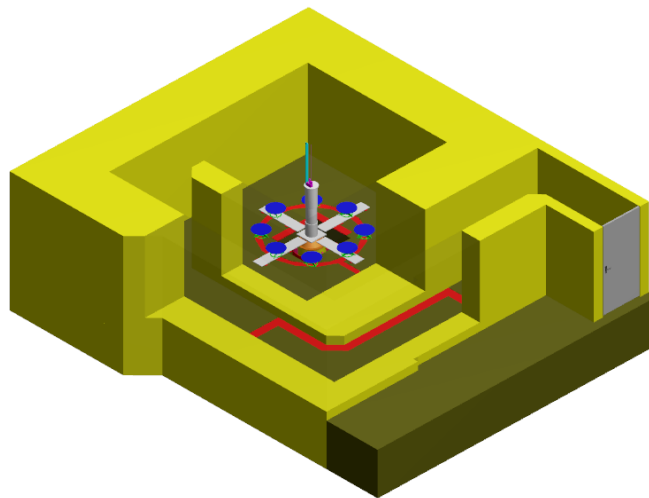
pelo fator de decaimento do ^{60}Co , nela são adquiridos os valores diários de taxas de dose pelo operador. A câmara de irradiação foi projetada por Luiz Carlos Duarte Ladeira (pesquisador da Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN).

Figura 31 – Laboratório de Irradiação Gama – LIG. a) sala de operação do Laboratório; b) interior da câmara de irradiação com ^{60}Co : mesas giratórias para comportar os produtos (seta) e c) protetor da fonte de ^{60}Co (seta).



Fonte: Adaptado de: http://www.cdtm.br/linhas_de_atuacao/Laboratorios/Irradiacao_Gama-Fotos.

Figura 32 – Maquete eletrônica da câmara de irradiação do LIG/CDTN.



Fonte: Adaptado de:

http://www.cdtm.br/linhas_de_atuacao/Laboratorios/Visao3DdaCamaradeIrradiacaoBlindagemBiologicaLabirintodoLIG.pdf.

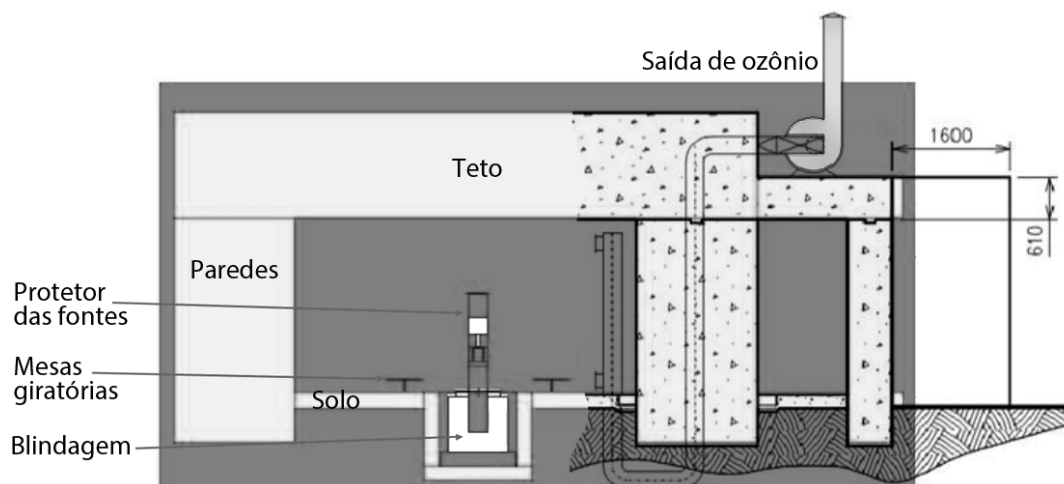
O laboratório possui uma câmara de irradiação de $21,5 \text{ m}^2$ com entrada em labirinto semelhante a um “s” e paredes com $1,65 \text{ m}$ de espessura, construídas em concreto armado (LABORATÓRIO, s/d). O compartimento é devidamente monitorado e protegido, ou seja, somente uma pessoa autorizada consegue ter acesso e quando esta pessoa entra, leva consigo um monitor de radiação do tipo Geiger (ver medidas da radiação).

No centro da câmara há uma fonte panorâmica de ^{60}Co que, quando não está irradiando produtos, permanece salvaguardada no subsolo. Ela é movimentada através de um cabo de aço, acionada seguindo rigorosas etapas. Se por ventura ocorrer alguma emergência, a fonte retorna à sua área de proteção.

A radiação da fonte é emitida para todas as direções, a partir de um centro emanando forte radiação (no interior da proteção da fonte). A posição deste centro está localizada na parte mais central da câmara a uma altura de aproximadamente 57,5 cm do chão, ou seja, a mesma altura em que as pastilhas de ^{60}Co permanecem durante as irradiações. Esta altura é visivelmente delimitada por uma redução do cilindro que protege a fonte. Nesta altura da fonte, amostras de minerais para pesquisa ou pequenos lotes são encostados ou amarrados (pelos operadores) na proteção da fonte (quando ela está guardada) a fim de acelerar o processo de irradiação.

A irradiação nesta câmara se dá a seco, no ar, causando a quebra das ligações das moléculas de oxigênio que se recominam, formando o ozônio⁴⁶. O sistema de exaustão retira o ozônio da câmara e coloca o ar externo (Figura 33); o irradiador somente é liberado pelo sistema quando o ozônio é retirado, o que pode ser verificado na tela de um dos controladores. Dependendo do que é irradiado, nota-se forte odor no interior da câmara.

Figura 33 – ilustração em corte da câmara de irradiação do CDTN.



Fonte: Adaptado de Gual *et al.* (2014).

⁴⁶De acordo com o estudo de Uzeli (2013) em câmaras de irradiação, a irradiação gama (^{60}Co) ao interagir com moléculas de oxigênio (O_2) quebra as ligações do oxigênio separando em dois átomos de oxigênio (O) reativos que ao se recombinarem com outra molécula de oxigênio formam o gás ozônio (O_3).

Ao entorno da fonte são dispostos, sobre pratos giratórios, os distintos produtos a serem irradiados para que recebam uma dose homogênea (LABORATÓRIO, s/d). Este procedimento será melhor descrito no próximo tópico. Por se tratar de um irradiador multipropósito, diversos tipos de produtos com distintas doses podem ser irradiados em conjunto, resultando numa trabalhosa administração de tempo e espaço. Este irradiador permanece sempre ativo por causa do decaimento do ^{60}Co e suas pausas (armazenamento da fonte em blindagem) são devido ao alcance das doses desejadas nos produtos. Neste sentido, doses altas são deixadas para o período da noite e doses muito altas são deixadas para os finais de semana. O planejamento das doses diárias é realizado em uma planilha virtual e de papel exclusivas, de responsabilidade dos operadores.

O manejo dos produtos é realizado por operadores de modo manual e o carregamento dos mesmos é auxiliado por carrinhos. Por questões ergonômicas, foi estabelecido o limite máximo de 25 kg por embalagem. Todas as amostras e produtos são irradiados à temperatura ambiente, em suas próprias embalagens metálicas, plásticas ou até mesmo de papelão. As maiores doses são geralmente destinadas aos minerais (ver tópico doses, já abordado). Cabe lembrar que existe um projeto de automatização da irradiação, mas este não foi posto em prática (LABORATÓRIO, s/d). Ressalta-se que medidas de temperatura na câmara foram realizadas, pois se notou o aquecimento nos materiais irradiados encostados na fonte.

3.2.1.1 Medidas de temperatura da câmara de irradiação gama

Com a finalidade de completar ainda mais o estudo sobre câmara de irradiação, foram adquiridas medidas de temperatura (superficial) em cinco diferentes pontos, pois altas temperaturas poderiam modificar a cor dos minerais irradiados (como o tratamento térmico), além de interferir no metal atenuador. A coleta das temperaturas no ambiente foi realizada durante pausas na irradiação dos produtos, ocorreram assim que a fonte foi recolhida à sua blindagem:

- a) Ponto 1: parte superior da fonte de irradiação;
- b) Ponto 2: centro da fonte de irradiação;
- c) Ponto 3: parte inferior da fonte de irradiação;

d) Ponto 4: objeto irradiado a 30 cm de distância sobre plataforma giratória (distância adotada para a irradiação seletiva);

e) Ponto 5: ponto mais afastado da fonte e próximo a parede (chão).

O equipamento utilizado para medir temperaturas é o termômetro infravermelho Hikari HT-450 provido de radiação laser saída $>1\text{mV}$, comprimento de onda 630 a 670nm, classe II, campo de visão 8:1, resolução $0,1^{\circ}\text{C}$, precisão $\pm 2^{\circ}\text{C}$, mira a laser, tempo de resposta menor que 1s e faixa de medição de -50 a 500°C .

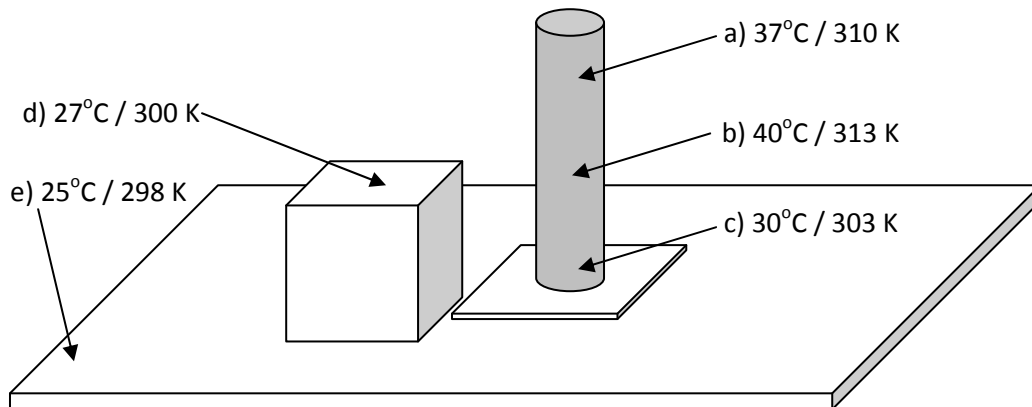
Este equipamento mede a temperatura da superfície de objetos por infravermelho e sem contato. A unidade ótica recebe a energia emitida, refletida e transmitida, a qual é coletada em um detector. A unidade eletrônica traduz a informação em uma temperatura que é exibida em um display. O laser é utilizado somente como mira. Conforme a distância (D) do objeto aumenta, a área de medição (S) do equipamento se torna maior numa relação de 8:1 (D:S). O fabricante recomenda a utilização de uma fita fosca sobre parte do objeto polido ou brilhante para adquirir melhor precisão, assim como medições mais próximas do objeto são mais precisas (HIKARI, s/d). A distância adotada nas medições dos cinco pontos foi de 20 cm (para maior precisão, conforme o fabricante), coletando os dados com no mínimo cinco tentativas no mesmo ponto e em movimentos circulares e de zigue-zague.

A energia da radiação é transformada em calor conforme interage com a matéria. As medições de temperatura na câmara de irradiação gama do CDTN não eram um dos objetivos específicos desta pesquisa. No entanto, ao receber alguns materiais irradiados quentes (31°C), necessitou-se de uma investigação.

As medições colaboram para a afirmação da temperatura ambiente $27^{\circ}\text{C} \pm 2$, entretanto esta temperatura é da zona de permanência dos discos giratórios, zona em que grande parte do material comercial é irradiado. Deste modo, quando artigos relatarem temperatura ambiente, sabe-se que é da ordem de $27^{\circ}\text{C} \pm 2$ (câmara situada em Belo Horizonte-MG) (Figura 34).

Constatou-se que pequenos pacotes de material gemológico ao serem amarrados na fonte (cápsula protetora) para receberem altas doses homogêneas, podem sair da câmara ainda mais quentes que os materiais situados na zona dos discos giratórios. Logo, esta zona não é indicada aos materiais sensíveis ao calor, como por exemplo, a opala branca. A opala branca ao ser aquecida tende a perder água e a trincar.

Figura 34 – Esquema mostrando o resultado das medições de temperatura de cinco pontos da câmara de irradiação. a) parte superior do protetor da fonte de irradiação, b) parte central do protetor da fonte de irradiação, c) parte inferior do protetor da fonte de irradiação, d) caixa com 30 cm de distância da fonte e e) ponto mais afastado da fonte. Medições de superfície com medidor de infravermelho sobre fita de papel.



Fonte: Autor.

A temperatura mais alta adquirida, 40°C, foi encontrada no centro da cápsula protetora da fonte e no extremo oposto deste ponto a temperatura diminuiu para 25°C. Deste modo, as temperaturas mensuradas não foram altas a ponto de comprometer os ensaios e a coloração dos materiais, tendo em vista que tratamentos térmicos utilizados nesses minerais são superiores a 100°C (FAVACHO, 2001).

3.2.1.2 Mesa de apoio

Embora tenha sido desenvolvida uma mesa para o experimento, por motivos operacionais, foi proposto pelo operador do irradiador a utilização de um dos discos giratórios como suporte do experimento. Para atingir a altura requerida foram sobrepostos dois blocos de concreto e uma base de 3 mm de ferro totalizando na alturas de 43 cm e 57,5 cm do piso. Estas alturas foram determinadas conforme a centralização visual da fonte (43 cm) e centralização correta da fonte a partir da mensuração na planta em corte lateral (57,5 cm) exposta na seção “câmara de irradiação gama”.

3.2.2 Irradiação gama gemológica homogênea e seletiva

Neste trabalho divide-se a irradiação de materiais gemológicos em irradiação homogênea e irradiação seletiva. A irradiação homogênea é a técnica convencional de irradiação de produtos a qual visa irradiá-los em toda a sua extensão e volume de modo homogêneo, ou seja, com igual dose ou mínima variação. A irradiação seletiva se trata da irradiação com barreiras atenuadoras como, por exemplo, blocos de chumbo, com a finalidade de irradiar um material em determinadas partes e com doses estabelecidas. Assim, a irradiação seletiva ou ionização seletiva de minerais consiste na ionização em determinadas porções destes materiais, resultando em características ópticas distintas no mesmo material, como por exemplo, sua cor ou tonalidade.

A irradiação gemológica comercial no LIG é comumente homogênea. Sacos plásticos lacrados ou caixas plásticas de até 25kg de material bruto, são empilhados nos discos giratórios. Quando a demanda é grande, pode-se fazer um muro circular com os pacotes ao entorno da fonte, mas na metade da dose desejada, cada um é girado manualmente a fim de homogeneizar a dose recebida em cada lote.

O LIG sugere embalagens apropriadas para a irradiação gama, para proteger o material contra possíveis perdas e misturas de materiais, pois embalagens de má qualidade se decompõem espalhando o material na câmara. As embalagens não interferem na dose recebida, logo são desprezíveis cálculos de atenuação da radiação neste caso. De modo geral, a irradiação de minerais com intuito de pesquisa é realizada em pequenas porções embaladas em sacos plásticos de polipropileno, papel alumínio e sobre eles camadas de fita crepe (sem indicação de marca)⁴⁷. Materiais a serem irradiados com dose de até 500KGy podem utilizar saco plástico grosso (polipropileno) com no mínimo 0,15mm de espessura e para cargas mais pesadas (irradiação comercial) é sugerido o saco de rafia costurado. Acima de 1000KGy os materiais devem ser protegidos por papel alumínio envolvido por fita crepe, uma vez que a cada 1000KGy adicional deve-se adicionar camadas extras de fita, pois ela se enrijece e quebra (ESPECIF, s/d).

⁴⁷ Conforme os estudos de Flores (1975,1976), Gonzales *et al.* (2002), Magauda (2004) e D'Almeida *et al.* (2009), não foram observadas significativas alterações nas propriedades dos papéis e celulose pura irradiados.

O LIG recebe material gemológico de pesquisadores, mas em maior quantidade de pedristas da região. Os pedristas são os trabalhadores responsáveis por irradiar gemas, possuindo o conhecimento das doses para cada tipo de material de cada região. Eles adquirem o material bruto de garimpeiros ou recebem materiais e encomendas de empresários de outros estados; após a irradiação, podem até enviar para a lapidação deixando o material pronto para exportação. Por receio de não perder sua clientela, as doses são omitidas ou alteradas na embalagem e os locais de origem são omitidos a terceiros, como por exemplo, pesquisadores novatos ou designers.

De modo geral, a padronização das cores adquiridas na irradiação gemológica geralmente é realizada informando basicamente a variedade do material e sua dose em Gray, por exemplo, quartzo fumê com dose de 65 KGy. Entretanto, pode-se ser mais específico sabendo a distância do material à fonte, tempo de irradiação, taxa de dose, e atividade da fonte. As doses e as tonalidades resultantes geralmente não estão atreladas às espessuras dos minerais. Nesta pesquisa, constatou-se que estas variáveis são difíceis de serem encontradas em publicações. A reprodução dos resultados da irradiação gama homogênea é realizada apenas com o parâmetro dose (em Gy). Em geral, cabe ao operador determinar a distância e o tempo conforme outros produtos a serem irradiados juntos. Para cada dose, em determinada atividade da fonte, existe uma distância (da fonte) mínima e máxima acarretando em um tempo mínimo e máximo – válido para irradiação de pequena quantidade de material de pesquisa, já que para o material comercial (de grande porte) é estipulada a distância dos discos giratórios (mínimo de aproximadamente 26 cm de distância da fonte).

Na irradiação seletiva pode-se considerar: 1) a atenuação da radiação por algum material, como por exemplo, o estudo de Korkut *et al.* (2010) sobre a atenuação da radiação pelo quartzo var. ametista e 2) a passagem da radiação por máscara, fresta e orifícios, dentre outros, como por exemplo o estudo de Novaes e Brito (2007) que trata da irradiação seletiva em camundongos. Como a irradiação seletiva não é um procedimento comum no LIG, ao longo do trabalho, foram sendo estabelecidos os procedimentos conforme o tempo e o espaço disponíveis para esta pesquisa.

3.2.3 Diretrizes para a irradiação gemológica⁴⁸

Ao selecionar materiais gemológicos para irradiação científica ou comercial, é necessário conhecer a sua origem, pois os resultados obtidos necessitam de reprodução. Muitas vezes as aquisições de pedras de terceiros, distribuidoras e lojas não possuem origem conhecida.

Deve-se estar disposto a consultar a literatura ou a própria empresa de irradiação para saber se o material escolhido possui precedentes irradiados, a fim de descobrir rapidamente a dosagem correta ou descobrir que aquela variedade não terá resultado satisfatório. Deste modo, cabe ressaltar que nem todas as gemas são passíveis de alguma alteração cromática por irradiação gama, podendo ser testada em outras técnicas, como por exemplo, recobrimento, difusão, tingimento, dentre outras. Alguns minerais alteram a coloração com baixas doses e outros podem necessitar de altíssimas doses, permanecendo muito tempo na câmara de irradiação. Ainda, os minerais passíveis de irradiação podem sair do processo com a cor desejada ou não (às vezes até pretos) necessitando de posterior tratamento térmico a fim de “abrir” a cor.

No primeiro contato do cliente com a empresa de irradiação, sendo ele pessoa jurídica ou física, receberá um formulário a ser preenchido com os dados do material a ser irradiado como teste. São solicitados o nome do mineral, origem, variedade gemológica, dose (KGy) e quantidade (Kg). O valor cobrado é o resultado da multiplicação do valor base do material por quilo e dose, mas existe o valor mínimo de R\$20,00 por irradiação. Ressalta-se que a irradiação do quartzo é distinguida das demais gemas por ser muito menos onerosa que as demais. De modo geral, quanto maior o valor do material maior é o valor da irradiação.

Embora testes pilotos possam ser realizados irradiando o material aos poucos, até obter resultado cromático satisfatório, ou por dose alta para minerais (exemplo 1000 KGy) para saber se ocorre alguma alteração, Lameiras (2006) utiliza uma técnica para diagnosticar a possível alteração cromática do quartzo sem a necessidade dos testes em irradiador. O pesquisador obtém a identidade do mineral na forma de um gráfico (por Infravermelho – técnica utilizada nesta dissertação) e conforme são identificados e comparados os picos no espectro, pode-se saber se aquela variedade ao ser irradiada adquire cor. Entretanto, necessita de um

⁴⁸Ressalta-se que o método de irradiação gama do CDTN foi estudado por Silva e Grossi (2014) os quais propõem melhorias providas da área da engenharia de produção.

especialista para decifrá-lo, sendo que existem muitas questões sem compreensão, além de ser utilizado em materiais incolores.

A elaboração de diretrizes ou métodos é característica metodológica do designer. A utilização de metodologias possibilita o design ser ensinável, apreendível e comunicável (BÜRDEK, 2010). Sendo assim, listam-se algumas diretrizes básicas, a partir dos estudos de Silva e Grossi (2014), idealizadas para a irradiação de minerais, sendo grande parte delas utilizadas nesta pesquisa. As diretrizes listadas são etapas auxiliares, são necessárias para alcançar o objetivo, a irradiação gemológica:

- a) Consultar literaturas ou profissionais da irradiação gemológica para determinar a dose inicial e o tipo de fonte e empresa de irradiação;
- b) Consultar a atividade da fonte a ser utilizada para tomar conhecimento dos tempos de irradiação que podem ser necessários;
- c) Selecionar amostras com conhecimento de sua origem (local ou regional);
- d) Amostras podem ser fragmentos de geodos (com parte predominante de cristais), material bicolor e fatias com diferentes espessuras e polimentos nas superfícies. Amostras com 2 mm a 4 mm de espessura (altura) pode ser suficiente para o estudo da cor resultante e com o mínimo de 5 mm de largura e 5 mm de profundidade;
- e) Utilizar embalagens adequadas e lacradas;
- f) Identificar nas embalagens material, origem, dose, data da exposição, peso, outro tipo de tratamento se houver, proprietário e código de controle fornecido pela empresa de irradiação;
- g) Amostras de testes podem ser enviadas por correio (dentro do Brasil), mas devem ser comunicadas antecipadamente e retiradas pessoalmente;
- h) Realizar o pagamento;
- i) Registrar o antes e o depois da irradiação através de imagens fotográficas com legenda de cor e escala, por isso preferencialmente utilizar amostras gemológicas com espessuras padronizadas;
- j) Realizar medições de radiação no material irradiado, por segurança;
- k) Estudar a estabilidade da cor por irradiação solar, térmica ou UV através da exposição dos materiais a estas radiações até o desbotamento total da amostra;

l) Realizar o acabamento no material (lapidação diferenciada, polimento, etc.).

Ressalta-se que para a determinação da dose de forma experimental existem cinco caminhos os quais podem ser escolhidos conforme o valor do material (incluindo o tamanho da amostra) e o tempo de espera:

- a) Irradiar o material com altíssima dose (em torno de 10000 KGy);
- b) Irradiar o material com dose “média” (em torno de 1000 KGy);
- c) Partir o material em fragmentos e irradiá-los com diferentes doses;
- d) Irradiar o material com dose baixíssima e ir sobrepondo as doses;
- e) Partir o material em fragmentos e irradiá-los com baixíssimas doses até altíssimas doses.

Com relação aos cinco caminhos citados, a escolha pela altíssima dose pode ser mais onerosa e levar grande tempo de irradiação (dias e até meses), porém se o material não alterar a cor, pode-se descartá-lo para o uso do tratamento. Utilizar a dose “média” embora seja alta pode ser favorável, pois diminui o tempo de espera, mas se o material não alterar a cor, fica-se na dúvida em relação as doses maiores. Partir o material em fragmentos e irradiá-los com diferentes doses, por exemplo, 10KGy, 100KGy, 1000KGy, pode ser interessante se o material não for de grande valor, além de auxiliar na estipulação da melhor dose – esta alternativa foi utilizada por Sawakuchi e Okuno (2004). A irradiação com baixíssima dose e com a sobreposição delas pode ser demorada, mas a mais exata, além de não necessitar partir o material em fragmentos, sendo uma das melhores alternativas para trabalhos científicos. Assim, para acelerar o processo de irradiação com distintas doses (doses crescentes) são utilizados o material em partes, permitindo comparações dos resultados lado-a-lado, sendo também uma das melhores alternativas para trabalhos científicos.

Na irradiação gemológica a cor resultante pode desvalorizar o material, por isso ressalta-se cautela com testes em gemas valiosas. Caso ocorra algum resultado insatisfatório, em última chance pode-se tentar resgatar a cor com tratamento térmico e se o tratamento térmico ainda não corresponder às expectativas, uma nova irradiação com dose menor ainda é possível sobre o resultado do tratamento térmico – o qual geralmente restaura a cor. Se nenhuma alternativa funcionar, pode-se tentar outro tratamento.

Cabe ressaltar que neste trabalho são desprezadas a interação da radiação gama com o ar, com a embalagem do material e o espalhamento da radiação por

ventura promovido por outros objetos na câmara de irradiação durante o experimento.

Em relação a irradiação gama seletiva, algumas diretrizes básicas podem ser seguidas:

- a) Escolher materiais a partir de testes de irradiação homogênea;
- b) Escolher materiais sensíveis a irradiação gama com baixas doses;
- c) Utilizar as diretrizes básicas da irradiação de minerais (irradiação homogênea);
- d) Preparar os materiais a serem irradiados preferencialmente por fatiamento ou desgastar materiais martelados deixando-os planos e paralelos em duas faces opostas – para melhor visualização do resultado;
- e) Selecionar material atenuador que possua alta densidade (consultar materiais já testados);
- f) Estimar a espessura do material atenuador⁴⁹;
- g) Posicionar os materiais alinhando-os na fonte, como por exemplo, exposto em Buyuk e Tugrul (2014);
- h) Realizar testes de contraste com diferentes espessuras de material atenuador e doses ou utilizar dados existentes na literatura;
- i) Planejar a área que será protegida, verificar volume e peso total do objeto com a blindagem;
- j) Pode-se realizar a sobreposição de doses para efeitos diferenciados;
- k) Ao final, realizar o acabamento no material (lapidação diferenciada, polimento, etc.).

As diretrizes para irradiação homogênea e seletiva da câmara de irradiação estudada foram necessárias para as etapas práticas desta pesquisa. Elas podem ser compreendidas também como resultado da pesquisa, isto é, são consequência da pesquisa exploratória, de observação e principalmente da experiência prática do autor em suas primeiras irradiações. As diretrizes podem contribuir para a

⁴⁹O método de tentativa e erro para estipular a melhor atenuação pode ser empregado, segundo Rockwell III (1956).

sistematização de possíveis outras irradiações e para um público muito leigo. A seguir, são expostas as técnicas de análise utilizadas na pesquisa.

3.2.4 Medidas da radiação

Foram utilizados dois equipamentos que medem a radiação em objetos e no ambiente. Os equipamentos são utilizados no Laboratório de Irradiação Gama do CDDTN pelos operadores, sendo um deles de uso obrigatório para entrar na câmara de irradiação (Figura 35).

Figura 35 – Medidores das radiações ionizantes: à esquerda medidor Geiger, à direita medidor digital.



Fonte: Autor.

O primeiro equipamento utilizado é o Geiger Counter Model 5 da Ludlum Measurements Inc. Trata-se de um dos equipamentos mais antigos utilizados para detectar radioatividade. Emite ruídos e expõe, por ponteiro, a variação entre 0 a 2.0 mR/h. Funciona por bateria e câmara interna de ionização com gás argônio (tubo GM). De modo geral, quando a irradiação passa pelo gás, ioniza e gera corrente elétrica (por diferença de potencial de 800 para 2000V) que é mensurada por amplificador e contador (FAURE, MENSING, 1986; MARTIN, 2000).

O segundo equipamento utilizado totalmente digital, por maior segurança, é o Rados RDS-30 Radiation Survey Meter para detecção de radiação gama, raios X, 1.3MeV a 48 KeV, da Mirion Technologies. As medidas podem ser apresentadas no visor de LCD em $\mu\text{Sv/h}$ ou mrem/h, uma vez que 0,01 μSv equivale a 1 Sv e 1 μrem equivale a 100 rem. Este equipamento possui microprocessador, detector (tubo GM), alarme, memória, bateria e infravermelho para comunicação com computadores (RDS, S/D).

3.2.5 Microscópio eletrônico de varredura (MEV) e espectroscopia por energia dispersiva de raio-X (EDS)

O equipamento utilizado é o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) de bancada, marca Hitachi, modelo TM3000 do LdSM/UFRGS, com feixes de elétrons de 5 e 15 keV. A imagem é gerada através da transcodificação da energia emitida pelos elétrons. De modo geral, o feixe de elétrons emitido em uma coluna atinge a amostra no interior de uma câmara a vácuo, os efeitos físicos gerados são recebidos por detectores (DEGEO, s/d). Acoplado a este microscópio há o EDS que se trata da Espectroscopia por Energia Dispersiva de raios-X, marca Oxford Instruments, modelo SwiftED3000, 161eV. Nele, são realizadas análises elementares das amostras (30mm²) desde o boro até o urânio em *software* específico. O EDS consiste em um detector semiconductor operado em baixa temperatura e acoplado a um contador multicanal. A sua análise qualitativa consiste na identificação dos elementos da amostra através da posição dos picos em espectro gerado através da classificação da energia coletada. A análise quantitativa obtém em porcentagem a concentração dos elementos encontrados (DEGEO, s/d).

As análises das amostras de quartzo e de chumbo foram realizadas utilizando o *software* do equipamento de EDS. Para cada amostra foi selecionada uma área de análise a partir da visualização da imagem gerada no MEV.

3.2.6 Ultravioleta-visível (UV-VIS)

Para as análises no quartzo nos comprimentos de onda no visível foi utilizado o equipamento Cary 5000 Universal Measurement Spectrophotometer, versão 2.24, da marca Agilent Technologies do Laboratório de Física da UFRGS. Os gráficos gerados nesse equipamento foram editados no *software* Origin® 8.1 Data Analysis and Technical Graphics.

O espectrofotômetro é um instrumento que possui um conjunto de lâmpadas as quais emitem comprimentos de ondas distintos, do ultravioleta ao infravermelho próximo, para estudo de propriedades ópticas dos materiais. Pode-se selecionar uma determinada faixa de comprimentos de onda para estudo. Para a análise de cor utiliza-se a faixa que compreende o campo da luz visível. A técnica é baseada na energia de excitação necessária à transição de elétrons entre orbitais moleculares - do nível fundamental ao de maior energia. As leituras geram gráficos os quais expõem medidas de refletância, transmitância ou absorção.

3.2.7 Espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier (FT-IR)

O instrumento utilizado para análise do quartzo em infravermelho, nesta pesquisa, é o Espectrômetro de infravermelho por transformada de Fourier da Shimadzu Corporation, modelo IRPrestige 21, pertencente ao Laboratório de Química da Central Analítica da UFRGS. Para não necessitar pulverizar as amostras elas foram entrepostas em duas placas de cristal de KBr (brometo de potássio) com 4 mm de espessura. Os parâmetros utilizados foram 50 *scans* e resolução de 4 cm⁻¹ em temperatura ambiente. Os gráficos gerados nesse equipamento foram editados no *software* Origin® 8.1 Data Analysis and Technical Graphics.

Essa análise fornece informações sobre a natureza química e estrutural de materiais. A espectroscopia concerne na absorção, emissão ou espalhamento da radiação eletromagnética por átomos ou moléculas. A amostra é irradiada por radiação infravermelha levada por um caminho de espelhos, ela absorve a energia em determinados comprimentos de ondas, seus átomos ou moléculas vibram resultando no espectro na região do infravermelho, ou seja, apresentando picos característicos de cada átomo ou molécula em um gráfico. A Transformada de Fourier é um tratamento no sinal, promovendo a transição entre as variáveis tempo e a frequência de sinais (GONÇALVES, 2004; HOLLAS, 2008).

3.2.8 Medidas de densidade

Foi utilizada a balança hidrostática de precisão, marca Marte, do Laboratório de Gemologia da UFRGS - LABOGEM/UFRGS para verificar a densidade das variedades de quartzo utilizadas nesta pesquisa. A gema é pesada no ar e após é pesada mergulhada em água destilada, gera-se a medida de densidade “d” através do princípio de Arquimedes pela equação (SCHUMANN, 2006):

$$d = \frac{M_{ar}}{V} \quad (3)$$

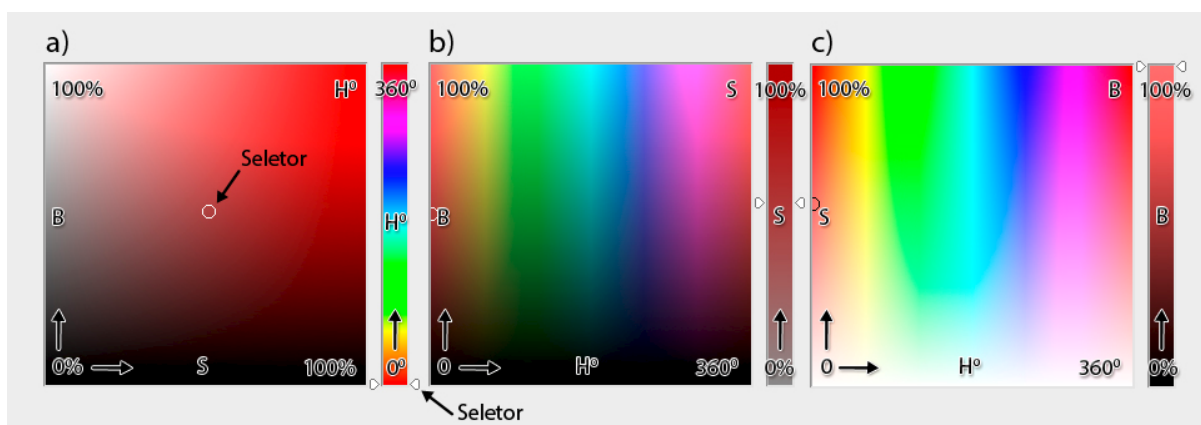
“M_{ar}” é a massa da gema no ar, “M_{ag}” é a massa da gema imersa em água destilada e o volume “V” é o resultado da diferença entre as duas massas “M_{ar}” e “M_{ag}”. A medida de densidade é uma das técnicas instrumentais não destrutivas para identificar gemas e outros materiais. A densidade expressa a razão entre a massa de um material e o volume por ele ocupado. É uma propriedade específica e

característica de cada material, está relacionada com o arranjo dos átomos do material e sua composição química (WEBSTER, ANDERSON, 1984).

3.2.9 Matiz, saturação e brilho (HSB) e legenda de cores

A avaliação dos resultados das irradiações se dá a partir de imagens digitais, por observação a olho nu, por FTIR e por UV-Vis. Foi também utilizado, de modo experimental, o sistema HSB (matiz, saturação e brilho) baseado nos estudos de Greve (2013) e Motoki *et al.* (2000) com o *software* Adobe Photoshop CS5® (Figura 36) e Microsoft Office Excel 2007®. Esta avaliação foi selecionada e adaptada, pois o equipamento de UV-Vis utilizado (conforme Norma CIE 1976) não gerou dados LAB para a caracterização das amostras irradiadas (CIE, s/d).

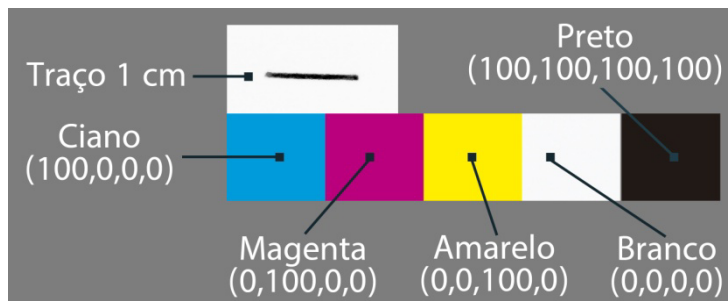
Figura 36 – Três telas da ferramenta “seletor de cores” do Adobe Photoshop® indicando os parâmetros do sistema HSB. a) seleção do matiz, b) seleção da saturação e c) seleção do brilho.



Fonte: Adaptado de Greve (2013).

As amostras minerais foram fotografadas, antes e após os tratamentos, em sua forma natural, cortada e lapidada, lembrando que em todos os casos de obtenção de imagens são utilizadas legenda de escala e de cor CMYK (Figura 37). Em cada amostra são coletados dez pontos (pixel) em posições aleatórias, resultando em uma média de valores HSB, exposta em uma tabela. A média geral do “H”, do “S” e do “B” resulta em um novo código HSB que é automaticamente convertido em CMYK, RGB e Pantone digital no Photoshop®. Ressalta-se que houve a tentativa de escaneamento de amostras gemológicas em *scanner* HP Photosmart C4780, porém as cores de diversos tipos de gemas (de translúcida a transparente) foram sumariamente alteradas no processo sendo então este método descartado, pois se pretende comparar os resultados desta pesquisa com futuras outras.

Figura 37 – Legendas. Legenda de escala (traço horizontal preto com 1 cm de comprimento) e legenda de cores CMYK (cores ciano, magenta, amarelo e preto impressos em papel matte branco).



Fonte: Autor.

Durante a pesquisa bibliográfica foram observadas imagens de minerais irradiados. Trabalhos dos outros autores, mencionados na fundamentação teórica desta pesquisa, não expõem imagens dos minerais irradiados junto às legendas de cores. A legenda de cores utilizada junto aos objetos na tomada de imagem (fotografia, *scanner*, microscópio) é um recurso necessário para a comparação e visualização mais apurada das alterações seja de cor ou de tonalidade. Durante a pesquisa houve a necessidade de adaptar o sistema RGB ao modelo impresso (legenda de cores) exposto acima. As cores vermelho, verde e azul foram agrupadas à legenda.

3.2.10 Câmera fotográfica

O registro das imagens desta pesquisa é realizado pela câmera digital Sony Cyber-shot, modelo DSC-W210, lente Carl Zeiss Vario-Tessar, 4x zoom, 3.6V, 12.1 mega pixels. As amostras foram fotografadas à luz do dia junto a legenda de cores e para coletar a cor para quantificação (HSB) é utilizada somente iluminação artificial fluorescente – para obter um padrão de reprodutibilidade. A diferença na iluminação pode ser percebida na própria legenda de cores.

3.2.11 Lapidação

Após os testes de irradiação, três amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, irradiadas com dose determinada nos procedimentos anteriores, foram lapidadas para verificação da estabilidade da cor no processo de lapidação. Apesar de ser um processo profissional, trata-se de um procedimento artesanal,

sendo que cada lapidador possui preferências próprias. As lapidações profissionais ocorreram no laboratório do lapidador Masamitsu Okajima, localizado em Porto Alegre, RS. A lapidação escolhida não é um formato tradicional, como por exemplo, brilhante, navete e briolette. O formato escolhido é de um simples prisma retangular com as arestas minimamente desgastadas formando facetas com 45° . As arestas dão melhor acabamento e segurança, pois podem ocorrer trincas indesejáveis nessas arestas se forem mantidas em ângulo de 90° . Deste modo, pode-se perceber se a cor será alterada devido ao atrito, força mecânica e calor, gerados no processo.

De modo geral, segundo Branco (2014), as etapas da lapidação são: corte, formação, facetamento e polimento. Após definir o projeto, as amostras passaram por martelamento para a divisão e desgaste manual em rebolo vertical de carbureto de silício para dar a forma inicial. A amostra é grudada em uma caneta com auxílio de resina para garantir o correto posicionamento do material no disco de facetamento; neste procedimento há o aquecimento da amostra com aproximadamente 70°C . Em sequência, as faces do retângulo e as facetas são aplainadas em um disco horizontal de 90% de chumbo e 10% de estanho; na parte superior há pó de carbureto de silício. As amostras não entram em contato com o chumbo e o procedimento é resfriado com água. Após o material ganhar forma, ele permanece fosco e passa para o disco de polimento. O disco seguinte é composto de estanho e possui sulcos radiais para segurar o pó de estanho com baixa concentração. A peça é novamente desgastada lado-a-lado repetindo os mesmos ângulos escolhidos. Logo, a peça sai do processo refletindo a luz.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ESTUDO PILOTO A

Nesta pesquisa, o interesse de estudo foi na irradiação gama gemológica da câmara panorâmica do CDTN. Embora Enokihara (2013) e Enokihara *et al.* (2013) reconheçam que a irradiação gama para o quartzo incolor pesquisado obteve coloração verde mais intensa, na câmara de irradiação com água, resultados interessantes foram apreciados nesta pesquisa e na de Drummond (2009) e Drummond *et al.* (2010), as quais utilizaram a câmara de irradiação gama do CDTN estocada à seco.

Informações foram coletadas das planilhas eletrônicas do equipamento de irradiação do CDTN utilizado nesta dissertação, para demonstrar a relação de dose, tempo e distância. Foram escolhidas determinadas doses e distâncias (exclusivas para esta pesquisa) da planilha eletrônica do sistema de irradiação gama do CDTN, projeto desenvolvido por Luiz Ladeira (Quadro 7). Foram selecionadas doses entre 1KGy e 5000KGy relacionando-as a distância mínima (encostado na fonte ou 0,010), 30 cm (distância próxima dos discos giratórios) e 3,5 m (distância máxima, distância em diagonal do canto das paredes).

O sistema de irradiação gama da câmara a seco estudada possibilita agilidade na troca de material conforme estes atingem as suas doses pré-estabelecidas. Entretanto, a mão-de-obra humana é necessária ao posicionamento dos materiais.

A seguir são expostos os resultados das irradiações gama homogênea nos minerais selecionados. Nesta primeira etapa, teste piloto, amostras brutas de quartzo de diferentes localidades foram irradiadas de modo homogêneo para conhecimento da técnica da irradiação e resposta cromática dos minerais adquiridos para possível irradiação gama seletiva.

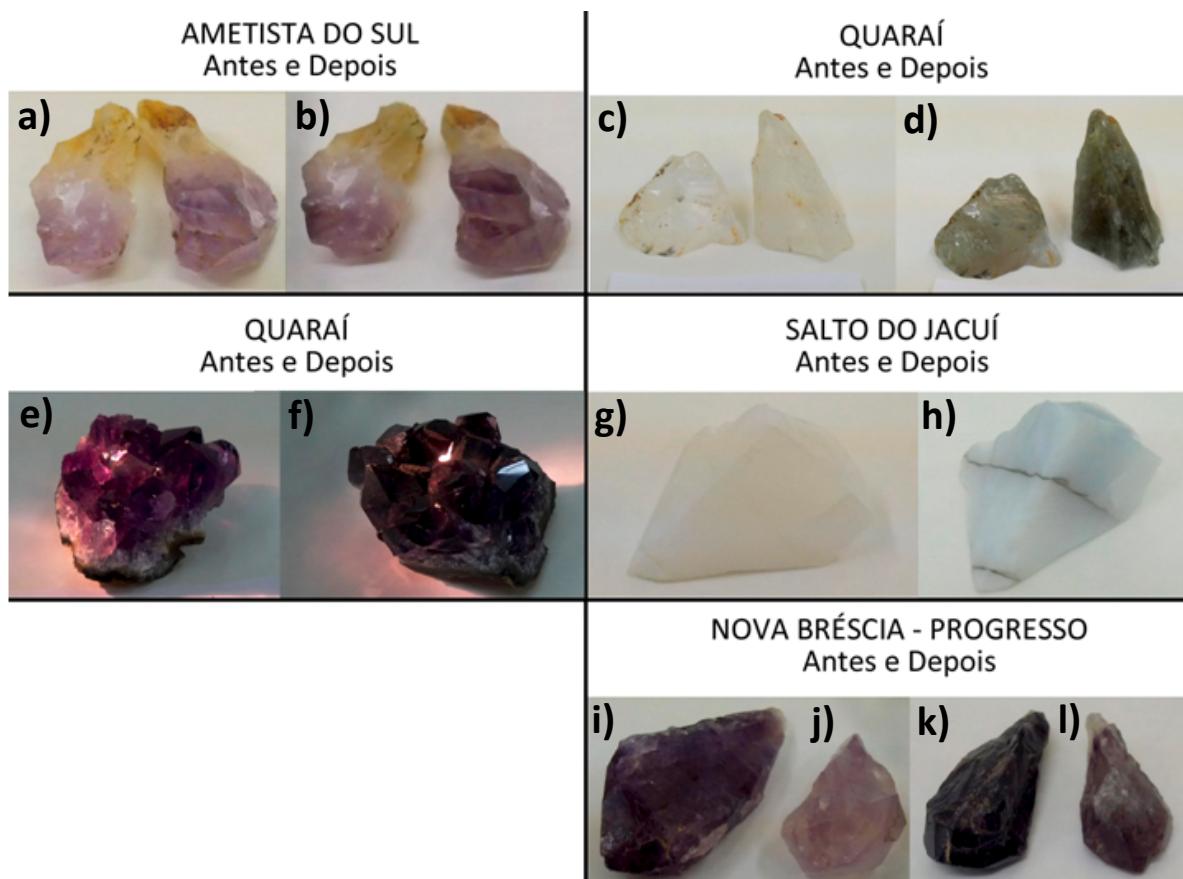
A partir da observação dos resultados das primeiras irradiações, constata-se que há diversidade de materiais gemológicos do Rio Grande do Sul suscetíveis ao tratamento por irradiação gama (Figura 38) e (Quadro 8). No entanto, demandam altas doses (aproximadamente 200 KGy), ou seja, maior tempo (dias) de exposição à radiação. Com a dose de 200 KGy nenhum desses materiais obteve uma intensificação máxima, podendo ser necessário aumentar a dose.

Quadro 7 – Simulação de valores máximos e mínimos de distância e tempo de exposição em relação a dose de irradiação gama da fonte panorâmica. A atividade da fonte foi de 33398,34 TBq, taxa de dose 18057,40 Gy/h, referente ao dia 3 de novembro de 2015.

DOSE (KGy)	DISTÂNCIA MÍNIMA (cm)	TEMPO MÍNIMO (h:min.:seg.)	DISTÂNCIA USUAL (cm)	TEMPO MÍNIMO (h:min.:seg.)	DISTÂNCIA MÁXIMA (cm)	TEMPO MÍNIMO (h:min.:seg.)
1	0,010	00:03:19	30,0	00:31:09	350,0	22:08:28
5	0,010	00:16:37	30,0	02:35:43	350,0	110:42:22
10	0,010	00:33:14	30,0	05:11:26	350,0	221:24:44
15	0,010	00:49:50	30,0	07:47:09	350,0	332:07:06
25	0,010	01:23:04	30,0	12:58:35	350,0	553:31:51
50	0,010	02:46:08	30,0	25:57:09	350,0	1107:03:42
75	0,010	04:09:12	30,0	38:55:44	350,0	1660:35:32
90	0,010	04:59:03	30,0	46:42:53	350,0	1992:42:39
100	0,010	05:32:16	30,0	51:54:19	350,0	2214:07:23
200	0,010	11:04:33	30,0	103:48:38	350,0	4428:14:46
300	0,010	16:36:49	30,0	156:42:57	350,0	6642:22:09
400	0,010	22:09:06	30,0	207:37:16	350,0	8856:29:33
500	0,010	27:41:22	30,0	259:31:34	350,0	11070:36:56
1000	0,010	55:22:44	30,0	519:03:09	350,0	22141:13:51
5000	0,010	276:53:41	30,0	2595:15:44	350,0	110706:09:17

Fonte: Adaptado do sistema de irradiação gama do CDTN.

Figura 38 – Resultados qualitativos das primeiras irradiações homogêneas em diversas variedades de quartzo do Rio Grande do Sul. Materiais irradiados com dose de 200 KGy na câmara de irradiação gama do CDTN. O tempo e distância de irradiação foram estipulados pelo operador. Ametista de Ametista do Sul: a) antes e b) depois. Quartzo incolor de Quaraí: c) antes e d) depois. Ametista de Quaraí: e) antes e f) depois. Opala branca de Salto do Jacuí: g) antes e h) depois. Ametista de Nova Bréscia: i) antes e j) depois. Ametista de Progresso: k) antes e l) depois.



Fonte: Autor.

As amostras de opala branca de Salto do Jacuí ao serem irradiadas (doses de 1 KGy a 1000 KGy) resultaram em amostras com difícil padronização de doses, elas são azuladas e em alguns casos há faixas escuras. Essas amostras não são adequadas à irradiação gama seletiva, são apenas adequadas à irradiação homogênea para posterior aproveitamento de partes bicolors. Conseguem-se boas tonalidades, no entanto nem todas as amostras corresponderam a alteração cromática, ou seja, doses menores geraram tonalidades mais intensas que maiores doses. Assim, a continuação do estudo deste material será retomada após a finalização desta dissertação.

Quadro 8 – Resultados qualitativos das primeiras irradiações homogêneas em diversas variedades de quartzo do Rio Grande do Sul do LABOGEM/UFRGS. Materiais irradiados com dose de 200KGy na câmara de irradiação gama panorâmica do CDTN. O tempo e distância de irradiação foram estipulados pelo operador.

VARIEDADE	RESULTADO
Ametista bicolor de Ametista do Sul, RS (incolor e violeta).	Baixa intensificação da cor lilás.
Quartzo incolor de Quaraí, RS	Alteração cromática para verde fracamente acinzentado. A ponta do cristal permaneceu mais clara. Necessita de outro tratamento para “abrir” a cor (UV, sol, calor).
Amostra de fragmento de geodo de ametista de Quaraí, RS	Intensificação da cor na parte violeta.
Opala branca de Salto do Jacuí, RS	Alteração cromática expondo contraste de veios esverdeados-fumê. A parte branca se tornou azul claro. Outras amostras foram irradiadas e confirmaram a tonalidade azul claro e médio.
Ametista monocromática de Nova Bréscia e Progresso, RS	Intensificação da cor lilás.

Fonte: Autor.

Dentre as amostras de ametista irradiadas, as amostras de Nova Bréscia, RS e Progresso, RS foram as que apresentaram considerável alteração cromática (interessantes para a irradiação seletiva), já a ametista de Ametista do Sul não apresentou notável alteração cromática. Entretanto, devido à falta de mais material disponível, não se pôde dar continuidade a irradiação destes minerais.

O quartzo incolor de Quaraí, RS alterou a cor para verde, uma vez que a coloração da base desse cristal se tornou ainda mais intensa. No momento da pesquisa seriam necessários o tempo de quatro dias de irradiação para a dose de 200 KGy, conforme verificado no quadro de simulação de doses, tempos e distâncias.

A partir destes resultados adquiriu-se quartzo incolor de fragmentos de geodos das regiões de garimpo do Rio Grande do Sul. Setenta e cinco fragmentos brutos destes materiais foram agrupados e irradiados com distintas doses (de 300 KGy a 5000 KGy) resultando na coloração verde acinzentado/fumê na dose de 5000 KGy – dose diferente das sugeridas por Enokihara (2013).

A escolha por estes materiais foi pela facilidade de obtenção e por serem muitas vezes desvalorizados no comércio. Todas estas amostras de quartzo incolor

que alteraram sua cor para verde possuem o mesmo matiz (prasiolita), inclusive a de Quaraí anteriormente relatada. Segundo Enokihara (2013), moléculas de água, de hidroxila (composto por oxigênio e hidrogênio - OH) e de silanol (composto por silício e hidroxila) são causas de cor verde para o quartzo incolor⁵⁰. Quanto mais alta for a velocidade de crescimento do mineral maior a aparição desses defeitos (LAUDISE; BORNS, 1988). Estas concentrações não puderam ser verificadas nas amostras desta dissertação. Um fragmento de geodo incolor com dezenas de cristais de quartzo incolores, proveniente de Ametista do Sul, pesando 2 Kg, foi irradiado com a dose de 1000 KGy resultando na coloração verde acinzentado/fumê, o que pode ser um diferencial devido a dificuldade em encontrar esta coloração em meio natural. Sugere-se o estudo da irradiação gama seletiva nestes fragmentos de geodos (de até 25 kg) e até mesmo em pequenos geodos (usados como chaveiro).

Ressalta-se que nesta etapa inicial da pesquisa não foi realizada a legenda de cor para a geração de fotografias.

Em sequência, outros materiais foram adquiridos a fim de que respondam ao processo de irradiação de forma mais rápida e homogênea (Quadro 6). O intuito inicial desta pesquisa foi de trabalhar com materiais do Rio Grande do Sul, mas para desenvolver o estudo da irradiação seletiva foram necessários outros testes em materiais de fora da região sul, entretanto ainda se trabalha com minerais de regiões brasileiras.

Quadro 9 – Resultados qualitativos das irradiações homogêneas em diversas variedades de quartzo e de vidro. As doses são variadas, a distância e o tempo de irradiação foram estipulados pelo operador.

VARIÉDADE	RESULTADO
Vidro comum SiO ₂ (sodo-cálcico) – vidro de janela e vidro de pote de conserva (15KGy, 60KGy)	Alteração cromática para castanho claro e fumê.
Quartzo fumê amostra incolor (Bagatini Pedras) (60KGy)	Alteração bicolor, parte incolor e parte fumê intenso com passagem de uma cor a outra bem delimitada.
Quartzo rosa maciço de Águas Vermelhas, MG (Bagatini Pedras) (250Gy a 200KGy)	Tonalidades de fumê expondo manchas esbranquiçadas das fraturas até chegar a cor preta homogênea.

Fonte: Autor.

⁵⁰O quartzo incolor que ao ser irradiado se torna verde, já sai do irradiador com a cor desejada, ou em alguns casos o verde é acinzentado e necessita ficar um tempo exposto à irradiação UV ou ao sol para eliminar esse problema (LAMEIRAS, 2012).

As amostras de vidro alteraram a coloração com tonalidades intensas terrosas ou âmbar, assim como em Mekki e Salim (1999). Por ser um material industrializado será utilizado nesta pesquisa como amostra-controle, baseado em Rodrigues Jr e Caldas (2002). Já o quartzo natural fumê adquirido em Soledade (RS) apresentou após a irradiação bicoloração, com zona de delimitação da bicoloração bem definida. Como se trata de um material natural, durante o seu crescimento pode ter ocorrido alterações, permanecendo uma parte do cristal diferente da outra. Esse resultado é semelhante ao encontrado na pesquisa de Drummond (2009). Esse resultado de bicoloração não é favorável ao estudo da radiação seletiva, por isso esse material não será utilizado.

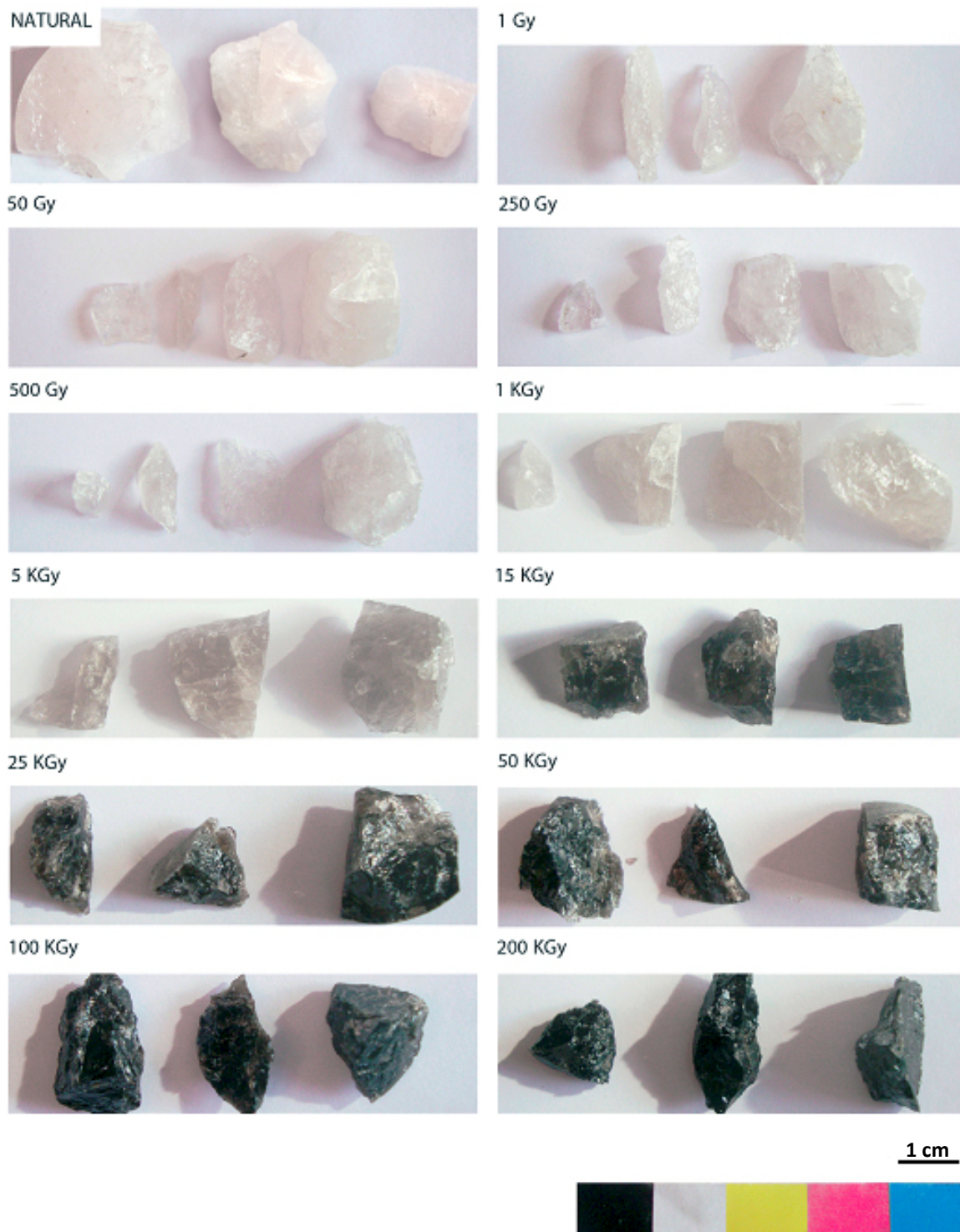
Grande parte do material irradiado, com resultado insatisfatório (neste momento, conforme a atividade da fonte utilizada com aproximadamente 33398,34 TBq), foi posto de lado. Em sequência, o foco da pesquisa foi voltado ao quartzo rosa de Águas Vermelhas de Minas Gerais, pois o quartzo rosa foi o material de maior interesse pela disponibilidade, variedades de tons e potencial para alteração cromática com doses mais baixas.

4.2 ESTUDO PILOTO B

As amostras de quartzo rosa irradiadas em diferentes doses expuseram gradação de tonalidades, passando do rosa pálido a tons de fumê e preto. Somente a partir de 500 Gy nota-se alteração de cor que na ordem de 100 KGy é máxima. As tonalidades geradas pelas doses de 1 Gy a 250 Gy não são perceptíveis a olho nu (Figuras 39 e 40).

Essas amostras foram analisadas no Photoshop CS5[®] pelo sistema HSB, com a padronização de suas espessuras (Figura 40).

Figura 39 – Lascas de quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG irradiadas de modo homogêneo. As doses variaram entre 1Gy a 200KGy permanecendo uma amostra natural. Imagem das amostras brutas após a irradiação gama. O tempo e a distância de irradiação foram estabelecidos pelo operador.



Fonte: Autor.

Figura 40 – Quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG fatiados com 2 mm de espessura e irradiados com diferentes doses. Amostras sem polimento e sem padronização do formato. Escala da barra 1 cm.



Fonte: Autor

As tonalidades obtidas de 5KGy a 25KGy são fumês claros os quais permitem a percepção de translucidez do material. Acima destas doses há intensificação de tonalidade para fumês escuros com 50KGy, chegando a percepção do preto em 100KGy absorvendo toda a iluminação e deixando o material opaco e com cor homogênea - ao moer este material preto (com pistilo e almofariz até adquirir um pó fino) foi notado que o pó permaneceu escuro e não branco. Esses resultados correspondem as irradiações de Barreto *et al.* (2009) e Miranda *et al.* (2012) com outros quartzo rosa, principalmente quanto ao escurecimento. Infelizmente a coloração rosa do material estudado não foi acentuada por essa técnica de irradiação gama.

Amostras com doses entre 100 KGy a 200 KGy permaneceram pretas e opacas. Ressalta-se que com a espessura de 2 mm a amostra que recebeu dose de 100 KGy apresentou ainda fraca transparência quando observada elevada da superfície, isto é, a luz atravessou a amostra.

Ao sobrepor as fatias de 2 mm, resultando em aproximadamente 4 mm, as tonalidades se intensificaram, mostrando que a relação entre dose e cor/tonalidade desejada está atrelada a espessura do material. Isto ressalta a ideia de que são necessários maiores estudos quanto à espessura do material irradiado, principalmente em relação as medidas da ordem de centímetros para gemas maiores.

As tonalidades fumês tendem as cores quentes como o vermelho, isto pode ser observado quando amostras de cor são analisadas no sistema HSB, expostas na sequência abaixo. A seguir, são expostos os resultados das coletas de dados do sistema HSB em relação ao quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG não irradiado (Tabela 1) e irradiado com distintas doses (Tabela 2, 3, 4 e 5).

Tabela 1 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) nas amostras de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG brutas, com espessura de 6 mm e não irradiadas para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA BRUTA NÃO IRRADIADA (esp. 6 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	22	12	19	19	11	12	19	12	27	13	5,39	16,60
S(%)	10	7	7	10	7	7	8	11	8	6	1,66	8,10
B(%)	85	87	90	87	84	88	91	88	92	87	2,51	87,90

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 16° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 5,39° e média 16,6°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 5°, desvio padrão 1,66% e média 8,1%. Foi verificado no parâmetro de brilho 7° de diferença, desvio padrão de 2,51% e média 87,9%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (16,8,88) correspondendo a CMYK (12,20,18,0), RGB (224,211,206) e Pantone 5035C digital; caracterizando rosa claro. A espessura de 6 mm para esta análise foi escolhida conforme o tamanho natural da lasca, além disso, esta amostra fatiada com 2 mm expõe muito fraca a coloração rosa a olho nu, podendo considerá-la incolor.

Em sequência, as fatias de 2 mm irradiadas com determinadas doses foram caracterizadas pelo sistema HSB (Tabela 2, 3, 4 e 5).

Tabela 2 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 1KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 1 KGy (esp. 2 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	355	349	355	355	369	350	348	360	349	346	6,89	353,6
S(%)	10	7	10	10	11	11	9	9	10	10	1,15	9,7
B(%)	92	89	93	91	90	84	90	89	90	88	2,45	89,6

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 23° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 6,84° e média 353,6°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 4°, desvio padrão 1,15% e média 9,7%. Foi verificado no parâmetro de brilho 9° de diferença, desvio padrão de 2,45% e média 89,6%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (354,10,90) correspondendo a CMYK (12,24,16,0), RGB (229,207,209) e Pantone 5035C digital; caracterizando a coloração nude.

Tabela 3 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 5KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 5 KGy (esp. 2 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	17	9	5	9	12	14	4	12	13	12	4,00	10,7
S(%)	18	20	14	19	18	19	17	17	19	20	1,79	18,1
B(%)	63	64	62	66	67	63	66	68	67	70	2,54	65,6

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 13° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 4,00° e média 10,7°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 6°, desvio padrão 1,79% e média 18,1%. Foi verificado no parâmetro de brilho 8° de diferença, desvio padrão de 2,54% e média 65,6%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (11,18,66) correspondendo a CMYK (41,45,43,0), RGB (168,144,138) e Pantone 408C digital; caracterizando fumê claro.

Tabela 4 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 15KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 15 KGy (esp. 2 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	14	14	9	14	9	17	13	16	9	15	2,98	13
S(%)	30	21	25	25	26	25	25	32	24	26	3,07	25,9
B(%)	29	32	31	34	30	33	30	32	33	30	1,64	31,4

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 8° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 2,98° e média 13°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 11°, desvio padrão 3,07% e média 25,9%. Foi verificado no parâmetro de brilho 5° de diferença, desvio padrão de 1,64% e média 31,4%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (13,26,31) correspondendo a CMYK (71,76,70,32), RGB (79,63,58) e Pantone 438C digital; caracterizando a cor fumê escuro.

Tabela 5 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG polidas, com espessuras 2 mm e irradiada com 25KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 25 KGy (esp. 2 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	12	26	22	22	12	12	20	22	23	12	5,61	18,3
S(%)	19	24	28	23	17	19	24	23	25	17	3,69	21,9
B(%)	10	11	11	14	11	10	10	14	13	11	1,58	11,5

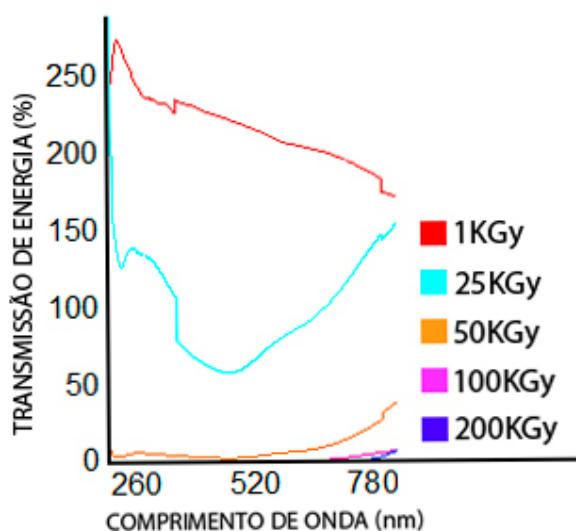
Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 11° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 5,61° e média 18,3°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 11°, desvio padrão 3,69% e média 21,9%. Foi verificado no parâmetro de brilho 4° de diferença, desvio padrão de 1,58% e média 11,5%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (18,22,11) correspondendo a CMYK (12,20,18,0), RGB (224,211,206) e Pantone Black C digital; caracterizando fumê intenso. Por não obter correspondência cromática na escala Pantone foi atribuído, pelo Photoshop, a identidade

Pantone Black C digital. A partir deste resultado nota-se o problema em caracterizar as outras cores por este método, pois as tonalidades são excessivamente escuras.

As diferenças de transmissão de luz visível, nestes materiais de Águas Vermelhas, quanto a diferentes doses de irradiação gama aplicadas podem ser percebidas através da espectrofotometria (Figura 41).

Figura 41 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa de Águas Vermelhas irradiadas com diferentes doses homogêneas. Devido ao grande número de fraturas do material foram selecionadas apenas as amostras em exposição.



Fonte: Autor.

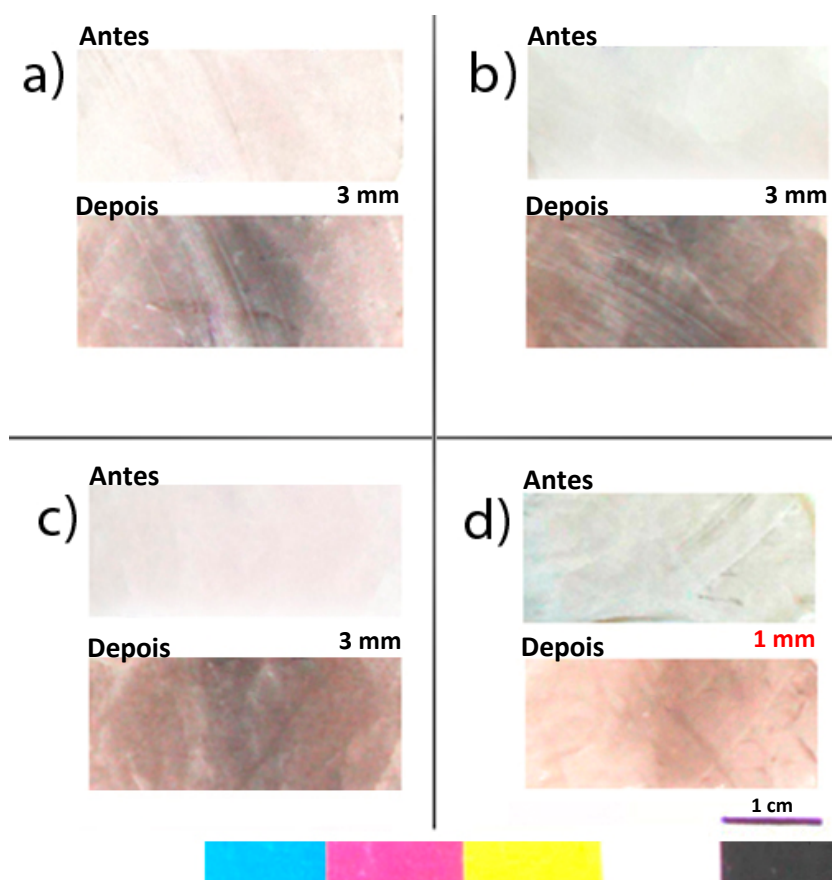
Conforme o aumento da dose de irradiação gama o material diminui a transmissão de luz visível, absorvendo cada vez mais e conseqüentemente escurece.

Em seqüência, foram testados com a irradiação seletiva fatias de quartzo incolor de Quaraí, RS que ao ser irradiado se transforma em quartzo verde (prasiolita), bem como o quartzo rosa de Águas Vermelhas-MG adquirido na distribuidora já citada. Neste primeiro experimento de irradiação seletiva foi utilizado um bloco de chumbo, com 99% de pureza, como máscara, com um orifício central com diâmetro de 2 mm. Uma fatia de quartzo incolor de Quaraí foi colada centralizada no verso do chumbo utilizando fita crepe. O bloco foi amparado por outros blocos com mesma espessura cobrindo a amostra. A dose utilizada foi de 200KGy – com a placa de chumbo encostada na proteção da fonte. O material alterou a coloração de modo homogêneo, não apresentou o desenho esperado de um círculo no centro da amostra. A partir disso, utiliza-se a fresta de dois blocos afastados (como a fenda de um penetrâmetro), pois problemas de alinhamento da fonte com o experimento podem comprometer o resultado e como não se pode assistir a irradiação em tempo real, tomou-se esta iniciativa.

A seguir, quatro amostras fatiadas de quartzo rosa de Águas Vermelhas foram irradiadas seletivamente. Foram utilizadas três amostras de aproximadamente 3 mm de espessura e uma fatia de 1 mm de espessura e polida. Blocos de chumbo, com 5 cm de espessura, do laboratório de Irradiação Gama do CDTN foram colocados lado a lado deixando uma fresta de 3 mm encostado na fonte e a 43 cm de altura do piso. Entretanto, as frestas possuem configuração diferenciada, elas possuem sistema de encaixe com lombada côncava e convexa. Logo, as partes côncavas formaram a fresta das amostras de chumbo. A partir deste experimento piloto foram desenvolvidos os novos experimentos mais precisos de irradiação seletiva.

Após os experimentos de irradiação homogênea no quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG, foi escolhida a dose de 15 KGy para realizar a irradiação gama seletiva neste material como procedimento piloto (Figura 42).

Figura 42 – Irradiação gama seletiva em quartzo rosa de Águas Vermelhas. Realizada com amostra de chumbo 5 cm (atenuador), fresta 3 mm, dose 15 KGy, 88 min, não alinhado com o centro da fonte (altura 43 cm do piso) e encostado na fonte. Amostras de “a” a “c” cortadas com 3 mm \pm 0,5, sem polimento e amostra “d” com 1 mm e polida (em destaque). Imagens em detalhe do antes e depois da irradiação.



Fonte: Autor.

Apesar das superfícies não polidas das amostras dificultarem a visualização da bicoloração resultante, notam-se regiões centrais escurecidas nas amostras. Na amostra de 1 mm de espessura é percebida uma faixa escura com bordas não abruptas ou difusas. A fenda de 3 mm gerou uma faixa de 5mm, no entanto, não se pode afirmar a ampliação, pois as amostras de atenuação não possuíam as bordas retas ou paralelas, possuíam um arredondado interno para encaixe. O escurecimento das amostras salientou os defeitos da superfície, expondo esbranquiçados. Estes foram os primeiros resultados favoráveis de irradiação seletiva desta pesquisa, mostram que é possível realizar a irradiação gama seletiva (na câmara panorâmica) no quartzo selecionado, embora não tenha atingida a aparência esperada.

Foi avaliada também neste experimento de irradiação seletiva a qualidade visual de uma das faces sendo bruta (Figura 43).

Figura 43 – Irradiação gama seletiva em quartzo rosa. Realizada com amostra de chumbo 5 cm (atenuador), fresta 3 mm, dose 15 KGy, 88 min, alinhado com o centro da fonte. Superfície bruta.



Fonte: Autor.

A partir desses resultados de irradiação seletiva, percebe-se a necessidade de tratar a superfície da amostra com polimento em ambos os lados. Devido às inúmeras fraturas do material há dificuldade de perceber a irradiação seletiva, por isso é selecionado novo quartzo mais límpido e amostras de chumbo com faces planas e paralelas.

Sendo assim, indica-se somente o desenvolvimento de simples grafismos neste material por causa de suas fraturas e também caso utilize a superfície sem

polimento ou bruta. Ressalta-se que o efeito degradê gerado é devido as bordas do chumbo serem arredondadas. Ao repetir o experimento com uma placa de chumbo com arestas retas percebe-se uma melhora na imagem, entretanto as fraturas ainda atrapalham a visualização (Figura 44).

Figura 44 - Irradiação gama seletiva com fresta de 3 mm no quartzo rosa de Águas Vermelhas, MG. Atenuação de chumbo de 10 cm de espessura e dose de 10KGy.



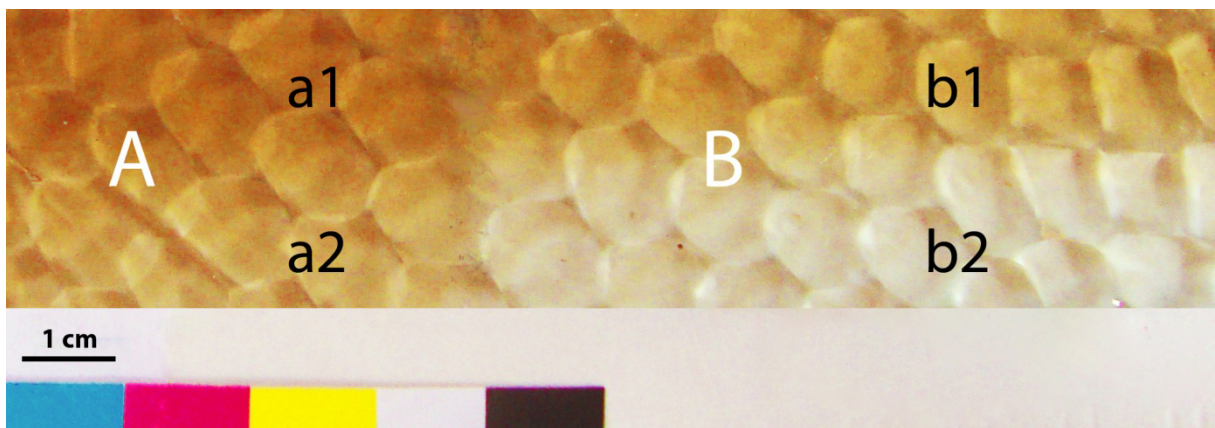
Fonte: Autor.

Além desses experimentos, testa-se a sobreposição de doses em um vidro sodo-cálcico com textura tátil (Figura 45). Trata-se de um recurso interessante para ser explorado no design de gemas e ainda com outras técnicas de beneficiamento, como por exemplo, a lapidação diferenciada ou texturização superficial.

Metade do vidro foi irradiada e a outra blindada, logo após o vidro foi girado 90° e novamente irradiado pela metade. O intuito deste ensaio é adquirir no mesmo material quatro tonalidades distintas. Neste experimento foram utilizados dois blocos de chumbo do CDTN encostados na fonte, com lombadas convexas, totalizando a espessura de 10 cm, a 43 cm de altura do piso e encostado na fonte. As doses utilizadas foram de 4 KGy e 6KGy. Este experimento teve

serventia para planejar o design de superfície de gemas como etapa final dos experimentos de irradiação seletiva.

Figura 45 – Irradiação gama seletiva com sobreposição deslocada de doses. Foi utilizado vidro sodo-cálcico com textura tátil e atenuação de 10 cm de chumbo. A) parte irradiada com 6KGy e B) parte irradiada com 4KGy. As partes “a1” recebeu a dose de 10KGy, “a2” recebeu 6KGy, “b1” recebeu 4KGy e “b2” atenuou as doses recebidas.



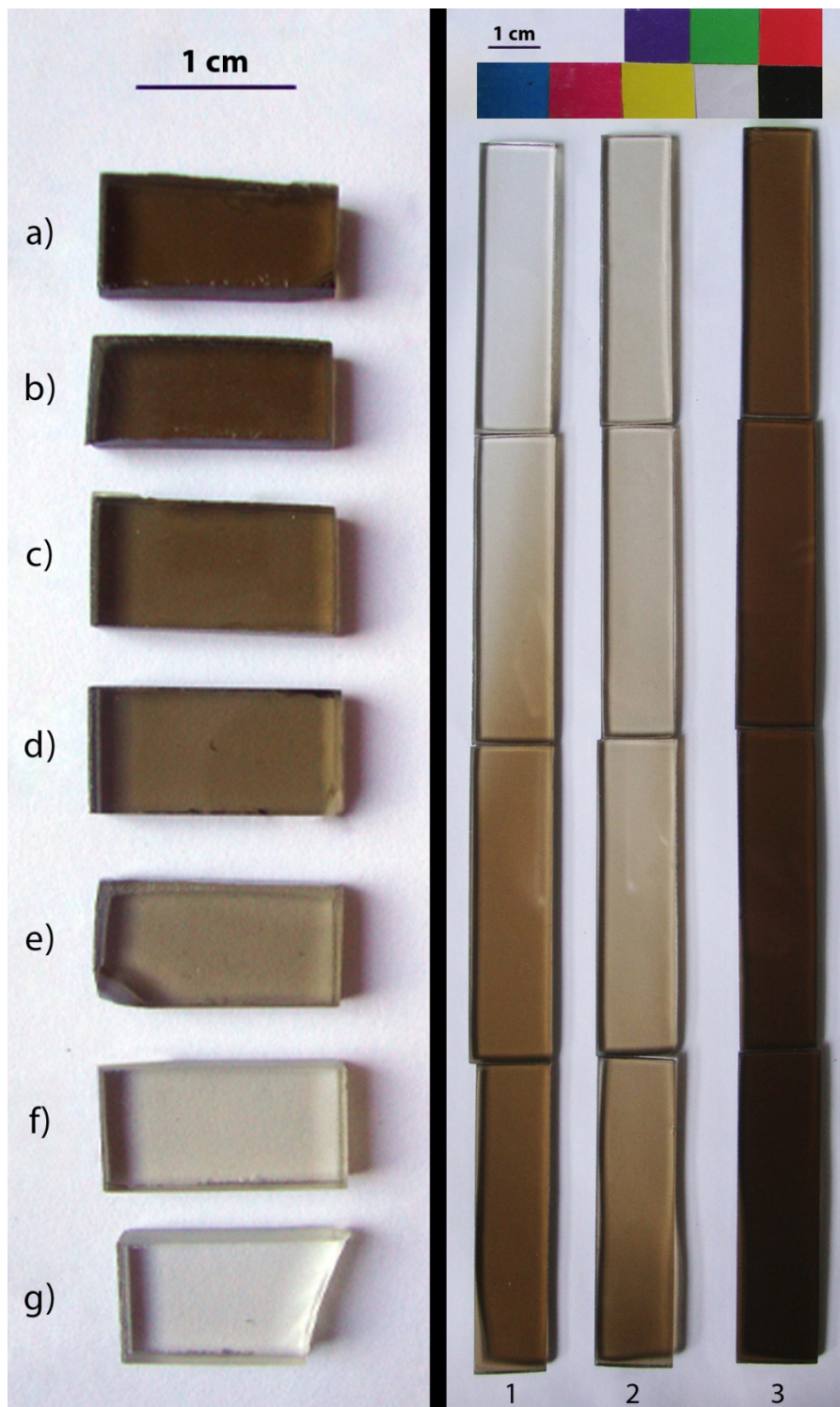
Fonte: Autor

A partir do interessante resultado da sobreposição de doses deslocadas no vidro, almeja-se o mesmo efeito em gemas na próxima etapa desta pesquisa. Conforme a administração das doses o efeito remeterá a um xadrez ou cruz (dificilmente observado em materiais naturais), caracterizando um design de superfície.

Com relação as lâminas de vidro irradiadas, elas alteraram a coloração para tonalidades terrosas ou âmbar. Para objetos de grande proporção irradiados de “modo estático”, isto é, sem rotação nos discos giratórios da câmara de irradiação gama, deverá ser notada bicoloração com degradê, conforme as tiras de vidro sodo-cálcico irradiadas (Figura 46).

O estudo de Omi (2006) expõe também o problema das doses recebidas de modo não homogêneo, este autor pesquisou isso em grandes cestos cilíndricos carregados de material gemológico, porém utilizou dosímetros.

Figura 46 – Irradiação gama em vidro. À esquerda, irradiação gama homogênea em vidro sodocálcico, amostra de vidro com 60 x 15 x 3 mm dividida em sete partes: a) 200KGy, b) 100KGy, c) 50KGy, d) 25KGy, e) 10KGy, f) 5KGy e g) 1KGy. À direita, irradiação gradual (natural) no “modo estático”. Cada tira de vidro possui quatro amostras de vidro com 60 x 15 x 3 mm. A irradiação foi realizada com altura 57,5 do piso. A primeira tira foi irradiada com 10KGy a 10 cm de distância da fonte, a segunda com 5 KGy a 10 cm da fonte e a terceira com 10 KGy encostada na fonte.



Fonte: Autor.

A partir do teste acima, de “irradiação gama gradual natural”, constata-se que não há grandes diferenças, com relação a atenuação natural da radiação, para pequenas espessuras de material a ser irradiado estaticamente. O problema deve ser com grandes volumes ou espessuras, pois a partir de aproximadamente 12 cm pode-se notar diferença de coloração. Os 24 cm das tiras expõem a grande diferença de coloração em degradê, expõe de modo visível, a interação do fluxo de fótons que decresce por unidade de área à medida que a distância varia (lei do inverso do quadrado da distância), conforme Tilly Junior (2010).

Ressalta-se que uma amostra de quartzo rosa-leitoso naturalmente bicolor (com parte branca opaca e rosa médio pouco translúcida) de Minas Gerais, doada por Helena Cristina do CDTN, ao ser irradiada tornou-se fumê em ambas as partes bicolores, mostrando a possibilidade de homogeneização da cor pela irradiação.

Estas etapas iniciais (estudo piloto A e B) foram de fundamental importância para compreender o processo de irradiação gemológica, resultando no desenvolvimento do tópico “câmara de irradiação gama” com as diretrizes já expostas. O material irradiado com diferentes doses possui serventia como “dosímetro visual” ou dosímetro colorimétrico⁵¹ para comparações com a irradiação gama seletiva (caso seja realizada imagem desse “dosímetro visual”, é interessante que se utilize a legenda de cores), além de poder selecionar a melhor tonalidade obtida ou realizar o estudo das possíveis sobreposições de doses.

Diversos artigos e dissertações sobre minerais expõem imagens cujas cores não podem ser confirmadas com exatidão, recurso interessante ao campo do design. Este problema é verificado principalmente em imagens de antes e depois de tratamentos, pois se notam diferenças de cor e tonalidade no plano de fundo da imagem, geralmente branco. Ao tentar amenizar o problema, ajustes podem ser realizados em *softwares* de correção de imagens, mas neste trabalho utiliza-se um guia de cor no momento da fotografia do mineral para facilitar futuras comparações em ambientes virtuais. Este padrão de cor é descrito na parte de materiais e métodos desta dissertação. Por exemplo, na enciclopédia de gemas de Arem (1987), as imagens foram calibradas com o colorímetro Pettijohn-Minolta e uma tabela com medições de algumas gemas pelo sistema CIE (L, a, b) e sistema de Munsell. No entanto, foram realizadas adaptações experimentais, como por exemplo, o uso de

⁵¹Dosímetro colorimétrico é baseado na mensuração de cor e é aplicado à altas dosagens, segundo Bibergal *et al.* (1960). Diversos materiais podem ser utilizados, por exemplo, celofane filmico, poliestireno, vidro, dentre outros materiais orgânicos e inorgânicos. Trata-se de um método eficaz o qual possibilita a comparação do escurecimento do material promovido pela irradiação.

um espelho na coleta da cor. Os autores Inspirong *et al.* (2012) em sua pesquisa sobre irradiação gama no quartzo da África do Sul tentam expor os resultados cromáticos através do sistema de cor CIE (L, a, b), mas sem precisão (ver capítulo sistemas de cores).

A legenda de cores construída CMYK (ciano, magenta, amarelo, preto e branco), utilizada sempre que uma imagem fotográfica é concebida nesta pesquisa (principalmente a partir da etapa 2), se tornou extremamente útil para a comparação das imagens e nivelamento das cores quando alterações bruscas ocorreram na luminosidade e na cor. Entretanto, a adição das cores RGB (vermelho, verde e azul) na legenda também auxiliaria a correção de cores no Photoshop®. Elas foram introduzidas durante a pesquisa, por isso algumas imagens apresentam legendas diferentes. Deste modo, sugere-se sempre que possível o uso de legendas de cor na tomada de imagem de minerais irradiados, tendo em vista a dificuldade de mensuração da cor por outros meios, pois se trata de um efeito óptico.

As imagens serão vistas por outros pesquisadores em outros computadores ou impressas e cada um deles terá uma percepção. Sendo assim, o recurso “legenda de cor” é apenas um guia extra para mostrar que alterações visíveis podem ocorrer. O uso da legenda de cor possibilita o autor fotografar os minerais em distintas fontes de luz, pois a alteração da fonte luminosa é facilmente percebida na legenda e pode ser corrigida com muito cuidado no computador. No entanto, para coletar dados de cor através de fotografia foi utilizada luz fluorescente, conforme Barbosa (2012).

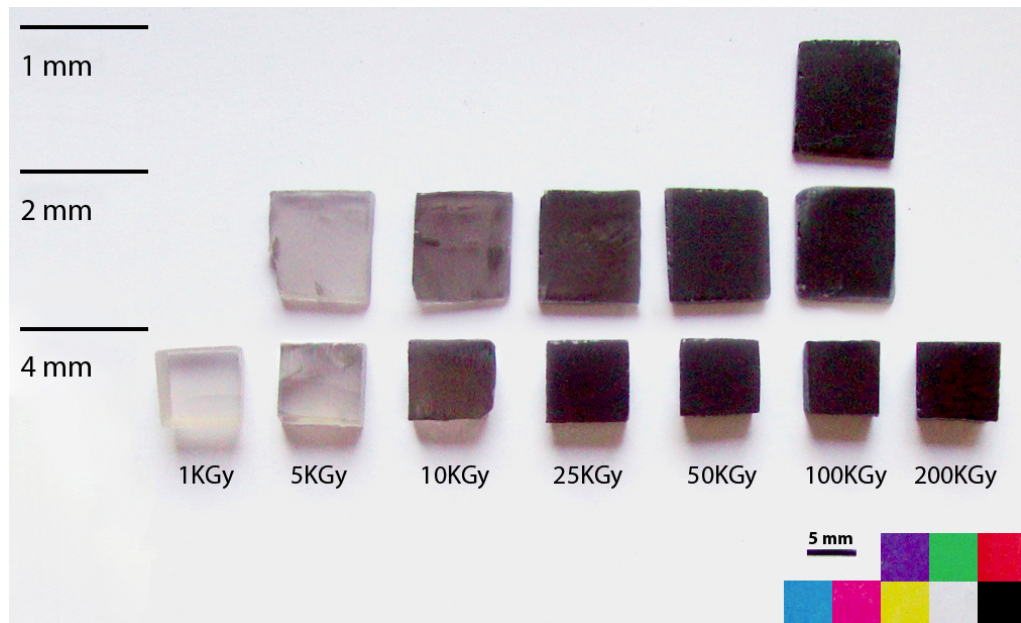
Por causa da difícil visualização da irradiação seletiva no quartzo rosa de Pedra Lavrada, amostras de quartzo rosa-pálido de excelente qualidade gemológica, de Pedra Lavrada, foram utilizadas para complementar o estudo.

4.3 RESULTADOS DO QUARTZO DE PEDRA LAVRADA

Embora nesta pesquisa seja utilizada a irradiação gama homogênea e seletiva, inúmeras outras tecnologias poderão beneficiar e diferenciar o material escolhido (quartzo rosa-pálido com qualidade gemológica, de Pedra Lavrada, PB).

A Figura 47 apresenta os resultados da irradiação homogênea das amostras representativas de Pedra Lavrada, PB. Em sequência, são expostos os resultados das irradiações seletivas neste material.

Figura 47 – Irradiação gama homogênea (de 1KGy a 200KGy) nas amostras selecionadas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada. Linha 1: amostra com 1 mm de espessura e dose de 100KGy; linha 2: amostras com 2 mm de espessura e doses de 5KGy a 100KGy e linha 3: amostras com 4 mm de espessura e doses de 1KGy a 200KGy.



Fonte: Autor.

As porções transparentes e pálidas do lote doado de quartzo rosa de Pedra Lavrada alteraram de modo significativo sua coloração para tonalidades de fumê e preto, não sendo observadas bicolorações naturais. Esses resultados também correspondem as irradiações de Barreto *et al.* (2009) e Miranda *et al.* (2012) com outros quartzo rosa, principalmente quanto ao escurecimento. Contudo não acentuaram a cor rosa. Suas doses de alteração cromática foram mais baixas (10 KGy) em comparação com quartzo incolor do Rio Grande do Sul estudado (média de 200 KGy).

Observa-se, a partir da Figura 46 que ao variar a dose é possível obter uma gama de tonalidades intrinsecamente relacionadas com a espessura da amostra. Quanto mais espessa a amostra mais acentuada é sua tonalidade, principalmente com relação as tonalidades de fumê a preto. Em sequência, são expostos os resultados referentes a cada dose de irradiação efetuada no quartzo rosa-pálido.

Com 1 KGy nota-se pouca alteração cromática na amostra de 4 mm. Trata-se de uma coloração nude ou fumê claríssimo observado via sistema HSB no Photoshop® (Tabela 6).

Tabela 6 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 1KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 1 KGy (esp. 4 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	350	348	343	355	347	360	347	360	354	347	5,85	351,1
S(%)	3	5	3	5	4	4	4	4	5	4	0,73	4,1
B(%)	84	85	84	86	86	84	85	85	85	85	0,73	84,9

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 17° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 5,85° e média 351,1°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 2°, desvio padrão 0,73% e média 4,1%. Foi verificado no parâmetro de brilho 2° de diferença, desvio padrão de 0,73% e média 84,9%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (351,4,85) correspondendo a CMYK (16,20,16,0), RGB (217,208,209) e Pantone 5245C digital; caracterizando a coloração nude ou fumê claríssimo.

Com 5 KGy nota-se considerável alteração cromática nas amostras. Trata-se de um fumê claro (Tabela 7). Nota-se pouca variação de tonalidade entre a amostra de 4 mm e 2 mm.

Tabela 7 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 5KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 5 KGy (esp. 4 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	344	326	340	347	346	351	355	337	326	332	10,05	340,4
S(%)	8	8	8	8	7	7	7	7	9	9	0,78	7,8
B(%)	73	68	69	71	71	70	69	70	72	71	1,50	70,4

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 29° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 10,05° e média 340,4°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 3°, desvio padrão 0,78% e média 7,8%. Foi verificado no parâmetro de brilho 5° de diferença, desvio padrão de 1,50% e média 70,4%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (340,8,70) correspondendo a CMYK (33,36,28,0), RGB (179,164,169) e Pantone 436C digital; caracterizando a coloração nude escuro ou fumê claro tendendo ao vermelho. Sua cor é semelhante a das amostras de 5KGy de Águas Vermelhas anteriormente irradiadas, embora as muitas inclusões neste material deixe-o aparentemente mais opaco, mais escuro.

Com 10 KGY nota-se diferença de tonalidade entre as espessuras de 4 mm e 2 mm. Trata-se da tonalidade de fumê mais adequada para a amostra de 4 mm com boa transparência (Tabela 8).

Tabela 8 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 10 KGY (esp. 4 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	17	11	10	10	16	14	16	18	15	16	2,94	14,3
S(%)	35	35	34	34	32	36	33	37	33	33	1,54	34,2
B(%)	33	31	34	35	32	32	33	35	33	31	1,44	32,9

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 8° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 2,94° e média 14,3°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 4°, desvio padrão 1,54% e média 34,2%. Foi verificado no parâmetro de brilho 4° de diferença, desvio padrão de 1,44% e média 32,9%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (14,34,33) correspondendo a CMYK (63,80,74,33), RGB (84,62,56) e Pantone 476C digital; caracterizando a coloração fumê intermediário.

Com 25 KGY existe grande diferença de tonalidade entre as amostras de 4 mm e 2 mm. A amostra de 4 mm é pouco translúcida e quando encostada em uma folha branca de papel parece ser preta (Tabela 9). A amostra de 2 mm é fumê escura.

Tabela 9 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 25KGy para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 25 KGy (esp. 4 mm)										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	339	337	336	334	336	330	336	333	331	330	3,11	334,2
S(%)	71	71	76	85	76	81	71	82	78	81	5,07	77,2
B(%)	11	13	13	13	13	15	11	16	15	15	1,71	13,5

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 9° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 3,11° e média 334,2°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 14°, desvio padrão 5,07% e média 77,2%. Foi verificado no parâmetro de brilho 11° de diferença, desvio padrão de 1,71% e média 13,5%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (334,77,13) correspondendo a CMYK (76,89,72,72) e RGB (33,8,19); caracterizando a coloração fumê intenso. Por não obter correspondência cromática na escala Pantone foi atribuído, pelo Photoshop®, a identidade Pantone Black C digital. A partir deste resultado nota-se dificuldade em caracterizar a cor por este método, pois as tonalidades são demasiadamente escuras.

Com 50 KGY a amostra de 2 mm tornou-se muitíssima escura, permanecendo preta quando encostada no papel branco, semelhante a amostra de 4 mm com dose de 25KGy. A amostra de 4 mm permaneceu preta. Ambas são de difícil observação da transparência. (Para observar a transparência da amostra sobrepõe-se a gema em um texto impresso, na cor preta CMYK(0,0,0,100), em papel branco).

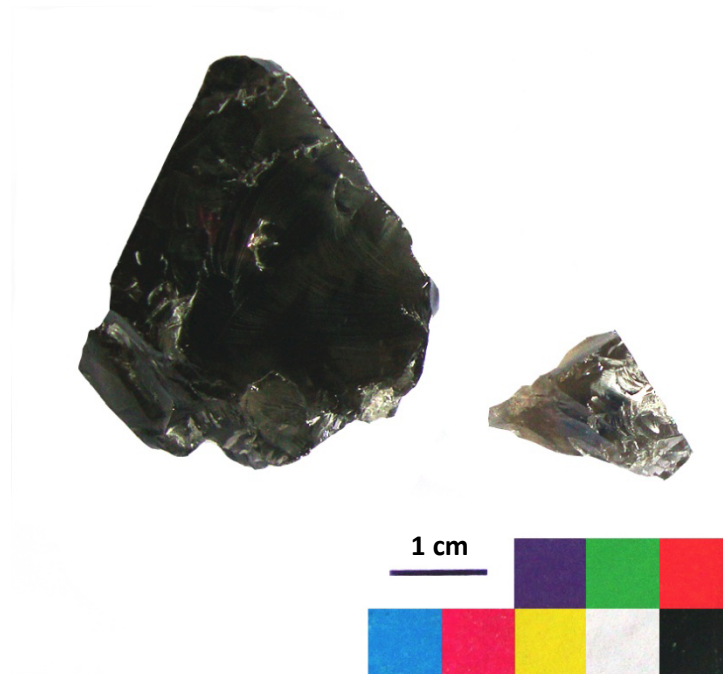
Com 100 KGY e 200 KGY - Tanto a amostra com espessura de 4 mm quanto a de 2 mm expõem a cor preta e opaca. Ressalta-se que a amostra de 1 mm com dose aplicada de 100 KGY permanece com difícil observação da transparência.

O matiz fumê gerado nas amostras de Pedra Lavrada, Pb é semelhante ao matiz de Águas Vermelhas, MG, por serem matizes quentes ou avermelhados (verificado pelo sistema HSB quando foi realizada a seleção de pontos de cor na imagem da gema). Estes matizes são diferentes dos gerados no vidro sodo-cálcico anteriormente expostos – diferença notada principalmente nas baixas dosagens. No vidro, os matizes tendem ao amarelo e até a alta dose estudada de 200 KGY mantém a transparência. Nesta pesquisa não são aprofundadas informações sobre a coloração

obtida no vidro pela irradiação, pois o vidro pode ser facilmente colorido por outras técnicas, tornando-se um material auxiliar, isso é, são “amostras-controle”.

Até o presente momento deste trabalho não foram encontradas pesquisas que relacionam doses de irradiação gama com diferentes espessuras de gemas, sendo um importante dado para a área de design de gemas e joias e produtos gemológicos. Conforme o desejo de atingir determinada tonalidade de cor é necessário relacionar a dose com a espessura do material gemológico, principalmente em relação ao design autoral/contemporâneo que propõe proporções diferenciadas, ou seja, livre criação (Figura 48).

Figura 48 – Amostras brutas de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, com diferentes dimensões, irradiadas com apenas 3 KGy (irradiação homogênea).



Fonte: Autor.

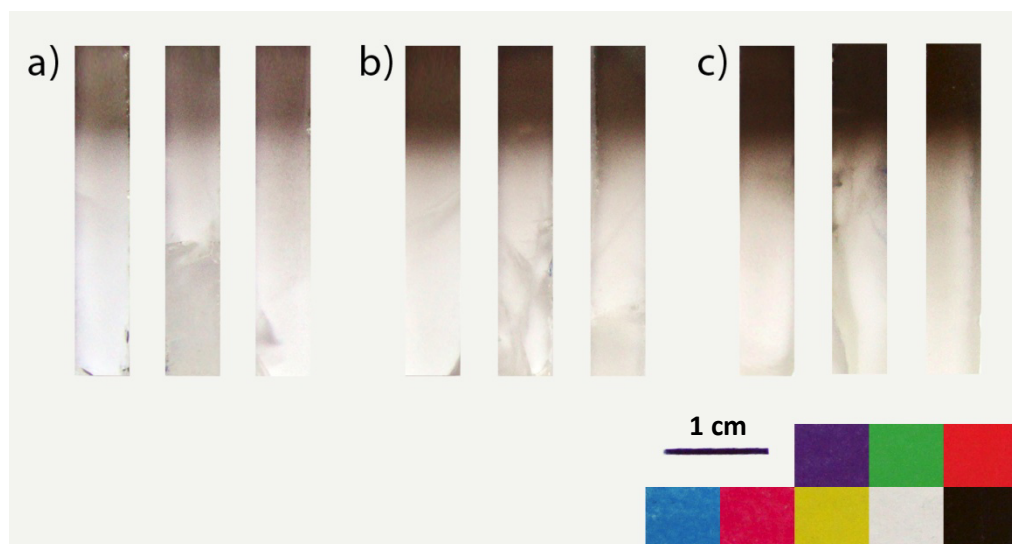
Para efeitos de comparação das amostras de quartzo irradiadas seletivamente foi padronizada a distância de 30 cm das amostras até a fonte, permanecendo as amostras de chumbo na frente conforme suas espessuras. A distância de 30 cm do experimento até a fonte é favorável ao controle da dosagem, pois se o operador deixar passar o tempo de irradiação não acarretará em significativa alteração de tonalidade no material, caso o experimento fosse colado na fonte isto seria um problema. Além disso, a distância escolhida convém com a possibilidade de usar outros materiais (com espessura maior) ao invés de usar o chumbo.

Em sequência, são mostrados e descritos os principais resultados da Irradiação gama seletiva no quartzo rosa pálido de Pedra Lavrada, PB (Figura. 49 a 53), constituindo testes básicos necessários para a área de design de gemas e joias. As imagens dos resultados negativos foram omitidas. Estas irradiações foram nomeadas de “a” a “l” e organizadas conforme o alfabeto (essas letras estão em sequência nas imagens abaixo).

Resultados das variações de doses (consequentemente dos tempos de irradiação):

- a) 5 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 20 cm de chumbo, altura 43 cm, 2h35min (Figura 49a);
- b) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 20 cm de chumbo, altura 43 cm, 5h11min (Figura 49b).
- c) 15 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 20 cm de chumbo, altura 43 cm, 7h47min (Figura 49c).

Figura 49 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo-rosa pálido de Pedra Lavrada, PB. Amostras com com 4 mm de espessura, polidas e irradiadas com diferentes doses: a) 5KGy com atenuação de 20 cm de chumbo, b) 10KGy com atenuação de 20 cm de chumbo e c) 15KGy com atenuação de 20 cm de chumbo.



Fonte: Autor.

Dentre as doses de 5, 10 e 15 KGy utilizadas na irradiação seletiva (Figura 49) indica-se a dose de 10KGy, para a espessura de aproximadamente 4 mm de quartzo estudado, por manter boa tonalidade de cor. Lembra-se que a padronização das

espessuras é imprescindível para a resposta cromática. Tendo em vista as infinitas possibilidades de uso da irradiação gama seletiva e o gosto pessoal do projetista, não são gerados parâmetros definitivos e restrições, mas apenas algumas indicações.

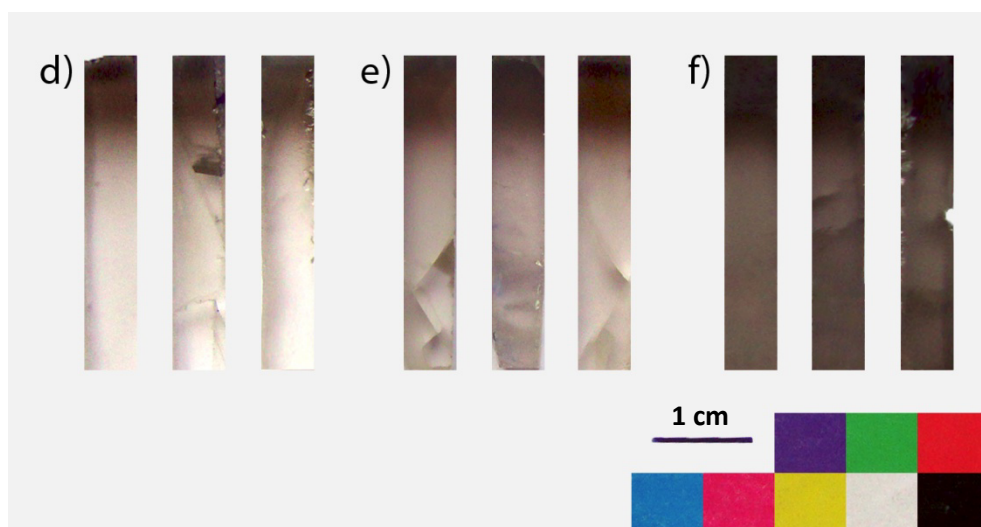
Resultados das variações das espessuras das placas de chumbo:

d) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura 43 cm, 5h11min (Figura. 50d).

e) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 5 cm de chumbo, altura 43 cm, 5h11min (Figura 50e).

f) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 3 cm de chumbo, altura 43 cm, 5h11min (Figura 50f).

Figura 50 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo-rosa pálido de Pedra Lavrada, PB. Amostras com 4 mm de espessura, polidas e irradiadas com diferentes atenuações: d) 10KGy com atenuação de 10 cm de chumbo, e) 10KGy com atenuação de 5 cm de chumbo e f) 10KGy com atenuação de 3 cm de chumbo. Escala da barra 1 cm.



Fonte: Autor.

Nos experimentos de irradiação seletiva houve forte atenuação da irradiação gama promovida pelo chumbo (Figura 50), resultando em amostras com alto contraste de cor, sendo um recurso de grande valia para o Design. Com relação a espessura de atenuação indica-se a espessura de 10 cm e espessuras menores que 10 cm, levando em consideração que espessuras menores resultarão em menor contraste, colorindo toda a amostra. A relação de 10 KGy com 3 cm de atenuação apresentou baixíssimo contraste o qual pode ser interessante a alguns projetos, já a

relação de 10 KGy com 5 cm de atenuação apresentou baixo contraste (Tabela 10 e 11). Não foi notada alteração de cor nas amostras de quartzo (parte blindada) que utilizaram as espessuras de atenuação de 20 cm (Figura 49) e 10 cm de chumbo (Figura 50), apresentando alto contraste da parte irradiada em relação a parte blindada.

Tabela 10 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polida, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 3 cm de chumbo para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 10 KGy (esp. 4 mm) ATENUAÇÃO 3 cm CHUMBO										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	26	25	22	26	25	22	21	22	26	25	2	24
S(%)	31	30	31	29	29	31	29	30	30	30	0,81	30
B(%)	43	43	44	43	44	44	42	45	45	44	0,94	43,7

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 5° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 2° e média 24°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 2°, desvio padrão 0,81% e média 30%. Foi verificado no parâmetro de brilho 3° de diferença, desvio padrão de 0,94% e média 43,7%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (24,30,44) correspondendo a CMYK (61,67,69,14), RGB (112,92,79) e Pantone 7533C digital; caracterizando a coloração fumê escuro.

Tabela 11 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polida, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 5 cm de chumbo para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 10 KGy (esp. 4 mm) ATENUAÇÃO 5 cm CHUMBO										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	20	21	29	25	17	20	22	24	22	25	3,37	22,5
S(%)	20	15	18	18	13	17	18	15	14	21	2,60	16,9
B(%)	76	72	70	71	73	75	75	76	76	74	2,20	73,8

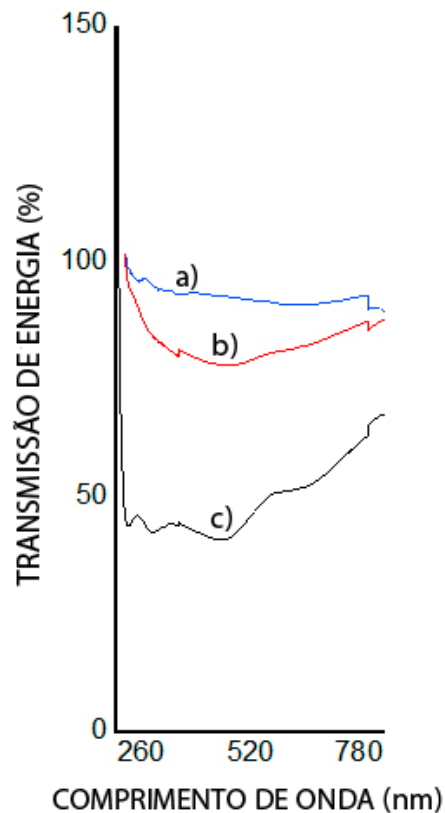
Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 12° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 3,37° e média 22,5°. No parâmetro de

saturação foi obtida a diferença de 8°, desvio padrão 2,60% e média 16,9%. Foi verificado no parâmetro de brilho 6° de diferença, desvio padrão de 2,20% e média 73,8%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (22,17,74) correspondendo a CMYK (32,35,37,0), RGB (189,168,157) e Pantone 7529C digital; caracterizando a coloração fumê claro.

Essa diferença de tonalidade verificada no sistema HSB (áreas atenuadas) pode ser constatada por espectro de transmissão no equipamento de UV-Vis (Figura 51).

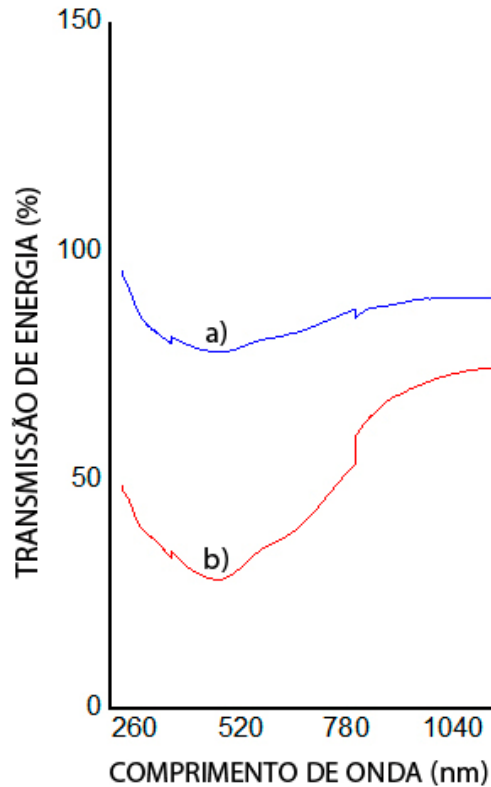
Figura 51 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama seletiva. a) não irradiada, b) amostra com atenuação de 5 cm de chumbo na dose de 10 KGy e c) amostra atenuada com 3 cm de chumbo na dose de 10 KGy.



Fonte: Autor.

A diferença da bicoloração na mesma amostra pode ser analisada pelo equipamento de UV-Vis (Figura 52).

Figura 52 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama seletiva (amostra bicolor). a) 10KGy com 5 cm de chumbo e b) 10KGy sem blindagem.



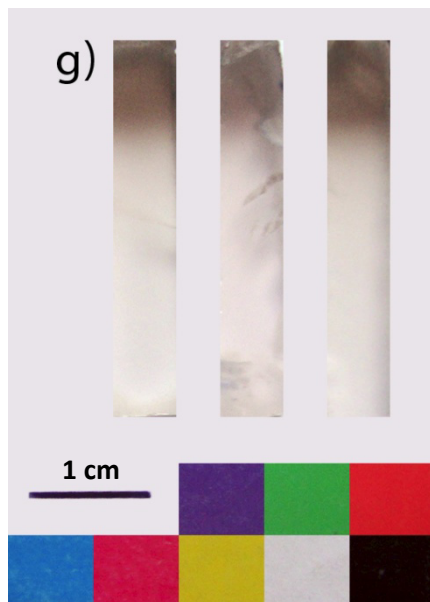
Fonte: Autor.

Resultados das variações das alturas das amostras em relação à fonte:

g) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura 57,5, 5h11min (Figura 53).

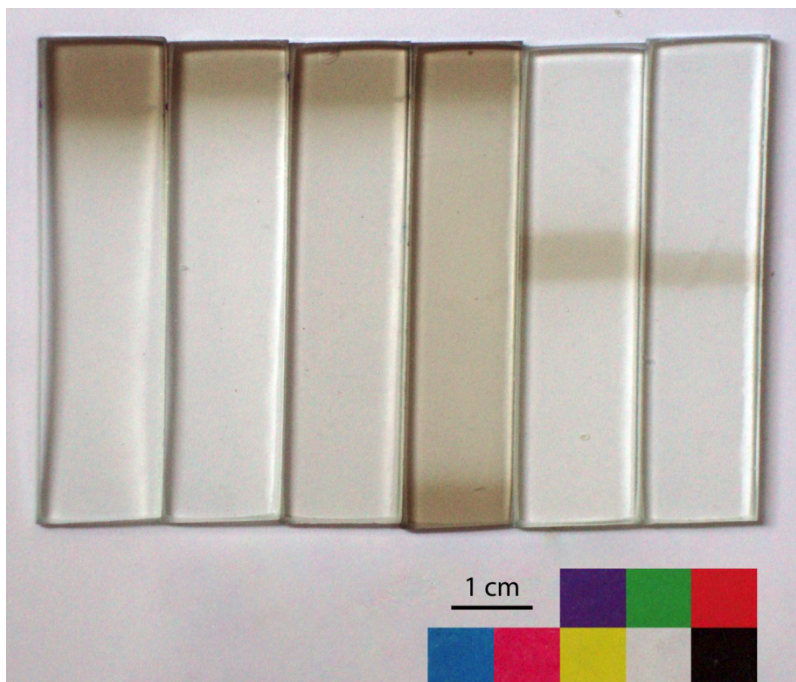
Apenas foi notada nas Figuras 49 e 50, nos experimentos com aproximadamente 14 cm a baixo do centro da fonte (57,5 cm), uma área extra de cor de aproximadamente 3 mm em degradê logo abaixo da zona da névoa (degradê entre a parte irradiada e a parte não irradiada). Quando o experimento é deslocado para baixo do centro da fonte, os raios incidem em ângulo, mas o efeito nas amostras é de difícil mensuração. As amostras-controle de vidro foram também úteis nesta comparação (Figura 54).

Figura 53 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, PB. Amostras com 4 mm de espessura, polidas e irradiadas com 10KGy, atenuação com 10 cm de chumbo e altura de 57,5 cm do piso. Escala da barra 1 cm.



Fonte: Autor.

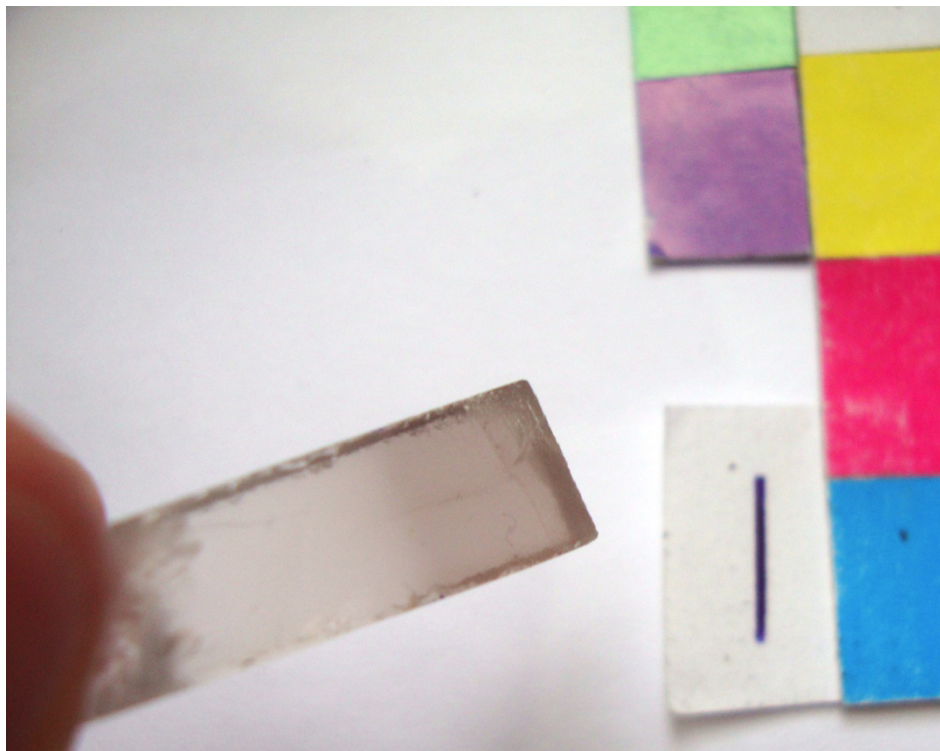
Figura 54 – Amostras de vidro sodo-cálcico utilizadas junto aos experimentos de irradiação gama seletiva (amostras controle).



Fonte: Autor.

Foram observadas as passagens de cor das áreas expostas para as áreas atenuadas em todos os experimentos de irradiação seletiva, todos eles apresentaram a névoa característica da radiação espalhada (efeito Compton), não sendo uma passagem totalmente abrupta ao longo da mancha de cor. No entanto, não é perdida a qualidade visual desejada, pois o efeito é mínimo em relação à simplicidade do arranjo experimental – ressalta-se que nas imagens apresentadas neste texto a passagem da cor aparenta ser mais suave (Figura 55). Este efeito natural é alterado em exames de raios X o qual possui uma grade de chumbo (denominada grade antidifusora) colocada entre o paciente e o filme, esta grade permanece em movimento (vai e vem) retardando esse efeito ao absorver os fótons espalhados em uma determinada distância focal, conforme Tilly Junior (2010). Esses resultados alcançados corresponderam a expectativa gerada na pesquisa do Wu *et al.* (1990), embora os autores utilizam outras configurações experimentais.

Figura 55 – Detalhe de uma amostra de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, PB irradiada seletivamente. Irradiada com 10 KGy e blindagem de chumbo de 10 cm.



Fonte: Autor.

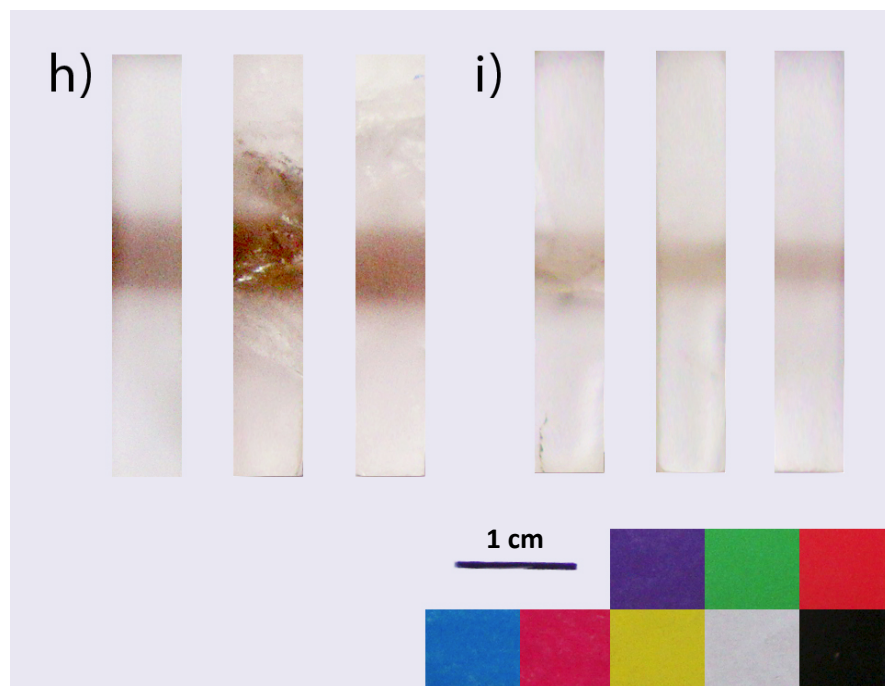
Resultados das variações de frestas entre as placas de chumbo:

h) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura aprox. 57,5, fresta 5 mm, 5h12min (Figura 56).

i) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura aprox. 57,5, fresta 3 mm, 5h12min (Figura 56).

j) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura aprox. 57,5, fresta 1 mm, 5h12min.

Figura 56 – Resultados (detalhes) das irradiações seletivas no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, PB. Amostras com 4 mm de espessura, polidas e irradiadas com diferentes espaçamentos de frestas: h) 10KGy, atenuação de 10 cm de chumbo e 5 mm de espaçamento de fresta e i) 10KGy, atenuação de 10 cm de chumbo e 3 mm de espaçamento de fresta. Escala da barra 1 cm.



Fonte: Autor.

As irradiações em fresta apresentaram redução na intensidade da cor conforme a diminuição da fresta, uma vez que com 1 mm de fresta não se pôde observar coloração resultante, experimento “j”. Deste modo, conseguiu-se uma mancha de cor de 3 mm, no entanto, a coloração é visivelmente mais clara que a dose aplicada e também em relação a fresta de 5 mm (Tabela 12 e 13). No entanto, pode ter ocorrido desalinhamento horizontal do experimento à fonte ou pode ser necessário aumentar a dose, pois os fótons divergentes podem ter sido muito atenuados nas paredes espessas da fresta de chumbo.

Tabela 12 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polidas, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 10 cm de chumbo e fresta de 5 mm para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 10 KGy (esp. 4 mm) FRESTA 5 mm										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	27	22	25	24	23	24	23	18	20	21	2,60	23,1
S(%)	69	63	61	49	47	60	48	65	65	61	7,05	57,8
B(%)	60	63	60	64	65	59	64	65	65	60	2,46	62,5

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 9° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 2,60° e média 23,1°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 22°, desvio padrão 7,05% e média 57,8%. Foi verificado no parâmetro de brilho 6° de diferença, desvio padrão de 2,46% e média 62,5%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (23,58,62) correspondendo a CMYK (43,69,80,6), RGB (158,102,66) e Pantone 4635C digital; caracterizando a coloração fumê claro.

Tabela 13 – Variação dos padrões H(°), S(%) e B(%) na amostra de quartzo rosa de Pedra Lavrada polida, com espessuras 4 mm e irradiada com 10KGy, blindagem de 10 cm de chumbo e fresta de 3 mm para comparação da alteração cromática e determinação da cor pela média.

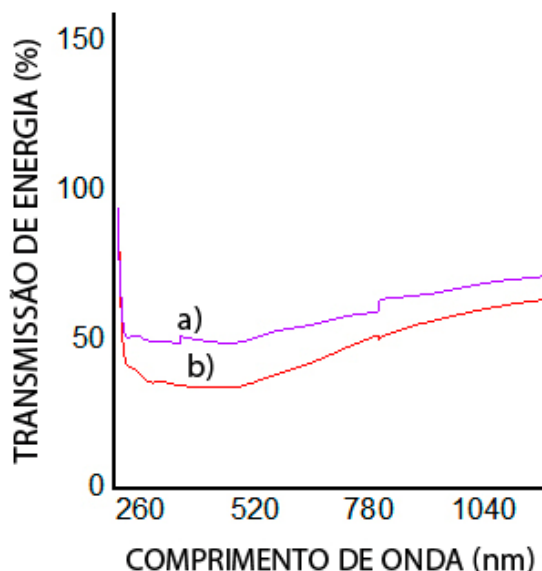
PARÂMETRO	AMOSTRA POLIDA 10 KGy (esp. 4 mm) FRESTA 3 mm										Desvio Padrão	Média
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
H(°)	20	26	24	21	29	26	26	25	26	25	2,61	24,8
S(%)	21	21	21	18	21	24	16	17	24	17	2,86	20
B(%)	78	78	79	79	80	82	78	78	82	78	1,61	79,2

Fonte: Autor.

Com relação a matiz (H), foi encontrada a diferença de 9° (entre os dez pontos coletados), desvio padrão de 2,61° e média 24,8°. No parâmetro de saturação foi obtida a diferença de 8°, desvio padrão 2,86% e média 20%. Foi verificado no parâmetro de brilho 4° de diferença, desvio padrão de 1,61% e média 79,2%. A média dos parâmetros HSB resultou na cor HSB (25,20,79) correspondendo a CMYK (26,32,36,0), RGB (201,178,161) e Pantone 4745C digital; caracterizando a coloração fumê claríssimo.

Essa diferença de tonalidade verificada no sistema HSB pode ser constatada por espectro de transmissão no equipamento de UV-Vis (Figura 57).

Figura 57 – Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama seletiva. a) coloração obtida a partir da fresta de 3 mm e b) coloração obtida a partir da fresta de 5 mm.



Fonte: Autor.

Resultados das variações de distância entre a placa de chumbo e a amostra:

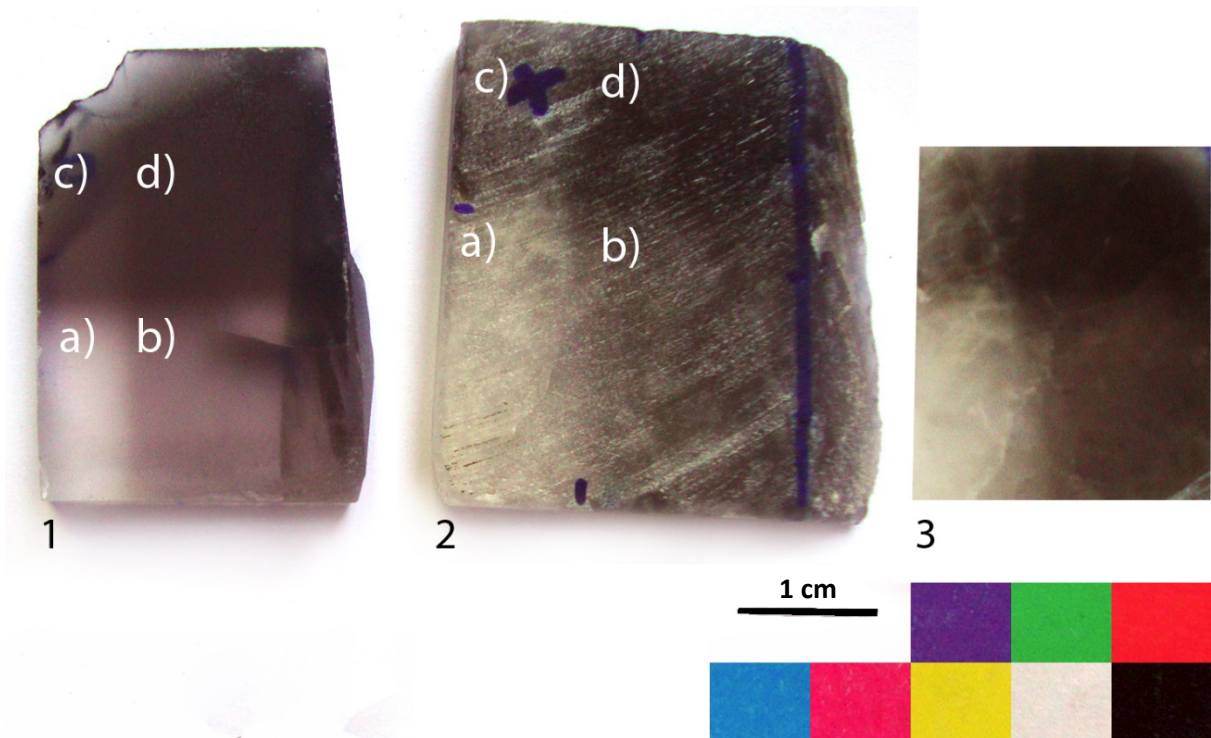
k) 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura 57,5, afastamento do chumbo 6 mm, 5h12min. Afastamento realizado com folha de papel dobrada resultando em um paralelepípedo oco.

O experimento “k”, de afastamento da amostra de quartzo com a amostra de chumbo, teve por principal finalidade a validação do experimento, pois as tiras de papel foram justapostas ao chumbo deixando as amostras de quartzo a microns de distância do chumbo. Como resultado, o afastamento não expôs diferença visível em relação aos outros experimentos com as amostras encostadas, podendo ser utilizada gemas brutas irregulares e outras camadas de proteção no chumbo.

Resultados das variações de sobreposição de doses em diferentes partes das amostras:

l) 5 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura 57,5, 2h37min. Após, giro da amostra de 90°, 10 KGy, a 30cm da fonte, atenuação de 10 cm de chumbo, altura 57,5, 5h13min (Figura 58).

Figura 58 – Resultados das irradiações seletivas com sobreposição de doses no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada (1) e no quartzo rosa de Águas Vermelhas – sem polimento e com polimento, respectivamente (2 e 3). Materiais gemológicos em processo de projeto. Atenuação de 10 cm de chumbo. Doses: a) nula, b) 5KGy, c) 10KGy e d) 15KGy. Irradiação concebida em dois momentos, com giro de 90°.



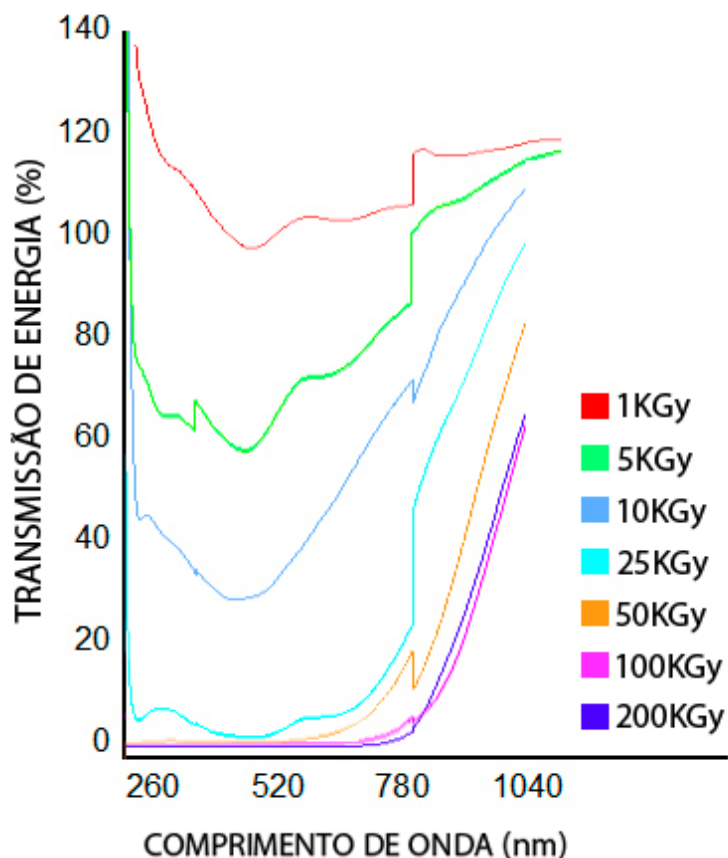
Fonte: Autor.

Segundo Rossman (1994), Nassau (2001) e Lameiras *et al.* (2006), o escurecimento do quartzo é devido as impurezas de alumínio comuns neste material, apesar de ocorrer em teores baixos (80 a 100 ppm). De acordo com este último autor,

O alumínio substitui o silício dentro da rede cristalina do quartzo. Porém, como o silício tem valência 4+ e o alumínio tem valência 3+, essa substituição provoca uma deficiência de carga elétrica. É necessário que um átomo de valência 1+ se encontre nas proximidades de onde se localiza um átomo de alumínio, para neutralizar a carga elétrica. Hidrogênio, lítio e sódio exercem esse papel.

Essas pequenas impurezas permitem a absorção da luz pelo material. Conforme as doses de irradiação gama foram aumentadas, as amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada escureceram bem como as de Águas Vermelhas. O espectro da região visível pôde constatar o fenômeno (Figura 59). Segundo Araújo *et al.* (2001), o quartzo enfumaçado ou fumê possui os menores índices de absorção comparados às outras variedades de cor deste material.

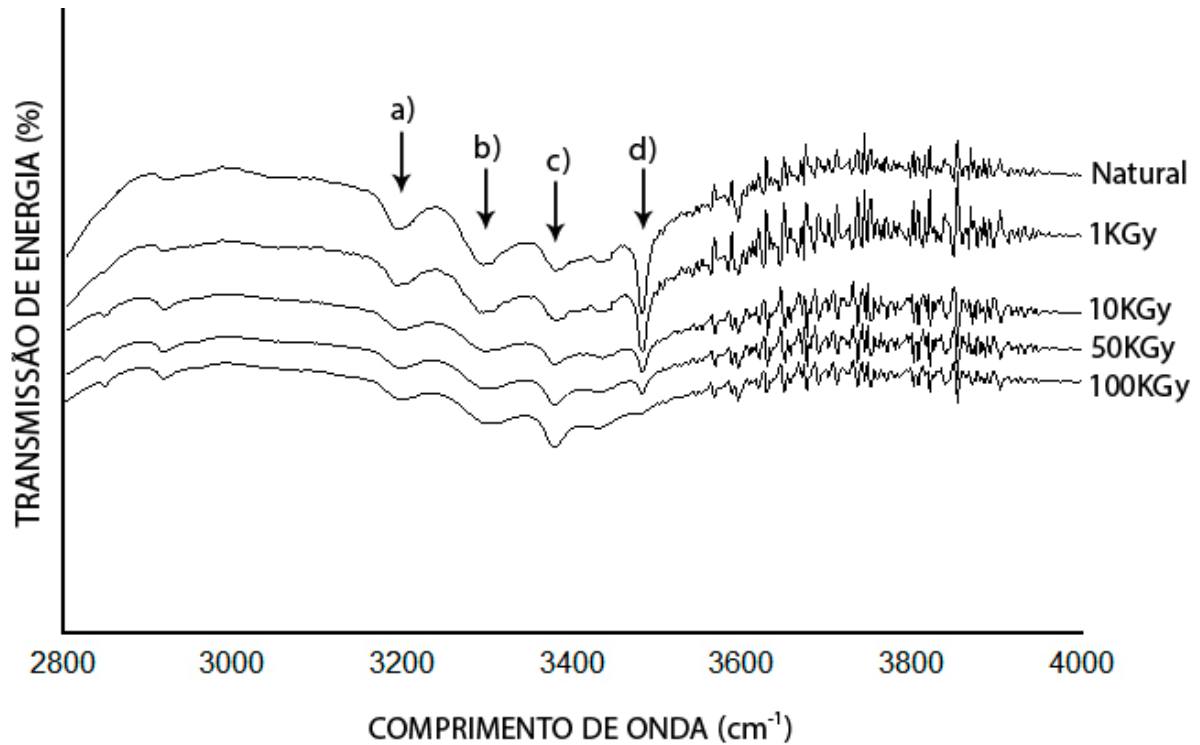
Figura 59— Resultados das análises representativas por espectrofotometria na região visível das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com diferentes doses homogêneas.



Fonte: Autor.

Os espectros de infravermelho das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada (Figura 60) são semelhantes aos apresentados por Barreto *et al.* (2009) e Miranda (2012). As quatro bandas destacadas acima se referem a: a) bandas 3200 cm^{-1} de ligação silício e oxigênio, b) bandas 3300 cm^{-1} de ligação silício e oxigênio, c) bandas 3380 cm^{-1} de ligação do alumínio com oxigênio equilibrado por compensador de carga hidrogênio e d) banda 3483 cm^{-1} da ligação lítio com hidroxila (KATS, 1962; MIRANDA, 2012). Notou-se que conforme aumenta a dose de irradiação, a banda “d” 3483 cm^{-1} diminui ao passo que a banda “c” 3380 cm^{-1} aumenta. Segundo Miranda (2012), trata-se provavelmente da migração de íons de lítio de suas posições originais.

Figura 60 – Espectros da região do infravermelho (FTIR) das amostras de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com irradiação gama em diferentes doses. Quatro bandas foram encontradas, destaca-se a banda “d” (lítio) a qual diminui consideravelmente com a intensidade da irradiação ao passo que a banda “c” (alumínio) aumenta discretamente.



Fonte: Autor.

Houve dificuldade em afirmar os resultados de FT-IR das amostras de quartzo rosa de Águas Vermelhas, por causa dos ruídos gerados nos espectros. Quanto aos resultados de UV-Vis, as fraturas desse material dificultaram a observação dos espectros.

As alterações cromáticas nos materiais irradiados (irradiação seletiva) ocorreram conforme os tempos de exposição (resultados nas doses desejadas), elas correspondem às irradiações homogêneas exibidas anteriormente (Figura 47). Conforme a repetição das doses houve constância nos resultados.

Apesar dos resultados de irradiação gama seletiva serem satisfatórios, o arranjo experimental pode ser aprimorado, como por exemplo, o uso de estêncil atenuador para gemas. A partir dos dados levantados, com o arranjo experimental simplificado, já se pode desenvolver designs no material estudado, entretanto, ainda podem ser realizados estudos de viabilidade com diferentes pontos de vista: econômico, operacional, ecológico, etc.

Trata-se de um processo tecnológico semiautomático, por isso sua operação (processo de produção) das gemas se torna praticamente artesanal – e por limitações de espaço/uso da câmara de irradiação. Este aspecto artesanal é um excelente ponto de partida para projetos autorais, do ponto de vista estético.

O interessante neste arranjo experimental é a possibilidade de padronização/reprodutibilidade dos efeitos nos materiais naturais, diferentemente se for desenvolver gemas bicolores por desbotamento de uma das extremidades com calor/fogo. Entretanto, ainda assim pode-se testar o desbotamento seletivo por UV.

A sobreposição de doses permite corrigir dosagens fracas e realizar *designs* diferenciados, com diversas tonalidades no mesmo material, conforme o desejo do projetista. No experimento “I” conseguiram-se três tonalidades diferenciadas e uma incolor, formando um xadrez (ou cruz) – uma estética dificilmente encontrada na natureza. As manchas de cor (tonalidades) profundas podem ser percebidas ao girar a amostra, exibindo sua tridimensionalidade causada pela irradiação, expondo ainda um importante acabamento.

A partir disso, o material poderá ser beneficiado com outras técnicas, por exemplo, a lapidação diferenciada, gravação superficial, dentre outras. Tendo em vista as infinitas possibilidades de se estudar a irradiação gama homogênea e seletiva em minerais, esta pesquisa foca em alguns experimentos essenciais a fim de contribuir para o design de materiais geológicos.

Esta pesquisa contribui com a noção da irradiação gama homogênea e seletiva para determinadas variedades de quartzo do Brasil, incluindo o conhecimento de doses, distancias, alturas, tempos, espessuras de amostras, atenuação básica e procedimentos para a área do design/arte; em específico no quartzo rosa-pálido (de qualidade gemológica) de Pedra Lavrada.

O estudo da irradiação ionizante em minerais é prioritariamente estudado por físicos, geólogos, engenheiros da área de ciência dos materiais. Sob o ponto de vista do Design ou da Arte, as informações de cor, tonalidade e dose são de fundamental importância para a aplicação na área do Design de joias e produtos gamológicos. A variação de dose é um recurso importante para a estética, pois permite selecionar a melhor tonalidade obtida para posteriores reproduções.

O quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada por ter ótima transparência e poucas fraturas se tornou excelente para esta pesquisa, ao contrário do quartzo rosa de Águas Vermelhas e incolores do Rio Grande do Sul, soma-se a isso a necessidade de pouco tempo de irradiação para alteração cromática (em torno de 5h dependendo do estado da fonte) - fato que colaborou para o estudo da irradiação gama seletiva em minerais. Todavia, por ser um material pouco estudado, mais pesquisas devem ser realizadas. Nesta pesquisa não se julga se vale a pena alterar a coloração deste material para a coloração obtida, mas ressalta-se a diferenciação que ele pode apresentar conforme o desejo do projetista.

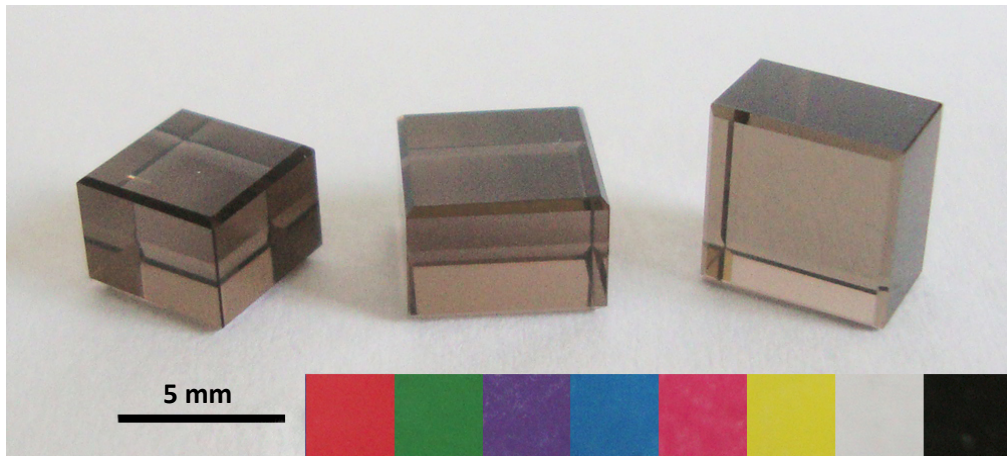
Retoma-se aqui que os dados levantados são importantes para futuras pesquisas sobre "design de superfície" em materiais geológicos, principalmente quanto ao propósito de desenvolver desenhos com tal procedimento, mas para isto é necessário o estudo da usinagem em materiais absorvedores da irradiação, sendo uma pesquisa a parte. Ressalta-se que a usinagem do chumbo pode ser perigosa e com dificuldade para a sua realização (diversos locais se recusam a trabalhar com este metal). Recomenda-se o CDTN para a correta usinagem do chumbo – principalmente com relação ao descarte do material tóxico.

Nesta pesquisa não foi utilizada a irradiação térmica e UV para complemento da irradiação gama nos minerais ou estudo da perda de coloração em relação a determinados tempos. Entretanto, a coloração das amostras irradiadas até o presente momento se mantiveram estáveis. A irradiação térmica em fornos foi evitada por ser uma técnica com complicações operacionais (principalmente para designers ou artistas despreparados); pequenos descuidos podem inutilizar o material, como por exemplo, o aparecimento de trincas e quebras.

Resultados dos testes de lapidação profissional:

O teste de lapidação após a irradiação resultou em amostras (irradiadas com 10KGY) com aproximadamente 6 x 6 x 4 mm e suas cores após esse beneficiamento correspondem a cor desejada definida anteriormente (Figura 61). Portanto, O quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada também pode ser irradiado na forma bruta (com dose baixa de aproximadamente 10KGy) para posteriormente ser lapidado.

Figura 61– Resultados dos testes de lapidação profissional em amostras, com diferentes posicionamentos, de quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada irradiadas com 10 KGy (irradiação gama). Espessura das amostras 4 mm. Escala da barra 5 mm.



Fonte: Autor.

5 DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS: COMPILAÇÃO DOS RESULTADOS

Durante a pesquisa, foram estabelecidas três considerações que devem ser ressaltadas:

- a) Designers que utilizam minerais devem prestar atenção quanto a aquisição dos seus materiais, dando importância aqueles que possuem procedência garantida e legal;
- b) Os minerais utilizados em peças de design, bem como os tratamentos ou beneficiamentos a que eles foram submetidos, devem ser bem estudados para permitir que seja dadas informações corretas aos compradores. Além disso, o próprio designer preferencialmente pode adquirir o material bruto e ele mesmo ou um profissional de confiança tratar/beneficiar os mesmos, o que proporciona um diferencial⁵² na peça gerada;
- c) Recomenda-se a experimentação de várias de técnicas para o beneficiamento ou diferenciação de materiais gemológicos, por exemplo, utilização da irradiação gama e laser CO₂ no mesmo material. Em alguns casos, pode-se chegar a resultados únicos, voltando o processo ao campo das artes (valorizando ainda mais o objeto) ou do artesanato (com poucas reproduções) ou a infinitos *designs* (promovidos pelo design industrial).

O tratamento/beneficiamento para valorização ou diferenciação de materiais gemológicos sob a luz do design é pouco explorado, comparado ao potencial que o Brasil possui de recursos minerais. Estudos da radiação gama em minerais foram encontrados principalmente na área das ciências dos materiais, carecendo de informações sobre o processo industrial, sobre a caracterização da cor para o meio digital e gráfico e sobre

⁵² Além de existir o beneficiamento de materiais gemológicos com a finalidade de valorização ou da região produtora, não se pode esquecer da valorização do autor, que por vezes também beneficia a região de origem do material. Por isso, recomenda-se o uso de identificação, seja estilística ou de identidade visual na promoção das peças e, principalmente, marcas identitárias na própria peça para a valorização do designer ou empresa.

a irradiação seletiva em minerais. Sendo assim, as contribuições desta dissertação são abordadas pela visão do design, uma vez que recursos metodológicos, caracterização da cor, modelo experimental, dentre outros aqui expostos, fornecem dados para a prática projetual do designer de materiais gemológicos e áreas correlatas.

O intuito desta pesquisa é também mostrar para o designer, seja de qualquer especialidade, que busque materiais gemológicos exclusivos ou pouco utilizados para desenvolver produtos diferenciados, mesmo que limite a produção ou necessite de diversos tratamentos e misturas de beneficiamentos para alcançar o resultado esperado. Buscar o material na natureza ou em uma distribuidora ainda no estado bruto permite explorar novas possibilidades de diferenciação do material. Salienta-se que a área de pesquisa/trabalho em materiais pode resultar em caminhos perigosos (uso de materiais tóxicos, equipamentos perigosos, dentre outros), principalmente para profissionais de determinadas especificidades do design.

Ressalta-se que basicamente três questões devem ser observadas para o desenvolvimento de design de gemas: 1) O desenho; 2) O material gemológico e 3) A tecnologia que concretizará o projeto. Por isso existe a necessidade de estudo e seleção dos melhores parâmetros para a reprodução da ideia. Em resumo, através da interação de tecnologias e dos materiais gemológicos eles podem: fundir, desbotar, alterar ou intensificar a cor, riscar, alterar a “rugosidade” da superfície, refletir, etc. Essas modificações em contraste é que possibilitam o design de superfície, por exemplo, a bicoloração. Todavia, nem todos os tratamentos ou beneficiamentos de gemas possibilitam a produção de grafismos. Geralmente os grafismos são superficiais, mas, por exemplo, com a irradiação gama seletiva em gemas, isso seria difícil devido a alta penetrabilidade dos raios. No entanto, pode-se considerá-la como design de superfície, pois o objeto (material gemológico) pode ser interpretado como a própria superfície.

Para o estudo ou desenvolvimento de *designs* em materiais gemológicos podem ser indicadas algumas diretrizes tanto para a irradiação gama homogênea quanto para a irradiação gama seletiva (Quadros 10 e 11):

Quadro 10 – Diretrizes básicas para a irradiação de minerais.

PESQUISA	Consultar a literatura ou profissionais de irradiação gemológica para determinar a dose inicial de irradiação, o tipo de fonte e a empresa de irradiação que será utilizada.
	Consultar a atividade da fonte de irradiação a ser utilizada, para tomar conhecimento dos tempos de irradiação que podem ser necessários.
SELEÇÃO DE MATERIAIS	Selecionar amostras com conhecimento de sua origem (local ou regional).
PADRONIZAÇÃO	Amostras podem ser fragmentos de geodos, minerais bicolors, fatias de minerais com diferentes espessuras e possuir diferentes polimentos nas superfícies. Amostras com 2 a 4 mm de espessura (altura) e com o mínimo de 5 mm de largura e 5 mm de profundidade, podem ser suficientes para o estudo da cor resultante.
	Utilizar embalagens adequadas e lacradas.
	Identificar nas embalagens o material, origem, dose, data da exposição, peso, outro tipo de tratamento se houver, proprietário e código de controle fornecido pela empresa de irradiação.
REALIZAÇÃO	Amostras de testes podem ser enviadas por correio (dentro do Brasil), mas devem ser comunicadas antecipadamente e retiradas pessoalmente.
	Realizar o pagamento.
VERIFICAÇÃO	Fotografar as amostras antes e depois da irradiação, com legenda de cor e escala. Para isso utilizar preferencialmente amostras gemológicas com espessuras padronizadas.
	Realizar medições de radiação no material irradiado, por segurança.
	Estudar a estabilidade da cor por irradiação solar, térmica ou UV, através da exposição dos materiais a estas radiações até o desbotamento total da amostra.
FINALIZAÇÃO	Realizar o acabamento no material (lapidação diferenciada, polimento, etc.).

Fonte: Autor.

Quadro 11 – Diretrizes básicas para a irradiação seletiva de minerais.

IRRADIAÇÃO HOMOGÊNEA	Escolher materiais a partir de testes de irradiação homogênea.
	Preferir materiais sensíveis à irradiação gama com baixas doses (ver página 104).
	Utilizar as diretrizes básicas da irradiação de minerais (irradiação homogênea, ver página 145).
PADRONIZAÇÃO	Preparar os materiais a serem irradiados preferencialmente por fatiamento, ou desgastar materiais martelados deixando-os planos e paralelos em duas faces opostas – para melhor visualização do resultado.
IRRADIAÇÃO SELETIVA	Selecionar material atenuador da irradiação que possua alta densidade (consultar materiais já testados).
	Estimar a espessura do material atenuador.
	Posicionar os materiais alinhando-os na fonte.
	Realizar testes de contraste com diferentes espessuras de material atenuador e doses ou utilizar dados existentes na literatura.
	Planejar a área que será protegida com a blindagem, verificar volume e peso total do mineral com a blindagem para ocupar a câmara de irradiação.
	Pode-se realizar a sobreposição de doses para efeitos diferenciados.
FINALIZAÇÃO	Ao final, realizar o acabamento no material (lapidação diferenciada, polimento, etc.).

Fonte: Autor.

O quartzo de Pedra Lavrada (PB) que foi selecionado, é de excelente qualidade gemológica, possuindo tonalidade rosa pálido, poucas fraturas, iridescência em alguns pontos, fraturas conchoidais e é quase incolor em fatias com 4 mm de espessura. Ao ser irradiado com raios gama, esse material não intensifica a cor rosa, mas são geradas tonalidades fumês ao preto. Essas tonalidades resultantes são obtidas com a variação de doses e de diferentes espessuras do material. No Quadro 12 abaixo, mostram-se os códigos de cores gerados pelo sistema HSB e

correspondentes CMYK, RGB e Pantone digital, que se sugere sejam utilizados no projeto de gemas, principalmente em relação ao design de superfície (através do contraste de tonalidades).

Quadro 12 – Compilação dos resultados do sistema HSB sobre as diferentes doses de irradiação gama no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada. Dose ideal de 10 KGy marcada em cinza.

QUARTZO ROSA-PÁLIDO DE PEDRA LAVRADA – ESPESSURA 4 mm						
DOSE (KGy)	SISTEMA HSB	MÉDIA DO DESVIO PADRÃO (SISTEMA HSB)	CORRESPONDENTES			COR
			SISTEMA CMYK	SISTEMA RGB	PANTONE DIGITAL	
1	(351,4,85)	2,44	(16,20,16,0)	(217,208,209)	5245C	Fumê claríssimo
5	(340,8,70)	4,11	(33,36,28,0)	(179,164,169)	436C	Fumê claro
10	(14,34,33)	1,97	(63,80,74,33)	(84,62,56)	476C	Fumê
25	(334,77,13)	3,29	(76,89,72,72)	(33,8,19)	-	Fumê intenso
50	-	-	-	-	-	Preto
100	-	-	-	-	-	Preto
200	-	-	-	-	-	Preto

Fonte: Autor.

Por fim, são listados os principais parâmetros de irradiação gama seletiva para o quartzo de Pedra Lavrada, que podem também ser utilizados no quartzo rosa de Águas Vermelhas.

- a) Dose de 10 KGy para espessura de 4 mm das fatias de quartzo (pode ser lapidado posteriormente);
- b) Placa de chumbo para atenuação da irradiação com 10 cm de espessura, para obtenção de alto contraste da bicoloração (por exemplo, parte da amostra incolor e outra parte fumê); com espessuras menores (por exemplo, 3 cm), obtem-se parte da amostra fumê claro e outra parte fumê.
- c) Amostras irradiadas com 30 cm de distância da fonte e com altura do chão de 57,5 cm, geraram um bom acabamento, com linha divisória que delimita a

bicoloração bem nítida e visível. Essa altura se deve ao alinhamento dos experimentos com o ^{60}Co do irradiador.

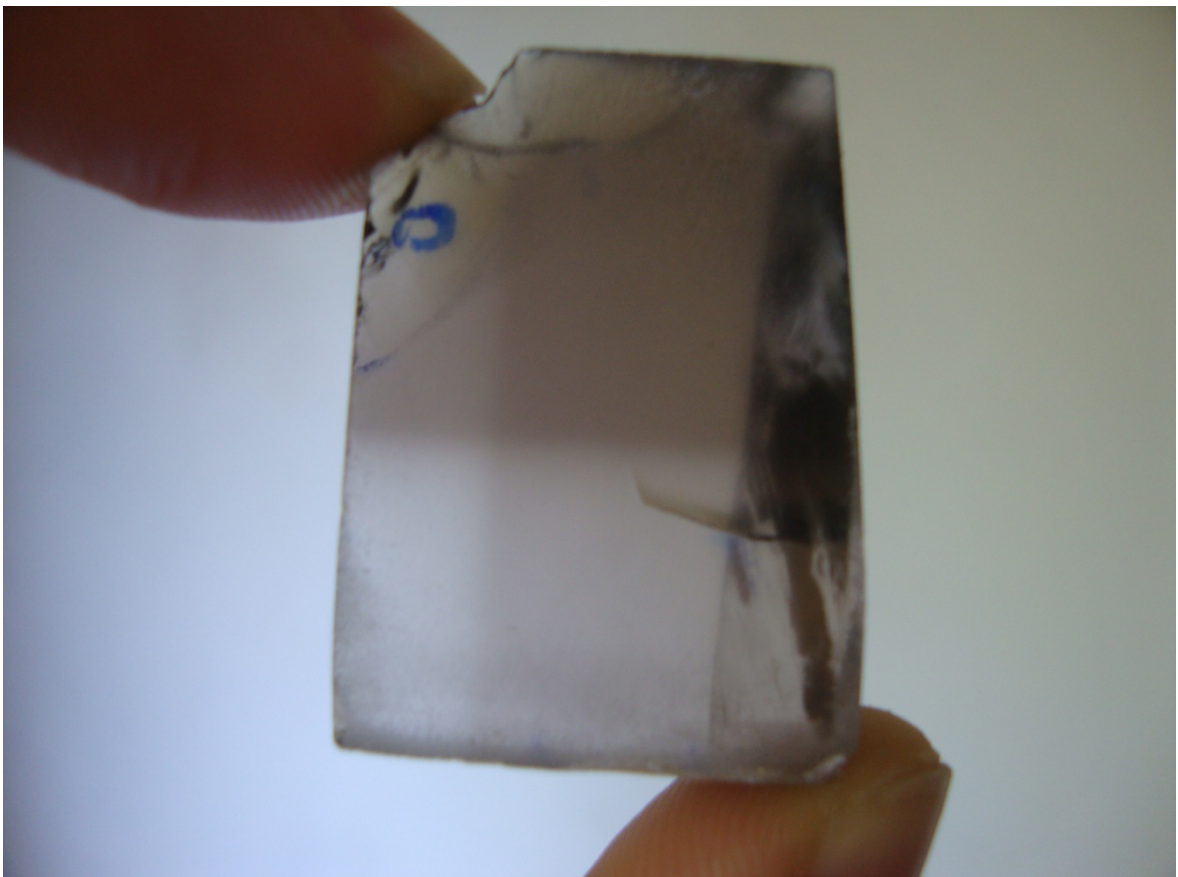
d) Os tempos de irradiação para as doses de 5 KGy, 10 KGy e 15 KGy foram respectivamente de 2h35min, 5h11min. e 7h47min. (atividade da fonte 33398,34 TBq);

e) Fresta entre as placas de chumbo superior a 3 mm de abertura. Abertura máxima de 24 mm para amostras com 30 mm de comprimento;

f) As amostras não necessitam ficar encostadas na blindagem, podendo-se usar uma fita adesiva dupla-face para evitar o contato do chumbo com as amostras. Amostras podem possuir superfície irregular;

g) Doses de 10 KGy e 5 KGy para sobreposições de doses, utilizando-se como atenuação placas de chumbo de 10 cm de espessura ou outras combinações de doses e espessuras de blindagem (Figura 62).

Figura 62 – Gema “xadrez”. Irradiação seletiva com sobreposição de doses no quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, resultando em um xadrez de retângulos (ou cruz) com diferentes tonalidades. Visualização da gema com transmissão da luz. A irradiação foi feita em dois momentos, com um giro de 90° da amostra, gerando uma gema com um novo design.



Fonte: Autor.

6 FINALIZAÇÃO

6.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS: DESIGN DE MATERIAIS GEMOLÓGICOS

Sabe-se que o designer poderia ser o profissional encarregado por somente gerar desenhos, esboços e informações de novos ou reformulados conceitos, aliando estética e/ou usabilidade, ou seja, conceber forma (pictórica ou tridimensional) e/ou função. Entretanto, o profissional necessita adentrar nas áreas da física, química, engenharia, dentre outras para a prática projetual, necessitando “por a mão na massa” e transformando a imaginação em realidade. Neste sentido, dentre as diversas especialidades do design, trabalhar com materiais é importante – design de materiais gemológicos, pois ao alterar o material inova-se o produto, seja pela cor ou outra propriedade óptica, por exemplo. O material desenvolvido ou beneficiado nunca será algo finalizado, pois se trata ainda de matéria-prima para produtos de design, ou seja, o design de materiais pode ser pensado como o design do design, pois o material certamente será modificado por outros designers. Por isso, o material aqui é mostrado inacabado.

Por mais estranho que pareça o resultado de um beneficiamento ou desenvolvimento de material há sempre uma sugestão inesperada por parte de outros olhares, por isso o “tudo vale” com ponderação é bem vindo. Para o designer ou artista sempre existirá uma maneira de reaproveitar um produto, um processo e até uma cor fora de moda. Portanto, os dados aqui apresentados são relevantes como base para o desenvolvimento de outros trabalhos, instigando o design autoral gemológico e o design de superfície gemológico, principalmente em se tratando da possibilidade da mistura de técnicas de beneficiamento ou comparação com outras possibilidades semelhantes, talvez outras mais viáveis, ecológicas, etc.

Embora a irradiação gama homogênea gemológica seja compreendida como tratamento, a irradiação gama seletiva gemológica pode ser compreendida como beneficiamento, quando sua intenção não é tratar, mas diferenciar o material. No entanto, ressalta-se que dependendo da gema e da sua ornamentação, ela pode ser desvalorizada, pois em alguns casos uma gema com cor homogênea valerá muito mais que outra bicolor.

Considera-se pertinente o estudo de design de materiais gemológicos ou gemas, pois essa área é pouco abordada e necessita de estímulos para a inovação.

6.2 CONCLUSÕES

Esta pesquisa contribui com a noção da irradiação gama homogênea e seletiva para determinadas variedades de quartzo do Brasil, incluindo o conhecimento de doses, distâncias, alturas, tempos, espessuras de amostras, atenuações e procedimentos para a área do design/arte.

Os resultados obtidos nesta pesquisa podem ser voltados para a diferenciação dos materiais quartzo rosa de Águas Vermelhas e quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada, pois a valorização pode ser contestada no mercado de joias. Para determinar a valorização seriam necessários outros estudos.

O material gemológico quartzo rosa-pálido foi de suma importância para este estudo, por causa da transparência, pouca fratura, sensibilidade à irradiação e estabilidade cromática mínima após a irradiação. Este material não altera a cor após passar por procedimentos de lapidação profissional, podendo ser irradiado em estado bruto para posterior lapidação (dose de 10 KGy para 4 mm de espessura de amostra). Indica-se este material para os diversos tipos de tratamentos/beneficiamentos existentes e recombinações. Não foram notadas diferenças de coloração quanto ao não alinhamento do eixo cristalográfico desse quartzo. As amostras de vidro sodo-cálcico foram importantes para comparação visual entre as amostras de quartzo, considerando-as como amostras-controle (pois nelas não há fraturas ou orientação cristalográfica).

A utilização do sistema de caracterização de cor por determinação do matiz, saturação e brilho (HSB) por fotografia e meio digital foi utilizado de modo experimental, resultando em um método auxiliar acessível que afasta a subjetividade na determinação das cores das gemas. Para isso foi necessária a padronização das espessuras e das superfícies das amostras relacionando-as com as doses de irradiação, além de legenda de cores utilizada no momento da captura das imagens. Para a avaliação das cores obtidas pelo tratamento de irradiação gama, principalmente a cor fumê (enfumaçada) que é intensificada rapidamente, recomenda-se a diversificação de espessuras das amostras, pois há notável diferença de tonalidade entre as amostras (com diferentes espessuras) com a mesma dose. Com cerca de 2 mm de diferença de espessura pode-se notar alteração de tonalidade nas amostras irradiadas. Essa seria uma maneira de padronizar a dose de irradiação (conforme a tonalidade desejada) sem a necessidade de realizar tratamento térmico posterior para atenuar a cor. A caracterização cromática por sistema HSB resultou em dados úteis (códigos virtuais de cores), por exemplo, para o desenvolvimento de futuras simulações virtuais ou projetos de designs de gemas bicolores. Foi

possível atrelar aos resultados das irradiações outros códigos de sistemas de cores no *software* Photoshop®, como por exemplo, RGB, CMYK e Pantone® digital em grande parte dos experimentos. Através deste sistema pôde-se notar que a cor fumê gerada pela irradiação gama no quartzo rosa tende ao matiz vermelho, expondo tonalidades castanhas e não cinzas.

Apesar do tratamento gemológico por irradiação gama ser um procedimento antigo, constata-se que ainda é utilizado e pesquisado, principalmente no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN e na empresa CBE-Embrarad, ambos sediados no Brasil. Este procedimento é acessível a qualquer interessado tanto para pesquisa quanto para o comércio, seguindo algumas diretrizes. O CDTN recebe de pequenas quantidades de material para ser irradiado até grandes quantidades (máximo de 25 kg por pacote irradiado e mínimo de R\$20,00 por pacote irradiado). O uso da irradiação seletiva (com materiais atenuadores) requer disponibilidade da câmara.

A questão da irradiação gemológica é um paradoxo, visto que embora o resultado seja entendido como natural pelo comércio, foi modificado pela tecnologia – e conforme for utilizada a irradiação seletiva o resultado pode ser uma estética não convencional. Como a irradiação gama seletiva alterará ainda mais a estética do material gemológico, sugere-se o resultado, em pequena quantidade, como design autoral, ou seja, objeto de coleção e objeto de arte por ser um processo trabalhoso. Esse é um procedimento de longa duração, necessitando de ajustes de espaço conforme a disponibilidade da câmara de irradiação (o que influencia o tempo de irradiação) e ajustes de tempo conforme a atividade (decaimento) da fonte.

Para os experimentos de irradiação gama seletiva foram necessários estudos metodológicos e práticos resultando em algumas diretrizes básicas. A irradiação gama homogênea foi necessária nesta pesquisa para estimativa de doses e comparações cromáticas com as irradiações seletivas. Por isso, recomenda-se que se faça para cada material (de mesma origem geológica) testes com doses homogêneas variadas. Para poder indicar um material para a irradiação gama seletiva, o material deve ser sensível à alteração cromática para gerar contraste de cor ou tonalidade, além disso, o material deve apresentar homogeneidade da cor resultante (não apresentar bicoloração ou mancha de cor natural após a irradiação homogênea) e preferencialmente a sua dose (para alteração cromática desejada) deve ser mínima possível para facilitar a atenuação dos raios gama. Quanto mais “sensível” é o material para a alteração de cor menor

é o tempo de irradiação e a dose utilizada, colaborando para a diferença resultante entre a dose mínima de alteração cromática e a dose máxima necessárias na determinação da espessura de atenuação – material puro é difícil obter coloração. Como já esperado, não foi notada ativação de radioatividade nos materiais experimentados desta pesquisa.

Tendo em vista a atividade da fonte de aproximadamente 33398,34 TBq e a distância de 30 cm da fonte ao experimento, os respectivos tempos das irradiações seletivas (do quartzo rosa-pálido de Pedra Lavrada) com doses de 5KGy, 10KGY e 15KGy foram respectivamente de 2h35min, 5h11min e 7h47min. Estas amostras apresentaram as mesmas tonalidades de cor das amostras irradiadas de modo homogêneo. A distância selecionada de 30 cm do experimento até a fonte de irradiação gama é favorável ao controle da dosagem, pois se o operador deixar passar o tempo de irradiação, não acarretará em significativa alteração de tonalidade no material. Caso o experimento fosse colado na fonte isso seria um problema, pois nesse local a alteração cromática do mineral é mais rápida. Além disso, permite um bom acabamento na divisa entre a cor atenuada e a cor não atenuada da amostra. A temperatura da câmara estimada para esta distância foi de 300 K (27°C) e 313 K (40°C) no centro do protetor da fonte de radiação.

A irradiação gama seletiva é um processo de beneficiamento polêmico (por causa do uso de radiação ionizante) e trabalhoso, mas tecnicamente viável, podendo ser realizados trabalhos exclusivos com poucas reproduções, embora possam ser concebidos trabalhos em série padronizados. Isso é devido a alta demanda de outros produtos para irradiação – ressaltando que se trata de uma fonte multipropósito. Os recursos de atenuação, blindagem e sobreposição de doses permitiram coletar dados importantes para o design de gemas. Por colorir o material por dentro e por fora permite uma estética bem acabada, uma mancha de cor profunda para posterior corte e lapidação.

Por fim, concluem-se os principais parâmetros de irradiação gama seletiva para o quartzo rosa de Pedra Lavrada os quais podem ser utilizados no quartzo rosa de Águas Vermelhas: 1) Dose de 10 KGy para espessura de 4 mm do quartzo (pode ser lapidado); 2) Atenuação de 10 cm de espessura do chumbo ou menor (3 cm); 3) Amostras irradiadas com 30 cm de distância da fonte; 4) Doses de 10 KGy e 5 KGy para sobreposições de doses com atenuação de 10 cm de espessura de chumbo, 5) Fresta entre as placas de chumbo superior a 3 mm e até o limite de 3mm em cada lado da amostra que permanece blindada pelo chumbo.

6.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Diversas alterações no experimento podem ser realizadas principalmente quanto a substituição do material atenuador chumbo e sua configuração visual.

Inúmeros beneficiamentos podem ser realizados a partir do material irradiado modificando-o ainda mais. Outras fontes de irradiação podem ser utilizadas e comparadas.

Aprofundar o estudo da estabilidade das cores obtidas com baixas doses (10 KGy) e avaliar a possibilidade de desenvolvimento de cobertura de blindagem/atenuação da radiação solar para maior duração da cor nos materiais irradiados.

Comparar os resultados do sistema HSB com dados de colorímetros ou outros equipamentos.

Tendo em vista o experimento de afastamento do material irradiado, pode-se experimentar a irradiação seletiva em fragmentos de geodos ou pequenos geodos com cristais irregulares.

REFERÊNCIAS

- ACELETRON. **Irradiação linear**. s/d. Disponível em: <<http://www.aceletron.com.br/tecnologia.htm>>. Acesso em: 12 nov. 2014.
- AGEE, F. J. **Radiation machines for gamma-ray laser research**. *Hyperfine Interactions* 107, p. 69-79, 1987.
- AGEE, F. J. **Review of Induced Gamma Emission and Gamma-Ray Laser Research**. *Hyperfine Interactions* 143, p.1-6, 2002.
- AGTA – American Gem Trade Association. **Gemstone information manual twelfth edition**, 2012. Disponível em: <<http://www.agta.org/gemstones/agta-gim/index.html#/1/>>. Acesso em: 3 nov. 2014.
- AKHAVAN, A. C. **The quartz page**, 2014. Disponível em: <http://www.quartzpage.de/gen_struct.html#i03>. Acesso em: 19 set. 2015.
- ALKMIM, D. G. **Identificação do potencial de desenvolvimento de cor em quartzo natural incolor por meio da espectrometria Raman**. Dissertação (Mestrado) Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais. CDTN, Belo Horizonte, 2012.
- ALMOND, P. R. **Cobalt Blues: the history of Leonard Grimmett, the man behind the first cobalt-60 unit in the United States**. Houston: Springer, 2013.
- ANDERSON, B. W. **A identificação das gemas**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1984.
- ANDRADE, M. F. **Comparação dos efeitos da terapia laser de baixa intensidade ($\lambda=660$ nm ou $\lambda=780$ nm) no tratamento de mucosite oral induzida por radiação ionizante em ratos**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Autarquia associada à Universidade de São Paulo, IPEN, 2014.
- APG Associação Portuguesa de gemologia. **A Gemologia**, s/d. Disponível em: <<http://www.apgemologia.org/gemas-gemologia>>. Acesso em: 8 mar. 2014.
- APPLIN, K. R.; HICKS, B. D. **Fibers of dumortierite in quartz**. *Am. Min.* no. 72, p. 170-172, 1987.
- ARAÚJO, F. G. S; CERCEAU, R. C.; COTA, A. B. **Correlação entre o espectro óptico e a concentração de impurezas no quartzo colorido**. *Rem, Rev. Esc. Minas*, vol. 54 n.4, Ouro Preto, out./dez, 2001.
- AREM, J. E. **Color encyclopedia of gemstones**. Chapman & Hall, 1987.
- ARTHUR, D. R. **Process for coloring diamonds**. Patente US2945793 A. 19 jul. 1960.

ASHBAUGH, C. E. **Gemstone irradiation and radioactivity**. *Gems & Gemology*, winter, 1988.

ASHBY, M.; JOHNSON, K. **Materiais e design: arte e ciência da seleção de materiais no design de produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

ASSIS, H. F. S.; BARBOSA, J. A. A.; MOTA, T. S. Avaliação dos impactos ambientais provocados pela atividade mineradora no município de Pedra Lavrada-PB. **Âmbito Jurídico**. Rio Grande, XIV, n. 90, jul, 2011. Disponível em: <http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=9925>http://www.ambito-juridico.com.br/site/index.php?n_link=revista_artigos_leitura&artigo_id=9925. Acesso em: set. 2015.

AZEVEDO, M. C. A. **Avaliação da participação das células B-1 no crescimento do carcinoma de Ehlich**. Dissertação (Mestrado em Medicina Veterinária). Instituto de Ciências e Saúde, Universidade Paulista, 2007.

BAGNATO, V. **Laser e suas aplicações em Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Livraria da física, 2008.

BAHADUR, H. **Radiation-induced modifications of points defects in quartz crystals and their applications in radiations dosimetry**. *Radiation Measurements*, v. 36, p. 493-497, 2003.

BALITSKY, V. S.; MAKHINA, I. B.; PRYGOV, V. I.; MARÍN, A. A.; EMEL'CHENKO, A. G.; FRITSCH, E.; MCCLURE, S. F.; TAIJING, L.; DEGHIONNO, D.; KOIVULA J. I.; SHIGLEY J. E. **Russian synthetic pink quartz**. *Gems & Gemology*, 34, p.34-43, 1998.

BALITSKY, V. S.; MACHINA, I. B.; MARÍN, A. A.; SHIGLEY J. E.; ROSSMAN, G. R.; T, L. **Industrial growth, morphology and some properties of Bi-colored amethyst–citrine quartz (ametrine)**, *Journal of Crystal Growth*, Vol. 212, Issues 1–2, p. 255-260, 2000.

BAPTISTA, D. L.; GIULLIAN, R.; GRANDE, P. L. (Ed.). **Annual report 2012**. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~grande/arep2012.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

BARACHINI, T. **Design de superfície: uma experiência tridimensional**. Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, 5., Congresso Internacional de Pesquisa em Design, 2002.

BARBIAN, T.; KINDLEIN JUNIOR, W.; JUCHEM, P. L. Valorização do arenito através do processo de gravação a laser. In: HARMANN, L. A.; SILVA, J. T.; DONATO, M. (Org.). **Tecnologia e inovação em gemas, jóias e mineração**. 1ed. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 53-60, 2014.

BARBIAN, T. **Design e tecnologia: gravação a laser de desenhos no arenito**. 127f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Design. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127896>>. Acesso em: 5 jan. 2016.

BARBOSA, C. T. **A origem do quartzo Green gold: tratamento e ambiente geológico**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade de São Paulo, 2012.

BARRETO, S. B.; GUZZO, P. L.; SOUZA NETO, J. A.; MORAIS, P. A. R.; CARVALHO JR, A. B.; KHOURY, K. J. **Spectroscopic study of rose quartz from the taboa pegmatite (borborema province, brazil) irradiated with high gamma doses**. Estudos Geológicos, vol. 19 (2), 2009.

BAXTER, M. **Projeto de produto: guia prático para o design de novos produtos**. São Paulo: Blucher, 2011.

BEURLEN, H.; BARRETO, S.; MARTIN, S.; MELGAREJO, S.; SILVA, M. R. R.; SOUZA NETO, J. A. **The Borborema Pegmatitic Province, NE-Brazil, revisited**. Estudos Geológicos, 19, p.62-66, 2009.

BIBERGAL, A. V.; SINITSYN, V. I.; LESHCHINSKIÎ, N. I. **Gamma irradiations facilities (izotopnye gamma-ustanovki)**. Atomizdat Gosudarstvennoe Izdatel'sto Literatury v Oblasti Atomnoi Nauki i Tekhniki Moskva, 1960.

BISSELLE, C. A.; KARAM, R. A.; WETHINGTON, J. A. **An Experimental Study of X-Ray Attenuation in Polyethylene-Lead Shields**. International Journal of Applied Radiation and Isotopes, V. 15, p. 529-539, 1964.

BONEWITZ, R. L. **Gemas e pedras preciosas**. São Paulo: Disal, 2013.

BOTTON, A. **A arquitetura da felicidade**. Rio de Janeiro: Rocco, 2007.

BRANCO, P. M.. **Dicionário de mineralogia e gemologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.

BRANCO, P. M. **Gemologia**. s/d. Disponível em: <http://www.portaldasjoias.com.br/index.php?option=com_content&task=view&id=133&Itemid=32>. Acesso em: 13 out. 2014.

BRANCO, P. M. **Um mineral-símbolo para o Rio Grande do Sul**, 2013. Disponível em: <<http://perciombranco.blogspot.com.br/2013/01/um-mineral-simbolo-para-o-rio-grande-do.html>>. Acesso em: 13 jan. 2014.

BRUM, T. M. M.; JUCHEM, P. L. Opala no Rio Grande do Sul In: HINRICHS, Ruth. **Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul**, Porto Alegre: Editora da UFRGS, p.27-43, 2014.

BUENO, P. H. S. **Efeito da radiação gama e do tipo de embalagem sobre as características microbiológicas, físico-químicas e sensoriais de peito de frango refrigerado**. Dissertação (Mestrado em Ciência Animal). Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

BÜRDEK, B. E. **Design: História, teoria e prática do design de produtos**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

BUYUK, B.; TUGRUL, A. B. **Gamma and neutron attenuation behaviours of boron carbide–silicon carbide composites**. *Annals of Nuclear Energy* 71, p.46–51, 2014.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

CAMPOS, C. **Em São Paulo, Pelé lança diamantes feitos com seu cabelo**. O Estado de S. Paulo, 2014. Disponível em: <<http://esportes.estadao.com.br/noticias/futebol,em-sao-paulo-pele-lanca-diamantes-feitos-com-seu-cabelo,1150428>> Acesso em: 30 out. 2015.

CASSEDANNE, J. P.; RODITI, M. **Crystallized and massive rose quartz deposits in Brazil**. *J. Gemmology*, 22, p.237-286, 1991.

CDTN – Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. **O CDTN**. Disponível em: <http://www.cdtm.br/O_CDTN> Acesso em: 12 nov. 2014.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. **Estudo da cadeia de suprimento do programa nuclear brasileiro: relatório parcial irradiadores e aplicações**. Brasília, 2010.

CHARLOTTE ; FIELL, P. **Design do Século XX**. Tradução: João Bernardo Boléo, China: Taschen, 2000.

CHILTON, A. B.; SHULTIS, J. K.; FAW, R. E. **Principles of radiation shielding**. Estados Unidos: Prentice Hall, Englewood Cliffs N.J, 1984.

CHOW, K. **Process for irradiating pearls and product resulting therefrom**. Patente US3075906 A, 29 jan. 1963.

CIBJO. **Gemmological Commission considers digital colour grading**, 2015. Disponível em: <http://www.cibjo.org/index.php?option=com_content&view=article&id=763:gemmological-commission-considers-digital-colour-grading&catid=7&Itemid=251> Acesso em: 15 jun. 2015.

CIBJO. **The gemstone book**. The world jewellery confederation, 2014.

CIDADE, M. K. **Caracterização e padronização do processo de gravação a laser em ágata aplicado ao design de joias**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Design. Porto Alegre, 2012.

CIDADE, M. K.; PALOMBINI, F. L.; DUARTE, L. C. **Configuração Ornamental Aplicada a Pingente**. 2015, Brasil. Patente: Desenho Industrial. Número do registro: BR302015001018-5, data de registro: 05/03/2015, título: "Configuração Ornamental

Aplicada a Pingente" , Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial.

CIE, s/d. **International Commission on Illumination**. Disponível em: <<http://www.cie.co.at>>. Acesso em: 11 jul. 2015.

CNEN – Comissão Nacional da Energia Nuclear. **Diretrizes básicas para proteção radiológica**. Norma CNEN-NN-3.01, Resolução 164/14, 2014. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>> Acesso em: 5 fev. 2014.

CNEN – Comissão Nacional da Energia Nuclear. **Requisitos de segurança e proteção radiológica para instalações mínero-industriais**. Norma CNEN-NN-4.01, Resolução 028/04, 2005. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm401.pdf>> Acesso em: 29 maio 2015.

CNEN – Comissão Nacional da Energia Nuclear. **Transporte de material radioativo**. Norma CNEN-NE-5.01, Resolução 013/88, 1988. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm501.pdf>> Acesso em: 29 maio 2015.

COHEN, A. J.; MAKAR, L. N. **Differing effects of ionizing radiation in massive and single crystal rose quartz**. N. Jb. Miner. Mh. 11, p.513-521, 1984.

COHEN, A. J. **Amethyst color in quartz, the result of radiation protection involving iron**. American Mineralogist, v.70, p. 1180-1185, 1985.

CONECIT – Conselho Estadual de Ciência e Tecnologia. **Programa de Gemas e Jóias – Deliberação CONECIT Nº 003/1999**. Minas Gerais, 1999.

CORBETTA, G. **Joalheria de arte**. Porto Alegre: AGE, 2007.

CORNEJO, M.V.L.A. **Cristalización artificial de rubíes**. História Natural. n.5, 2004.

CORREA, M. **Variedades gemológicas de quartzo na Bahia, geologia, mineralogia, causas de cor, e técnicas de tratamento**. Dissertação (Mestrado de Geologia). Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia. Universidade de São Paulo, 2010.

CPRM – Serviço Gemológico do Brasil. **Gemas Tratadas**, 2009. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=1277&sid=129>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

CROWNINGSHIELD, R. **Irradiated topaz and radioactivity**. Gems & Gemology, Notes and new techniques, winter, 1981.

D'ALMEIDA, M. L. O.; BARBOSA, P. S. M.; BOARATTI, M. F. G.; BORRELY, S. G. **Radiation effects on the integrity of paper**. Radiation physics and chemistry. v.78, n.7-8, p. 489-492, 2009.

DANA, J. D.; HURLBUT, C. S. **Manual de Mineralogia**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico S. A., vol. 1, 1969.

DAPPER, S. T. H.; SALCE, F. A. P.; REIS, T. H.; SILVA, L. D.; KINDLEIN JUNIOR, W. Sinterização Seletiva a Laser de Pó de Ágata. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. (Org.). **II Mostra de resultados de pesquisa aplicadas ao arranjo produtivo de gemas de jóias do Rio Grande do Sul**. 1ed. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 20-25, 2013.

DEGEO. s/d. **MEV e EDS**. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/laboratorios/microlab/mev.htm>>. Acesso em: 20 jun. 2014.

DESMET, P.; HEKKERT, P. **Special issue editorial: Design & emotion**. International Journal of Design, vol. 3, nº. 2, p. 1-6, 2009.

DIAS, G. O. **Espodumênio brasileiro natural e tratado: um estudo dos centros de cor e coloração artificial**. Tese (Mestrado em Ciências). Universidade Federal de Minas Gerais, 2002.

DIENES, G. J.; VINEYARD, G. H. **Radiation effects in solids**, New York: Interscience Publishers Inc., 1 ed., 1957.

DNPM, IBGM. **Boletim referencial de preços de diamantes e gemas de cor**. 5ª ed., 2005. Disponível em: <http://gemologia.ibgm.com.br/laboratorio/wp-content/uploads/2011/11/brp_20051.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2015.

DOMARCO, R. E. **Efeitos do tratamento combinado de irradiação gama e refrigeração no crescimento de levedura (Saccharomyces cerevisiae Hansen) em suco de laranja**. Sci. agric. vol. 53 n. 1, Piracicaba, jan./apr, 1996.

DRUMMOND, N. F.; MENDES, J. C.; LAMEIRAS, F. S. **Caracterização de quartzo para obtenção de suas variedades gemológicas por irradiação gama e/ou tratamento térmico**. R. Esc. Minas, Ouro Preto, 63(3), jul. set., p. 449-456, 2010.

DRUMMOND, N. F. **Ambientes geológicos e mudanças de cor no quartzo hialino**. Dissertação (Mestrado em Gemologia). Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.

DUARTE, L. C.; ROCHA, T. L. A. C.; ROLDO, L.; KINDLEIN JUNIOR, W.; CIDADE, M. K.; PEDROTTI JÚNIOR, S.L. **Design de Produto para a Ágata: Aplicação de Microcápsulas Fluorescentes em Superfícies Gravadas a Laser**. Revista Design & Tecnologia, n.2, 2010.

DUARTE, L. C.; KINDLEIN JUNIOR, W.; SILVA, F. P.; GABERT, P.; Tessmann, C. S.; Silveira, F.L.; CIDADE, M.K.; GOMES, L. E. S. Técnicas inovadoras e materiais naturais em joalheria no Laboratório de Design e Seleção de Materiais. In: HARTMANN, L. A.;

SILVA, J. T. **Tecnologias para o setor de gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 148-164, 2010.

DUARTE, L. C.; JUCHEM, P. L.; LAMEIRAS, F. S.; SZCZEPANIAK, F. F. **Modificação e intensificação da cor por irradiação gama em quartzo hidrotermal de Ametista do Sul (Brasil) e Artigas (Uruguai)**. XV Congresso Brasileiro de Geoquímica, Brasília, 2015.

ELESBÃO, T. R.; DUARTE, L. C.. **Tratamento de gemas por irradiação**. 5º Workshop Design&Materials, 2010.

ENOKIHARA, C. T.; SCHULTZ-GÜTTLER, R. A.; RELA, P. R.; CALVO, W. A. P. **Studies of colored varieties of Brazilian quartz produced by gamma radiation**. Nukleonika, 58 (4), p.469–474, 2013.

ENOKIHARA, C. T. **Estudo do quartzo verde de origem hidrotermal tratado com radiação gama**. Tese (Doutorado em Ciências). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2013.

EPA - United States Environmental Protection Agency. **Learn about lead**. Disponível em: < <http://www2.epa.gov/lead/learn-about-lead#lead>> Acesso em: 17 ago. 2014.

ESPECIFICAÇÕES de embalagens apropriadas para irradiação. Impresso. Laboratório de Irradiação Gama – LIG, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, s/d.

FARAJOLLAHI, A. R. **Comparison between Clinically Used Irregular Fields Shielded by Cerrobend and Standard Lead Blocks**. J Biomed Phys Eng. Jun 1;5 (2), p. 77-82, 2015.

FARINA, M.; PEREZ, C.; BASTOS, D. **Psicodinâmica das cores em comunicação**. São Paulo: Edgard Blücher, 2006.

FAURE, G.; MENSING, T. M. **Isotopes: principles and applications**. USA: John Wiley & Sons, INC., 1986.

FAVACHO, M. D. S. Tratamento em gemas. In: CASTAÑEDA, C.; LICCARDO, A.; ADDAD, J. (Org.). **Gemas de Minas Gerais**. 1ed. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Geologia-Núcleo Minas Gerais, v. 03, p. 52-73, 2001.

FERREIRA, A. B. H. **Mini dicionário Aurélio**. Rio de Janeiro: Editora Nova Fronteira S. A., 1989.

FIRMINO, S. F. **Transmissão e fluência de fótons na área de radiodiagnóstico para diferentes configurações de feixe e blindagem**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

FLORES, S. C. P. **Gamma irradiation as fungicide and its effects on paper**. Bull. AIC. v.16, 1975-1976, p. 15-44.

- FLORIT, L. F. **A reinvenção social do natural: natureza e agricultura no mundo contemporâneo**. Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Filosofia e Ciências Humanas. Programa de Pós-Graduação em Sociologia, Porto Alegre, 2003.
- FLORIT, L. F.; DREHER, M. T. **A construção social da natureza e suas implicações para a ética no turismo**. Revista Turismo Visão e Ação, v. 11, nº 01, jan/abr, 2009.
- FONSECA, D. S. Cobalto. In: **Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. Sumário Mineral 2013**, 2013.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002.
- FRITSCH, E.; ROSSMAN, G. R. **An update on color in gems. Part 2: colors involving multiple atoms and color centers**. Gems & Gemology, Spring, 1988.
- FRONDEL, C. **The System of Mineralogy of James Dwight Dana and Edward Salisbury Dana**. v. 3, Silica Minerals, 7th ed., New York and London: John Wiley & Sons, 1962.
- FOUCAULT, M. **O que é um autor?** Lisboa: Vega Passagens, 2002.
- GARABEDIAN, A; GARABEDIAN, M. **Method for introducing inclusion image into gemstone**. United States Patent Application Publication Pub. No. US 2009/0269702 A1, oct. 29, 2009.
- GERHARDT, T. H.; SILVA, D. T. **Métodos de pesquisa**. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.
- GIA - Gemological Intitute of America. 2015. **Gems for pantone colors spring/summer 2015**. Disponível em: <<http://www.gia.edu/gia-news-research-pantone-spring-colors-2015>> Acesso em: 22 jun. 2015.
- GIDLOW, D. A. **Lead toxicity**. Occupational Medicine, 54, p.76-81, 2004.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2007.
- GIORDANI, A. J.; SEGRETO, H. R. C.; SEGRETO, R. A.; MEDEIROS, R. B.; OLIVEIRA, J. S. R. **Verificação das doses de radiação absorvidas na terapia de transplantes de medula óssea**. Radiol. Bras. 37(5), p.343-349, 2004.
- GOLCMAN, R. Entrevista a Ricardo Passos (Portugal). In: **site Joias do Brasil**, 2003. Disponível em: <<http://joiasdobrasil.com/entrevista/reny.asp>>. Acessado em: 22 out. 2013.
- GOMES, M. R.; FILHO, E. B.. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. ABM Associação Brasileira de Metais, 1975.
- GONÇALVES, L. A. **Um estudo sobre a Transformada Rápida de Fourier e seu uso em processamento de imagens**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.

GONZAGA, R. S. G.; GUZZO, P. L. **Estudo da modificação da coloração de quartzos róseo-leitosos da província da Borborema por radiação gama e tratamentos térmicos**. In: VIII Jornada de Iniciação científica, 2010, Rio de Janeiro. Anais da XVIII JIC - 2010. Rio de Janeiro: CETEM, v. 01. p. 01-07, 2010.

GONZALES, M. E.; CALVO, A. M.; KAIRYAMA, E. **Gamma radiation for preservation of biologically damaged paper**. Radiation Physics and chemistry. v.63, n.3-6, p.263-265, 2002.

GOOGLE PLAY. **Apps**. s/d. Disponível em: <<https://play.google.com/store>> Acesso em: 25 fev. 2015.

GOREVA, J.S. **Fibrous nanoinclusions in massive rose quartz: the origin of rose coloration**. American Mineralogist, 86, p.466-472, 2001.

GRAY, T. **Os elementos: uma exploração visual dos átomos conhecidos no universo**. São Paulo: Blucher, 2011.

GREVE, G. **Ecodesign em processos : (re)utilização de efluentes do processo de tingimento de ágata para coloração artificial do basalto carijó**. 2013. Dissertação (Mestrado em Design) Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

GROSSMAN, R. P.; WISENBLIT, J. Z. **What we know about consumers' color choices**. Journal of Marketing Practice: Applied Marketing Science, Vol. 5, Issue 3, 1999.

GUAL, M. R. LADEIRA, L. C. D.; MESQUITA, A. Z.; PEREIRA, M. T.; LAMEIRAS, F. S.; RIBEIRO, E.; GROSSI, P. A. **Resultados preliminares da avaliação das doses no labirinto do irradiador gama do CDTN/CNEN utilizando o código MCNPX**. Segunda Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações - SENCIR 2014, 2014. Disponível em: <http://sencir.nuclear.ufmg.br/ii-sencir/assets/AR_28.pdf> Acesso em: 19 jul. 2015.

GUIZHI, L. **Development of Man-Made Synthetic Gemstones and Their Improvement**. Gold Journal. n. 03, 1995.

HAN, A.; GUBENCU, D. **Analysis of the laser marking technologies**. Nonconventional Technologies Review, n. 4, p. 17 – 22, 2008.

HAYES, C. **The ABC's of Nondestructive Weld Examination**. NDTnet, Jun, Vol.3 No.6, 1998. Disponível em: < <http://www.ndt.net/article/0698/hayes/hayes.htm>>. Acesso em: 7 jun. 2015.

HEBERT, L.B.; ROSSMAN, G. R. **Greenish Quartz from the Thunder Bay Amethyst Mine Panorama, Thunder Bay, Ontario, Canada**. Canadian Mineralogist, v.46, p.67-74, 2008.

HECHT, J.; TERESI, D. **Laser: light of a million uses**. New York: Dover Publications, 1998.

HELLER, E. **A psicologia das cores: como as cores afetam a emoção e a razão**. Barcelona: Gustavo Gili, 2012.

HENN, U; SCHULTZ-GLUTTER, R. A. **Color enhanced quartz and its identification green, violet-blue and yellow green quartz from Brazil**. Canadian Gemmologist, v. 30, n. 2, p. 46-54, 2009.

HINRICHS, R. **Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.

HOLBERT, K. E. **Radiation effects and damage**. 2005. Disponível em: <<http://holbert.faculty.asu.edu/eee560/RadiationEffectsDamage.pdf>> Acesso em 15 jan. 2015.

HOLLAS, M. J. **Modern spectroscopy**. Germany: John Wiley & Sons Inc., 2008.

HUBBELL, J. H. **Photon Mass Attenuation and Energy-absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV**. Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol. 33, p. 1269-1290, 1982.

IBGM, Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos. **Manual de lapidação diferenciada de gemas**. MOL, A. (org). Brasília: Athalaia Ed., 2009.

IBGM, Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos. **Manual Técnico de Gemas**. DNPM, IBGM, 1998.

IBGM, Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos. **O setor em grandes números 2012**, 2013. Disponível em: <http://www.ibgm.com.br/site/admin/_upload/estatistica/arquivo/671-OSetoremGrandesNumeros2012_Completo.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2014.

ICGFI – Grupo Consultivo Internacional sobre Irradiação de Alimentos. **Fatos sobre irradiação de alimentos: série de fichas descritivas do Grupo Internacional sobre Irradiação de Alimentos**. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, 1999.

INSIRIPONG, S.; KEDKAEW, C.; THAMAPHAT, N.; CHAMTIMA, N.; LIMSUWAN, P.; KAEWKHAO, J. **Irradiation effect on natural quartz from Zambia**. Procedia Engineering 32, p. 83-89, 2012.

INTARASIRI, S.; WIJAIKHUMB, A.; BOOTKUL, D.; SUWANNAKACHORN, D.; TIPPAWAN, U.; YU, L. D.; SINGKARAT, S. **Development of vertical compact ion implanter for gemstones applications**. Applied surface science, v.310, p.94-99, 2014.

INTARASIRI, S.; BOOTKUL, D.; YU, L. D.; KAMWANNA, T.; SINGKARAT, S.; VILAITHONG, T. **Gemological modification of local natural gemstones by ion beams**. Surface and Coatings Technology. v203, issues 17- 18, p.2788-2792, 2009.

ÏSHAKO´GLU, A.; BAYTA, A. F. **Measurement and evaluation of saturations for water, ethanol and a light non-aqueous phase liquid in a porous medium by gamma**

attenuation. Applied Radiation and Isotopes 56, p. 601–606, 2002.

JONES, O. **A gramática do ornamento.** São Paulo: Editora Senac, 2010.

JUCHEM, P. L.; BRUM, T. M. M.; FISCHER, A. C.; LICCARDO, A.; CHODUR, N. L. Geology of gemstone deposits in South Brazil. In: **Actas XIII Cong. Latinoamericano Geologia.** Lima. Sociedad Geol. Peru, v. 01. p. 01-06, 2008.

JUCHEM, P. L. Materiais gemológicos do RS. In: HINRICHS, R. **Técnicas instrumentais não destrutivas aplicadas a gemas do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: IGEO/UFRGS, p. 45-57, 2014.

JUCHEM, P. L. Mineralizações de ametista em riodacitos do Grupo Serra Geral, Província Vulcânica Paraná. In: **Metalogenia e exploração mineral no Grupo Serra Geral.** HARTMANN, L. A.; BAGGIO, S. B.. eds, p.41-54, 2014.

KARYAGIN, S. V. **The Current Status of Gamma-Ray Lasers Based on the Mössbauer Effect.** Hyperfine Interactions 141/142, 2002. p.53-62.

KATS, A. **Hydrogen in α -quartz.** Philips Res. Repts., 17, 201-279, 1962.

KIBAR, R.; GARCIA-GUINEA, A.; ÇETIN, A.; SELVI, S.; KARAL, T.; CAN, N. **Luminescent, optical and colour properties of natural rose quartz.** Radiat. Meas, 42, p.1610-1617, 2007.

KLEIN, C.; DUTROW, B. **Manual de ciência dos minerais.** Porto Alegre: Bookman, 2012.

KLEIN, C.; HURLBUT, C. S. Jr. **Manual de mineralogía Basado en la obra de J. D. Dana.** Vol. 1. Barcelona: Editorial Reverté S. A., 2011.

KORKUT, T.; KORKUT, H.; KARABULUT, A.; BUDAK, G. **A new radiation shielding material: amethyst ore.** Annals of Nuclear Energy. P.56-59, 2010.

KRUCKEN, L. **Design e território: valorização de identidades e produtos locais.** São Paulo: Studio Nobel, 2009.

LAMEIRAS, F.S; NUNES, E.H.M. **Estimativa da dose do quartzo natural irradiado pela termoluminescência.** Ver. Esc. Minas, Ouro Preto, 57(1), jan-mar, p. 19-22, 2004.

LAMEIRAS, F. S. The Relation of FTIR Signature of Natural Colorless Quartz to Color Development After Irradiation and Heating, Infrared Radiation. In: MOROZHENKO, V. (Ed.). **Infrared radiation.** InTech, 2012.

LAMEIRAS, F. S.; NUNES, E. H. M.; MELO, V. A. R.; LIZ, O. R. **Identificação de quartzos incolores para joalheria.** REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 59(1), p. 129-133, jan., mar., 2006.

LAUISE, R. A; BORNS, R. L. **Perfection of quartz and its connection to crystal growth.** IEEE transactions on ultrasonics ferroeletrics and frequency control. v. 35, n. 3, p.277-286, 1988.

LEGRAND, J.; PEROLAT, J. P.; LAGOUTINE, F.; LE GALLIC, Y. **Table de radionucléides**. France: Commissariat à l'Énergie Atomique. Bureau National de Métrologie Laboratoire de Métrologie des Rayonnements Ionisants, 1974.

LIG - Laboratório de Irradiação Gama do Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN. Catálogo. Laboratório de Irradiação Gama – LIG, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear – CDTN, s/d.

LIMA, S. A. R. P. **Guia de mineralogia**. GEOSOL/Fundação Victor Dequech, 2004.

LÖBACH, B. **Design industrial – Bases para a configuração dos produtos industriais**. São Paulo: Blucher, 2001.

LOPEZ N, B. N. *et al.* **A study of the geographical shifts in global lead production - a possible corresponding shift in potential threats to the environment**. Journal of Cleaner Production 107, p. 237-251, 2015.

LUPTON, Ellen. **The designer as producer**. 1998. Disponível em: <http://www.typosheque.com/articles/the_designer_as_producer>. Acesso em: 10 out. 2013.

LUZ, A. B.; BRAZ, E. **Quartzo: série rochas e minerais industriais**. CETEM/MCT, nº 2, Rio de Janeiro, p.5-6, 2000.

MACIEL, A.; FERNANDES, R. **Gemas e Jóias brasileiras têm potencial para se expandir**, 2004. Disponível em: <<http://desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/noticia.php?area=2¬icia=5960>>. Acesso em: 21 jul. 2014.

MAIA, R.F. S.; MEIRELLES, A. C. R. A arte, o encanto e a trajetória de uma lapidária. In: MEIRELLES, A. C. R. *et al.* **Jóias do Pará: design, experimentações e inovação tecnológica nos modos de fazer**. Belém: Paka-Tatu, 2011.

MAGAUDDA, G. **The recovery of biodeteriorated books and archive documents through gamma radiation: some considerations on results achieved**. Journal of cultural heritage. v.5, p.113-118, 2004.

MANZINI, E. **A matéria da invenção**. Lisboa: Centro Português de Design, 1993.

MARASCHIN, A. J.; MIZUSAKI, A. M. **Datação de processos diagenéticos em arenitos-reservatório de hidrocarbonetos: uma revisão conceitual**. Revista Pesquisas em Geociências, 35 (1): 27-41, 2008.

MARRA, P. **Gemas orgânicas ganham espaço no design de jóias brasileiras**, 2011. Disponível em: <<http://finissimo.com.br/2011/12/18/paulo-tavares-gemas-organicas-para-expojoia/>> Acesso em: 10 jan. 2014.

MARTIN, J. E. **Physics for radiation protection**. New York: John Wiley & Sons, INC., 2000.

- MICALISTER, D. R. **Gamma Ray Attenuation Properties of Common Shielding Materials**. PG Research Foundation, Inc. University Lane Lisle, IL 60532, USA, 2013. Disponível em: <<http://www.eichrom.com/PDF/gamma-ray-attenuation-white-paper-by-d.m.-rev-4.pdf>> Acesso em: 13 out. 2014.
- MCGINNIS, R. **Shielding Equations and Buildup Factors Explained**, s/d. Disponível em: <<http://www.radprocalculator.com/Files/ShieldingandBuildup.pdf>>. Acesso em: mar. de 2014.
- MCLAUGHLIN, W. L.; BOYD, A. W.; CHADWICK, K. H.; McDONALD, J. C.; MILLER, A. **Dosimetry for Radiation Processing**. Taylor & Francis, London, 1989.
- MEKKI, A.; SALIM, M., **XPS study of transition metal doped silicate glasses**. J.lec. Spec, 101/103, p. 227-232, 1999.
- MIRANDA, H. L. C.; BOBROWSKI, V. L.; TILLMANN, M. A. A.; DODE, L. B.; MENEGHELLO, G. E. **Qualidade fisiológica de sementes de arroz submetidas à radiação gama**. Ciência Rural, v.39, n.5, ago, 2009.
- MIRANDA, M. R. **Caracterização espectroscópica e alteração da cor por radiação gama e tratamentos térmicos de quartzo róseo-leitoso da Província Pegmatítica da Borborema**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, 2012.
- MIRANDA, M. R.; GONZAGA, R. S. G.; GUZZO, P. L.; BARRETO, S. B.; MELGAREJO, J. C. **Estudo da suscetibilidade ao escurecimento por radiação gama de quartzo róseo-leitoso da província pegmatítica da Borborema**. Revista Brasileira de Geociências, vol. 42 (2), 2012b.
- MOIK, J. **Digital processing of remotely sensed images**. Washington: NASA, 1980.
- MÖLLER, S. V. **Aplicações industriais das radiações ionizantes: datação, esterilização e detecção de fugas**. Curso de extensão em radiologia industrial, gamagrafia e medidores nucleares para técnicos, s/d.
- MORAES, V. N. **O autor no design de joias: uma aproximação com o direito**. Dissertação (Mestrado em Design). Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2012.
- MOREIRA, F. R.; MOREIRA, J. C. **A cinética do chumbo no organismo humano e sua importância para a saúde**. Ciênc. saúde coletiva, Rio de Janeiro, v.9, n. 1, p. 167-181, 2004.
- MORRIS, R. **Fundamentos de design de produto**. Porto Alegre: Bookman, 2010.
- MOTOKI, A.; VARGAS, T.; PEIXOTO, J. L. N. **Análise quantitativa das cores de feldspato alcalino, nefelina e sodalita em rochas ornamentais**. Mineração Metarulgia, v. 554, n. 6, p. 14-30, 2000.

- MUNSTEINER. **Atelier Tom Munsteiner**, s/d. Disponível em: <<http://www.munsteiner-cut.de/ENGLISH/sculptures.html>> Acesso em: 9 nov. 2014.
- MUSEU GERDAU, Museu das Minas e do Metal. **Minas**. Belo Horizonte. Áudio, s/d.
- NASA, s/d. **Space Station Validation of Advanced Radiation-Shielding Polymeric Materials Project**. Nasa TechPort View Project. Disponível em: <<http://techport.nasa.gov/view/12854#>> Acesso em: 2 maio 2015.
- NASSAU K., PRESCOTT B. S., **Smoky, blue, greenish yellow, and other irradiationrelated colors in quartz**, Min. Mag. **41**, 301-12, 1977.
- NASSAU, K. **Gemstone enhancement**. London and Boston: Butterworths, 1984.
- NASSAU, K. **The origin of color in minerals**. American Mineralogist, vol. 63, p. 219-229, 1978.
- NASSAU, K. **The physics and chemistry of color: the fifteen causes of color**. New York: John Wiley, 2001.
- NORMAN, D. A. **Design emocional: porque adoramos (ou detestamos) os objetos do dia-a-dia**. Rio de Janeiro: Rocco, 2008.
- NOUAILHETAS, Y. **Apostila educativa radiações ionizantes e a vida**. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN, s/d.
- NOVAES E BRITO, R. R.. **Irradiação ionizante seletiva impede a evolução do lupus eritematoso sistêmico em camundongo fêmeo (NZB/NZW) F1 e seleciona população radiorresistente de células B-1 peritoneais**. 2007. Tese (Doutorado em Microbiologia e Imunologia). Universidade Federal de São Paulo, 2007.
- NUNES, E. H. M., LAMEIRAS, F. S. **The Optical Absorption of Gamma Irradiated and Heat-Treated Natural Quartz**. Materials Research, Vol. 8, No. 3, 305-308, 2005.
- OCDE; EUROSTAT. **Manual de Oslo: diretrizes para a coleta e interpretação de dados sobre Inovação**. 3ª ed. Produção: FINEP, 2007.
- OKUNO, E.; CALDAS, I. L.; CHOW, C. **Física para ciências biológicas e biomédicas**. São Paulo: Harbra, 1986.
- OKUNO, E. **Radiação: efeitos, riscos e benefícios**. São Paulo: Harbra, 1988.
- OKUNO, E.; VILELA, M. A. C. **Radiação ultravioleta: características e efeitos**. São Paulo: Livraria da Física, 2005.
- OLIVEIRA, P. R.; OLIVEIRA, A. C.; OLIVEIRA, F. C. **A radiação ultravioleta e as lentes fotocromicas**. Arq. Bras. Oftalmol., São Paulo, v. 64, n. 2, abr., 2001 .
- OMETTO equipamentos, s/d. Disponível em: < www.omettoequipamentos.com.br> Acesso em: 20 jul. 2014.

OMI, N. M. **Desenvolvimento de irradiador gama dedicado ao beneficiamento de pedras preciosas.** (Tese) Doutorado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – IPEN. São Paulo, BR-SP, 2006.

OMI, N. M. **Desenvolvimento de um aplicativo para simulação de doses em sistemas de irradiação gama.** Dissertação (Mestrado), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, São Paulo, 2000.

OWEN, Charles. **Considering Design Fundamentally.** Design Processes Newsletter, 1993.

PANTONE. **Pantone Color Institute.** s/d. Disponível em: <<http://www.pantone.com>>. Acesso em: 11 jul. 2015.

PARADISE, T. R. **The natural formation and occurrence of green quartz.** Gems & Gemology, Spring, P.39-42, 1982.

PEDROSA, I. **Da cor à cor inexistente.** Rio de Janeiro: Léo Christiano Editorial Ltda. e Editora Universidade de Brasília, 3 ed., 1982.

PICHLER, R.; BARBIAN, T.; JUCHEM, P. L.; DUARTE, L. C. Aproveitamento gemológico de serpentinito do Rio Grande do Sul, com aplicação da tecnologia laser. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T. (org.). **Mostra de pesquisas, produtos e tecnologias aplicadas ao arranjo produtivo de gemas e joias do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre: IGEO/UFRGS. p.16-19, 2013.

PORMIM – Ministério de Minas e Energia. **Beneficiamento de Minérios,** s/d. Disponível em: <http://www.pormin.gov.br/biblioteca/arquivo/beneficiamento_de_minerio.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2014.

POUGH, Frederick H; ROGERS, T. H. **Experiments in x-ray irradiation of gemstones.** Am. Mineral, 32, p. 31-43, 1947.

POYNOR, R. **No more rules: graphic design and postmodernism.** New Haven, Connecticut: Yale University Press, 2003.

PREISS, K. **Measuring concrete density by gamma ray transmission.** Materials Research & Standards – ASTM, Vol. 5, Num. 6. Jun. p. 285 – 291, 1965.

PRESS, F.; SIEVER, R.; GROTZINGER, J. **Para entender a Terra.** Porto Alegre: Bookman, 2006.

PREUSSER, F.; CHITHAMBO, M. L.; GÖTTE, T.; MARTINI, M.; RAMSEYER, K.; SENDEZERA, E. J.; SUSINO, G. J.; WINTLE, A. G. **Quartz as a natural luminescent dosimeter.** Earth-Science reviews, 97, p.84-214, 2009.

PROTHERO, D.R. **Interpreting the stratigraphic Record.** USA: McGraw, 1997.

RDS-30, Survey Meter. **User's manual.** RADOS doc. n^o 2096 5600 V. 1.10, s/d.

RELA, P. R.; GOMES, F. F.; THOMÉ, L. E.; KODAMA, Y. **Recuperação de um acervo: uso da Radiação Gama Cobalto 60) na descontaminação de objetos do acervo do Instituto de Estudos Brasileiros – USP**. Revista do Instituto de Estudos Brasileiros, n.46, São Paulo, 2008.

ROCHA, G. A. Quartzo - cristal. In: Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. **Sumário Mineral 2013**, 2013.

RODRIGUES JR., A. A.; CALDAS, L. V. E. Vidro comercial como detector de irradiação sim/não num irradiador de grande porte. **Anais do Encontro Nacional de Aplicações Nucleares**, Rio de Janeiro, Brasil, p.11-16, agos., 2002.

ROCK, M. The designer as author. In: BIERUT, M.; DRENTTEL, W.; HELLER, S. (Ed.). **Looking closer 4: critical writings on graphic design**. New York: Allworth Press, p. 237-244, 2002.

ROCKWELL III, T. **Reactor shielding design manual**. New York: McGraw-Hill Book Company Inc, 1956.

ROSSMAN, G. R., **The colored varieties of silica**, Reviews in Mineralogy 29, 433-68, 1994.

ROSSMAN, George R. **Color in gems: the new technologies**. Gems & Gemology, Sum., 1981.

ROSTOKER, M. D.; PASCH, N. F.; ZELAYETA, J. **Gamma ray techniques applicable to semiconductor lithography**. Patent US5591564 A, 1997.

RST. **Demron**. Disponível em: <<http://www.radshield.com/Demron-RST.php>>. Acesso em: 12 nov. 2014.

RUBIM, R. **Desenhando a superfície**. São Paulo: Edições Rosari, 2004.

RUSSO, F. T. **Investigação das propriedades ópticas, elétricas e estruturais em ametista**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós - Graduação em Ciência e Tecnologia de Materiais. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, Bauru, 2011.

RÜTHSCHILLING, E. A.. **Design de superfície**. Porto Alegre: Ed. Da UFRGS, 2008.

RÜTHSCHILLING, E. A. **Design de superfície: conceito**, 2006. Disponível em: <<http://www.nds.ufrgs.br/novo/index.html>>. Acesso em 23 jun. 2014.

SABIONI, A.C.S.; FERREIRA, C.M. **Alguns aspectos técnicos e econômicos do tratamento térmico de gemas**. Rev. Escola de Minas, 1996.

SANTOS, M. C. L. Consumo, descarte, catação e reciclagem: notas sobre design e multiculturalismo In: MORAES, D. **Design e multiculturalismo**. Barbacena: EdUEMG, p.63-64, 2008.

SÁSIAN, L.; YANTEZ, P.; TIVOL, T. **The optical design of gemstones**. Optics & Photonics News, apr., 2003.

- SATIN, M. **Use of irradiation for microbial decontamination of meat: Situation and perspectives.** Meat Science, v.62, n.3, p.277-283, 2002.
- SAWAKUCHI, G. O.; OKUNO, E. **Effects of high gamma ray doses in quartz.** Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 218, p. 217–221, 2004.
- SCAFF, Luiz A. M. **Radiações: mitos e verdades perguntas e respostas.** São Paulo: Editora Bracelola, 2002.
- SCHOBENHAUS, C. *et al.* **Idade U/PB do culcanismo rio dos remedios, Chapada Diamantina, Bahia.** In: Cong. Bras. Geolog., 38, Balneário Camburiú, vol. 2, p. 397-398, 1994.
- SCHOLZ, R.; CHAVES, M. L. S. C.; KRAMBROCK, K.; PINHEIRO, M. V. B.; BARRETO, S. B.; MENEZES, M. G. **Brazilian quartz deposits with special emphasis on gemstone quartz and its color treatment.** Springer Geology, 2012.
- SCHULTZ-GLUTTLER, R. A. **Quartzo verde ou prasiolita?.** Diamond news, ano 8, n. 28, p.19, 2007.
- SCHULTZ-GÜTTLER, R. A.; KOHIGASHI, H. C. **Treated violetish blue to violet quartz from Brazil.** Gems news international, Gems and Gemology, v.42, n.4, p. 285-286, 2006.
- SCHUMANN, W. **Gemas do mundo.** 9ª ed. São Paulo: Disal, 2006.
- SCHWARTZ, A. R. D.; NEVES, A. F.. Design de superfície: abordagem projetual geométrica e tridimensional. In: MENEZES, M. S.; PASCHOARELLI, L. C. **Design e planejamento: aspectos tecnológicos.** São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009.
- SEDDON, Tony. **Imagens: um fluxo de trabalho digital criativo para designers gráficos.** Porto Alegre: Bookman, 2009.
- SILVA, D. F. **Estudo dos efeitos fotoinduzidos por Raio-X em filmes vítreos do sistema $[Sb(PO_3)_3]_n-Sb_2O_3$ dopados com CuO.** Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais). Universidade de São Paulo, 2009.
- SILVA, F. L. C.; GROSSI, P. A. **Implantação de métodos baseados em engenharia de produção no laboratório de irradiação gama.** In: VIEIRA, M. M. F. (org.) *et al.* Livro resumo: XX PIBIC, XI PROBIC, IV PIBITI, p.15-16, 2014.
- SILVA, P. V. R. *et al.* **Digital evaluation of the influence of interruption of the fixation process on radiographic contrast and base-plus-fog density in three commercial brands of radiographic films.** Rev. odontol. UNESP, Araraquara, v. 43, n. 1, p. 41-45, 2014.
- SILVEIRA, Newton. **Direito de autor no desenho industrial.** São Paulo: Revista dos Tribunais, 1982.

SMITH, G.; VANCE, E. R.; HASAN, Z.; EDGAR, A.; RUNCIMAN, W. A. **A charge transfer mechanism for the colour of rose quartz**. Phys. Stat. Sol. 46 , p.135-140, 1978.

SMITH, G.; STRENS, R. G. J. **Intervalence transfer absorption in some silicate, oxide and phosphate minerals**. In: STRENS, R. G. J. The Physics and chemistry of minerals and rocks. New York: John Wiley & Sons, p.583-612, 1976.

SOARES, S. J.; DILLY, J.; DUARTE, L. C.; SILVA, F. P.; CANDIDO, L. H. A. Contribuição ao design de superfície em gemas naturais : estudo sobre a caracterização da gravação a laser em madrepérolas. In: DONATO, M.; Duarte, L. C.; HARTMANN; L. A. (Org.) **Inovação, design e pesquisas aplicadas em gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGeo/UFRGS, 2015.

SONZOGNI, A. **NuDat 2.6**. National Nuclear Data Center - NNDC, Brookhaven National Laboratory, s/d. Disponível em: < <http://www.nndc.bnl.gov/nudat2/>> Acesso em: 30 abr. 2015.

STABIN, M.G. **Radiation protection and dosimetry: an introduction to health physics**. New York: Springer Science+Business Media, 2007.

SZCZEPANIAK, F. F.; DUARTE, L. C.; JUCHEM, P. L. Design de superfície de gemas: simulação do quartzo rutilado através da metalização de ouro em estêncil. In: HARTMANN, L. A. **Tecnologia e inovação em gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.

TAUHATA, L.; SALATI, I.; DI PRINZIO, R.; DI PRINZIO, A. R. **Radioproteção e dosimetria: fundamentos**. 10ª ed. Rio de Janeiro: IRD/CNEN, 2014.

TAUHATA, L.; ALMEIDA, E. S. **Energia nuclear e suas aplicações**. Rio de Janeiro: CNEN, 1984.

TEIXEIRA, J. A. A. B.; SILVA, O. A. Chumbo. In: Departamento Nacional de Produção Mineral - DNPM. **Sumário Mineral 2013**, 2013.

TEIXEIRA, W.; FAIRCHILD, T. R.; TOLEDO, M. C. M.; TAIOLI, F. (org.). **Decifrando a Terra**. São Paulo: Ed. Oficina de Textos, 2000.

TILLY JUNIOR, J. G. **Física radiológica**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2010.

TIMBLIN JUNIOR, L. O. **Density measurement of saturated submersed sediment by gamma ray scattering**. Materials Research & Standards – ASTM, Vol. 2, Num. 7. Jun., p. 566 – 570, 1962.

TURNER, J. E. **Atoms, radiation, and radiation protection**. New York: John Wiley & Sons, 1995, 2007.

UZUELI, D. H. **Estudo sobre o gás ozônio formado no processo de irradiação industrial com cobalto-60 e seu impacto no meio ambiente**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, IPEN, São Paulo, 2013.

- VIEIRA, G.F. **Avaliação da cor dos dentes em função de uma escala comercial**. Tese (Livre Docência). Faculdade de Odontologia da Universidade de São Paulo, 1996.
- VULTEE, J. V. **Über die orientierten werwachsungen von rutil in quartz**. N. Jb. Min. Abh, p.389-415, 1955.
- WATKINS, J. M.; SILVA FILHO, A. F.; MENDES, J. C.; PEREIRA, R. S. **Relatório técnico 56: perfil de gemas (diamante e gemas de cor)**. Ministério de Minas e Energia, 2009.
- WEBMINERAL. **Mineralogy Database**. Disponível em: <www.webmineral.com>. Acesso em: 19 jan. 2015.
- WEBSTER, R.; ANDERSON, B. **Gems: their sources, descriptions and identification**. Butterworth & Co Ltd, 1984.
- WEYMAR, L. B. C. **Authorship in graphic design: An individual style or a collective imaginary?**. Strategic Design Research Journal, 2(3): 109-112 nov-dec, 2009.
- WEYMAR, L. B. C. **Design entre aspas: indícios de autoria nas marcas da comunicação gráfica**. Tese (Doutorado em Comunicação Social). Faculdade dos Meios de Comunicação Social, PUCRS, Porto Alegre, 2010.
- WILDNER, W. Estratigrafia do magmatismo Serra Geral na Bacia do Paraná – Conceitos básicos e divisão faciológica. In: **Reunião aberta da Comissão Brasileira de Estratigrafia**. Anais. UFRGS, 2004.
- WILM, M.; BISINELLA, R. C.; PICHLER, R.; KINDLEIN, W. Jr.; JUCHEM, P. L.; DUARTE, L. C. Design e tecnologia: estudo de viabilidade da reutilização de rejeitos de quartzo rosa com uso de corte por jato d'água. In: HARTMANN, L. A.; SILVA, J. T.; DONATO, M. **Tecnologia e inovação em gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2014.
- WU, A.; LINDNER, G.; MAITZ, A. H.; KALEND, A. M.; LUNSFORD, L. D.; FLICKINGER, J. C.; BLOOMER, W. D. **Physics of Gamma Knife approach on convergent beams in stereotactic radiosurgery**. I. J. Radiation Oncology - Biology - Physics. vol. 18, n. 4, abril, p. 941-949, 1990.
- XAVIER, A. M.; MORO, J. T.; HEILBRON, P. F. **Princípios básicos de segurança e proteção radiológica**. 3.ed. Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS, 2006.
- XIE, Y.; CHIBA, M.; SHINOHARA, A.; WATANABE, H.; INABA, Y. **Studies on lead-binding protein and interaction between lead and selenium in the human erythrocytes**. Industrial Health 36, p.234-239, 1998.
- ZANATTA, A. L. (Org.). **Plano de desenvolvimento com metodologia participativa – APL pedras, gemas e joias (Cidade Polo Soledade)**. Passo Fundo: Graffoluz Editora e Indústria Gráfica Ltda., 2014.

ZANATTA, A. L.; SILVA, J. T.; BRUSSO, M. J.; IPAR, C. E. A. L.; LERMEN, M.; SILVA, V. B. Tecnologia 3D-Gemas: visualização de projetos virtuais de lapidação. In: HARTMANN. **Tecnologias para o setor de gemas, joias e mineração**. Porto Alegre: IGEO/UFRGS, 2010.

ZHENG, Z.; JIANGSHENG, C.; JIATING, Z.; HONGGUI, D.; YONGFU, Z.; SHANGZE, H.; JIE, F. **Study on the possibility of reading two kinds of data from one glass detector**. Radiat.Phys.Chem., v.50, n.3, p. 303-305, 1997.

ZHANG, Q. R. **Possible generation of a γ -ray laser by electrons wiggling in a background laser**. Chinese Physics B. vol. 24, Iss. 5, may, 2015.

ZHOU, B. H.; MAHDAVIAN, S. M. **Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power Co₂-laser**. Journal of Materials Processing Technology, 146, p. 188-192, 2004.

GLOSSÁRIO

Acatassolamento ou *chatoyance* – É o resultado da reflexão da luz em pequenas fibras do mineral, causa brilho em estreita faixa que se move em ondas ao girar o mineral.

Aceleração de elétrons – A aceleração de elétrons em acelerador linear, sendo um acelerador de partículas, gera elétrons concentrados e acelerados na forma de feixe. O equipamento requer baixa manutenção e utiliza energia elétrica possibilitando sua desativação a qualquer momento, assim como os equipamentos de raios X. Os produtos são transportados por esteiras e passam por feixes. A dose varia dependendo da velocidade da esteira, desta forma é controlada a exposição do produto ao feixe. Gemas tratadas anteriormente por irradiação gama podem ter suas cores intensificadas em aceleradores lineares.

Ágata – Variedade compacta microcristalina de quartzo, bandada.

Ametista – Variedade roxa, violeta ou púrpura de quartzo.

Ametrino – Variedade bicolor de quartzo nas cores da ametista e do citrino.

Atividade da fonte (radioativa) – Atividade da fonte possui grandeza definida pelo valor esperado do número de transições nucleares espontâneas daquele estado de energia dividido pelo intervalo de tempo.

Aventurina – Quartzo de aparência ligeiramente translúcida e brilhante devido aos reflexos internos de outros minerais. O efeito óptico “aventurina” são reflexos metálicos brilhantes gerados por inclusões de minerais lamelares.

Biotita – Mica castanho escura (ver micas).

Brilho – Maneira como é refletida a luz na superfície de um mineral, com diferentes intensidades e qualidades. O brilho nos minerais pode ser metálico, vítreo, adamantino, sedoso, nacarado, etc.

Citrino – Variedade de quartzo de cor amarela clara ao mel escuro.

Clivagem – Modo de separação em planos paralelos de acordo com a estrutura atômica dos minerais.

Cristal – Substâncias cristalinas com formas poliédricas definidas.

Cristal-de-rocha – Variedade incolor e transparente de quartzo.

Design – Há distintas definições sobre o que é design⁵³.

Design autoral – A questão sobre autoria é complexa e antiga, iniciada há mais de quarenta anos na França. Deriva dos contrastantes discursos “A morte do autor” de Barthes e “O que é um autor?” de Foucault, resultando, por um lado, na defesa de que o criador não controla o significado de seu projeto, sugerindo o nascimento do leitor (interpretante) e, por outro lado, no repensar da importância de quem fala, ou seja, do significado da autoria e da responsabilidade de ser autor. A partir desta questão diversos estudos são elaborados principalmente nos Estados Unidos e continuam na contemporaneidade⁵⁴.

Design de gemas, materiais gemológicos e de joias – Os designers de gemas se dedicariam ao projeto das gemas incluindo o design de superfície de gemas e identidade, já os designers de joias seriam responsáveis por utilizar ou não as gemas criadas e desenvolver coleções de adereços para as empresas de joias e acessórios. Cabe ressaltar que o designer de gemas, quando desenvolve um cristal e não somente o formata, pode estar muito próximo a um designer de materiais ou engenheiro de materiais ou outro profissional dessa área. Apesar de utilizar os termos design de gemas e design de materiais gemológicos muitas vezes como sinônimos nesta pesquisa, entende-se que existe uma tênue diferença entre eles. O designer de materiais gemológicos trata o material em estado bruto, beneficiando-o ou tratando-o. Esse material se transformará em produto (gema), pois trata-se de uma etapa que necessita de finalização. O designer de gemas transforma o material gemológico em gema, finalizando em um produto (por exemplo uma gema lapidada), para ser utilizado em uma joia, por exemplo.

Dose absorvida – É a quantidade de energia cedida à matéria pelas partículas ionizantes por unidade de massa. A unidade gray é a mais utilizada na quantificação de dose absorvida por materiais gemológicos.

⁵³Design, de modo geral, “[...] é um meio de conferir ideias persuasivas, atitudes e valores sobre como são ou deveriam ser as coisas [...]” (CHARLOTTE, FIELL, 2000, p.7). Deste modo, são inúmeras as possibilidades de atuação do profissional. Um dos princípios do design é atrair a atenção do observador, depois prender a sua atenção (BAXTER, 2011), além de transmitir a ele uma informação. É uma função civilizatória (SANTOS, 2008). Norman (2008) assegura uma interdisciplinaridade do design, uma vez que isso se deve a busca em diversas fontes de conhecimento teórico e metodológico para a prática projetual.

⁵⁴ Conforme os estudos de Foucault (2002), Rock (2002), Poynor (2003) e Weymar (2010).

Dumortierita – Borossilicato fibroso de ferro-alumínio, geralmente vermelha-rosada ou violeta a azul.

Fluorita – Fluoreto de cálcio de cores vibrantes, dentre as mais comuns violeta, verde e amarela.

Forma cristalina – Também denominada forma cristalográfica, é um conjunto de faces iguais de um cristal que se repetem no espaço através dos elementos de simetria desse cristal.

Fuchista – Muscovita de cor verde clara, devido à incorporação de Cr à sua estrutura cristalina.

Gema – Segundo a NBR 10630 da ABNT, a palavra gema deve ser utilizada somente para gemas naturais, pois para os outros casos deve-se especificar, como por exemplo, gema artificial, gema composta, gema sintética, etc. Este termo geralmente denota minerais inorgânicos límpidos e cuidadosamente selecionados. Entretanto, segundo Schumann (2006), as gemas ou pedras ornamentais podem ser consideradas como toda a substância, natural ou artificial ou cultivada, orgânica ou inorgânica, bruta ou lapidada, utilizada como ornamento, como por exemplo, madeiras, vidros, ossos, minerais, etc.; apresentando raridade, beleza e durabilidade. Dentre elas, podem-se citar o diamante, rubi, ametista, ágata, turmalina, quartzo, opala, âmbar, marfim, pérola, coral dentre inúmeras outras.

Geodo – Cavidade preenchida por minerais muitas vezes no formato de cristais que se projetam da parede para a parte central da cavidade.

Gray – Unidade de dose absorvida (ver dose absorvida). É dada em Joule por Quilograma.

Iridescência – Efeito que mostra as cores do arco-íris.

Luz solar ou lâmpadas UV – A luz solar e a lâmpada ultravioleta são utilizadas para clarear tonalidades e também para atenuar o acinzentado promovido pela irradiação gama em determinadas gemas. Com relação à radiação por lâmpadas, ela acelera o processo de descoloração simulando a passagem do tempo (ENOKIHARA, 2013). Em certas gemas se consegue eliminar totalmente a coloração e algumas quando expostas à radiação ultravioleta podem emitir luz, fenômeno denominado fluorescência que por vez pode auxiliar na identificação de um mineral. A lâmpada ultravioleta possui serventia também na cura da cola UV muitas vezes utilizada para compor gemas *doublets*. Neste caso, caso houver interesse em construir uma gema *doublet* ou *triplet* com gema irradiada utilizando cola UV, é necessário verificar o tempo/intensidade de utilização da fonte UV para não desbotar a gema.

Micas – É a denominação genérica para minerais do grupo dos filossilicatos (do grego *phylon*, que significa folha) que tem como característica principal serem constituídos por lâminas muito finas, que podem ser separadas facilmente, inclusive com a mão. São silicatos hidratados constituídos principalmente por Al, K, Na, Fe, Mg e Li, com mais de 30 espécies descritas, sendo as mais comuns a muscovita (incolor, cinza), biotita (castanho escuro), lepidolita (cinza violeta).

Mineral maciço – Mineral sem forma definida.

Minerais – São sólidos homogêneos inorgânicos, com composição química definida e estrutura cristalina (disposição ordenada de átomos). Perpassam 4.200 espécies estudadas.

Nêutrons (irradiação) – Irradiação com nêutrons (partículas sem carga) em reatores nucleares, são muito penetrantes possibilitando boa intensidade e uniformidade da cor; não se ionizam diretamente, ou seja, transferem a energia para outras partículas as quais podem ionizar (OKUNO, 1988). Por serem altamente penetrantes, os nêutrons podem atingir o núcleo do átomo tornando-o radioativo. Quando isto ocorre é necessário deixar as gemas em quarentena. Crowningshield (1981) estudou topázios brasileiros altamente radioativos provavelmente tratados por irradiação de nêutrons em reator nuclear. Segundo Enokihara (2013), não se tem notícias de tratamento de minerais em reatores nucleares de pesquisa.

Obsidiana – Vidro vulcânico natural.

Pedra semipreciosa – Este termo é geologicamente incorreto tendo em vista que as gemas são divididas somente em gemas de cor e diamante.

Pegmatito – Rocha de granulação grossa a muito grossa (cristais centimétricos até métricos), que geralmente ocorre como corpos alongados. Como é originada nos estágios finais de cristalização de um magma, concentra um grande número de elementos químicos que não fazem parte da composição dos minerais comuns formadores de rocha e, por isso, é comum conter muitos minerais raros e minerais gemológicos. Os maiores minerais já encontrados no planeta, por vezes com várias toneladas, foram extraídos de pegmatitos.

Prasiolita – Variedade verde de quartzo.

Quartzito – É uma rocha metamórfica cujo componente principal é o quartzo. Esse mineral ocorre na forma de grãos, geralmente originados de depósitos arenosos, que por sua vez se transformaram em uma rocha sólida denominada de arenito, antes de serem submetidos aos processos metamórficos. O aumento de pressão, temperatura

e de atividades químicas provocados pelo metamorfismo, transforma argilas depositadas entre os grãos de areia em finas lamelas de muscovita e deposita cimento silicoso entre os grãos, resultando em uma rocha muito resistente.

Quartzito verde – Rocha metamórfica de textura granular constituída essencialmente de quartzo e fuchcita (mica verde).

Quartzo enfumaçado ou fumê – Variedade marrom claro ou cinza a quase preta de quartzo.

Quartzo leitoso – É translúcido ou quase opaco, variando de branco a cinzento ou creme.

Quartzo olho-de-falcão – Quartzo semelhante ao olho de tigre, porém azul. Possui efeito olho de gato, ou acatassolamento.

Quartzo rutilado – Quartzo que possui inclusões aciculares de rutilo.

Raios X – Energia que provêm da eletrosfera do átomo, um fenômeno elétrico, também podem ser provenientes de transições eletrônicas depois de uma ionização interna ou podem ser provenientes da desaceleração de partículas carregadas, sejam elas elétrons, partículas alfa, ou prótons com alta energia. Este processo é denominado “radiação de freamento” ou *Bremsstrahlung*. Os raios X são comumente utilizados para impressionar chapas fotográficas do corpo humano, possibilitando contraste entre os ossos e o restante do corpo. Esta radiação possui maior disponibilidade em equipamentos os quais possuem emissão controlável através da energia elétrica. Contudo, é baixa a penetração em gemas, proporcionando também baixa uniformidade da cor, sendo assim, neste caso, inviável comercialmente.

Rocha – Nome dado aos agregados de minerais de diferentes espécies.

Rocha metamórfica – É proveniente de transformações (metamorfose) de qualquer outro tipo de rocha submetida a processos físicos diferentes da condição original onde a rocha se formou.

Rodocrosita – Carbonato de manganês que possui cores rosa, vermelha, marrom ou cinza.

Sistemas cristalinos – A estrutura interna ordenada (estrutura cristalina) dos minerais se manifesta externamente. Os minerais cristalizam como poliedros regulares, com características geométricas determinadas pelas relações entre faces, arestas, vértices e eixos, que originam formas cristalinas com maior ou menor simetria; essas propriedades geométricas, permitem agrupar os cristais em sete grupos, denominados de sistemas cristalinos: cúbico (ou isométrico), tetragonal, rômico (ou ortorrômico), monoclinico, triclinico, hexagonal e trigonal (ou romboédrico).

Sistema cristalino trigonal – Os cristais do sistema trigonal possuem três eixos horizontais iguais e um eixo vertical maior ou menor que os horizontais, que exhibe uma simetria ternária (faces iguais são repetidas três vezes em torno desse eixo). É comum certos cristais (como o quartzo) apresentarem um contorno hexagonal, mas as extremidades são constituídas de formas cristalinas com simetria ternária.

Tratamento térmico – O tratamento térmico, concebido em fornos, pode alterar a cor de uma gema bem como restaurar sua cor original ou até mesmo atenuar tons fortes ou enegrecidos em gemas irradiadas, não ultrapassando em média 400°C e podendo levar de minutos a horas aquecendo (FAVACHO, 2001; CGEE, 2010; ENOKIHARA, 2013). Trata-se de uma técnica comumente utilizada para transformar ametista do Rio Grande do Sul em citrino. Ressalta-se que o superaquecimento acidental nos materiais gemológicos por corte ou lapidação pode acarretar em perda da coloração, podendo ser restaurada com a irradiação (NASSAU, 1984). O tratamento térmico não necessariamente é realizado em fornos elétricos, mas também em fornos a lenha, lembrando que o material pode alterar a cor ao entrar diretamente em contato com uma chama de fogo, mas pode trincar e quebrar devido ao aquecimento rápido.


Turmalina – Silicato complexo de boro e alumínio, podendo possuir Ca, Na, Fe, Li e Mg. É um grupo de minerais de diversas cores, bicolorações e com fórmula química complexa.

Xisto – Rocha metamórfica constituída por minerais orientados, dentre eles micas (muscovita, biotita ou clorita), o que permite que possa ser dividida em fatias.

Fonte: Acelétron (s/d), Bonewitz (2013), Branco (2014), Klein e Dutrow (2012), Okuno (1988), Schumann (2006), Stabin (2007), Tauhata *et al.* (2014), Teixeira *et al.* (2000), Tilly Junior (2010) e Webmineral (s/d).

ANEXO

Anexo A – Relatório de ensaio (lado “a”) da Falcão Bauer referente a garantia do grau de pureza do chumbo adquirido para o experimento de irradiação gama seletiva. Análises de espectrofotometria de absorção atômica e espectroscopia de emissão em plasma.

 **Falcão Bauer**
Centro Tecnológico de Controle de Qualidade

Relatório de Ensaio nº QUI/L-231189/2/13
Página: 1 / 2

**GARANTIA DO GRAU DE
PUREZA DO CHUMBO REF.
NF Nº 3.062 (29/08/2014)
Cliente: FELIPE FOERSTNOW**

RELATÓRIO DE ENSAIO Nº QUI/L-231189/2/13

INTERESSADO **GRX SAO PAULO IND.E COM.LTDA.EPP.**
R CASA ILHA DA MADEIRA, 114 - MANDAQUI
CEP: 02441-180 - SAO PAULO - SP
Ref.: (57644)

1. IDENTIFICAÇÃO DA(S) AMOSTRA(S)

01 (Uma) Amostra de Chumbo identificada pelo interessado como: Am. 2 - Eletrolítico puro em chapas, tarugo, blocos, fio, vareta de solda, peça usinada, peça fundida, peça extrudada, anodo, lingote, barra sextavada e quadrada/ ASTM B29 DIN 1719 GRAU A e recebida pelo laboratório em 21/02/2013.

Identificação Interna: L-0091581

2. METODOLOGIA(S) UTILIZADA(S)

C-026-MTA / 0- Análise química de metal patente (solda)
D-004-MTA / 03 - Procedimento para Operação do Espectrômetro de Plasma Varian Modelo ICP/OES VISTA MPX
D-027-MTA / 0- Procedimento para operação do Espectrofotômetro de Absorção Atômica Agilent modelo 240FS

3. EQUIPAMENTO(S) UTILIZADO(S)

FB15545 - Espectrofotômetro de absorção atômica - Marca Agilent - Modelo 240FS
ICP - Espectrometro de Emissão em Plasma - Marca Varian - Modelo Vista-MPX

RECEBIOS
S/Paulo: _____ de _____ de 20____
GRX São Paulo Ind. e Com. Ltda.

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquinos, 111 - S.P. - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833 - FAX (11) 3611-017
Filiais: SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos • RJ: Macaé - Rio de Janeiro
www.falcaobauer.com.br - bauer@falcaobauer.com.br

Fonte: L. A. Falcão Bauer LTDA.

Anexo B – Relatório de ensaio (lado “b”) da Falcão Bauer referente a garantia do grau de pureza do chumbo adquirido para o experimento de irradiação gama seletiva. Análises de espectrofotometria de absorção atômica e espectroscopia de emissão em plasma.

Falcão Bauer
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

Relatório de Ensaio nº QUI/L-231189/2/13
Página: 2 / 2

4. RESULTADOS OBTIDOS

PARÂMETROS	UNIDADE	RESULTADOS
Alumínio	%	Não Detectado
Antimônio	%	Não Detectado
Arsênio	%	Não Detectado
Bismuto	%	0,0138
Cádmio	%	Não Detectado
Chumbo	%	99,9442
Cobalto	%	Não Detectado
Cobre	%	0,0228
Estanho	%	0,0036
Ferro	%	0,0047
Níquel	%	Não Detectado
Zinco	%	0,0050
Prata	%	0,0059

Observação: O elemento Pb foi calculado através da diferença entre a somatória dos valores obtidos dos elementos analisados e 100%. Pode haver variação neste resultado caso existam outros elementos que não foram determinados.

5. DATA DO(S) ENSAIO(S)
Ensaio realizado no período de 21/02/2013 a 11/03/2013.

São Paulo, 11 de março de 2013.

L.A. FALCÃO BAUER LTDA
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

L.A. FALCÃO BAUER LTDA
Centro Tecnológico de Controle da Qualidade

Verificado por: Amauri dos Santos
Técnico Químico
CRQ 04483097

Liberado por: ALESSANDRA ROSSI
Coordenadora de Laboratório
CRQ nº 04432101

Os resultados apresentados no presente documento referem-se exclusivamente à(s) amostra(s) ensaiada(s).
A reprodução deste documento somente poderá ser feita na íntegra e sua utilização para fins promocionais depende de aprovação prévia.

SÃO PAULO: Rua Aquinos, 111 - S.P. - CEP 05036-070 - FONE (11) 3611-0833 - FAX (11) 3611-0170
Filiais: SP: Bauru - Campinas - Santos - São José dos Campos - RJ: Macaé - Rio de Janeiro
www.falcaobauer.com.br - bauer@falcaobauer.com.br

Fonte: L. A. Falcão Bauer LTDA.

