UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**O *DESIGN* DE GEMAS ATRAVÉS DOS ENFOQUES:
MINERALOGIA, TRIBOLOGIA E *DESIGN***

Angela Vido Nadur

Orientador: Prof. Dr. Rainer Aloys Schultz Güttler

TESE DE DOUTORAMENTO

Programa de Pós-Graduação em Mineralogia e Petrologia

São Paulo

2014

Autorizo a reprodução e divulgação, total ou parcial, deste trabalho por qualquer meio convencional ou eletrônico para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Nadur, Angela Vido

O *Design* de Gemas através dos enfoques: Mineralogia, Tribologia e
Design / Angela Vido Nadur. – São Paulo, 2014.

229 p. : il.

=

Tese (Doutorado): IGc/USP

Orient.: Schultz-Güttler, Rainer Aloys

1. Lapidação de gemas 2. Gemologia 3. Rugosidade 4. Qualidade de
superfície I. Título

Agradeço com todo o meu coração, ao meu companheiro, Eder e ao nosso amado filhinho, Pedro. Nós representamos um time, em que o carinho, amor e dedicação são mútuos. Vocês são tudo para mim!

Aos meus amados pais, Elias e Cleide, que se dedicaram a mim com o amor mais puro e às minhas irmãs Soraia e Eliane, exemplos de dedicação e perseverança.

Ao meu querido orientador, sinceros sentimentos de gratidão, que desde o início acreditou em mim, apoiou-me a seguir adiante, esclarecendo todas as dúvidas e a realização de meu sonho. Muito Obrigada Prof. Rainer Aloys Schultz Güttler!

Agradecimentos

Durante os quatro anos de desenvolvimento desta tese, eu conheci muitas pessoas especiais e dedicadas no seu trabalho, que me ajudaram a adquirir o conhecimento que almejava.

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus familiares, tanto da parte materna, quanto da paterna, família Vido Nadur, família Vido Meneghelli e família Rodrigues dos Santos. Agradecimentos à revisora de língua portuguesa, Angela Detti.

No Instituto de Geociências, gostaria de agradecer aos professores que fizeram parte da minha vida acadêmica: Prof. Dr. Gergely Andres Júlio Szabó, Prof. Dr. Renato de Moraes, Prof. Dr. José Barbosa de Madureira Filho, Prof. Dr. Fabio Ramos Dias de Andrade, Prof. Dr. Daniel Atêncio, Prof. Dr. Silvio Roberto Farias Vlach, Profa. Dra. Mabel Norma Costas Ulbrich e Profa. Dra. Eliane Aparecida Del Lama. Ao grande amigo, Dr. Isaac Jamil Sayeg, que além das seções de MEV, auxiliou-me psicologicamente. Agradecimentos aos técnicos e amigos Jordana Acuña Zampelli, Magali Poli Fernandes Rizzo, Leonardo José Cappuci e Tadeu.

No Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS), obtive maravilhosa receptividade e acolhimento dos professores e estudantes que fazem pós-graduação. Imensos agradecimentos ao Prof. Dr. Prof. Dr. Amilton Sinatora, Luiz Alberto Franco, Enio Soares e Fabio do Nascimento.

No Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), devo agradecer a atenção prestada pelo Prof. Dr. Henrique Kahn e aos pesquisadores e amigos: M. Sc. Liz Zanchetta D'Agostino, Sheila Schuindt do Carmo, M. Sc. Juliana Livi, Freud Seigfreid Campbell e André Borges Braz.

Na Universidade de Arquitetura e Urbanismo, agradecimentos aos professores: Prof. Dr. Marcos da Costa Braga, Profa. Dra. Cyntia Malaguti e Prof. Dr. Lúcio Gomes Machado.

Durante a viagem à Alemanha, na *Fachhochschule Trier*, foi-me prestado grande apoio de Winfried Juchem, Prof. Theo Smeets, Profa. Üte Eitzenhofer, Prof. Lothar Brügel, Oranna Kamman, Renate Kley, Petr Dvorak, Hector Lasso e Anna Ameling.

No Laboratório Gemológico Alemão, *Deutsche Gemmologische Gesellschaft*, fui acolhida com grande atenção e com liberdade para pesquisa pelo Prof. Dr. Ulrich Henn e os amigos Martina Bank, Francisco Bank e Fabian.

No Departamento de Física Aplicada, recebi auxílio do Prof. Dr. Sergio Morelhão e Gaspar Darin a identificar meios para realização da pesquisa.

Aos amigos, que são como irmãos, do Conselheiro Crispiniano, do Camargo Aranha e da Faculdade São Judas Tadeu, que acompanharam toda a minha evolução e modificação de carreira, aos queridos: Ana Helena Baptista Rodrigues, Patrícia Tavares da Silva, Thaís Freitas, Emanuele Azevedo, Renata Miranda, Luciana Magalhães Ruffo, Caroline Panarotte, Jones Ishiki Siqueira, André Peluchi de Andrade e Leandro Henrique de Oliveira Almeida.

Os últimos agradecimentos aos meus amigos de troca de informações, conversas pessoais e vivência, Tatiana Ruiz Cavallaro Cordioli, Dr. Jurgen Schnellrath, Ana Piazza e Cassandra Terra Barbosa.

Agradecimentos a CAPES e ao DAAD que financiaram esta pesquisa.

*“Imagination is more important than
knowledge, because knowledge is limited,
whereas imagination embraces the entire
world and beyond– stimulating progress,
giving birth to evolution...”*

Albert Einstein

RESUMO

NADUR, A. V. **O *Design* de Gemas através dos enfoques: Mineralogia, Tribologia e *Design*.** 2014. 229p. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Esta tese tem como objetivo descrever o processo de desenvolvimento da gema lapidada, do início até o fim, abordando o comportamento dos minerais colocados em produção e sua aplicação no *Design*. O mineral gemológico foi submetido a processos mecânicos, comumente utilizados na lapidação de gemas, e analisados através da tribologia. A lapidação de gemas foi desenvolvida através de processos empíricos, em que pode ser descrita pela ciência através de fatores como tempo, velocidade de rotação, carga aplicada e padrões de qualidade de brilho são parâmetros julgados pelo lapidário e avaliados através de padrões visuais.

Neste trabalho, destacaram-se parâmetros mineralógicos preponderantes que possibilitaram a otimização da lapidação de gemas, como a relação da orientação cristalográfica com o polimento (dureza, direção de polimento); relação da composição química do mineral com os pós de polimentos e lubrificantes; sua influência na planicidade de superfície; determinação de propriedades ópticas em relação aos ângulos críticos aplicados nas faces do pavilhão, e itens preponderantes que referem-se ao *Design de Gemas*.

Foram utilizados seis conjuntos de minerais gemológicos, que ocorrem em abundância no Brasil e são largamente utilizados na indústria joalheria. São eles: granada, topázio, berilo, turmalina, espodumênio e quartzo. Os mesmos minerais foram lapidados no Brasil e na Alemanha. Foram feitos ensaios de brilho, rugosidade e comparações da qualidade da superfície em micrografias no Microscópio Eletrônico de Varredura. Análises complementares foram realizadas com os minerais e os pós de polimento, entre eles a microdureza Vickers nos diferentes eixos cristalográficos dos minerais e análise do pó de polimento quanto ao tamanho, formato e composição química. O objetivo foi identificar a melhor combinação de mineral, pó de polimento e ângulos de facetamento, através da qualidade da superfície e brilho.

É proposto ao final, a aplicação do conhecimento para a área de desenvolvimento em *Design* de Gemas. Os parâmetros de qualidade em lapidação, permitirão a evolução da compreensão do comportamento dos minerais perante seu processamento, admitindo possibilidades futuras de melhorias da qualidade e excelência para criação de novos formatos para a gema lapidada.

Palavras chave: Lapidação de gemas, Gemologia, Rugosidade, Qualidade de Superfície.

ABSTRACT

NADUR, A. V. **The Gemstone *Design* through the focus: Mineralogy, Tribology and *Design*.** 2014. 229p. Thesis (Doctor's Degree) – Institute of Geosciences. University of São Paulo, São Paulo.

This thesis aims to describe the procedure of gemstone cutting regarding its mineralogical characteristics, production and Design. Chosen gemstones underwent usual mechanical procedures for gemstone cutting and were then subject to tribology analysis. Gemstone cutting was developed through an empirical process, in which can be described by science with rotation speed, applied strength, and brightness are parameters judged by the lapidary and evaluated visually.

Herein the main mineralogical parameters that optimize gemstone cutting are emphasized, namely: crystallographic axes and polish orientation relationship (hardness, polishing direction); the choice of polishing powders and lubricants according to the mineral chemical composition; their influence on the flatness of surface; refraction indexes and critical angles (used to determine the ideal pavilion angles), and their applications concerning Design.

Six groups of gem minerals abundant in Brazil and vastly used in the jewelry industry were used for this study: garnet, topaz, beryl, tourmaline, spodumene and quartz. The cutting processes were performed both in Brazil and in Germany. The faceted gemstones brightness and roughness were determined and compared with SEM (Scanning Electron Microscope) micrographs. In addition, the minerals and polishing powder grains went through complementary analysis, such as: Vickers micro hardness tests on all crystallographic axes and evaluation of grain size, shape, chemical composition and its influence on flatness of surface, respectively. All tests were performed to better correlate minerals, polishing powders and faceting angles. The evaluation criteria included surface quality and light reflection standards.

Lastly, this thesis aims to apply the knowledge acquired in this work to develop Gemstone Design. Gemstone cutting quality standards allow for further comprehension of mineral “behavior” during its processing and open future possibilities on cutting quality enhancement and excellence to develop of new shapes for faceted gemstones.

Keyword: Gemstone Cutting, Gemology, Roughness, Quality of Surface.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS	5
3. MATERIAIS E MÉTODOS	6
4. A TÉCNICA DE LAPIDAÇÃO DE GEMAS NO BRASIL E NA ALEMANHA	11
5. O DESIGN DE GEMAS	17
5.1. DESENVOLVIMENTO DA FORMA	19
5.2. ESTÉTICA	20
5.3. GEOMETRIA - A PROPORÇÃO ÁUREA NA LAPIDAÇÃO	20
5.4. FUNCIONALIDADE DAS FACETAS	29
5.5. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO ATUAIS DE DIAMANTE	30
6. MINERAIS GEMOLÓGICOS TRATADOS NA TESE	31
6.1. GRANADA	34
6.2. TOPÁZIO	35
6.3. BERILO	37
6.4. TURMALINA	39
6.5. ESPODUMÊNIO	41
6.6. QUARTZO	42
7. DEFINIÇÃO DO TRIBOSSISTEMA	43
8. ANÁLISES ÓPTICAS	46
8.1. LUZ INCIDENTE, REFRACTADA E REFLETIDA.	47
8.2. DETERMINAÇÃO DOS MELHORES ÂNGULOS E PROPORÇÕES	49
8.2.1. REFLEXÃO COM FEIXE À LASER	53
8.2.2. GONIÔMETRO	56
8.2.3. DISPERSÃO	59

8.3. ORIENTAÇÃO CRISTALOGRÁFICA UTILIZANDO O POLARISCÓPIO	60
8.4. IDEAL SCOPE E REFLEXÃO TOTAL DA LUZ	64
9. ANÁLISES FÍSICAS	67
9.1. BRILHO	68
9.1.1. REFLECTIVITY METER PRESIDUM	68
9.1.1.1. Relação do índice de refração e valores do Refletômetro	70
9.2. EFEITO DA ABRASÃO E DO POLIMENTO	72
9.3. RUGOSIDADE	74
9.3.1. RUGOSÍMETRO KOSAKALAB	78
9.3.2. MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICA DCM3D	80
9.3.3. MEV – MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA	83
9.3.4. MEV-FEG	85
9.4. PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS GEMAS	86
9.4.1. TENACIDADE	87
9.4.1.1. Deformação	87
9.4.2. CLIVAGEM	88
9.4.3. DUREZA	89
9.4.3.1. Microdureza Vickers	90
9.4.3.2. Direções de polimento em função da anisotropia de dureza	98
10. RESULTADOS	101
10.1. PRÉ-FORMAÇÃO E FACETAMENTO	103
10.2. EXPERIÊNCIA DE POLIMENTO (CrODPbSn)	117
10.3. EXPERIMENTO DE POLIMENTO (CDPbSn / CDCuOL / CDPbSnAS)	118
10.4. EXPERIMENTOS DE POLIMENTO COM DIAMANTINE (AlO)	124
10.5. EXPERIMENTOS DE POLIMENTO COM GE6 (AlO)	127
10.6. DISCUSSÕES ENTRE OS EXPERIMENTOS DE POLIMENTO	130
10.7. METODOLOGIA E TRATAMENTO DE ANÁLISE DE SUPERFÍCIE	133
10.7.1. LUBRIFICANTES	135
10.7.2. TIPOS DE PÓS DE POLIMENTO	135
10.7.3. MÉTODOS DE ANÁLISE DOS PÓS DE POLIMENTO	136
10.7.3.1. Mastersize 2000, Malvern Ver. 5.54	137

10.7.3.2.	Difração de Raios X	142
10.7.3.3.	Fluorescência de Raios X	150
10.7.3.4.	MEV-FEG	153
11.	<u>DISCUSSÕES</u>	<u>167</u>
12.	<u>PROJETO DE <i>DESIGN</i> DE GEMAS NA FACHHOCHSCHULE TRIER</u>	<u>189</u>
13.	<u>CONCLUSÕES</u>	<u>192</u>
14.	<u>CONSIDERAÇÕES FUTURAS</u>	<u>195</u>
15.	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	<u>199</u>
	<u>APÊNDICE 1 – VALORES DE MICRODUREZA</u>	<u>206</u>
	<u>APÊNDICE 2 – MICROGRAFIAS EM MEV-FEG (AMOSTRAS POLIDAS COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO E ÓXIDO DE CÉRIO)</u>	<u>207</u>
	<u>APÊNDICE 3 – TABELAS COM VALORES DE RA OBTIDAS EM MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICADCM3D</u>	<u>213</u>
	<u>APÊNDICE 4 - UM POUCO DA HISTÓRIA DE IDAR-OBERSTEIN</u>	<u>216</u>
	<u>APÊNDICE 5 - APRESENTAÇÃO DO TEMA DA TESE NA FACHHOCHSCHULE TRIER</u>	<u>222</u>
	<u>ENTREVISTAS COM ALUNOS DA FACHHOCHSCHULE TRIER</u>	<u>223</u>
	<u>APÊNDICE 6 - EXPERIÊNCIAS EM OFICINAS E LABORATÓRIOS</u>	<u>227</u>

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - CICLO DE ITENS PESQUISADOS PARA O <i>DESIGN</i> DE GEMAS.	4
FIGURA 2 – DIMENSÕES DO CORPO-DE-PROVA.....	6
FIGURA 3 - EXEMPLIFICAÇÃO DAS AMOSTRAS DOS MINERAIS GEMOLÓGICOS. DA ESQUERDA PARA A DIREITA: GRANADA, TOPÁZIO, BERILO, TURMALINA, ESPODUMÊNIO E QUARTZO.	7
FIGURA 4 – RELAÇÃO DOS ITENS A SEREM ANALISADOS POR MEIOS ÓPTICOS E FÍSICOS.	10
FIGURA 5 - ETAPAS DA LAPIDAÇÃO FEITAS NO BRASIL. AS SIGLAS REPRESENTAM OS MATERIAIS E <i>MESHS</i> DESCRITOS ACIMA. AS CINCO PRIMEIRAS FOTOS REPRESENTAM A PRÉ-MOLDAGEM (SIC100, C120, C180, C220 E C600), EM SEGUIDA O FACETAMENTO (DC500) E AS ÚLTIMAS FOTOS, DISCOS DE POLIMENTO. O DISCO DE COBRE NÃO FOI UTILIZADO, NO BRASIL, PORÉM ESTÁ DEMONSTRADO NA FOTO PARA O CONHECIMENTO DO MATERIAL.....	15
FIGURA 6 - DESCRIÇÃO DE ETAPAS DE LAPIDAÇÃO DA ALEMANHA. OS DOIS PROCESSOS DE LAPIDAÇÃO ENCONTRAM-SE JUNTOS (LIVRE E FACETADO), SENDO AS PRIMEIRAS QUATRO IMAGENS AS ETAPAS DE PRÉ-MOLDAGENS, OS REBOLOS DE FELTRO COM ALO E CEO (POLIMENTO LAPIDAÇÃO LIVRE), DISCO DC500, FACETAMENTO, EM SEGUIDA, O DISCO DE PB/SN PARA O POLIMENTO FACETADO.....	16
FIGURA 7 - TRIÂNGULO PASCAL E A DEMONSTRAÇÃO DA SEQUÊNCIA DE FIBONACCI.....	21
FIGURA 8 - RETÂNGULO ÁUREO E SUA CONSTRUÇÃO RELACIONADA A SEQUÊNCIA DE FIBONACCI.....	22
FIGURA 9 - CONSTRUÇÃO DE RETÂNGULO ÁUREO ACIMA E SEGMENTO ÁUREO ABAIXO (IMAGEM SUPERIOR E INFERIOR).....	22
FIGURA 10 - REPRESENTAÇÃO DA CONCHA <i>CHAMBERED NAUTILUS</i> E SUA APLICAÇÃO NO RETÂNGULO ÁUREO.....	23
FIGURA 11 - CONVEXOS REGULARES E SUA RELAÇÃO COM O SEGMENTO ÁUREO.....	27
FIGURA 12 - PROPORÇÕES LAPIDAÇÃO BRILHANTE (BRUTON, 1978).	28
FIGURA 13 - DIAGRAMAS PARA FACETAR. O PONTO VERMELHO REPRESENTA O LIMITE ENTRE O 1 E O 1,618 NO SEGMENTO ÁUREO E ESTÃO APROXIMADOS DAS PROPORÇÕES IDEAIS. DE CIMA PARA BAIXO, FORMATO AMERICANA, PERA E CORAÇÃO (USFACETERSGUILD, 2014).	28
FIGURA 14 - À ESQUERDA, EFEITO VISUAL GERADO NA LAPIDAÇÃO BRILHANTE, E À DIREITA, TOPÁZIO LAPIDADO POR JIM PHILLIPS, COM A IMAGEM DAS ARESTAS EM DIREÇÕES DISCORDANTES PARA CADA FACETA.	30
FIGURA 15 - AMOSTRAS DE GRANADA UTILIZADAS NA TESE. A PRIMEIRA AMOSTRA, À ESQUERDA APRESENTA MORFOLOGIA ROMBODODECAEDRICA E AS DUAS, À DIREITA, ANÉDRICAS.	34
FIGURA 16 - PARTE DA ESTRUTURA DA GRANADA PROJETADA COM VISUALIZAÇÃO DO EIXO A1, MOSTRANDO A ESTRUTURA ALTERNADA DE TETRAEDROS E OCTAEDROS (FORMADOS) E DODECAEDROS (DESENHADOS COMO CUBOS DISTORCIDOS) COORDENADOS POR CÁTIOS. (DEER ET AL., 1992).	35
FIGURA 17 - TOPÁZIO IMPERIAL UTILIZADOS NA TESE EM FORMATOS EUÉDRICOS.	36

FIGURA 18 - CADEIA ESTRUTURAL DO TOPÁZIO, EM QUE OCTAEDROS DE AlO_4F_2 SÃO COMPARTILHADOS COM TETRAEDROS DE SiO_4 . EIXO C REPRESENTADO PELO EIXO Z DESCRITO NA FIGURA (DEER ET AL., 1992).	36
FIGURA 19 – AMOSTRAS DE BERILO (ÁGUA-MARINHA E MORGANITA) ADQUIRIDOS PARA ESTA TESE. ...	37
FIGURA 20 – ORGANIZAÇÃO ATÔMICA PROJETADA NO PLANO BASAL {0001} (TRÖGER, 1972; DEER ET AL., 1992).	38
FIGURA 21 – TURMALINA (VERDELITA, RUBELITA E BICOLORES) UTILIZADAS NA TESE.	39
FIGURA 22 - ORGANIZAÇÃO ATÔMICA PROJETADA PERPENDICULAR AO EIXO C (TRÖGER, 1979; KLEIN E HURLBUT, 1993).	40
FIGURA 23 - ESPODUMÊNIO HIDENITA UTILIZADOS NESTA TESE.	41
FIGURA 24 - ARRANJO ATÔMICO, VISTA SUPERIOR E VISTA LATERAL, EM QUE OS TETRAEDROS DE COR CINZA REPRESENTAM AS CADEIAS DE SiO_3 E OS OCTAEDROS DE COR VERDE E ESFERAS PORÇÕES DE LI E AL, RESPECTIVAMENTE (GEOARIZONA, 2011).	41
FIGURA 25- DEMONSTRAÇÃO DE ESPODUMÊNIO ANTES DA SEPARAÇÃO DE PARTES PÓS CLIVAGEM, MEDIDAS EM GONIÔMETRO.	42
FIGURA 26 – AMOSTRAS DE QUARTZO AMETISTA, HIALINO E CITRINO ANÉDRICOS OU SUBÉDRICOS UTILIZADAS NA TESE.	42
FIGURA 27 - ORGANIZAÇÃO ATÔMICA, TENDO O QUARTZO A À ESQUERDA (TRIGONAL) E QUARTZO B À DIREITA (HEXAGONAL) (TRÖGER, 1979; CAMBRIDGE, 2011).	43
FIGURA 28 - SEQUÊNCIA TRIBOLÓGICA ADEQUADA PARA A LAPIDAÇÃO DE GEMAS.	44
FIGURA 29 - RELAÇÃO DOS ITENS ANALISADOS E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.	45
FIGURA 30 – REFLEXÕES DE LUZ DE MANEIRA ESPECULAR E DIFUSA (OPTICAMPUS.COM, 2014).	48
FIGURA 31 - REPRESENTAÇÃO DA REFLEXÃO E REFRAÇÃO DA LUZ (FÍSICA-UFPR, 2014).	49
FIGURA 32 - REPRODUÇÃO DO ESTUDO DE ÂNGULOS DE INCIDÊNCIA, REFRAÇÃO, REFLEXÃO E ÂNGULO CRÍTICO A PARTIR DE UM EIXO (TOLKOWSKY, 1919).	52
FIGURA 33 - EXPERIMENTO RELATADO POR LENZEN (1984) (ESQUERDA) E EQUIPAMENTO UTILIZADO NO DGEMG (DIREITA).	53
FIGURA 34 - AMOSTRA DE GRANADA COM LUZ REFLETIDA VISTA LATERALMENTE E EM PERSPECTIVA. É POSSÍVEL VERIFICAR O MINERAL ACESO PELA REFLEXÃO TOTAL DA LUZ.	54
FIGURA 35 - AMOSTRA DE TOPÁZIO COM LUZ REFLETIDA LATERALMENTE E EM PERSPECTIVA.	55
FIGURA 36 - AMOSTRA DE BERILO COM LUZ REFLETIDA LATERALMENTE E EM PERSPECTIVA.	55
FIGURA 37 - AMOSTRA DE TURMALINA COM LUZ REFLETIDA LATERALMENTE E EM PERSPECTIVA.	55
FIGURA 38 - AMOSTRA DE ESPODUMÊNIO COM LUZ REFLETIDA LATERALMENTE E EM PERSPECTIVA.	55
FIGURA 39 - AMOSTRA DE QUARTZO COM LUZ REFLETIDA LATERALMENTE E EM PERSPECTIVA.	55
FIGURA 40 - REFLEXÃO TOTAL DA LUZ NA MESMA SUPERFÍCIE DE INCIDÊNCIA, EM ÂNGULOS MAIORES QUE 90° EM RELAÇÃO À SUPERFÍCIE.	56
FIGURA 41 - GONIÔMETRO - DEUTSCHE GEMMOLOGISCHE GESELLSCHAFT.	56

FIGURA 42 - CATRACA DE GRADUAÇÃO DE ÂNGULOS, MARCA OTTO EIGNER E LOCALIZAÇÃO DO NÔNIO À ESQUERDA.	57
FIGURA 43 - TUBO OCULAR COM REFLEXÃO COLIMADA (ESQUERDA) E BARRA CENTRAL COM MINERAL PRISMÁTICO POSICIONADO (DIREITA).....	58
FIGURA 44 - EXEMPLIFICAÇÃO DE GRAUS (ACIMA) E NÔNIOS (ABAIXO) DO GONIÔMETRO COM A MEDIÇÃO DE 227°13'	58
FIGURA 45 - POLARISCÓPIO SCHNEIDER UTILIZADO EM <i>DEUTSCHE GEMMOLOGISCHE GESELLSCHAFT</i> . .60	
FIGURA 46 - GRANADA, MINERAL ISOTRÓPICO, SEM ALTERAÇÕES NAS QUATRO POSIÇÕES.	62
FIGURA 47 - ROTAÇÃO DE TOPÁZIO A 360° E POSICIONAMENTO PERPENDICULAR COINCIDENTE COM O EIXO ÓPTICO (TRÊS ÚLTIMAS IMAGENS). MINERAL BIAxIAL, ÂNGULO 2V 48-68° (REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA), NÃO É POSSÍVEL VER A SEPARAÇÃO DAS ISÓGERAS.....	62
FIGURA 48 - IDENTIFICAÇÃO DO BERILO ATRAVÉS DE EIXO ÓPTICO E ROTAÇÃO EM POSIÇÃO PERPENDICULAR. IDENTIFICAÇÃO DO EIXO ÓPTICO NA PRIMEIRA IMAGEM À ESQUERDA. MINERAL UNIAxIAL.	62
FIGURA 49 - TURMALINA MELANCIA ROTACIONADA A 360° E IDENTIFICAÇÃO DE EIXO ÓPTICO NO EIXO C (TRÊS ÚLTIMAS IMAGENS).	63
FIGURA 50 - ESPODUMÊNIO - IDENTIFICAÇÃO DE EIXO ÓPTICO EM TODAS AS IMAGENS E ROTAÇÃO EM 360°. MINERAL BIAxIAL, NÃO FOI POSSÍVEL SUA VISUALIZAÇÃO EM LENTE CONOSCÓPICA.....	63
FIGURA 51 - QUARTZO HIALINO ANALISADO PERPENDICULAR AO EIXO ÓPTICO E IDENTIFICAÇÃO DE EIXO ÓPTICO NO EIXO C. (QUATRO ÚLTIMAS IMAGENS)	63
FIGURA 52 – DIAMOND CUT PROPORTION OU IDEALSCOPE®- DGEMG.	64
FIGURA 53 - EFEITOS DE VISUALIZAÇÃO DO IDEALSCOPE® (PRINCESCOPE.COM, 2014)	65
FIGURA 54 – RELAÇÃO DE REFLETIVIDADES DEMONSTRADA POR IDEALSCOPE®	65
FIGURA 55 - PROPORÇÕES VARIADAS EM LAPIDAÇÃO BRILHANTE. DIAMANTE (ACIMA) E ZIRCÔNIA CÚBICA (ABAIXO).	66
FIGURA 56 - EQUIPAMENTO REFLECTIVITY METER DA MARCA PRESIDUM.....	69
FIGURA 57 – REPRESENTAÇÃO DO AUMENTO DE REFLETIVIDADE CONFORME AUMENTO DE ÍNDICE DE REFRAÇÃO.....	70
FIGURA 58 – DESCRIÇÃO DO PROCESSO DE POLIMENTO E ALTERAÇÃO DA SUPERFÍCIE PARA (A) CAMADA AMORFA OU MICROCRISTALINA – BEILBY (B) AMORFISMO PONTUAL (C) DEFORMAÇÃO PLÁSTICA COM O AMASSAMENTO DA ESTRUTURA CRISTALINA E (D) DESTACAMENTO E RECOMBINAÇÃO DE ESTRUTURA CRISTALINA.	73
FIGURA 59 - SUPERFÍCIE DAS AMOSTRAS DE GRANADA NA ETAPA DE DESBASTE COM REBOLO DIAMANTADO (A) E NA ETAPA DE POLIMENTO COM PÓ DE DIAMANTE, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO, ÁGUA E SABÃO (B).....	74
FIGURA 60 – REPRESENTAÇÃO DA ÁREA REAL DE CONTATO E ÁREA APARENTE DE CONTATO, EM QUE AA APRESENTA A ÁREA TOTAL E AR, ÁREA DE CONTATO (STOTERAU, 2004).	75

FIGURA 61 - (A) PERFIL DE SUPERFÍCIE REAL, COM GRANDE MAGNITUDE. (B) (C) COMPRESSÃO DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS EM ESCALAS 1:5 E 1:50 E MANEIRA COMO É APRESENTADA NOS GRÁFICOS (HUTCHINGS, 1992).	76
FIGURA 62 – DIÂMETRO GROSSEIRO DA PONTA <i>STYLUS</i> ANALISANDO PICOS E VALES.	76
FIGURA 63 - DEFINIÇÃO DE RA, MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE PICOS E VALES (STOTERAU, 2004).	77
FIGURA 64 - RUGOSÍMETRO KOSAKALAB SURFCORDER SE1700A – LFS.	78
FIGURA 65 - EQUIPAMENTO PARA PLANIFICAR SUPERFÍCIE DE MEDIÇÃO SOBRE MASSA PLÁSTICA.....	79
FIGURA 66 - EQUIPAMENTO MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICA DCM3D (LCT - LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA).....	80
FIGURA 67 - IMAGEM 3D CRIADA NO LEICAMAP DCM3D MOSTRANDO A INCLINAÇÃO DO TOPÁZIO POLIDO COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO COM DEGRADÊ DE CORES ENTRE O AZUL ESCURO E O VERMELHO, EM QUE A PARTE AZUL É A PARTE MAIS BAIXA, E VERMELHA, A MAIS ALTA.	81
FIGURA 68 - TABELA DEMONSTRATIVA DOS PARÂMETROS OBTIDOS EM CADA ANÁLISE E LEITURA LINEAR PARA GERAÇÃO PERFIL DE RUGOSIDADE (PERPENDICULAR À DIREÇÃO DO POLIMENTO).	81
FIGURA 69 - PERFIL DE RUGOSIDADE GERADO PELO MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICA DCM3D PARA CADA PONTO DE MEDIÇÃO.	81
FIGURA 70 - LOCALIZAÇÃO DOS SINAIS EMITIDOS PELA AMOSTRA E RELAÇÃO DE VOLTAGEM PARA ELEMENTOS LEVES E PESADOS (DEDAVID, 2007).	84
FIGURA 71 - TIPOS DE EMISSORES DE ELÉTRONS (A) FILAMENTO DE TUNGSTÊNIO (B) HEXABORETO DE LANTÂNIO (C) FEG – FIELD EMISSION (AUSTRALIAN MICROSCOPY, 2014).	85
FIGURA 72 - TIPOS DE DEFORMAÇÃO EM RELAÇÃO À TENACIDADE. (A) FRÁGIL (B) FRÁGIL-DÚCTIL (C)FRÁGIL-DÚCTIL (D) APENAS DÚCTIL (ERI-U, 2014).	87
FIGURA 73- COMPORTAMENTO DA DUREZA NOS EIXOS CRISTALOGRAFÍCOS (CORRENS, 1969).	90
FIGURA 74 - MICRÔMETRO MICROMET 2100. (LFS – LABORATÓRIO DE FENÔMENOS DE SUPERFÍCIE)... ..	91
FIGURA 75 – AMOSTRAS EMBUTIDAS EM RESINA ACRÍLICA MOSTRANDO EM CADA FACE APARENTE A FACE DO EIXO CRISTALOGRAFÍCO (A) GRANADA (B) TOPÁZIO (C) BERILO (D) TURMALINA (E) ESPODUMÊNIO E (F) QUARTZO.	91
FIGURA 76 – ESQUEMA DO PERFIL DO ENDENTADOR E DAS MEDIDAS DAS IMPRESSÕES DIAGONAIS (ILUIC, 1980).....	92
FIGURA 77 - IMAGEM SUPERIOR, ZONAS OU INTERVALOS DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE MATERIAIS. SISTEMA DE FRATURAMENTO ATRAVÉS DO ENDENTADOR (A) FRATURAS RADIAIS (B) FRATURAS LATERAIS (C) FRATURAS AO MEIO (D) FRATURA SEMICIRCULAR (FISCHER-CRIPPS, 2007).	93
FIGURA 78 - IMPRESSÕES RESIDUAIS FEITAS COM ENDENTADOR PIRAMIDAL DE DIAMANTE DE BASE QUADRADA. (A) IMPRESSÃO NORMAL (B) ABAOLADA PARA DENTRO (PILE-UP – MATERIAL ELÁSTICO OU MALEÁVEL) (C) ABAOLADA PARA FORA (MATERIAL DURO - SINK-IN) (FISCHER-CRIPPSS, 2007).	94

FIGURA 79 – IMPRESSÕES PILE-UP EM MINERAIS GEMOLÓGICOS (A) GRANADA 100G (110), (B) TOPÁZIO 100G – (EIXO B), (C) BERILO 100G (EIXO A1), (D) TURMALINA 100G (EIXO A1), (E) ESPODUMÊNIO 100G (110 – PLANO PARALELO A CLIVAGEM), (F) QUARTZO 100G (110).....	94
FIGURA 80 – VALORES DE HV (HARD VICKERS) NOS DIFERENTES EIXOS CRISTALOGRAFÍCOS DA GRANADA. A GRANADA POSSUI ESTRUTURA CRISTALINA CÚBICA E A DIFERENÇA DE DUREZA NOS DIFERENTES EIXOS SÃO DIFERENTES, PORÉM APROXIMADOS.....	96
FIGURA 81 - VALORES DE HV NOS DIFERENTES EIXOS CRISTALOGRAFÍCOS DO TOPÁZIO.	96
FIGURA 82 - VALORES DE HV NOS DIFERENTES EIXOS CRISTALOGRAFÍCOS DO BERILO.	96
FIGURA 83- VALORES DE HV NOS DIFERENTES EIXOS CRISTALOGRAFÍCOS DA TURMALINA.	97
FIGURA 84- VALORES DE HV NOS DIFERENTES EIXOS CRISTALOGRAFÍCOS DO ESPODUMÊNIO.	97
FIGURA 85- VALORES DE HV NOS DIFERENTES EIXOS CRISTALOGRAFÍCOS DO QUARTZO.	98
FIGURA 86 – RACIOCÍNIO DE ANÁLISES NAS ETAPAS DE PRÉ-FORMAÇÃO, POLIMENTO E DISCUSSÕES AO FINAL.....	102
FIGURA 87 – IMPERFEIÇÕES NA SUPERFÍCIE DO DISCO DE FACETAMENTO DECORRENTE DO TRABALHO EXAUSTIVO.....	104
FIGURA 88 – PERFIS DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS DE GRANADA. VALORES DE RA: SIC100 (0.883), C120 (1.869), C180 (1.684), C220 (0.659), C600 (1.043), DC500 (0.363).	105
FIGURA 89 – EVOLUÇÃO DAS ETAPAS DE PRÉ-FORMAÇÃO EM AMOSTRAS DE GRANADA EM QUE É POSSÍVEL VERIFICAR FRATURAS CONCHOIDAIAS NAS FIGURAS (C) E (D) E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NA ÚLTIMA ETAPA DE FACETAMENTO (F) (3.000X). ETAPAS (A)SIC100 (B)C120 (C)C180 (D)C220 (E)C600 (F)DC500.	106
FIGURA 90 - PERFIS DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS DE TOPÁZIO. VALORES DE RA: SIC100 (0.594), C120 (3.903), C180 (3.671), C220 (0.569), C600 (1.053), DC500 (0.536).....	107
FIGURA 91 - EVOLUÇÃO DAS ETAPAS DE PRÉ-FORMAÇÃO EM AMOSTRAS DE TOPÁZIO EM QUE É POSSÍVEL VERIFICAR FEIÇÕES DE CLIVAGEM NAS IMAGENS DE (A) ATÉ (D) E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NAS DUAS ÚLTIMAS ETAPAS (E) E (F) (3.000X). ETAPAS (A)SIC100 (B)C120 (C)C180 (D)C220 (E)C600 (F)DC500.	108
FIGURA 92 - PERFIS DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS DE BERILO. VALORES DE RA: SIC100 (0.975), C120 (2.198), C180 (4.017), C220 (0.961), C600 (0.936), DC500 (0.513).....	109
FIGURA 93 - EVOLUÇÃO DAS ETAPAS DE PRÉ-FORMAÇÃO EM AMOSTRAS DE BERILO EM QUE É POSSÍVEL VERIFICAR FRATURAS CONCHOIDAIAS NAS IMAGENS (A) ATÉ (D) E DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NAS TRÊS ÚLTIMAS ETAPAS (D) ATÉ (F) (3.000X). ETAPAS (A)SIC100 (B)C120 (C)C180 (D)C220 (E)C600 (F)DC500.	110
FIGURA 94 - PERFIS DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS DE TURMALINA. VALORES DE RA: SIC100 (1.731), C120 (1.667), C180 (3.380), C220 (0.776), C600 (1.186), DC500 (0.711).	111
FIGURA 95 - EVOLUÇÃO DAS ETAPAS DE PRÉ-FORMAÇÃO EM AMOSTRAS DE TURMALINA EM QUE É POSSÍVEL VERIFICAR FEIÇÕES DE DEFORMAÇÃO PLÁSTICA DESDE A PRIMEIRA ETAPA (3.000X). ETAPAS (A)SIC100 (B)C120 (C)C180 (D)C220 (E)C600 (F)DC500.	112

FIGURA 96 - PERFIS DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS DE ESPODUMÊNIO. VALORES DE RA: SIC100 (1.032), C120 (0.993), C180 (3.854), C220 (0.652), C600 (0.890), DC500 (0.611).	113
FIGURA 97 - EVOLUÇÃO DAS ETAPAS DE PRÉ-FORMAÇÃO EM AMOSTRAS DE ESPODUMÊNIO EM QUE É POSSÍVEL VERIFICAR FEIÇÕES DE CLIVAGEM EM UMA E DUAS DIREÇÕES. A DEFORMAÇÃO PLÁSTICA É VISTA APENAS A IMAGEM (D) (3.000X). ETAPAS (A)SIC100 (B)C120 (C)C180 (D)C220 (E)C600 (F)DC500.	114
FIGURA 98 - PERFIS DE RUGOSIDADE PARA AS AMOSTRAS DE QUARTZO. VALORES DE RA: SIC100 (0.576), C120 (1.587), C180 (3.197), C220 (0.520), C600 (1.160), DC500 (0.189).	115
FIGURA 99 - EVOLUÇÃO DAS ETAPAS DE PRÉ-FORMAÇÃO EM AMOSTRAS DE QUARTZO É POSSÍVEL VERIFICAR FRATURAS DIVERSAS E NENHUMA DEFORMAÇÃO PLÁSTICA (3.000X). ETAPAS (A)SIC100 (B)C120 (C)C180 (D)C220 (E)C600 (F)DC500.	116
FIGURA 100 - AMOSTRAS POLIDAS COM CRO E DISCO DE CHUMBO E ESTANHO NO BRASIL. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).....	118
FIGURA 101 - GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DA RUGOSIDADE EM MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICA DCM3D, UTILIZANDO OS MATERIAIS GEMOLÓGICOS ANALISADOS NESTA TESE, COM O PÓ DE DIAMANTE, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÓLEO DE SOJA NO BRASIL, PÓ DE DIAMANTE, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA E SABÃO NA ALEMANHA, INDICA QUE O POLIMENTO COM ÓLEO DE OLIVA PODE SER EFICIENTE PARA O POLIMENTO DE GRANADA, TOPÁZIO E QUARTZO.	120
FIGURA 102 - AMOSTRAS POLIDAS COM C E DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÓLEO DE SOJA NO BRASIL. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).....	121
FIGURA 103 - AMOSTRAS POLIDAS COM C E DISCO DE COBRE E ÓLEO DE OLIVA NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).....	122
FIGURA 104 - AMOSTRAS POLIDAS COM C E DISCO DE CHUMBO E ESTANHO, ÁGUA E SABÃO NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).	123
FIGURA 105 - GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DA RUGOSIDADE EM MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICA DCM3D, UTILIZANDO OS MATERIAIS GEMOLÓGICOS ANALISADOS NESTA TESE, COM DIAMANTINE, DISCO DE CHUMBO/ESTANHO E ÁGUA, E DIAMANTINE, DISCO DE CHUMBO/ESTANHO, ÁGUA E LIMÃO AMBOS NA ALEMANHA, INDICA QUE O USO DE LIMÃO FOI EFICAZ PARA TODOS OS MINERAIS COM EXCEÇÃO DO QUARTZO.	124
FIGURA 106 - AMOSTRAS POLIDAS COM DIAMANTINE E DISCO DE CHUMBO E ESTANHO, ÁGUA E LIMÃO NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).	125

FIGURA 107 - AMOSTRAS POLIDAS COM DIAMANTINE E DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).	126
FIGURA 108-GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DA RUGOSIDADE EM MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICA DCM3D, UTILIZANDO OS MATERIAIS GEMOLÓGICOS ANALISADOS NESTA TESE, COM GE6, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA, E GE6, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO, ÁGUA E SABÃO AMBOS NA ALEMANHA, INDICANDO O USO DO SABÃO ADICIONADO AO LUBRICANTE EFICIENTE PARA O BERILO, TURMALINA, ESPODUMÊNIO E QUARTZO.	127
FIGURA 109 - AMOSTRAS POLIDAS COM GE6, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).....	129
FIGURA 110 - AMOSTRAS POLIDAS COM GE6, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO, ÁGUA E SABÃO NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).	130
FIGURA 111 - COMPARAÇÃO DE POLIMENTO (PLANICIDADE DE SUPERFÍCIE-RA) COM O USO DE PÓS DE POLIMENTO UTILIZADOS NESTA TESE.	132
FIGURA 112 - COMPARAÇÃO DE TAMANHO DE GRÃOS DE POLIMENTO DE TODOS OS PÓS UTILIZADOS NESTA TESE, COM AS MICROGRAFIAS EM MEV-FEG.....	133
FIGURA 113 – RELAÇÃO DA MORFOLOGIA DOS GRÃOS. TODAS AS MICROGRAFIAS POSSUEM O MESMO AUMENTO (50.000X) COM EXCLUSÃO DAS QUE INDICAM AOS AUMENTOS COM 70.000X.....	133
FIGURA 114 - GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DO TAMANHO DOS GRÃOS DE POLIMENTO EM MICRÔMETROS DO VOLUME TOTAL NO BRASIL.	138
FIGURA 115 - GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NO BRASIL.	139
FIGURA 116 - GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DO TAMANHO DOS GRÃOS DE POLIMENTO NA ALEMANHA.	140
FIGURA 117 - GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS NA ALEMANHA.....	140
FIGURA 118 - GRÁFICO DE REPRESENTAÇÃO DO TAMANHO DAS PARTÍCULAS COM COMBINAÇÕES DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO COM OUTROS MATERIAIS PARA CONFERIR O PODER DE AGLOMERAÇÃO.	142
FIGURA 119 – DIFRATOMETRIA DO ÓXIDO DE ALUMÍNIO DO BRASIL EM COMPARAÇÃO COM A FICHA 01-081-2266 (ALUMINIUM OXIDE).	144
FIGURA 120 - DIFRATOMETRIA DO ÓXIDO DE CÉRIO DO BRASIL EM COMPARAÇÃO COM AS FICHAS - 01-081-0792 CERIUMOXIDE CEO ₂ , 01-089-5168 LANTHANUM OXIDE LAOF, 01-083-0652 MONAZITE.	145
FIGURA 121 - DIFRATOMETRIA DO ÓXIDO DE CROMO DO BRASIL EM COMPARAÇÃO COM A FICHA CHROMIUM OXIDE.....	145
FIGURA 122 - DIFRATOMETRIA DO PÓ DE DIAMANTE DO BRASIL EM COMPARAÇÃO COM AS FICHAS 01-075-0624 (DIAMOND), 01-085-0794(QUARTZO).....	146

FIGURA 123 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO DA ALEMANHA EM DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.	147
FIGURA 124 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO (GE6) DA ALEMANHA EM DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.	147
FIGURA 125 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO PÓ DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO (DIAMANTINE) DA ALEMANHA, EM DIFRATOMETRIA DE RAIOS X.	148
FIGURA 126 - REPRESENTAÇÃO DIFRATOMÉTRICA DO ÓXIDO DE CÉRIO DA ALEMANHA EM COMPARAÇÃO COM A FICHA 01-089-8435 CERIUM OXIDE; CE11O20.	148
FIGURA 127 - REPRESENTAÇÃO DIFRATOMÉTRICA DO CARBETO DE SILÍCIO DA ALEMANHA EM COMPARAÇÃO COM A FICHA SILICON CARBIDE.	149
FIGURA 128 - REPRESENTAÇÃO DIFRATOMÉTRICA DO PÓ DE DIAMANTE DA ALEMANHA EM COMPARAÇÃO COM A FICHA DIAMOND.	150
FIGURA 129 - MICROGRAFIAS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO OBTIDO NO BRASIL (A) 500X (B) 4.000X (C) 7.000X (D) 16.000X (E) 30.000X (F) 50.000X.	154
FIGURA 130 - GRÁFICO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PONTUAL GERADO POR EDS EM ÓXIDO DE ALUMÍNIO DO BRASIL.	155
FIGURA 131 - MICROGRAFIAS DE ÓXIDO DE CÉRIO OBTIDAS NO BRASIL (A) 20.000X (B) 30.000X (C) 50.000X (D) 100.000X.	156
FIGURA 132 - GRÁFICO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PONTUAL GERADO POR EDS EM ÓXIDO DE CÉRIO DO BRASIL.	156
FIGURA 133 - MICROGRAFIAS DE ÓXIDO DE CROMO OBTIDOS NO BRASIL (A) 20.000X (B) 30.000X (C) 30.000X (D) 50.000X.	157
FIGURA 134 - GRÁFICO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PONTUAL GERADO POR EDS EM ÓXIDO DE CROMO DO BRASIL.	158
FIGURA 135 - MICROGRAFIAS DE PÓ DE DIAMANTE OBTIDOS NO BRASIL (A) 5.000X (B) 13.000X (C) 30.000X (D) 50.000X.	159
FIGURA 136 - GRÁFICO DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA PONTUAL GERADO POR EDS EM PÓ DE DIAMANTE DO BRASIL.	159
FIGURA 137 - MICROGRAFIA DE CARBETO DE SILÍCIO ORIGINÁRIO DA ALEMANHA (A) 400X (B) 5.000.	160
FIGURA 138 - RELAÇÃO DE FASES QUÍMICAS EM ANÁLISE PONTUAL DE EDS DO CARBETO DE SILÍCIO ADQUIRIDO NA ALEMANHA.	160
FIGURA 139 - MICROGRAFIAS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO OBTIDO NA ALEMANHA (A) 400X (B) 5.000X (C) 15.000X (D) 50.000X.	161
FIGURA 140 - EDS DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO OBTIDO NA ALEMANHA.	162
FIGURA 141 - MICROGRAFIAS DE DIAMANTINE, UTILIZADO NA ALEMANHA (A) 400X (B) 20.000X (C) 20.000X (D) 50.000X.	162
FIGURA 142 - EDS DE MATERIAL DIAMANTINE OBTIDO NA ALEMANHA.	163

FIGURA 143 – MICROGRAFIAS DO MATERIAL GE6 UTILIZADO NA ALEMANHA (A)400X (B)5.000X (C)20.00X (D)100.000X.....	163
FIGURA 144 – EDS DO MATERIAL GE6 COM FASES QUÍMICAS EM ÓXIDO DE ALUMÍNIO. MATERIAL OBTIDO NA ALEMANHA.	164
FIGURA 145 - MICROGRAFIAS DE CEO UTILIZADO EM OFICINA NA ALEMANHA (A)10.000X (B)30.000X (C)70.000X (D)100.000X.....	165
FIGURA 146 - EDS DO MATERIAL CEO OBTIDOS NA ALEMANHA E IDENTIFICAÇÃO DE FASES QUÍMICAS EM CE E LA.	165
FIGURA 147 - MICROGRAFIA DE PÓ DE DIAMANTE SAINT-GOBAIN UTILIZADO NA ALEMANHA (A)10.000X (B)50.000X.....	166
FIGURA 148 - EDS DE PÓ DE DIAMANTE OBTIDO NA ALEMANHA, COM FASE QUÍMICA EM CARBONO.	166
FIGURA 149 - GRÁFICO DE VALORES DE RA OBTIDOS POR PROCESSOS DE POLIMENTO NO BRASIL.	168
FIGURA 150 - GRÁFICO DE VALORES DE RA OBTIDOS POR PROCESSOS DE POLIMENTO NA ALEMANHA.	169
FIGURA 151 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA GRANADA NO BRASIL....	170
FIGURA 152 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA GRANADA NA ALEMANHA.	171
FIGURA 153 - SUPERFÍCIE DE GRANADA POLIDA COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO NO BRASIL (A). A FIGURA À DIREITA MOSTRA UMA IMAGEM DO PÓ DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO (B).	172
FIGURA 154 -SUPERFÍCIE DE GRANADA POLIDA NA ALEMANHA COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA (A). A FIGURA À DIRETA MOSTRA MICROGRAFIA DO PÓ DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO(B).	172
FIGURA 155 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA O TOPÁZIO NO BRASIL. .	174
FIGURA 156 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA O TOPÁZIO NA ALEMANHA.	174
FIGURA 157 - SUPERFÍCIE DA AMOSTRA DE TOPÁZIO POLIDO NO BRASIL, COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE ESTANHO E ÁGUA (A) E TOPÁZIO POLIDO NA ALEMANHA, COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA (B).	175
FIGURA 158 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA O BERILO NO BRASIL.	176
FIGURA 159 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA O BERILO NA ALEMANHA.	177
FIGURA 160 - SUPERFÍCIE DO BERILO POLIDO NO BRASIL COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE ESTANHO E ÁGUA (A) E BERILO POLIDO NA ALEMANHA COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA (B).	178
FIGURA 161 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO A TURMALINA NO BRASIL.	179
FIGURA 162 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA A TURMALINA NA ALEMANHA.	180

FIGURA 163 - SUPERFÍCIE DE TURMALINA POLIDA NO BRASIL COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE ESTANHO E ÁGUA (A) E TURMALINA POLIDA NA ALEMANHA COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA (B).....	180
FIGURA 164 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA O ESPODUMÊNIO NO BRASIL.	182
FIGURA 165 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA GRANADA NA ALEMANHA.	182
FIGURA 166 - SUPERFÍCIE DE ESPODUMÊNIO POLIDO NO BRASIL COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE ESTANHO E ÁGUA (A) E SUPERFÍCIE POLIDA NA ALEMANHA COM ÓXIDO DE ALUMÍNIO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA (B).....	183
FIGURA 167 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA O QUARTZO NO BRASIL.	184
FIGURA 168 - GRÁFICO DE DEMONSTRAÇÃO DOS VALORES DE BRILHO PARA O QUARTZO NA ALEMANHA.	185
FIGURA 169 - SUPERFÍCIE DE (A) QUARTZO POLIDO NO BRASIL COM ÓXIDO DE CÉRIO, DISCO DE ESTANHO E ÁGUA (B) PÓ DE ÓXIDO DE CÉRIO OBTIDO NO BRASIL (C) SUPERFÍCIE POLIDA COM ÓXIDO DE CÉRIO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA (D) PÓ DE ÓXIDO DE CÉRIO OBTIDO NA ALEMANHA.	186
FIGURA 170 - GONIÔMETRO PORTÁTIL EM QUE O MINERAL É LOCALIZADO ENTRE O EIXO FLEXÍVEL E A BASE DO TRANSFERIDOR DE GRAU.....	189
FIGURA 171 - EXEMPLO DE REFRAÇÃO E REFLEXÃO DE LUZ, EM QUE DUAS ESFERAS CRIADAS NA ARESTA AO FUNDO DO CUBO, APARECEM REFLETIDAS NA FACE DA BASE E REFRAATADAS NA FACE SUPERIOR E LATERAL DIREITA (LINDEMANN, 2012).	190
FIGURA 172 - IDEALSCOPE® PRODUZIDO MANUALMENTE.	191
FIGURA 173 - IMAGENS DE OITO AMOSTRAS DE QUARTZO LAPIDADOS NA FACHHOCHSCHULE TRIER SUBMETIDOS À ANÁLISE COM IDEALSCOPE® E À OBSERVAÇÃO DE SUAS REFLEXÕES (FORA DO CONE À ESQUERDA E DENTRO DO CONE À DIREITA).....	191
FIGURA 174 - AMOSTRAS POLIDAS COM CEO E DISCO DE ESTANHO NO BRASIL. (A) GRANADA-20.000X, (B) TOPÁZIO-50.000X, (C) BERILO 50.000X, (D) TURMALINA-20.000X, (E) ESPODUMÊNIO-20.000X, (F) QUARTZO-20.000X.....	207
FIGURA 175 - AMOSTRAS POLIDAS COM CEO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA, NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X)	208
FIGURA 176 - AMOSTRAS POLIDAS COM CEO E FELTRO NA ALEMANHA (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).....	209
FIGURA 177 - AMOSTRAS POLIDAS COM ALO E DISCO DE ESTANHO NO BRASIL. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F) QUARTZO (20.000X).	210

FIGURA 178 - AMOSTRAS POLIDAS COM ALO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÁGUA NA ALEMANHA (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).....	211
FIGURA 179 - AMOSTRAS POLIDAS COM ALO E FELTRO NA ALEMANHA. (A)GRANADA, (B)TOPÁZIO, (C)BERILO, (D)TURMALINA, (E)ESPODUMÊNIO E (F)QUARTZO (20.000X).....	212
FIGURA 180 - LOCALIZAÇÃO DE IDAR- OBERSTEIN NA ALEMANHA, CASTELO OBERSTEIN (SCHLOSS OBERSTEIN) E IGREJA NA PEDRA (FELSENKIRCHE).....	216
FIGURA 181 - SPIESSBRATEN.	219
FIGURA 182 - IMAGENS DO INTERIOR DA GALERIA (EDELSTEINMINEN, 2013).	219
FIGURA 183 - IMAGENS DO <i>DEUTSCHES EDELSTEINMUSEUM</i> (MUSEU ALEMÃO DE GEMAS), MINERAIS DE KUNZITA E PROCESSO DE LAPIDAÇÃO DE GEMAS TRADICIONAL.....	220
FIGURA 184 - ORIENTAÇÃO DOS AMBIENTES INTERNOS DA ESCOLA.....	221
FIGURA 185 - DE CIMA PARA BAIXO, DA ESQUERDA PARA A DIREITA, IMAGEM ESCOLA, CORREDOR PRINCIPAL, OFICINA DE LAPIDAÇÃO E OFICINA DE JOALHERIA.	222
FIGURA 186 - APRESENTAÇÃO DE TESE EM FACHHOCHSCHULE TRIER.....	222
FIGURA 187 - DE CIMA PARA BAIXO, DA ESQUERDA PARA DIREITA - PEÇAS EM TITÂNIO, VIDRO E GRANADA, EMBALAGEM E FOTO PESSOAL JUNTO À SUA BANCADA DE TRABALHO.	224
FIGURA 188 - JOIAS DESENVOLVIDAS POR ANNA AMELING.	225
FIGURA 189 - HECTOR LASSO EM PRIMEIRA IMAGEM E JOIAS DESENVOLVIDAS POR ELE, ATRAVÉS DE PROTÓTIPOS MANUAIS E COMPUTADORIZADOS E FUNDIÇÃO.	226
FIGURA 190 - DEUTSCHE GEMMOLOGISCHE GESELLSCHAFT.	227
FIGURA 191 - DOUTORANDA E TOM MUNSTEINER EM SUA OFICINA.	228
FIGURA 192 - DOUTORANDA E FAMÍLIA ROTH.	228

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - RELAÇÃO DOS MINERAIS UTILIZADOS.....	8
TABELA 2 - RELAÇÃO DOS CÓDIGOS UTILIZADOS PARA INDICAR OS MATERIAIS.	9
TABELA 3 - DEMONSTRAÇÃO DAS COMBINAÇÕES DE ETAPAS DE LAPIDAÇÃO NO BRASIL E ALEMANHA.	13
TABELA 4 - DEMONSTRAÇÃO DE COMBINAÇÕES EXPERIMENTAIS NA ALEMANHA.	14
TABELA 5 - TABELA DE PROPORÇÕES DE TAMANHO DE MESA (GIA, 2009).	29
TABELA 6 - MINERAIS GEMOLÓGICOS SELECIONADOS DISPOSTOS EM GRAU DE COMPLEXIDADE DE ORGANIZAÇÃO ATÔMICA (TRÖGER, 1979; KLEIN E HURLBUT, 1993).	32
TABELA 7 - PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DOS MINERAIS UTILIZADOS (TRÖGER, 1979; KLEIN E HURLBUT, 1993; DEER ET AL., 1992; MINDAT, 2013).	33
TABELA 8 - TABELA DE ÂNGULOS IDEAIS PARA SEREM COLOCADOS NO PAVILHÃO E COROA PARA CADA MINERAL.	50
TABELA 9 - RELAÇÃO DE ÂNGULOS OBTIDOS NA CATRACA DE LAPIDAÇÃO DA MARCA OTTO EIGNER E AS LEITURAS NO GONIÔMETRO OBTENDO TOTAL DE 180° (ÂNGULO 1-ENTRE OS PAVILHÕES) (ÂNGULO 2 – ENTRE MESA E PAVILHÃO) (ÂNGULO 3 – ENTRE MESA E PAVILHÃO).	59
TABELA 10 - VALORES DE DISPERSÃO DA LUZ NOS MINERAIS SELECIONADOS.	59
TABELA 11 - MÉDIA ARITMÉTICA ENTRE MEDIDAS DO BRILHO EM MINERAL CLIVADO E SUA COMPARAÇÃO COM AMOSTRAS POLIDAS.	88
TABELA 12 - VALORES DE DIREÇÕES DE POLIMENTO PARA TOPÁZIO IMPERIAL INDICANDO A DIFERENÇA DE BRILHO EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO CRISTALOGRÁFICA.	99
TABELA 13 - VALORES DE DIREÇÕES DE POLIMENTO PARA BERILO INDICANDO A DIFERENÇA DE BRILHO EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO CRISTALOGRÁFICA.	99
TABELA 14 - VALORES DE DIREÇÕES DE POLIMENTO PARA TURMALINA INDICANDO A DIFERENÇA DE BRILHO EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO CRISTALOGRÁFICA.	100
TABELA 15 - VALORES DE DIREÇÕES DE POLIMENTO PARA QUARTZO INDICANDO A DIFERENÇA DE BRILHO EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO CRISTALOGRÁFICA.	101
TABELA 16 - VALORES EM RA (NM) E IMAGENS 2D DO LOCAL DE ANÁLISE DO POLIMENTO DE GEMAS COM O MATERIAL ÓXIDO DE CROMO.	117
TABELA 17 – VALORES EM RA(NM) E IMAGENS 2D DO LOCAL DE ANÁLISE DE MINERAIS GEMOLÓGICOS COM POLIMENTO COM PÓ DIAMANTADO, DISCO DE CHUMBO E ESTANHO E ÓLEO DE OLIVA, EM OFICINA NA ALEMANHA.	120
TABELA 18 - DESCRIÇÃO DOS DADOS OBTIDOS EM MALVERN, MATERIAIS OBTIDOS NO BRASIL.	139
TABELA 19 - DESCRIÇÃO DOS DADOS OBTIDOS EM MALVERN, MATERIAIS OBTIDOS NA ALEMANHA. ..	140
TABELA 20 - ÓXIDO DE ALUMÍNIO COMBINADO COM DIFERENTES MATERIAIS PARA AVALIAR O TESTE DE AGLOMERAÇÃO.	141
TABELA 21 - DADOS REFERENTES À FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X DE PÓS DE POLIMENTO OBTIDOS NO BRASIL.	151

TABELA 22 - DADOS REFERENTES À FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X DE PÓS DE POLIMENTO OBTIDOS NA ALEMANHA.	152
TABELA 23- VALORES DE RA OBTIDOS EM MICROSCÓPIO CONFOCAL PARA AS CONDIÇÕES DE LAPIDAÇÃO NO BRASIL, DEMONSTRADAS NO GRÁFICO DA FIGURA 142.	168
TABELA 24- VALORES DE RA REFERENTES ÀS ANÁLISES REALIZADAS EM MICROSCÓPIO CONFOCAL PARA AS CONDIÇÕES DE LAPIDAÇÃO NA ALEMANHA, DEMONSTRADAS NO GRÁFICO DA FIGURA 143.	168
TABELA 25 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM GRANADA NO BRASIL.	169
TABELA 26 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM GRANADA NA ALEMANHA.	170
TABELA 27 - IDENTIFICAÇÃO DE VALORES IDEAIS PARA GRANADA, CONFORME AS ANÁLISES REALIZADAS.	173
TABELA 28 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM TOPÁZIO NO BRASIL.	173
TABELA 29 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM TOPÁZIO NA ALEMANHA.	174
TABELA 30 - IDENTIFICAÇÃO DE VALORES IDEAIS PARA TOPÁZIO, CONFORME ÀS ANÁLISES REALIZADAS.	175
TABELA 31 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM BERILO NO BRASIL.	176
TABELA 32 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM BERILO NA ALEMANHA.	177
TABELA 33 - IDENTIFICAÇÃO DE VALORES IDEAIS PARA BERILO, CONFORME AS ANÁLISES REALIZADAS.	178
TABELA 34 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM TURMALINA NO BRASIL.	179
TABELA 35 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM TURMALINA NA ALEMANHA.	179
TABELA 36 - IDENTIFICAÇÃO DE VALORES IDEAIS PARA TURMALINA CONFORME AS ANÁLISES REALIZADAS.	181
TABELA 37 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM ESPODUMÊNIO NO BRASIL.	181
TABELA 38 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM ESPODUMÊNIO NA ALEMANHA.	182
TABELA 39 - IDENTIFICAÇÃO DE VALORES IDEAIS PARA O ESPODUMÊNIO, CONFORME AS ANÁLISES REALIZADAS.	183
TABELA 40 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM QUARTZO NO BRASIL.	184
TABELA 41 - VALORES REFERENTES À REFLEXÃO DA LUZ EM QUARTZO NA ALEMANHA.	185
TABELA 42 - IDENTIFICAÇÃO DE VALORES IDEAIS PARA O QUARTZO CONFORME AS ANÁLISES REALIZADAS	186
TABELA 43 – VALORES DE RA DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM PÓ DE DIAMANTE E VARIANTES DE DISCOS E LUBRIFICANTES OBTIDOS NO MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICADCM3D. NA TOPOGRAFIA DAS IMAGENS, O AZUL SIGNIFICA A PARTE MAIS BAIXA E O VERMELHO, A MAIS ALTA, SEGUINDO O DEGRADÊ DE CORES.	213
TABELA 44 - VALORES DE RA DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM PÓ DIAMANTINE (ÓXIDO DE ALUMÍNIO) E VARIANTES DE DISCOS E LUBRIFICANTES OBTIDOS NO MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICADCM3D. NA TOPOGRAFIA DAS IMAGENS, O AZUL SIGNIFICA A PARTE MAIS BAIXA E O VERMELHO, A MAIS ALTA, SEGUINDO O DEGRADÊ DE CORES.	213

TABELA 45 - VALORES DE RA DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS COM PÓ GE6 (ÓXIDO DE ALUMÍNIO) E VARIANTES DE DISCOS E LUBRIFICANTES OBTIDOS NO MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICADCM3D. NA TOPOGRAFIA DAS IMAGENS, O AZUL SIGNIFICA A PARTE MAIS BAIXA E O VERMELHO, A MAIS ALTA, SEGUINDO O DEGRADÊ DE CORES.....	214
TABELA 46 - VALORES DE RA DOS POLIMENTOS REALIZADOS COM PÓ DE ÓXIDO DE ALUMÍNIO E VARIANTES DE DISCOS E LUBRIFICANTES OBTIDOS NO MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICADCM3D. NA TOPOGRAFIA DAS IMAGENS, O AZUL SIGNIFICA A PARTE MAIS BAIXA E O VERMELHO, A MAIS ALTA, SEGUINDO O DEGRADÊ DE CORES.....	214
TABELA 47 - VALORES DE RA DOS POLIMENTOS REALIZADOS COM PÓ DE ÓXIDO DE CÉRIO E VARIANTES DE DISCOS E LUBRIFICANTES OBTIDOS NO MICROSCÓPIO CONFOCAL LEICADCM3D. NA TOPOGRAFIA DAS IMAGENS, O AZUL SIGNIFICA A PARTE MAIS BAIXA E O VERMELHO, A MAIS ALTA, SEGUINDO O DEGRADÊ DE CORES.....	215

1. Introdução

O processo de dar formas aos materiais naturais iniciou-se com os homens pré-históricos no período paleolítico (pedra lascada) e neolítico (pedra polida), quando desenvolviam ferramentas e objetos de caça com pedras.

O processo de abrasão consistia em desbastar por atrito um mineral contra o outro com saliva, como lubrificante, e areia, como pó abrasivo. Em seguida, outros povos desenvolveram a sua própria técnica com a qual lapidavam minerais locais, como por exemplo, o lápis-lazúli trabalhado pelos mesopotâmicos; a turquesa talhada por Incas e Maias na América do Sul e na Índia, a esmeralda, o jade usado pelos chineses, além do lápis-lázuli, ágata e quartzo incolor, utilizados nas joias egípcias. As joias eram desenvolvidas nesta época para adornar ídolos ou monarcas, produzindo formatos arredondados ou placas utilizadas para o entalhe (KLEIN, 2005).

A prática do facetamento teve início na Índia por volta do séc. V a.C., e obteve continuidade na Europa nos séculos XIII e XIV, com a evolução da lapidação cabochão para o facetamento, com superfícies planas e polidas (KRAUS, 1987; NADUR, 2009). As gemas lapidadas eram aquelas com maior valor místico e de estimação, principalmente o diamante, o rubi, a safira e a esmeralda. Estas gemas foram usadas principalmente para a indumentária religiosa e de soberanos até o Renascimento. A inserção da proposta de projeto e sua realização foram iniciadas pelos nobres ourives, com a união do planejamento e manufatura. Paralelamente, abriu-se o caminho para o *Design* próprio com a circulação de estampas e modelos de joias.

O “*Design* de Gemas”, visto como um campo do *Design* e como um processo criativo de desenvolvimento de produtos, sempre esteve presente na sociedade humana. O ser humano desenvolve instintivamente produtos que adaptem o mundo à sua existência.

A curiosidade ou necessidade do homem, transformou-o em *Designer*. A atuação de *Design* foi percebida pelo artista e criador, Leonardo da Vinci (KHONSARI e BOSSER, 2008; BÜRDEK, 2010), porém foi com as obras de arte na Revolução Industrial, nos séculos XVIII e XIX, que o termo passou a ser utilizado de forma geral.

A palavra *Design* se origina do latim, do verbo *designare*, sendo traduzida como determinar, demonstrar de cima. O *Design* transforma o vago em determinado por meio da diferenciação progressiva, determinação por meio da apresentação. A ciência do *Design* corresponde à ciência da determinação, segundo Holger Van den Boom (1994, apud BÜRDEK, 2010).

O termo *Design* foi mencionado e descrito pela primeira vez no dicionário Oxford no séc. XVI como um plano desenvolvido pelo homem ou um esquema que possa ser realizado (BÜRDEK, 2010).

O ato de produzir *Design* é um campo aberto, em que tudo é possível. O importante é que não haja regras, mas sim objetivos. Um projeto é desenvolvido para cumprir necessidades ou realizar uma ideia e pode também ser aplicado a qualquer objeto, imagem ou tecnologia. É uma área em que o foco é desenvolver ou aperfeiçoar o mundo em que vivemos (LÖBACH, 2001).

No ano de 1861, William Morris fundava a empresa Morris, Marschall, Faulkner&Co, para a renovação no pensamento e na produção das artes aplicadas, surgindo o movimento *Arts and Crafts*. A interrupção da separação das etapas do trabalho, ou seja, a nova junção do projeto e produção, condizia com o movimento de renovação. O *Designer* fabricava o seu projeto.

Após as guerras mundiais, a produção de *design* foi intensificada, com a necessidade da sociedade de reinício de vida comercial e industrial, tendo como um dos principais mentores Walter Gropius, fundador e diretor da Universidade Bauhaus (*Das Staatliche Bauhaus*). O curso de *Design*, integrado à universidade de arquitetura, propôs que as atividades artesanais, as artes aplicadas e a técnica deveriam fazer parte do meio acadêmico. O *Designer* desenvolvia a ideia e tinha conhecimento prático de produção para concretizar o produto, possibilitando projetos mais criativos com menor índice de erro. A “Bauhaus” desenvolvia nos seus estudantes, capacidades de simplificação e objetivação, seguindo os lemas “Forma segue a Função” de Louis Sullivan, com formas geométricas simples, e cores primárias do movimento artístico holandês “De Stijl”. Portanto, além da área criativa e projetual, a ciência e a engenharia já faziam parte do projeto, relacionando a composição dos materiais às suas maneiras de produção (OVERY, 1991; ARGAN, 2005; MORAES, 2008)

Atualmente, o *Design* é uma área composta de criatividade, técnica e capacidade de encontrar soluções, muitas vezes desvinculado do processo de

manufatura. No entanto, o *Designer* necessita da prática de produção para adquirir conhecimento detalhado do material, para entender as necessidades de uso, conectar todos os pontos e criar capacidade para encontrar soluções inovadoras. O campo de atuação de *Design* é vasto, podendo dedicar-se ao projeto de produtos ou visuais, estando ou não relacionado à indústria manufatureira.

O “*Design de Gemas*” é uma área nova de atuação, em que o conhecimento de minerais gemológicos, mediante processos de corte e polimento, são essenciais, além de conhecimentos técnicos em joalheria, ergonomia e moda.

O tema tratado nesta tese, que descreve o raciocínio de desenvolvimento de um projeto de *Design*, é abordado de uma maneira nunca antes tratada. Devido ao campo “*Design de Gemas*” ser novo e pouco desenvolvido, não existem trabalhos científicos que enquadrem o mineral gemológico como um material de engenharia. Estudos de caráter óptico em relação à brilhância e refletividade de luz, foram mencionados pelo *Gemological Institute of America* e *Deutsche Gemmologische Gesellschaft*, que constituem parte da pesquisa em identificação de formatos de gemas facetadas e avaliações de qualidade.

O mineral gemológico visto como material de engenharia ou material que é submetido aos processos de lapidação pode ser estudado pela área de Tribologia. O termo Tribologia é definido como "A ciência e tecnologia da interação de superfícies em relativo movimento" e abrange estudos sobre atrito, desgaste e lubrificação. A palavra tem origem no alfabeto grego e significa atrito. Foi reconhecido pela primeira vez em 1966 pelo comitê do governo britânico, apesar de existirem casos anteriores de estudiosos (HUTCHINGS, 1992).

Na lapidação de gemas, o atrito e desgaste são controlados, sendo intensos nas etapas de pré-formação ou facetamento e menos intensos na etapa de polimento. Uma forma de diminuir o atrito e permitir o controle do desgaste é através dos lubrificantes. Para lapidação, o lubrificante utilizado é a água ou óleo, que atuam em diferentes funções: o de garantir o deslizamento e o de captar e carregar partículas de sílica que podem ser altamente prejudiciais no caso de serem inaladas (silicose).

A tese está dividida em três partes: a primeira parte induz o leitor à linha de raciocínio de criação de facetas, iniciando com o *Design* e seu planejamento.

A segunda descreve os minerais gemológicos de um ponto de vista científico para a lapidação, e a terceira analisa o comportamento dos minerais em relação ao seu processamento na lapidação de gemas. Podendo assim definir as áreas estudadas como: Planejamento ou *Design*, Mineralogia e Tribologia. Os itens estudados estão descritos na figura 1, abaixo.

O título descreve as áreas, na ordem: Mineralogia, Tribologia e *Design*, relacionando a ordem de entendimento. Primeiro, entendem-se características do mineral e seu comportamento na lapidação, para então realizar o *Design*. Para o *Design*, não existe ordem hierárquica, é um sistema cíclico, em que todo o conhecimento é necessário para o surgimento de ideias.

Figura 1 - Ciclo de itens pesquisados para o *Design* de Gemas.

A tese inclui o relato de experiências obtidas na oficina de lapidação da *Fachhochschule Trier*, em Idar-Oberstein, Alemanha, em que as amostras foram lapidadas seguindo técnicas e padronizações utilizadas por eles.

Adiante, as discussões e conclusões são elaboradas para definir padrões de qualidade de polimento e processos de lapidação ideais para os seis minerais utilizados.

Por último, os anexos descrevem percepções adicionais à experiência na Alemanha relacionadas também ao *Design* e a lapidação.

2. Objetivos e justificativas

Este trabalho tem como objetivo principal estabelecer condições ideais para o polimento das gemas coradas estudadas em função das diferenças mineralógicas (cristalografia, dureza, clivagem, direções de polimento, índice de refração e ângulo crítico) e analisar o seu comportamento em relação aos resultados de brilho e planicidade de superfície. Através dos resultados obtidos propõe-se a aplicação dos conhecimentos na área de *Design*, que permitirá a especialização e agregação de valor ao produto: gema lapidada.

O Brasil é um dos nove maiores produtores de gemas coradas do mundo e comercializa este material como *commodities*. As gemas lapidadas fazem parte um importante setor da economia mundial, sendo alguns países mais rigorosos em sua classificação.

Esta linha de raciocínio teve início com o desenvolvimento da dissertação de mestrado da doutoranda "A Lapidção de Gemas no Panorama Brasileiro", e deliberou uma visão macro e categórica, do que foi e do que é a lapidação de gemas no Brasil: como ponto de vista histórico e técnico de cortar, pré-moldar, facetar e polir minerais e rochas, tratando-se de uma ciência e não apenas de uma técnica manual empírica.

No doutorado, esta visão tornou-se mais aprofundada e científica, quando diagnosticaram-se pontos nunca antes comentados na área lapidação de gemas coradas e no ambiente acadêmico.

Desta forma, conclui-se que o *Designer*, criador de formatos de lapidação, conheça conceitos científicos e mecânicos para através deste conhecimento desenvolver ferramentas de criação para obter novas respostas.

A finalidade desta tese é de determinar características pontuais do comportamento de minerais perante o seu processamento, que combinadas com procedimentos e materiais, adquirirão melhor refletividade de luz e brilho de superfície. Essas qualidades buscam otimizar a determinação de processos, possibilitando o aprimoramento da técnica e percepções para a criatividade.

3. Materiais e Métodos

Os minerais gemológicos selecionados foram escolhidos seguindo os seguintes critérios: serem comumente utilizados na indústria joalheira e lapidados em larga escala; ocorrerem em grandes quantidades no Brasil; possuírem estruturas cristalinas e composições químicas diferentes, passíveis de comparação.

Os grupos de minerais selecionados foram: granada, topázio, berilo, turmalina, espodumênio e quartzo. As amostras selecionadas, uma em cada grupo mineral, são descritas quanto à sua composição química, estrutura cristalina, características físicas e ópticas, relevantes à lapidação. Parte das amostras foram adquiridas em comércio local da cidade de São Paulo e parte foi cedida pelo orientador.

Com os seis grupos de materiais mineralógicos foram criadas 10 amostras para cada um, com medidas aproximadas a 10x10x5mm (Fig.2 e Fig.3) a seguir, totalizando 60 amostras. As etapas de pré-formação, facetamento e polimento foram registradas para posterior análise e discussão.

Figura 2 – Dimensões do corpo-de-prova.

Cada grupo de mineral foi cortado, seguindo as determinações abaixo;

As amostras de granada, devido ao seu sistema cristalino isométrico, foram cortadas e polidas em direções aleatórias, pois possuem o mesmo distanciamento interatômico em todas as direções.

As amostras de topázio (topázio imperial), de formato prismático, clivagem basal perfeita e inclusões em canais longitudinais paralelos ao eixo c, foram cortadas perpendiculares ao prisma, sendo as superfícies de análise paralelas às faces basais.

As amostras de berilo, de coloração rosa claro (berilo de variedade morganita) sem faces cristalinas aparentes, foram cortadas em sentido aleatórios em relação a cristalografia, de maneira usualmente utilizada nas oficinas de lapidação.

O cristal de turmalina de cor verde uniforme perpendicular ao eixo c foi cortada em fatias perpendiculares a este eixo, como normalmente é feito em oficinas de lapidação para o melhor aproveitamento do material. Portanto a facetada analisada apresentava-se longitudinal ao prisma.

As amostras de espodumênio foram cortadas de modo a identificar os planos de clivagem e criar a face analisada inclinada a este plano, excluindo a possibilidade de destacamento durante o processo de lapidação. As facetadas cortadas inclinadas em relação ao plano de clivagem não apresentam precisão de ângulos em relação a estes planos, devido ao corte ser manual, sem a utilização de equipamentos de precisão, como um goniômetro.

As amostras de quartzo, sem faces cristalinas aparentes, foram cortadas aleatoriamente, repetindo a maneira em que o mineral é tratado na prática da lapidação, não se levando em consideração a localização de zoneamentos de cor, fraturas e peso.

Figura 3 - Exemplificação das amostras dos minerais gemológicos. Da esquerda para a direita: granada, topázio, berilo, turmalina, espodumênio e quartzo.

As superfícies foram desgastadas e polidas no Brasil e na Alemanha, para criar parâmetros comparativos, utilizando etapas compatíveis, materiais e lubrificações semelhantes, seguindo as regras de cada oficina de lapidação. Isto foi feito com a finalidade de identificar pontos que permitissem o melhoramento de processo e otimização na qualidade de superfície.

No Brasil, as amostras foram cortadas na empresa Union Stones Lapidações e foram pré-formadas, facetadas e polidas na empresa J&M Stones, ambas localizadas no bairro da República em São Paulo. Dois conjuntos de minerais polidos, um com Al_2O_3 e outro, com CeO_2 , foram feitas por um lapidário residente em São Paulo.

Na Alemanha, foram feitas amostras pré-formadas, facetadas e polidas na oficina da Universidade de Ciências Aplicadas, *Fachhochschule Trier*, em Idar-Oberstein.

As amostras receberam como siglas a numeração de 1 a 6 para sua definição de minerais/materiais (Tab. 1) e os símbolos de materiais de abrasão, polimento e lubrificantes foram nomeados pelas fórmulas simplificadas (SiC , C , AlO , CrO , CeO) (Tab. 2). Em alguns códigos, são utilizados adicionalmente os símbolos D ou F representando as palavras, Disco ou Feltro, respectivamente. As numerações: 200, 300, 400, 600 indicam o *mesh* ou o tamanho de grão abrasivo referentes à granulação do disco ou rebolo (exemplo: 1SiC200, granada pré-formada (1) com carбето de silício (SiC) com granulação de numeração #200).

Tabela 1 - Relação dos minerais utilizados.

Numeração dos grupos mineralógicos	
granada	1
topázio	2
berilo	3
turmalina	4
espodumênio	5
quartzo	6

Tabela 2 - Relação dos códigos utilizados para indicar os materiais abrasivos e lubrificantes.

Representação das composições químicas	
SiC	Carbeto de Silício
CeO	Óxido de Cério
CrO	Óxido de Cromo
AlO	Óxido de Alumínio
C	Diamante
DT	Diamantine - AlO
GE6	AlO
D	Disco
DC	Disco com composto Diamantado
DCu	Disco de Cobre
DPbSn	Disco de Chumbo e Estanho
DPb	Disco de Chumbo
F	Feltro
A	Água
S	Sabão
L	Limão
OI	Óleo de Oliva

Os ensaios realizados objetivaram a experimentação do comportamento dos minerais quanto às características de superfície pós-lapidação, através de análises ópticas e análises físicas, adotando metodologia através dos conceitos de Tribologia.

As análises propostas para avaliação de uma boa lapidação de gemas são feitas através de dois enfoques: o primeiro refere-se às propriedades ópticas e o segundo enfoque refere-se às propriedades físicas das gemas tendo a relação dos itens avaliados, descritos na figura 4, a seguir.

Os equipamentos de análise ópticas foram utilizados no *Deutsche Gemmologische Gesellschaft*, Idar-Oberstein, Alemanha, são eles: Feixe à laser monocromático PHYWE, Goniômetro, Polariscópio Gemológico e IdealScope®.

Figura 4 – Relação dos itens a serem analisados por meios ópticos e físicos.

Os equipamentos para as análises físicas foram: Reflectivity Meter (Laboratório de Gemologia do Instituto de Geociências), Rugosímetro Kosakalab Surfcorde SE1700α, Microdurômetro Micromet 2100, e PHmetro (utilizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) do Departamento de Engenharia Mecânica, Naval e Oceânica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo), Microscópio Eletrônico de Varredura LEO 440 (Instituto de Geociências), Microscópio Confocal DCM3D Leica, Microscópio Eletrônico de Varredura Field Emission FEI Quanta 600 FEG (Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), localizado no Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo). No LCT também foram utilizados equipamentos para análise dos pós de polimento através de análises físicas e químicas, tais como: Mastersize Malvern 2000, Difractometria de Raios X Panalytical, modelo X'Pert PRO X'Celerator e Fluorescência de Raios X Axios Advanced Panalytical.

Devido à evidência de que estes tipos de análises sejam assuntos completamente novos para a lapidação de gemas coradas, foram usadas referências tribológicas comparativas que são utilizadas para o polimento de diamante, materiais cerâmicos e rochas ornamentais.

Obtendo as conclusões das análises de equipamentos de cunho científico, o objetivo está na comparação de determinações científicas com as tradicionais, utilizadas nas oficinas de lapidação.

4. A técnica de lapidação de gemas no Brasil e na Alemanha

A lapidação de gemas é uma técnica tradicional que consiste em produzir faces completamente planas ou superfícies arredondadas, através do polimento de superfícies de minerais gemológicos, pela diminuição de grãos abrasivos em cada etapa do processo até o polimento.

A definição de qualidade está relacionada à diminuição de rugosidade, exclusão de riscos e obtenção de brilho. Estes itens são obtidos com êxito através da escolha do tamanho do grão abrasivo, tipo de lubrificante adequadas as propriedades físicas do mineral.

Segundo padrões tribológicos, o mineral gemológico é chamado de corpo, o disco de contra-corpo e o pó utilizado entre os dois corpos de terceiro-corpo. Os lubrificantes utilizados são: água ou óleo e os discos e rebolos (contra-corpo) de composições variadas, ambos suscetíveis a desgastes mecânicos e alterações químicas. Os pós de polimento (terceiro-corpo) são: óxidos de alumínio, de cério, de cromo e pó de diamante.

Na lapidação tradicional, a cor e a conservação de peso são itens preponderantes na definição do volume e preço e o formato de lapidação é orientado seguindo estas necessidades. No entanto, neste trabalho, a proposta é de analisar o comportamento dos minerais em relação às suas características ópticas e mecânicas, e propor padrões ideais com base em comprovações científicas colocando em risco a conservação de material para adquirir um melhor resultado em refletir totalmente a luz e possuir a melhor qualidade de polimento.

As superfícies podem ser obtidas com a qualidade requerida através da lapidação facetada, mas também com formatos arredondados através da técnica de lapidação livre ou artesanal. Foram feitos alguns testes utilizando a lapidação livre, usando rebole de feltro para polimento, para a comparação de qualidade de superfície.

O primeiro item a ser observado na lapidação através do ponto de vista científico, é o estudo prévio do mineral. Nesta etapa, o cristal é analisado com luz transmitida para identificar pontos a serem excluídos no corte e para a localização do formato escolhido.

O segundo item para análise antes do corte é a localização do eixo óptico através do Polariscópio, orientando o corte de minerais uniaxiais e biaxiais.

O terceiro item é localizar a direção da clivagem, se existente.

O quarto é calcular a perda de massa na lapidação sendo registrados os volumes, antes e depois da lapidação.

No quinto item deve ser calculado o ângulo crítico e o ângulo em que deve ser aplicado no pavilhão, sendo os dois diferentes para cada mineral.

O sexto item é a identificação das direções de crescimento do mineral.

O sétimo, e último item, determina as etapas de desbaste e os materiais de polimento em função do tamanho dos grãos e da dureza dos minerais.

Durante e após o polimento, as amostras são analisadas no momento de máxima reflexão de luz da superfície usando se necessário uma lupa de 10x.

A lapidação de gemas é dividida entre lapidação de diamantes e de gemas coradas. A lapidação de diamantes utiliza o próprio diamante como material de corte e pó de polimento e a lapidação de gemas coradas, que engloba todos os minerais coloridos e incolores com dureza de Mohs igual ou abaixo de 9, utiliza diversos materiais para desgaste e polimento, buscando a aproximação da dureza do pó de polimento com o mineral.

O processo de lapidação de gemas coradas é segmentado por dois grupos especiais: o de minerais de durezas altas (9 Mohs), como o grupo do coríndon (safira e rubi), e o grupo dos minerais com durezas menores ou igual a 8,5. Dentro do grupo dos minerais de dureza menor, existem minerais que necessitam cuidados especiais, como os minerais com muitas fraturas (ex. esmeralda), com clivagem perfeita (ex. espodumênio) e minerais com fenômenos ópticos (ex. olho de tigre, safira) (NADUR, 2009).

Os processos de lapidação executados no Brasil e na Alemanha seguem padrões semelhantes, utilizando os mesmos processos de corte, pré-formação e polimento, porém com combinações diferentes de *meshs* (nome que indica o número de peneira para qualificar a granulometria dos grãos abrasivos), dependendo de cada mineral e finalidade estética (polido ou fosco).

As conclusões dos resultados serão limitadas apenas ao polimento dos minerais com os pós de polimento: óxido de cério e óxido de alumínio combinados com disco de chumbo e estanho ou apenas estanho, excluindo as etapas que utilizaram feltro, como mencionadas na tabela 3. O uso do feltro não foi analisado porque não foi experimentado no Brasil, sendo assim não foram criadas padronizações comparativas.

As amostras foram divididas em dois grupos: os tratados na Alemanha e os tratados no Brasil. Os equipamentos, materiais e *meshs* utilizados nos dois países estão descritos na tabela 3, abaixo.

Tabela 3 - Demonstração das combinações de etapas de lapidação no Brasil e Alemanha.

ETAPAS DE LAPIDAÇÃO		
Brasil	Alemanha	
Facetada	Livre ou Cabochão	Facetada
SiC100	SiC120	
C120	SiC320	
C180	SiC400	-
C220	SiC500	-
C600	-	-
DC500	SiC320/Feltro	DC500
CeO+DSn	CeO/Feltro	CeO+DPbSn
AlO+DSn	AlO/Feltro	AlO+DPbSn
CrO+DPbSn	-	-
C+DPbSn	-	C+DPbSn

Na Alemanha, além das combinações padrões com disco, material de polimento e lubrificante, foram testadas variantes de óxido de alumínio e também pó de diamante com granulometria menor que a adquirida no Brasil de modo a experimentar as diferenças no resultado de qualidade de superfície. As combinações entre pó de polimento, disco e lubrificantes diversos estão mostradas na tabela 4.

Tabela 4 - Demonstração de combinações experimentais na Alemanha.

Testes de Superfície na Alemanha		
Diamantine +Disco PbSn + Água	C + Disco Cobre + Óleo de Oliva	GE6+ Disco PbSn + Água
Diamantine + Disco PbSn + Água + Limão	C + Disco PbSn + Água + Sabão	GE6+ Disco PbSn + Água + Sabão

O “Diamantine” e “GE6” são tipos de óxido de alumínio. O “Diamantine” é o nome utilizado para óxido de alumínio com grãos menores e o “GE6” é também uma variante de óxido de alumínio, comercializado pela empresa Wilhelm Kruel (Idar-Oberstein) com grãos menores que o óxido de alumínio comumente utilizado.

O “Diamantine” e “GE6”, são indicados para minerais de baixa dureza. Foram feitos testes para os minerais de maior dureza utilizados neste trabalho, supondo que pós de grãos menores resultariam em superfícies com menos riscos. O uso do limão ou vinagre é empiricamente utilizado por lapidários para adquirir superfícies mais planas e surgiu a necessidade de explicar esse processo cientificamente.

Para os minerais utilizados nesta tese, as durezas variam entre 6,5 e 8,5, foram feitas experiências com a mesma combinação utilizada para gemas de dureza 9, ou seja, disco de cobre e óleo de oliva.

Para o “GE6”, buscaram-se experimentações que definissem a diferença no polimento com o uso ou ausência de sabão, que serão descritos nos capítulos seguintes.

Na oficina de lapidação de Idar-Oberstein, a orientação de escolha dos pós de polimento foi sugerida pelo técnico que para minerais com dureza menor do que 7,0, utiliza-se o óxido de cério e para minerais com dureza iguais ou maior que 7,0, utiliza-se o óxido de alumínio. Variações de materiais como o óxido de cromo e diamante possibilitam menor custo, no caso do óxido de cromo e maior rapidez de desgaste e maior custo, no caso do diamante.

Os equipamentos de desgaste de polimento, utilizados no Brasil e Alemanha, foram registrados em sua ordem granulométrica (etapas) e são demonstrados a seguir nas figuras 5 e 6.

Figura 5 - Etapas da lapidação feitas no Brasil. As siglas representam os materiais e *meshs* descritos acima. As cinco primeiras fotos representam a pré-moldagem (SiC100, C120, C180, C220 e C600), em seguida o facetamento (DC500) e as últimas fotos, discos de polimento. O disco de cobre não foi utilizado, no Brasil, porém está demonstrado na foto para o conhecimento do material.

Figura 6 - Descrição de etapas de lapidação da Alemanha. Os dois processos de lapidação encontram-se juntos (livre e facetado), sendo as primeiras quatro imagens as etapas de pré-moldagens, os rebolos de feltro com AlO e CeO (polimento lapidação livre), disco DC500, facetamento, em seguida, o disco de Pb/Sn para o polimento facetado.

5. O *Design* de Gemas

O *Design* é definido como uma ideia, um projeto ou um plano para a solução de um problema determinado e a forma de tornar esta ideia visualmente perceptível, seja com projetos, modelos ou amostras e sua concretização (LÖBACH, 2001).

No conceito alemão, a tradução da palavra *Gestaltung*, usualmente utilizada para nomear *Design*, quer dizer formação, configuração, ou seja, a materialização de uma ideia.

O *International Council Societies of Design* (ICSID) define o *Design* como uma atividade criativa, cujo objetivo é estabelecer as qualidades multifacetadas de objetos, processos e serviços e seus sistemas em ciclos de vida completos. Portanto, o *Design* é o fator central da humanização inovadora de tecnologias e o fator crucial do intercâmbio cultural e econômico (MOZOTA, 2011).

Entretanto, levando em consideração os conceitos de *Design*, podemos comparar o *Design* de Gemas como um processo criativo, cujo objetivo é estabelecer novos formatos, orgânicos ou facetados, especificamente com minerais e rochas gemológicas, de modo a desenvolver tecnologia, levando em consideração características físicas, químicas e ópticas dos minerais e seus processos de produção. Fatores preponderantes como tendências comportamentais da sociedade (moda), estética e ergonomia devem ser consideradas.

O *Design* de Gemas é uma área nova e emergente que surgiu com a profissão de *Designer* de Joias, para profissionais com especialização em criar formatos em minerais e rochas.

O *Designer* de Joias produz objetos de ornamentação para serem “vestidos”. Seu formato é criado para se adequar ou interagir aos “formatos do corpo humano” e para preencher necessidades psicológicas de quem os utiliza, sejam estas simbólicos, estéticos ou funcionais.

O *Design* de Gemas está intimamente relacionado com o *Design* de Joias, por desenvolver parte do produto, joia. Porém, a criação de objetos relacionados a minerais e rochas é ilimitada. Atualmente, utiliza-se este grupo de materiais para confeccionar gemas lapidadas, esculturas, objetos de arte, mobiliários,

revestimentos ou qualquer produto que utilize minerais e rochas como parte de construção.

O enquadramento desta área, dentro da grade curricular dos cursos de graduação em *Design*, está na disciplina *Design* de Produto, sendo necessárias posteriores especializações (MOZOTA, 2011).

O processo de produção do produto gema lapidada é a lapidação de gemas. Com a evolução da tecnologia mundial, a lapidação também busca especializações, introduzindo o corte à laser, softwares que escaneiam o mineral bruto e localizam através de logaritmos o formato desejado e qual a porcentagem de perda de massa. Porém a área busca a preservação da atuação humana, em que a sensibilidade manual e visual são necessárias durante o manuseio de um material de alto custo e com detalhamento específico quanto às características físicas, químicas e ópticas dos minerais.

Os formatos facetados produzidos atualmente são resultados do tipo de maquinário existente. As máquinas de lapidação foram criadas de modo a atender às necessidades da época. Rebolos, discos e mandris, permitem que sejam feitas faces planas, arredondadas, convexas ou côncavas e acabamentos polidos ou foscos. Com a mudança e evolução da tecnologia, novos resultados podem ser obtidos, ao que se relaciona à criação da forma.

O intuito deste trabalho é criar possibilidades para que o *Designer*, que se especializa em desenvolver novos formatos em gemas, tenha embasamento científico por meio do conhecimento do comportamento dos minerais através da óptica, química e mecânica (física) e se sinta apto a experimentar novos caminhos. O *Designer* que se aprofunda na técnica, na ciência e na engenharia tem um leque maior de possibilidades de desenvolver a sua imaginação e criar produtos de alta qualidade.

Os subcapítulos relacionados a seguir permitem identificar itens para descrever o *Design* de Gemas e oferecer ferramentas para o seu desenvolvimento. As discussões quanto à estética e à definição da forma possuem diversas linhas de raciocínio e interpretações filosóficas, que devem ser abordadas novamente em trabalho futuros.

5.1. Desenvolvimento da forma

A configuração do formato, sempre foi o maior desafio de um projeto, devido às perspectivas de possibilidades infinitas (ACKERMAN et al.,1996).

A escolha ou definição da forma se configura para atender necessidades, sejam estas emotivas, técnicas ou casuais. A forma é definida a partir do cumprimento de um objetivo.

A forma pode ser desenvolvida por dois caminhos: a partir de uma ideia inicial e ao desenrolar de sua produção. Durante o processo de realização do projeto, novas ideias surgem e então a forma é aperfeiçoada, ou a forma é criada a partir das necessidades que requerem o material e o processo de produção com influências ergonômicas e da moda. Desta forma, ao analisar cada processo, o raciocínio é colocado em movimento, possibilitando o surgimento de novas ideias.

O *insight* ou ideia é um processo deliberadamente involuntário e pode ser ou não a somatória de informações no cérebro. Portanto, para que surjam ideias, é necessário dar início ao processo, criando uma linha de raciocínio.

A lapidação de gemas, inicia-se normalmente pela análise do material bruto, partindo do princípio que os minerais gemológicos são raros e possuem características individuais como fraturas, inclusões, entre outros. O trabalho é iniciado com a análise individual, de mineral à mineral. A partir da delimitação destes pontos intrínsecos relacionados à estrutura do mineral, o formato é criado. Alguns fatores característicos dos minerais podem servir como fator inspirador para a definição da forma, como, por exemplo, as inclusões, nível de transparência para definir o facetamento, zoneamentos de cor e fenômenos ópticos. Portanto, o ponto inicial da linha de raciocínio e criação de formas são as características ópticas que os minerais oferecem. Por outro lado, quando já existe a demanda de um formato, o material bruto é adequado ao mesmo.

5.2. Estética

O formato criado está diretamente relacionado com a beleza que ele transmite. Este item possui grande ênfase na joia como produto. A joia remete à beleza, transmite beleza ou significa algo belo para quem a usa.

A beleza é a percepção individual do ser humano de identificar algo que é agradável aos sentidos e por motivos psicológicos, são atraídos. Não existe uma regra. Alguns destes sentidos são universais e outros restritos a sociedades, culturas e períodos específicos da história, como a moda.

O *Design* de Joias está diretamente relacionado com Moda, Arte e *Design*. A moda é o resultado de opiniões que regem ou identificam uma sociedade em épocas determinadas, esteja relacionada com novidades, necessidades da indústria, ou ideais em comum. A arte está relacionada a representações individuais ou em grupos de necessidades, sejam emotivas, objetivas ou casuais. Já o *Design* está ligado a desejos ou necessidades de uma sociedade, com preocupações técnicas da atualidade e de planejamento, podendo ou não estarem relacionadas à produção em série (CAMPOS, 2011a).

Portanto, podemos definir que estética e beleza, são medidas relativas de opinião pessoal ou de um grupo, apesar de ocorrerem variações de opiniões, existe um grau de concordância entre as culturas do que é considerado belo e harmônico. Este grau de concordância está relacionado às proporções da natureza e da geometria, muitas vezes chamada de Proporção Áurea na Arte Visual, Arquitetura e *Design*.

5.3. Geometria - A proporção áurea na lapidação

A chamada divina proporção, razão áurea, razão de ouro ou proporção áurea é uma constante real algébrica irracional denotada pela letra grega ϕ , símbolo denominado *Phi* em homenagem ao escultor *Phideas* (500-432 a.C.), que teria utilizado técnicas da proporção áurea para projetar o Parthenon, na Grécia (HEMENWAY, 2008; KIMBERLEY, 2010) (Eq. 1).

$$\phi = \frac{(1 + \sqrt{5})}{2} \approx 1.618033989$$

(1)

Desde a antiguidade a proporção áurea é percebida nas proporções de crescimento da natureza, como a espiral do contorno das conchas e é repetida pelos artistas em obras de arte, arquitetura e *design*, como, por exemplo, a pintura de Leonardo da Vinci, Monalisa.

O matemático italiano Leonardo de Pisa, conhecido como Fibonacci, descreveu em 1202 uma sequência de números, que era conhecida desde a antiguidade: uma série de números inteiros iniciada por 0 e 1, tem continuidade com a soma dos dois números anteriores, podendo ser representado pelo Triângulo de Pascal (Fig. 7) abaixo. Este triângulo numérico é infinito e formado por binomiais $\binom{n}{k}$, em que n representa o número da linha na posição horizontal e k representa o número na posição vertical. Esta sequência tem relação com a proporção áurea, considerando a divisão de cada número pelo seu antecessor e obtendo outra sequência: $1/1=1$, $2/1=2$, $3/2=1.5$, $5/3=1.666$, $8/5=1.6$, sendo que as razões vão se aproximando no número *Phi*, e se normalizam após a 40ª posição, demonstrando a mesma divisão consecutivamente e representando o infinito (HEMENWAY, 2008).

Figura 7 - Triângulo Pascal e a demonstração da sequência de Fibonacci.

A sequência de Fibonacci é também encontrada na construção do retângulo áureo, proporção que demonstra a relação 1:1,618 e a maneira com que é aplicado aos formatos artísticos, em que a soma dos dois últimos números e quadrados representam o número e quadrado adiante (Fig.8).

Figura 8 - Retângulo áureo e sua construção relacionada a sequência de Fibonacci.

A relação utilizada para a aplicação da proporção nas artes é de 1:1,618 e pode ser construída através de um segmento ou linha ou através de um retângulo, demonstrados abaixo (Fig. 9):

Figura 9 - Construção de retângulo áureo acima e segmento áureo abaixo (imagem superior e inferior).

A demonstração da formação da concha *Chambered Nautilus* evidencia a espiral logarítmica do crescimento em cada estágio consecutivo de expansão. Um retângulo áureo, na proporção 1: 1,6180339875 (Fig.10).

Figura 10 - Representação da concha *Chambered Nautilus* e sua aplicação no retângulo áureo.

Na resolução da equação, a sequência infinita de retângulos proporcionais (Fig.11), mostrada anteriormente, é descrita sendo o $a=1,61803$ e $b=1$ na equação 2:

$$\frac{a+b}{a} = \frac{a}{b} = \phi = 1,618033$$

$$\frac{1,61803 + 1}{1,61803} = \frac{1,61803}{1} = \phi$$

$$\phi = 1.618033$$

(2)

Pitágoras e seu grupo de estudantes descobriram três dos cinco sólidos convexos regulares: cubo, tetraedro, octaedro, icosaedro e dodecaedro. Traçando as diagonais de um pentágono é possível obter a estrela de cinco pontas e exemplos de proporções áureas (HEMENWAY, 2008). (Fig. 11 e Eq. 3)

Figura 11 - Convexos regulares e sua relação com o segmento áureo.

$$\frac{AD}{DF} = \phi \quad \frac{EB}{BF} = \phi$$

$$\frac{R}{X} = \frac{1,618033}{1} = \phi$$

$$\frac{AD}{DC} = \phi \quad \frac{AC}{DC} = \phi \quad \frac{AD}{AB} = \phi$$

(3)

Observando as proporções áureas calculadas no pentágono, foi possível a comparação com os formatos facetados de lapidações existentes utilizando o segmento áureo. Através da transformação da proporção áurea em porcentagem, como por exemplo (Eq. 4):

$$\frac{100}{x} = \frac{1,618}{1} \rightarrow x = 61,804$$

(4)

Portanto, para termos as proporções áureas exatas aplicadas nas gemas facetadas, as mesas deveriam possuir 61,804% da coroa, e como vemos nos exemplos abaixo, a lapidação brilhante de Marcel Tolkowsky possui a mesa com 53% (Fig.12). Nos modelos seguintes, a lapidação *Americana* ou *Cushion Cut*, a mesa possui 55%, no *Brilliant Pear* - 67% e para o *Sweetheart* - 64% (Fig.13). As proporções das mesas variam em casas unitárias para mais ou para menos em relação à proporção áurea. A porcentagem não é precisa porque, provavelmente, os criadores das facetas não utilizavam a proporção áurea como pré-requisito de desenvolvimento, mas, inconscientemente, desenvolveram algo semelhante e harmônico. Se aplicado o segmento áureo, como demonstrado nos diagramas das lapidações, *Americana*, *Brilliant Pear* e *Sweetheart*, podemos identificar que os mesmos não possuem proporções exatas à razão áurea,

porém possuem valores aproximados e, de uma maneira geral, as proporções do facetamento podem se enquadrar à proporção áurea.

Figura 12 - Proporções lapidação brilhante (BRUTON, 1978).

Figura 13 - Diagramas para facetar. O ponto vermelho representa o limite entre o 1 e o 1,618 no segmento áureo e estão aproximados das proporções ideais. De cima para baixo, formato Americana, Pera e Coração (USFACETERSGUILD, 2014).

Segundo metodologia de análise de lapidação brilhante do *Gemological Institute of America* (2009), mesas com porcentagens de 52% a 62% são consideradas excelentes, em uma escala de excelente a muito ruim descritas na tabela 5, abaixo. Estas proporções têm relação com o posicionamento do ângulo no pavilhão com a reflexão total da luz, como também as proporções harmônicas de simetria.

Tabela 5 - Tabela de proporções de tamanho de mesa (GIA, 2009).

Proporções de Mesa	
Graduação	Porcentagem
Excelente	52%-62%
Muito Bom	50%-66%
Bom	47%-69%
Ruim	44%-72%
Muito Ruim	<44% - >72%

5.4. Funcionalidade das facetas

As facetas, quando foram desenvolvidas por Marcel Tolkowsky e por seus antecessores, foram criadas para atuarem como refletores de luz, utilizando as características de refração e reflexão dos minerais. Foi percebido que um plano colocado a um determinado ângulo reflete a luz completamente, e que dois planos inclinados, um frente ao outro, colocados a um ângulo ideal, refletem a luz completamente do mesmo lado que incidiu.

Sendo assim, podemos constatar que as facetas do pavilhão são colocadas para refletir a luz incidente. Portanto, estas devem estar colocadas de acordo com o ângulo crítico, calculado a partir do índice de refração para cada mineral. A cintura ou rondiz serve para criar apoio para cravação na joia, também como local de inscrição de códigos e sustentação contra quebras. As facetas da coroa servem para mudar o ângulo da reflexão da luz dos feixes vindos do pavilhão e a direção das imagens criadas pelas arestas do pavilhão. Por último, com a reflexão total da luz e a luz retornando ao mesmo meio em que incidiu, em algumas gemas ocorre a dispersão. É através da mesa que é gerado o

campo de visualização da gema lapidada, em que são percebidos estes efeitos (Fig. 14).

Figura 14 - À esquerda, efeito visual gerado na lapidação brilhante, e à direita, topázio lapidado por Jim Phillips, com a imagem das arestas em direções discordantes para cada faceta.

A funcionalidade das facetas e dos formatos orgânicos está em utilizar as características dos minerais de refletir e refratar a luz para criar ornamentação estética, ou seja, o que as tornem mais atrativas. A atratividade pode estar ligada não somente à reflexão de luz, como também à transparência, efeitos ópticos ou a exaltação de inclusões.

5.5. Métodos de avaliação atuais de diamante

Os métodos de avaliação atuais foram desenvolvidos pelo *Gemological Institute of America* (2009) e são utilizados para mensurar na lapidação brilhante de diamantes, a qualidade da lapidação, nos itens: polimento, simetria, *Design* (aparência, fogo e cintilância), peso e durabilidade. O método de avaliação está inserido na padronização 4 C's (cut, color, clarity and carat), ou seja, (lapidação, cor, transparência e quilatagem), respectivamente.

6. Minerais Gemológicos tratados na tese

Os minerais são materiais sólidos, naturais, homogêneos, de composição química definida e arranjo atômico ordenado (KLEIN e HURLBUT, 1993; CHVÁTAL, 2007), e as gemas são na maioria minerais lapidados, que possuem características especiais como alta dureza, durabilidade, transparência, cor, efeitos ópticos, raridade e beleza. As gemas são utilizadas para fins de adorno pessoal ou objetos de arte (KLEIN e HURLBUT, 1993).

Os minerais gemológicos selecionados, nesta tese, pertencem à classe dos silicatos e foram organizados quanto à complexidade da organização atômica, da mais simples a mais complexa, em relação à classificação à classe dos silicatos e dos sistemas cristalinos, de modo a criar padrões comparativos.

O primeiro e o segundo são minerais pertencentes à família dos nesossilicatos (granada e o topázio) em que os tetraedros de SiO_4 aparecem isolados (em grego nesos, ilha), posteriormente os minerais, berilo e turmalina, pertencentes à família dos ciclossilicatos, quando os tetraedros estão ligados em anéis, círculos (em grego kyklos, círculo). A seguir, o espodumênio pertencente à família dos inossilicatos, tetraedros ligados em cadeias únicas (do grego ino, fio), e por último o quartzo pertencente à família dos tectossilicatos, em que os tetraedros são ligados tridimensionalmente em rede (do grego tecton, construtor) (Tab. 6).

Tabela 6 - Minerais gemológicos selecionados dispostos em grau de complexidade de organização atômica (TRÖGER, 1979; KLEIN e HURLBUT, 1993).

Minerais	Classe dos Silicatos	Arranjo de SiO ₄	Sistema Cristalino	Cristalografia Morfológica
Granada - Almandina	Nesosilicato		Cúbico
Topázio Imperial	Nesosilicato		Ortorrômbico
Berilo - Morganita	Ciclossilicato		Hexagonal
Turmalina	Ciclossilicato		Trigonal
Espodumênio - Hiddenita	Inossilicato		Monoclínico
Quartzo Hialino e Citrino	Tectossilicato		Hexagonal

Os minerais, quando analisados através de meios físicos, ópticos ou químicos, reagem de modos adversos por possuírem composições químicas e organização atômica diferentes. As distâncias interatômicas e os volumes de massa atômica interferem no modo como estes átomos estão “empacotados” e assim fatores como o índice de refração, diafaneidade, dureza e clivagem são variáveis (Tab. 7).

Os padrões comparativos realizados entre as características físicas, químicas e ópticas permitirão o entendimento individual de cada mineral trabalhado. A seguir, descrição dos itens comparativos e breve relato de cada mineral.

Tabela 7 - Parâmetros característicos dos minerais utilizados (TRÖGER, 1979; DEER et al., 1992; KLEIN e HURLBUT, 1993; MINDAT, 2013).

Minerais	Fórmula geral	Sistema Cristalino	Prop. Ópticas	Prop.Físicas
1-Granada	$\text{Fe}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)$ (Almandina)	Cúbico $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a_1=a_2=a_3$	1-IR: 1,76 2-A.Crít. $34^\circ 29'$	1-D. 6,5 - 7,5 2-Cliv.ausente
2-Topázio	$\text{Al}_2\text{SiO}_4(\text{F},\text{OH})_2$	Ortorrômico (+) $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$ $a \neq b \neq c$	1-IR: 1,61-1,62 2-A.Crít. $37^\circ 83'$	1-D.8,0 2-Cliv.Perfeita {001}, basal
3 - Berilo	$\text{Al}_2\text{Be}_3(\text{SiO}_3)_6$	Hexagonal (-) $\alpha=\beta=90^\circ$; $\gamma=120^\circ$ $a_1=a_2=a_3 \neq c$	1-IR: 1,58-1,59 2-A. Crít. $39^\circ 09'$	1-D.7,5 -8,0 2-Cliv.Imperfeita {0001}
4-Turmalina	$\text{Na}(\text{Li},\text{Al})_3\text{Al}_6\text{B}_3\text{Si}_6(\text{O},\text{OH})_{30}(\text{OH},\text{F})$	Trigonal (-) $\alpha=\beta=90^\circ$; $\gamma=120^\circ$ $a_1=a_2=a_3 \neq c$	1-IR: 1,62-1,64 2-A. Crít. $37^\circ 60'$	1-D. 7,0-7,5 2-Cliv. Imperfeita em {1120} e {1011}
5-Espodumênio	$\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$	Monoclínico (+) $\alpha=\gamma=90^\circ$ $\beta=110,17^\circ$ $a \neq b \neq c$	1-IR: 1,66-1,67 2-A.Crít. $36^\circ 78'$	1-D.6,5-7,0 2-Cliv.Perfeita a 94° , Prismática
6-Quartzo	SiO_2	Hexagonal (+) $\alpha=\beta=90^\circ$; $\gamma=120^\circ$ $a_1=a_2=a_3 \neq c$	1-IR: 1,54-1,55 2-A. Crít. $40^\circ 01'$	1-D.7,0 2-Cliv.ausente

6.1. Granada

As amostras de granada, utilizadas nesta tese, têm morfologia rombododecaédrica ou são anédricas, sem morfologia externa, de cor avermelhada a rósea e tamanho médio de 1cm. Não apresentam clivagem, e a sua fratura pode ser classificada como conchoidal ou subconchoidal (Fig. 15).

Figura 15 - Amostras de Granada utilizadas na tese. A primeira amostra, à esquerda apresenta morfologia rombododecaédrica e as duas, à direita, anédricas.

Os minerais do grupo da granada são particularmente característicos de rochas metamórficas, mas também são encontradas em rochas ígneas e em material aluvial (DEER et al., 1992).

A fórmula geral da granada é representada por $A_3B_2(SiO_4)_3$, em que A e B referem-se respectivamente a números de coordenação de cátions, 8 e 6. O sítio A é ocupado por cátions, grandes e bivalentes e o sítio B, cátions pequenos e trivalentes. A ocupação do sítio catiônico A pode conter Ca, Mg, Fe^{2+} ou Mn^{2+} e o sítio B incorpora Al, Fe^{3+} e Cr^{3+} . O grupo é subdividido em duas espécies; pyrospita (piropo, almandina, esferassartita) e ugrandita (uvarovita, grossularia, andradita) devido a alterações isomórficas e o nome é dado à série molecular predominante (KLEIN e HURLBUT, 1993; DEER et al., 1992) (Fig. 16).

O grupo das granadas é amplo, possuindo variedades de cores esverdeadas, amareladas e marrom. As variedades utilizadas nesta tese foram: almandina e piropo de cores vermelho escuro a róseo, identificadas através do índice de refração.

Figura 16 - Parte da estrutura da granada projetada com visualização do eixo a1, mostrando a estrutura alternada de tetraedros e octaedros (formados) e dodecaedros (desenhados como cubos distorcidos) coordenados por cátions. (DEER et al., 1992).

A escolha do posicionamento do formato de lapidação dentro do mineral de granada, é aleatória, porque a cor da granada é homogênea e geralmente escura. Para amostras com cores muito escuras, o pavilhão é deixado mais raso, para que se concentre menos material e maior passagem de luz.

6.2. Topázio

Os cristais de topázio imperial foram adquiridos com hábito prismático, de cor amarelo-escuro e róseo e com comprimento médio de 2cm. Apresentam clivagem basal perfeita na direção (001) nas ligações de Al-O e Al-F. A estrutura é relativamente densa sendo baseada em agrupamentos cúbicos e hexagonais de oxigênio e flúor (TRÖGER, 1979; DEER et al., 1992) (Figs. 17 e 18). Através de experiências práticas com a lapidação, o plano de clivagem perfeito paralelo à face basal não é facilmente identificado e destacado através do atrito ou aumento de temperatura.

Figura 17 - Topázio Imperial utilizados na tese em formatos euédricos.

O topázio ocorre principalmente em rochas ígneas ácidas, como granito e pegmatitos, e é frequentemente encontrado em veios e cavidades de rochas. É usualmente associado com o último estágio de ação pneumatolítica e pode ser constituinte em greisens. Está associado com minerais de quartzo, fluorita, turmalina, berilo, cassiterita e muscovita. Pode ser encontrado em material aluvial (DEER et al., 1992).

A estrutura do topázio consiste em cadeias de AlO_4F_2 octaédricas paralelas ao eixo c, que são ligadas a tetraedros independentes de SiO_4 . A composição é constante, apresentando variações nas porcentagens de íons de flúor e hidroxila (KLEIN e HURLBUT, 1993). Por ser ortorrômbico e biaxial, o ângulo entre os eixos ópticos (2V) reduz com a diminuição de OH e aumento de F, e o índice de refração aumenta com a diminuição de F.

Figura 18 - Cadeia estrutural do topázio, em que octaedros de AlO_4F_2 são compartilhados com tetraedros de SiO_4 . Eixo c representado pelo eixo z descrito na figura (DEER et al., 1992).

O topázio é encontrado nas cores: azul, incolor, marrom ou róseo. O posicionamento do formato de lapidação no bruto é colocado de forma longitudinal, perpendicular ao eixo c, para melhor aproveitamento do material.

6.3. Berilo

As amostras de berilo adquiridas para as análises possuem formato subédricos, ou ausente com morfologia externa, anédrica, de coloração rosa claro e azul claro, referentes às variedades morganita e água-marinha, respectivamente, com fraturas, inclusões fluidas internas e tamanho médio de 6cm. Neste trabalho, apenas as de coloração rosa foram utilizadas. Apesar de possuir clivagem imperfeita (0001), possui boa coesão dos átomos e a clivagem é imperceptível durante o processo de lapidação (Fig. 19).

Figura 19 – Amostras de berilo (água-marinha e morganita) adquiridos para esta tese.

O berilo e/ou água-marinha ocorrem comumente em veios e drusas de granito, em granito pegmatítico, associado com minerais que incluem quartzo, feldspato, muscovita, lepidolita, topázio, turmalina, espodumênio, cassiterita, columbita e tantalita. O berilo também ocorre em nephelina sienitos, mica xistos e mármore. A esmeralda é restrita à paragênese metamórfica, tipicamente ocorrente em biotita xistos e em veios de calcita em calcário betuminoso (TRÖGER, 1979; DEER et al., 1992).

As características dominantes da estrutura hexagonal do berilo é conter anéis de seis tetraedros de SiO_4 que formam colunas paralelas ao eixo c. Neste

grupo, dois dos átomos de oxigênio nos tetraedros são compartilhados com outros SiO_4 na estrutura. Entre os anéis, estão os átomos de Al e Be, em que a coordenação de Al se apresenta em coordenação octaédrica em um grupo com seis átomos de oxigênio e o Be é rodeado por quatro átomos de oxigênio em um tetraedro distorcido. Nestes canais, certa quantidade de íons e moléculas tais como: $(\text{OH})^-$, H_2O , F, He e íons de Rb, Cs, Na e K podem ser hospedados (DEER et al., 1992; KLEIN e HURLBUT, 1993).

A presença de íons de metais de transição, como Fe^{2+} , Fe^{3+} , Cr^{2+} , V^{3+} , Cu^{2+} , Mn^{2+} , entre outros, na forma de impurezas intersticiais e substitucionais na estrutura do mineral, é responsável pela gama de cores que o berilo apresenta (KLEIN e HURLBUT, 1993). O berilo possui as variedades: água-marinha (azul), esmeralda (verde), goshenita (incolor), morganita (róseo), heliodoro (amarelo) e bixbita (vermelho-salmão).

As propriedades ópticas do berilo são afetadas pelo conteúdo alcalino do mineral. Se o teor alcalino aumentar, o índice de refração aumenta e a birrefringência também aumenta progressivamente. A densidade e índice de refração aumentam com a diminuição de porcentagens de BeO (DEER et al., 1992) (Fig. 20).

Figura 20 – Organização atômica projetada no plano basal {0001} (TRÖGER, 1972; DEER et al., 1992).

6.4. Turmalina

As amostras de variedades de turmalina foram adquiridas em formato euédrico prismático, de coloração intensa verde, azul, rosa e bicolores, de comprimento médio de 3cm, porém apenas as de cores verdes e azuis foram utilizadas, variedades chamadas por verdelita e indicolita (Fig. 21).

Figura 21 – Turmalina (verdelita, rubelita e bicolores) utilizadas na tese.

A turmalina ocorre comumente em granitos pegmatíticos, veios pneumatolíticos e algumas formações de granito. Pode ser encontrada em rochas metamórficas como um produto de metassomatismo de boro ou materiais aluviais. Em alguns pegmatitos, o último estágio de cristalização é rico em lítio e turmalinas coloridas são desenvolvidas apresentando associação com os minerais: lepidolita, berilo, apatita, fluorita e minerais raros (KLEIN e HURLBUT, 1993).

A estrutura da turmalina é romboedral e é expressa pela fórmula geral $XY_3Z_6(BO_3)_3(T_6O_{18})V_3W$. Os sítios X, poliédricos, podem ser ocupados por Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , ou ainda se manter vazios. Os sítios Y e Z, são de coordenação octaédrica, Z é de tamanho menor e mais distorcido, usualmente ocupado por Al^{3+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mg , Cr^{3+} , e V^{3+} , enquanto o sítio Y permite diversas e extensivas substituições, envolvendo Fe^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Li^+ , Fe^{3+} , Mn^{2+} , V^{3+} , Cr^{3+} e Ti^{4+} . O boro, em coordenação triangular regular, aparentemente, não sofre substituição. O sítio T, tetraédrico, é predominantemente ocupado por Si, cuja concentração pode ser menor que seis átomos por fórmula unitária, permitindo a acomodação

de quantidades significativas de Al. Os dois sítios restantes, V e W, acomodam ânions monovalentes (OH, F) e ou bivalentes (O^{2-}), sendo V ocupado por OH e O^{2-} e o W, ocupado por OH, F e O^{2-} ou ainda manterem-se vazios.

O primeiro passo para reconhecer a espécie é determinar a ocupação dominante do sítio X, classificando-as em turmalinas alcalinas (Na+K dominante), cálcicas (Ca, dominante) ou com vacâncias [], constituindo os três subgrupos principais. Em seguida, os subgrupos principais são divididos em mais três subgrupos secundários designados por hidróxi-flúor ou óxi-turmalina em função da ocupação dos sítios W e V. As demais designações são decorrentes da ocupação preferencial dos sítios Y e Z.

Os membros finais desse grupo constituem séries isomórficas completas e parciais. As quatro principais séries são a elbaíta-schorlita, a schorlita-dravita, a elbaíta-liddicoatita e a dravita-uvita. Entretanto, outros dois tipos diferentes de substituição podem ocorrer nessas séries, denominados desidroxilação [$(OH)^- + R^{2+} = O^{2-} + R^{3+}$] e deficiência de álcalis [$R^+ + R^{2+} = [] + R^{3+}$]. Essas substituições produzem membros intermediários no grupo, determinando uma nova série definida por membros finais deficientes em prótons ou sem álcalis (CASTAÑEDA et al., 2001). Estas classificações, consideram a combinação de até 29 espécies de variedades de turmalina (DEER et al., 1992) (Fig. 22).

Figura 22 - Organização atômica projetada perpendicular ao eixo C (TRÖGER, 1979; KLEIN e HURLBUT, 1993).

Os índices de refração, a birrefringência e a densidade aumentam conforme o aumento de quantidade de Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn, Ti. O pleocroísmo é

variável e intenso, mas é particularmente forte com amostras de turmalina com porções maiores de Fe.

Os desenhos de lapidação são normalmente localizados perpendiculares ao eixo c.

6.5. Espodumênio

As amostras de espodumênio foram adquiridas em formatos subedrais, de coloração verde claro (Hiddenita) e tamanho médio de 2cm (Fig. 23).

Figura 23 - Espodumênio Hiddenita utilizados nesta tese.

O espodumênio é um raro piroxênio, monoclinico, de lítio. Os piroxênios são um importante grupo de minerais de rochas silicáticas (Fig. 24).

Os piroxênios são cristalizados em dois subgrupos polimórficos: ortorrômbo (ortopiroxênios) e monoclinico (clinopiroxênios). O espodumênio pertence à série isomórfica dos clinopiroxênios e tem composição química, $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, um silicato de lítio e alumínio. É comumente encontrado em rochas de composição granito-pegmatíticos, ricas em lítio. Possui as variedades rosa, com o nome de *Kunzita* e, verde, com o nome *Hiddenita*.

Figura 24 - Arranjo atômico, vista superior e vista lateral, em que os tetraedros de cor cinza representam as cadeias de SiO_3 e os octaedros de cor verde e esferas porções de Li e Al, respectivamente (GEOARIZONA, 2011).

Com o intuito de confirmar o ângulo de clivagem descrito por Tröger (1979), foi feito um experimento com Goniômetro no Laboratório Gemológico Alemão (DGemG), com uma amostra de espodumênio clivada. A clivagem medida apresentou o ângulo de $93,3^\circ$, com as fixações nas angulações $340^\circ 20'$ e $73^\circ 50'$, sendo a definição de Tröger (1979) de 94° (Fig. 25).

Figura 25- Demonstração de espodumênio antes da separação de partes pós clivagem, medidas em goniômetro.

Nas oficinas de lapidação, o formato lapidado é encaixado no mineral bruto de modo que as facetas não estejam paralelas a planos de clivagem.

6.6. Quartzo

As amostras de quartzo foram adquiridas em formatos subedrais ou sem forma, anedrais, nas variedades ametista, hialino e citrino, com zoneamentos de coloração de crescimento, que permitissem identificar a orientação cristalográfica. As amostras possuíam tamanho médio de 3cm (Fig. 26).

Figura 26 – Amostras de quartzo ametista, hialino e citrino anédricos ou subédricos utilizadas na tese.

A sílica é um dos minerais mais abundantes e ocorrentes na crosta terrestre. É o mineral constituinte essencialmente de rochas ígneas, metamórficas, sedimentares e sistemas hidrotermais.

O quartzo α é composto por uma estrutura tridimensional de tetraedros de SiO_4 , chamado de tectossilicato. A composição química é dada por SiO_2 , porém com pequenos conteúdos de íons substitucionais e intersticiais (DEER et al., 1992). O quartzo é um dos minerais mais estáveis e resistentes a ataques químicos. O quartzo α é o tipo de quartzo estável em temperaturas atmosféricas até 573°C e o quartzo β $> 573^\circ\text{C}$ (Fig. 27).

Figura 27 - Organização atômica, tendo o quartzo α à esquerda (trigonal) e quartzo β à direita (hexagonal) (TRÖGER, 1979; CAMBRIDGE, 2011).

O quartzo é um mineral de aparência homogênea, com zoneamento de cor e inclusões que podem ser ressaltados na lapidação. O formato a ser lapidado é normalmente enquadrado com o posicionamento do zoneamento no fundo do pavilhão, para que a cor seja refletida, valorizando a inclusão, ou aleatoriamente, para os de cores homogêneas.

7. Definição do Tribossistema

A definição de um tribossistema, segundo a tribologia original voltada para o estudo de materiais metálicos, analisa o registro do sulco gerado durante o processamento através das características do comportamento da interação do corpo, contra-corpo, terceiro-corpo e lubrificantes. Desta maneira, variáveis são analisadas de formas complementares para obtenção do diagnóstico, como por

exemplo: composição química, estrutura física, dureza, angulosidade do grão, velocidade de rotação da máquina e coeficiente de atrito.

Para a definição do tribossistema relacionado à lapidação de gemas, foi desenvolvida uma sequência metodológica, descrita na figura 28, em que inclui itens e metodologias que não foram realizadas neste trabalho, porém descrevem o processo completo de análise. Na figura 29 estão descritos o raciocínio de análise das amostras utilizadas nesta tese, sendo o item Lubrificantes (pHmetro) excluído deste trabalho.

Figura 28 - Sequência tribológica adequada para a lapidação de gemas.

Figura 29 - Relação dos itens analisados e equipamentos utilizados.

A lapidação de gemas permite a configuração de faces planas ou arredondadas, utilizando disco ou rebolo indicado para a aquisição de cada forma. Cada processo gera resultados diferentes de superfície. Nesta tese, as superfícies analisadas serão resultantes de rebolos na pré-formação e discos no facetamento e polimento, ou seja, o uso da técnica de facetamento em que as superfícies são mais planas. No entanto, comparações podem ser feitas com o polimento com rebolo de feltro, que é utilizado em formatos orgânicos.

8. Análises Ópticas

A luz é uma onda eletromagnética, cujo comprimento de onda se inclui em um determinado intervalo que pode ser visto pelos seres humanos. A faixa do espectro visível contém radiação de fótons capazes de sensibilizar o olho humano e estão compreendidos entre a faixa de nanômetros, 370 a 750, do violeta ao vermelho.

Neste trabalho, as análises ópticas referenciadas às gemas, determinaram-se através de experimentações do comportamento da luz em interação com os minerais selecionados, com os padrões de reflexão e refração.

Segundo a lei da reflexão, o feixe de luz ou o raio incidente é refletido com o ângulo oposto que incidiu, no mesmo plano, em um mesmo meio. A refração consiste na mudança de velocidade e direção do feixe de luz que ultrapassa um meio a outro, sendo mensurados seus ângulos através da lei de Snell. (Eq. 5).

$$n_{ar} \cdot \sin i \text{ (angulo incidente)} = n'_{\text{mineral}} \cdot \sin r' \text{ (angulo refletido)} \quad (5)$$

Tendo este conhecimento, Marcel Tolkowsky (1919) desenvolveu proporções matemáticas que aprisionaram a luz dentro do mineral, ou seja, criavam a reflexão total da luz utilizando características próprias dos minerais em refletir a luz a um determinado ângulo (ângulo crítico) e criou a lapidação brilhante. Após esta descoberta muitas variações surgiram.

O **ângulo crítico** é determinado quando o ângulo de incidência do feixe de luz é de 90° e quando refrata-se, passando de um meio para outro, não ultrapassa os meios, os feixes mantêm-se paralelo à superfície. A fórmula utilizada para esta resolução é também a Lei de Snell.

Estudos e discussões adiante levam em consideração os efeitos ópticos de cada mineral utilizado. São as análises:

- a) Estudo de ângulos colocados no pavilhão da lapidação (ângulo crítico e reflexão total da luz), usando o feixe de raio à laser Phywe DIN 58126 e Goniômetro.
- b) Orientação óptica com o Polariscópio Gemológico.

- c) Observação da reflexão de luz nas facetas com diferentes proporções usando o IdealScope®.

Os equipamentos foram disponibilizados pelo *Deutsche Gemmologische Gesellschaft* (DGemG) com acompanhamento do Dr. Ulrich Henn.

8.1. Luz incidente, refratada e refletida.

A reflexão acontece no limite entre dois meios com diferentes densidades, ou seja, a superfície. A luz atinge a superfície e reflete no ângulo oposto em que incidiu, sem atravessar os materiais. Quando a luz atravessa o limite da superfície, ocorre a refração. Quando o feixe de luz passa de um meio para outro, ocorre a razão entre os senos do ângulo incidente e o ângulo de refração. A mudança do ângulo do feixe depende da velocidade que a luz atinge e seu comprimento de onda, o que é definida pela lei de Snell, mencionada acima (Eq. 5) (READ, 1991).

A luz refletida se comporta de duas maneiras em relação à superfície refletida: se a superfície for altamente polida, semelhantes como espelhos ou superfícies metálicas, o ângulo de reflexão é perfeito, segundo a lei de Lambert, de maneira especular. Em superfícies rugosas, os feixes encontram uma superfície com obstáculos e refletem em outras direções, de forma difusa, como demonstrado figura abaixo (Fig. 30), comprometendo o brilho (WAHLSTROM, 1969).

Figura 30 – Reflexões de luz de maneira especular e difusa (OPTICAMPUS.COM, 2014).

A refração ocorre quando a luz atravessa meios de densidades diferentes e sofre mudanças, como: mudança de ângulo, velocidade, absorção e dispersão. Quando colocamos uma caneta inclinada dentro de um copo com água, podemos ver claramente a quebra da imagem em relação à superfície, exceto em um caso especial, quando a caneta é colocada verticalmente a 90° (TOLKOWSKY, 1919).

Ao considerarmos o feixe de luz saindo de um meio mais denso para um menos denso, ocorrem diferentes situações: o feixe de luz refrata ao deixar o meio mais denso, porém também reflete para o mesmo meio que incidiu, conforme demonstrado na figura 31, abaixo. Na terceira posição em que o feixe de luz alcança o ângulo crítico, reflete e também refrata paralelamente à superfície divisora de meios e isto ocorre apenas do meio mais denso para o menos denso. No quarto caso, feixes com ângulos acima ao ângulo crítico são refletidos completamente (reflexão total da luz). O ângulo crítico pode ser calculado através da lei de Snell com o seno de 90° .

Figura 31 - Representação da reflexão e refração da luz (FÍSICA-UFPR, 2014).

8.2. Determinação dos melhores ângulos e proporções

Através da lapidação facetada, é possível colocar ângulos ideais nas facetas que permitam que a luz retorne ao mesmo plano em que incidiu, ocorrendo a retrorreflexão, permitindo a maior brilhância.

O fenômeno que ocorre com a reflexão total da luz, está relacionado ao ângulo que a luz se comporta quando incide dentro da gema, ao valor do ângulo crítico e ao ângulo em que as facetas estão colocadas, para que através das leis da óptica, a luz seja refletida em todas as facetas e retorne ao mesmo plano que incidiu.

Quando a luz atinge o ângulo crítico de reflexão do mineral, a luz escapa do mineral tangencialmente à superfície, como verificado na figura 31, fazendo com que a soma de luz percebida pelo observador seja nula, porque a luz deixa o mineral perpendicularmente a visão do observador. A equação 6 descreve o cálculo do ângulo crítico para a granada.

$$n_{ar} \cdot \sin i \text{ (angulo incidente)} = n'_{mineral} \cdot \sin r' \text{ (angulo refletido)}$$

$$\sin r' = \frac{n \cdot \sin i}{n'}$$

$$\sin r' = \frac{1 \cdot \sin 90^\circ}{1,77 \text{ (granada)}}$$

$$\sin r' = \frac{1.1}{1,77}$$

$$\sin r' = 0,5649$$

(6)

A partir do cálculo dos ângulos críticos para cada mineral, foi proposto por Hartig (1974) e experimentados por Vargas et al. (1988) e Kühne e Brepohl (1988) uma série de ângulos ideais para serem colocados no pavilhão e coroa em função do tipo de gema (Tab.8).

Tabela 8 - Tabela de ângulos ideais para serem colocados no pavilhão e coroa para cada mineral.

Minerais	IR	Resultado Lei de Snell	Leitura do Seno – Ângulo crítico	Angulo pavilhão (Hartig, 1974)
Granada	1,77	0,5649	34°29'	39-42°
Topázio	1,625	0,6153	37°83'	39-40°
Berilo	1,585	0,6309	39°09'	40-43°
Turmalina	1,635	0,6116	37°60'	39-40°
Espodumênio	1,665	0,6006	36°78'	39-40°
Quartzo	1,555	0,6430	40°01'	41-43°

Ao observar a tabela, é possível verificar que os ângulos dos pavilhões propostos pelos autores são maiores que o valor do ângulo crítico obtido. O valor é maior, porque o objetivo da reflexão de luz está em atingir a visão do observador localizado a 90° da superfície e não tangencialmente, como ocorre com o ângulo crítico. Portanto o cálculo atinge a reflexão total da luz, ou seja, valores maiores ao ângulo crítico.

Como mostrado na figura 32, o feixe incidente de luz ao penetrar o mineral e ser refletido em uma das faces, repete a lei de reflexão, sendo mostrado ao lado oposto.

Tolkowsky (1919), no capítulo sobre a determinação dos melhores ângulos e proporções na sua tese de doutorado, tendo um bloco de mineral

cortado com facetas, analisou o caminho da luz, a partir de um eixo central. Assim ele percebeu como ocorrem a refração e reflexão da luz (Fig. 32).

O caminho da luz, ao incidir a 90°, reflete nas faces do pavilhão e deixa o mineral tangencialmente à superfície, onde a brilhância é nula. Deste modo, propôs que o ângulo de incidência deva ser menor que 90°, para que o seno do ângulo de refração seja proporcionalmente menor, evitando a incidência do ângulo crítico e favorecendo a reflexão total da luz, para que a luz saia do mineral e alcance a visão do observador.

Conforme relata Tolkowsky (1919), “O ângulo de dispersão do feixe de luz é proporcional ao seno do ângulo de refração e a soma de luz é proporcional ao cosseno do ângulo de refração”, sendo assim, “a máxima brilhância é produzida tanto com a igualdade entre a soma de luz e o ângulo de dispersão, e isto ocorre quando o seno e o cosseno do ângulo de refração são iguais, ou seja, 45°”. Está demonstrada abaixo a exemplificação com o índice de refração da granada (Eq. 7):

$$\text{Sen}_{\text{ângulo crítico}} = \frac{\text{sen } 45^\circ}{1,78} = \frac{0,7071}{1,78} = 0,3994 = 23^\circ 56'$$

(7)

Portanto, há de se concluir que o ângulo encontrado é menor que o calculado para o ângulo crítico ocorrente a 90° e o feixe de luz incidente e refletido é 45° e 135°. Segundo Tolkowsky (1919), segue abaixo o cálculo dos ângulos internos de incidência e reflexão (Fig. 32 e Eq. 8).

Figura 32 - Reprodução do estudo de ângulos de incidência, refração, reflexão e ângulo crítico a partir de um eixo (TOLKOWSKY, 1919).

$$\text{ângulo } QRC = \text{ângulo } SRB = i$$

$$\text{ângulo } Q'RB = \text{ângulo } QRC$$

$$\text{ângulo } SRQ' = 2i$$

$$\text{ângulo } ZRQ' = \text{ângulo } ZRS + \text{ângulo } SRQ'$$

$$\text{ângulo } ZRQ' = \text{ângulo } PQR = 2 * \alpha$$

No ângulo ZRQ'

$$\text{ângulo } ZRQ' = \text{ângulo } ZRS + \text{ângulo } SRQ'$$

$$2 * \alpha = x + 2 * i$$

No triângulo QRC

$$\text{ângulo } QRC = 90^\circ - \alpha$$

$$\text{ângulo } QRC = i$$

$$\text{ângulo } 2 * (90^\circ - \alpha)$$

Entretanto

$$(90^\circ - \alpha) + i + 180^\circ - 2 * \alpha = 180^\circ$$

$$i = 3 * \alpha - 90^\circ$$

Introduzindo o valor para i em (eq. 02)

$$2 * \alpha = x + 6 * \alpha - 180^\circ$$

$$4 * \alpha = 180^\circ - x$$

E dando o valor de x ao valor de $23^{\circ}38'$

$$4 * \alpha = 180^{\circ} - 23^{\circ}38'$$

$$\alpha = 39^{\circ}15'$$

(8)

Entretanto, podemos relacionar o valor de α de Tolkowsky (1919) com o valor sugerido por Hartig (1974). Segundo a Lei de Snell, o valor do ângulo crítico para a granada é $34^{\circ}37'$ e o de Tolkowsky (1919) é de $39^{\circ}15'$, sendo o arredondamento para o ângulo do pavilhão de Hartig (1974) para $39^{\circ} - 42^{\circ}$, abrangendo uma margem de reflexão, o que justifica o cálculo de maior aproximação de Tolkowsky (1919).

Com os resultados, podemos concluir que quanto maior é o índice de refração, menor é o ângulo crítico e menos profundo é o pavilhão, utilizando-se menos material, que é o caso do diamante.

8.2.1. Reflexão com feixe à laser

Para a realização da pesquisa foi utilizado o equipamento de feixe à laser monocromático da marca Phywe, no *Deutsche Gemmologische Gesellschaft* (DGemG). O feixe à laser monocromático vermelho possui as configurações 0,2-1mW, comprimento de onda de 632,8nm, classe 2, DIN58126 e 230V/35VA.

A experiência surgiu do interesse de visualizar o comportamento da luz em relação aos ângulos colocados no pavilhão, como foi demonstrado por Lenzen (1984), conforme figura mostrada a seguir (Fig. 33).

Figura 33 - Experimento relatado por Lenzen (1984) (esquerda) e equipamento utilizado no DGemG (direita).

O ensaio foi feito em amostras dos seis minerais estudados neste trabalho lapidados com o ângulo correto no pavilhão e coroa, ângulos estes propostos por Hartig (1974), nos quais foram observados os padrões da reflexão da luz. Os ângulos colocados nos pavilhões de cada mineral foi: granada (40°), topázio (40°), berilo (41°), turmalina (40°), espodumênio (40°) e quartzo (42°).

Deve ser levada em consideração que o índice de refração do material foi medido no refratômetro gemológico que tem luz monocromática amarela (lâmpada de sódio) de comprimento de onda de 589,3nm, com duas aproximadas linhas de emissão e o comprimento de onda do equipamento de feixe à laser é 632,8nm, o que pode causar pequenas alterações na direção do ângulo de refração (READ, 1991).

Foram feitos testes em cada mineral com a visualização do feixe de luz incidindo e refletindo nos planos do pavilhão.

Na primeira análise, foi possível visualizar o feixe de luz percorrendo a granada, por ser um mineral escuro e translúcido, porém nos outros minerais de cores claras ou incolores podemos verificar a cor avermelhada em todo o mineral e o retorno do feixe ao mesmo lado em que incidiu, determinando a reflexão total da luz (Figs. 34 a 39). A análise foi eficiente para comprovação de que a gama de ângulos propostos por Hartig (1974) favorece a reflexão total da luz em todos os minerais.

Figura 34 - Amostra de granada com luz refletida vista lateralmente e em perspectiva. É possível verificar o mineral aceso pela reflexão total da luz.

Figura 35 - Amostra de topázio com luz refletida lateralmente e em perspectiva.

Figura 36 - Amostra de berilo com luz refletida lateralmente e em perspectiva.

Figura 37 - Amostra de turmalina com luz refletida lateralmente e em perspectiva.

Figura 38 - Amostra de espodumênio com luz refletida lateralmente e em perspectiva.

Figura 39 - Amostra de quartzo com luz refletida lateralmente e em perspectiva.

Com o posicionamento de um plano próximo ao feixe de luz refletido foi possível identificar o feixe refletido, a perda de intensidade e o espalhamento da luz (Fig. 40).

Figura 40 - Reflexão total da luz na mesma superfície de incidência, em ângulos maiores que 90° em relação à superfície.

8.2.2. Goniômetro

O goniômetro é um instrumento de medida de ângulos em forma circular graduada em 360° , utilizado para medir ângulos entre superfícies refletoras de um cristal ou um prisma. O equipamento consiste inicialmente em um tubo colimador que gera o foco de luz, atingindo a face do mineral, sendo refletido e captado pelo tubo ocular. O mineral é colocado na mesa angular central interligada ao disco graduado, que mede o ângulo entre duas faces, ou reflexões. Este Goniômetro de mesa foi utilizado no *Deutsche Gemmologische Gesellschaft*, com acompanhamento do Dr. Ulrich Henn (Fig. 41).

Figura 41 - Goniômetro - Deutsche Gemmologische Gesellschaft.

Nesta tese, os minerais estavam cortados e polidos em formatos prismáticos triangulares com ângulos ideais propostos por Hartig (1974) (os mesmos utilizados no capítulo anterior 8.2). O objetivo estava em confirmar os ângulos colocados e a qualidade de precisão do graduômetro da catraca de lapidação da marca Otto Eigner, (Fig, 42) abaixo, original de Idar-Oberstein, utilizada na *Fachhochschule Trier*. As catracas possuem marcas de graduação em escala milimétrica e são movimentadas conforme a aplicação da pressão pelo lapidário. O nônio da catraca de lapidação, localizado do lado esquerdo da medição, relaciona as medidas menores após a vírgula.

Figura 42 - Catraca de graduação de ângulos, marca Otto Eigner e localização do nônio à esquerda.

No Goniômetro, o colimador e o tubo ocular foram posicionados a 90°, relacionando o feixe incidente e refletido na superfície da amostra. A medição foi feita com a visualização da reflexão da luz na face desejada, de modo centralizado. O ponto inicial é registrado e gira-se a barra central em direção à próxima face até atingir a reflexão da luz. A última e a primeira medida devem exibir o mesmo número, confirmando o fechamento de 360° e a soma dos ângulos internos 180° (Fig. 43).

Figura 43 - Tubo ocular com reflexão colimada (esquerda) e barra central com mineral prismático posicionado (direita).

O goniômetro possui um disco com medidas equidistantes de 0° a 360° e outra lamina que identifica o nônio, ou seja, a medição em minutos. No disco de graus, cada grau é dividido ao meio, a leitura avança de $30'$ a $30'$. A leitura do ângulo e dos minutos dá-se pelo encontro dos traços, na lâmina dos graus e dos minutos a partir do zero. Quando se lê o ângulo inteiro, deve-se ler se ultrapassa a sua metade ou está antes e, a partir daí, verificar qual é o próximo traço no campo dos nônios que encontra os traços dos ângulos. Caso o traço do nônio cruze na segunda metade do minuto, o valor deve ser multiplicado por 2 (Fig. 44).

Figura 44 - Exemplificação de graus (acima) e nônios (abaixo) do goniômetro com a medição de $227^\circ 13'$.

As medidas colocadas na escala graduada da catraca de lapidação de Otto Eigner não apresentaram resultados precisos, porque o equipamento permite a movimentação do ângulo em relação à pressão colocada durante o facetamento.

A tabela abaixo mostra os ângulos que foram lapidados e os ângulos que foram determinados através do goniômetro. As somas dos ângulos descritos resultam em 180° (Tab. 9).

Tabela 9 - Relação de ângulos obtidos na catraca de lapidação da marca Otto Eigner e as leituras no goniômetro obtendo total de 180° (ângulo 1-entre os pavilhões) (ângulo 2 – entre mesa e pavilhão) (ângulo 3 – entre mesa e pavilhão).

Minerais	ângulo proposto	ângulo1	ângulo2	ângulo3
Granada	40	102,00	38,99	39,01
Topázio	40	101,24	37,74	41,02
Berilo	41	87,98	49,43	42,59
Turmalina	40	99,59	40,42	39,99
Espodumênio	40	99,04	40,64	40,33
Quartzo	42	95,21	42,09	42,70

8.2.3. Dispersão

A dispersão é um fenômeno de espalhamento dos comprimentos de onda da luz e isso ocorre fortemente com o diamante, com dispersão de 0,044, o zircão com 0,039, a andradita ou demantóide com 0,057 (SCHUMANN, 2006). Na Gemologia, este fenômeno é chamado de brilhância ou fogo, e os minerais utilizados neste trabalho possuem dispersão menor que o diamante e pouca demonstração de fogo na dispersão de luz (Tab. 10).

Tabela 10 - Valores de dispersão da luz nos minerais selecionados.

Minerais	Dispersão
Granada (piropo, almandina)	0,022-0,027
Topázio (imperial)	0,014
Berilo (morganita ou goshenita)	0,014
Turmalina (elbaíta)	0,017
Espodumênio (hiddenita)	0,017
Quartzo (hialino ou citrino)	0,013

8.3. Orientação cristalográfica utilizando o polariscópio

Uma maneira prática e acessível de orientar os minerais para então serem lapidados com faces paralelas a faces cristalográficas, é com o uso do Polariscópio (Fig. 45).

O Polariscópio é um equipamento comumente utilizado por gemólogos para distinguir minerais isotrópos de anisótipos. O equipamento é formado por dois planos paralelos polaróides, em que um é o foco de luz e o outro, superior, é a lente polarizada, localizados a uma distância suficiente para que a gema analisada seja colocada entre os planos, o que permite identificar minerais isotrópicos e anisotrópicos por absorção de luz. O plano inferior é rotacionável e o plano superior, fixo. Um feixe de luz é emitido por baixo do plano inferior e visualizado através dos dois planos.

O equipamento foi utilizado no Laboratório Gemológico Alemão, *Deutsche Gemmologische Gesellschaft*.

Figura 45 - Polariscópio Schneider utilizado em *Deutsche Gemmologische Gesellschaft*.

A proposta desta experiência é de localizar nos minerais os eixos ópticos e a partir desta experiência, o seu posicionamento para lapidação. A prática de orientação cristalográfica é importante para lapidação, devido à determinação de diferentes durezas, clivagens e comportamento da luz ao longo dos diferentes eixos cristalográficos.

A orientação cristalográfica não é algo comumente utilizada na lapidação de gemas coradas atualmente, por causa da necessidade de conservar o máximo de peso para comercialização e à falta de trabalhos científicos indicando a sua importância.

Os minerais transparentes são divididos em isotrópicos e anisotrópicos. Os minerais isotrópicos possuem eixos cristalográficos de tamanhos equivalentes e a luz se move com a mesma velocidade em todas as direções. Neste trabalho o mineral isotrópico utilizado foi a granada. Os minerais isotrópicos quando observados em polariscópio, não interagem com a luz quando rotacionados a 360°. Sua orientação é aleatória em referência à passagem de luz.

Para os minerais anisotrópicos, os eixos cristalográficos possuem tamanhos desiguais e a luz se comporta de duas ou três maneiras, porém no polariscópio e refratômetro é possível verificar apenas duas maneiras. A luz é dividida em dois ou três feixes, sendo próprios dos minerais uniaxiais ou biaxiais, respectivamente. Os minerais uniaxiais possuem um eixo óptico e os biaxiais, dois eixos ópticos. Quando observados em polariscópio, estas diferenças de velocidade da luz fazem com que os minerais interajam diferentemente e produzam luz quando se encontram paralelamente à lente polarizada, iluminando a lente superior. Em alguns casos, é possível identificar a figura de interferência do eixo óptico utilizando a lente conoscópica.

A dinâmica do ensaio foi identificar o eixo óptico em minerais que tivessem, ou não, morfologia cristalográfica externa aparente e confirmar o posicionamento dos eixos cristalográficos com base em Tröger (1979).

A lapidação de minerais orientados perante a estrutura cristalografia possibilitaria a previsão do comportamento físico de cada eixo, como: dureza, taxa de desgaste, clivagem, cisalhamento. Seguem abaixo, as experiências com polariscópio (Figs. 46 a 51). O mineral granada foi fotografado apenas para registrar a ausência da interação óptica.

Este estudo foi desenvolvido após a preparação das amostras para estudo de qualidade de superfície e será utilizado em estudos futuros para lapidação orientada. Portanto os resultados de superfície demonstram apenas brilho e rugosidade sem a interação efetiva da orientação cristalográfica.

O uso do Polariscópio é uma maneira simples e efetiva para orientação de cristalográfica de minerais gemológicos.

Figura 46 - Granada, mineral isotrópico, sem alterações nas quatro posições.

Figura 47 - Rotação de topázio a 360° e posicionamento perpendicular coincidente com o eixo óptico (três últimas imagens). Mineral biaxial, ângulo 2V 48-68° (referência bibliográfica), não é possível ver a separação das isógeras.

Figura 48 - Identificação do berilo através de eixo óptico e rotação em posição perpendicular. Identificação do eixo óptico na primeira imagem à esquerda. Mineral uniaxial.

Figura 49 - Turmalina melancia rotacionada a 360° e identificação de eixo óptico no eixo C (três últimas imagens).

Figura 50 - Espodumênio - Identificação de eixo óptico em todas as imagens e rotação em 360°. Mineral biaxial, não foi possível sua visualização em lente conoscópica.

Figura 51 - Quartzo hialino analisado perpendicular ao eixo óptico e identificação de eixo óptico no eixo C. (quatro últimas imagens)

8.4. Ideal Scope e Reflexão total da Luz

No Laboratório Gemológico Alemão de Idar-Oberstein, *Deutsche Gemmologische Gesellschaft* (DGemG), utilizou-se o IdealScope® com filtro vermelho e analisaram-se proporções em lapidações brilhantes e o comportamento de reflexões, com diamante e zircônia cúbica, para melhor entendimento da diferença entre os ângulos de pavilhão (Fig. 52).

O equipamento foi posicionado dentro de uma mesa de luz fotográfica com quatro pontos de luz e a câmera utilizada foi Canon EOS 1100D Macro.

Figura 52 – Diamond Cut Proportion ou IdealScope®- DGemG.

O princípio de funcionamento do IdealScope® foi baseado na descoberta de Okuda nos anos de 1970 em que uma lente de 10x posicionada ao meio de paredes refletoras de cor rosa, permitia a visualização de um diamante lapidado ao centro deste refletor. O instrumento quantificava a brilhância das facetas, ou seja, a reflexão de cor branca significava luz transmitida ou vazamento de luz, a cor preta, bloqueio de luz e a cor rosa, reflexão total da luz (Figs. 53 e 54) (PRINCESCOPE.COM, 2014).

Figura 53 - Efeitos de visualização do IdealScope® (PRINCESCOPE.COM, 2014)

Figura 54 – Relação de refletividades demonstrada por IdealScope®.

Foi possível analisar e comparar diamantes e zircônias cúbicas com suas características ideais e ruins de reflexão (Fig. 55).

Figura 55 - Proporções variadas em lapidação brilhante. Diamante (acima) e zircônia cúbica (abaixo).

Ao avaliar a figura 55, acima, as melhores lapidações foram de 44% e 42,7%, com retorno de luz em tonalidade vermelha e as piores, de porcentagem 47% e 47,5%, por demonstrarem pontos de vazão de luz próximo à cintura e também no centro do mineral. Segundo as análises do DGemG, o diamante de 44% e 42,1% são muito bons, e as de 47% e 47,6% suficientes. As zircônias cúbicas são demonstradas em aula como modelos de reflexão, como ruim, bom e muito bom.

Este estudo é exemplo para o entendimento de reflexões em lapidações facetadas e podem ser aplicadas ao estudo de minerais gemológicos coloridos e seus diferentes índices de refração e angulações de pavilhão. A cor refletiva, neste caso, deve ser oposta ao do mineral. O estudo de reflexão de luz e uso do

IdealScope® foi aplicado nas experiências de Projeto de *Design* na *Fachhochschule Trier* e análises ópticas.

9. Análises Físicas

A lapidação de gemas é um processo mecânico de abrasão e desgaste de minerais gemológicos, que visa a diminuição de grãos abrasivos em cada etapa para a obtenção de uma superfície polida. A lapidação de gemas, por ser um processo mecânico e interagir com os minerais de forma física e química, faz parte do ramo de estudos da Engenharia de Materiais e da Tribologia.

A Engenharia de Materiais é um ramo da engenharia em que a interdisciplinaridade entre a física e química é requerida na pesquisa de produção e transformação da matéria, em que são necessárias estudar as estruturas e propriedades dos materiais, suas aplicações, o processamento e seu desempenho. A Tribologia estuda o comportamento do processo e seu desempenho, ou seja, a interação entre superfícies (materiais) em movimento relativo (STOTERAU, 2004).

Para verificar o comportamento dos minerais gemológicos diante dos processos de produção, são analisados:

- a) Brilho é mensurado com o equipamento Reflectivity Meter através da planicidade e índice de refração;
- b) Rugosidade, quanto a padrões de conformidade entre picos e vales com a interferência da morfologia dos grãos de polimento e efeito dos lubrificantes com Surfcorde Kosakalab SE1700α, Microscópio Confocal Leica DCM3D e Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV LEO 440 e MEV-FEV Quanta 600) e
- c) Variação de dureza nos diferentes eixos cristalográficos com o equipamento Microdurômetro Micromet 2100.

Os equipamentos e teorias estão mencionados em primeiro lugar e, em seguida, os resultados das análises divididos pelas etapas de lapidação.

9.1. Brilho

O brilho é percebido através da visualização da reflexão de luz em uma superfície, ou seja, a aparência superficial com luz refletida (KLEIN e HURLBUT, 1993). O brilho, refletividade ou reflectância de uma gema pode ser medida qualitativamente como vítreo, metálico, lustroso e adamantino, para determinar sua descrição visual.

A origem do brilho é a reflexão, isto é, o reflexo na superfície de uma parte da luz incidente (SCHUMMANN, 2006). O brilho é caracterizado por sua intensidade, sendo mais intenso quanto menor for a rugosidade, ou seja, quanto mais a superfície for plana, mais os feixes são refletidos, através da reflexão especular. Isto pode ser medido em termos absolutos como a razão da intensidade do raio refletido sobre a intensidade do raio incidente (READ, 1991) (Eq. 9):

$$Refletividade(R) = \frac{I_R}{I_0} \quad (9)$$

O termo brilhância, deriva da palavra brilho e é utilizado em gemologia para determinar os efeitos luminosos ocorrentes com a reflexão total da luz, originados dentro do mineral, sendo mais intensos em minerais transparentes.

9.1.1. Reflectivity Meter Presidium

O equipamento *Reflectivity Meter* da marca Presidium, é um equipamento desenvolvido para gemólogos e é utilizado para medir o índice de reflexão em gemas polidas (Fig. 56).

Figura 56 - Equipamento Reflectivity Meter da marca Presidium.

O princípio de funcionamento do equipamento consiste na emissão de um feixe de luz (lâmpada LEDs), que atinge a gema polida na superfície de medição. Uma parte é refratada dentro do mineral e outra parte é refletida em sua superfície. A parte refletida é captada por um receptor dentro do equipamento. O valor indicado pelo equipamento é a quantidade de luz refletida na superfície e depende da planicidade e índice de refração. Portanto, o equipamento pode ser utilizado como um rugosímetro óptico, captando variações de polimento. O gráfico abaixo demonstra que segundo a lei de Fresnel, a refletividade aumenta conforme aumenta o índice de refração (Fig. 57).

A fórmula desenvolvida pelo físico Fresnel (Eq. 10) calcula a intensidade do brilho em uma superfície plana em relação ao seu índice de refração, em que é formada pela equação anterior (Eq. 9) substituindo os campos de intensidade do feixe incidente e refletido para os índices de refração no ar, n_1 e do material, n_2 .

$$\text{Refletividade} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2 \quad (10)$$

Figura 57 – Representação do aumento de refletividade conforme aumento de índice de refração.

O resultado da equação diretamente proporcional representa a porcentagem de retorno de luz em relação ao índice de refração. No caso do diamante, a superfície reflete 17% da luz e 83% é absorvido pelo mineral (BRUTON, 1978).

Nesta tese de doutorado o equipamento foi utilizado para medir a reflexão de luz nas diferentes etapas de abrasão, de modo a identificar a evolução da superfície plana e comparar a qualidade de superfícies polidas trabalhadas com diferentes pós de polimento. As análises foram feitas nos seis minerais selecionados, lapidados no Brasil e na Alemanha.

Porém há de se levar em consideração os diferentes índices de refração e índices demonstrados no equipamento. Cada um deve ser comparado apenas dentro do seu grupo mineralógico para que não haja discrepâncias.

As análises mostradas no capítulo 11 apontam a média aritmética de seis medições para cada amostra.

9.1.1.1. Relação do índice de refração e valores do Refletômetro

O princípio de funcionamento do equipamento Reflectivity Meter é gerar valores a partir da reflexão da luz na superfície de materiais que são influenciados pelo índice de refração do material e a rugosidade da superfície.

O índice de refração em materiais anisotrópicos é constante no eixo óptico, possuindo apenas uma velocidade e, em todas as outras posições do mineral, o feixe de luz é dividido em dois, para os uniaxiais e, em três, para os biaxiais, porém são vistas apenas duas divisões. Para os uniaxiais, os dois feixes são nomeados como ordinário e extraordinário e para os biaxiais, alfa, beta e gama, porém são analisados apenas o alfa e o gama. A diferença entre a velocidade destes feixes é nomeada birrefringência. Para uniaxiais negativos, o valor do feixe ordinário é superior ao extraordinário e vice-versa. Para os biaxiais a birrefringência é medida entre alfa e beta, entre beta e gama e entre alfa e gama, e para quantificação entre biaxiais positivos ou negativos, é calculado entre alfa e gama.

Os valores obtidos no Reflectivity Meter são influenciados pelos valores dos diferentes índices em relação ao posicionamento da amostra, como é mostrado abaixo no cálculo que segue (Eq. 11).

Refletividade da turmalina com índice de refração padrão

(11)

$$no = \left(\frac{1,62 - 1}{1,62 + 1} \right)^2 = 0,055999 = 5,6\%$$

$$ne = \left(\frac{1,64 - 1}{1,64 + 1} \right)^2 = 0,05877 = 5,9\%$$

Nota-se que a diferença na quantidade de luz refletida é pequena, 0,3% no caso da turmalina, com birrefringência alta de 0,02, não influenciará as deduções futuras em respeito aos valores de rugosidade.

Com a lei de Fresnel é possível determinar a quantidade de luz refletida. Sabe-se que o diamante reflete 17% do total de luz incidente. A fórmula calcula o valor absoluto de reflexão para cada mineral. Conforme exemplo abaixo (Eq. 12).

$$\text{Refletividade do diamante} = \left(\frac{2,42 - 1}{2,42 + 1} \right)^2$$

(12)

$$x = \left(\frac{1,42}{3,42} \right)^2$$

$$x = \frac{2,0164}{11,6964}$$

$$x = 0,1724 = 17\%$$

Os valores são alterados devido à superfície não ser totalmente plana. Esta porcentagem é considerada como 100% da luz refletida como calibração do Reflectivity Meter, desconsiderando alterações de rugosidade.

9.2. Efeito da abrasão e do polimento

O estudo da tribologia envolve mecanismos de corte, abrasão e polimento. Inicialmente utilizada para o estudo de metais e depois para outros materiais, como por exemplo cerâmica e rochas.

Os mecanismos de corte, abrasão e polimento resultam no desgaste da superfície em diferentes proporções de acordo com a velocidade, tamanho do grão abrasivo e pressão exercida. Grãos maiores com alta pressão e alta velocidade resultam em altas taxas de desgaste e através da diminuição dos grãos, gradativamente, é possível adquirir superfícies cada vez mais planas.

Em todos os processos, o lubrificante é o fator redutor de atrito e desgaste, produzindo o deslizamento, podendo ainda causar alterações químicas.

No processo de polimento, variantes como a adição de ácidos e alterações na velocidade e pressão podem resultar em superfícies mais brilhantes e planas.

A adição de ácidos ou água como lubrificantes propiciam a combinação das moléculas superficiais do material trabalhado com as moléculas do lubrificante, fazendo com que ocorra alteração química e a criação de locais pontuais nas superfícies, sendo as mesmas amorfas ou oxidadas. Através da pressão e superaquecimento no contato entre corpo e contra-corpo, pode ocorrer alteração superficial como a deformação plástica, o que é possível

verificar na figura 59, placas superficiais com indicação da direção ação mecânica.

Esta camada é denominada Beilby e é definida por uma camada superficial com estrutura molecular desorganizada, causada pelo atrito ou aquecimento, sendo a sua espessura de 1 a 100nm. A teoria foi desenvolvida por George Thomas Beilby no início do séc. XX. (BHUSHAN, 2002; ENGIN, 2013).

Na figura a seguir (Fig. 58) é possível visualizar esquematicamente o conceito da superfície de Beilby.

Figura 58 – Descrição do processo de polimento e alteração da superfície para (a) camada amorfa ou microcristalina – Beilby (b) amorfismo pontual (c) deformação plástica com o amassamento da estrutura cristalina e (d) destacamento e recombinação de estrutura cristalina.

Nesta tese, foi possível perceber camadas planas superficiais geradas desde o processo de abrasão e principalmente no polimento, como é possível verificar nas imagens abaixo (Fig. 59). A possibilidade de que tenha ocorrido fusão parcial da superfície não foi esclarecida com os métodos aplicados nesta tese.

Figura 59 - Superfície das amostras de granada na etapa de desbaste com rebolo diamantado (a) e na etapa de polimento com pó de diamante, disco de chumbo e estanho, água e sabão (b)

9.3. Rugosidade

A rugosidade é um termo padrão utilizado em tribologia para relacionar superfícies com maior ou menor planicidade.

O termo rugosidade significa irregularidades em pequena escala na superfície produzida por processos mecânicos e alterações do material utilizado. Estes por sua vez, podem ser grosseiros ou finos e são medidos através da detecção de ondulações (picos e vales) com o uso de perfilômetros (HUTCHINGS, 1992).

Os processos de fabricação, em geral, induzem erros decorrentes que são traduzidos sob a forma de desvios dimensionais e geométricos nas superfícies obtidas. Nenhum processo de fabricação, existente até o presente, permite produzir superfícies completamente lisas. Superfícies mesmo que aparentemente lisas, quando observadas em microscópio, apresentam regiões com riscos, maior ou menor planicidade (STOTERAU, 2004).

Na lapidação de gemas o atrito e o desgaste são controlados, sendo intensos nas etapas de pré-formação ou facetamento, e menos intensos na etapa de polimento. Uma forma de diminuir o atrito e permitir o controle do desgaste é através do uso dos lubrificantes. Para lapidação, o lubrificante utilizado é a água ou óleo, que atuam em diferentes funções: o de garantir o deslizamento e o de carregar partículas do mineral polido que podem ser altamente prejudiciais se inaladas.

Define-se atrito como a resistência entre dois corpos em deslizamento e desgaste, e a remoção gradual de partículas geradas através do contato em movimento relativo.

Quando as superfícies estão altamente rugosas e são colocadas em contato, ou seja, com picos e vales distantes, somente os picos entrarão em contato, com alta energia mecânica e de deformação, ao passo que os vales estarão afastados. Estas regiões de contato são denominadas junções e a soma das áreas das junções constituem a área real de contato, A_r e a área de contato aparente, A_a que significa toda a área do material trabalhado, na medida em que o material vai sendo desgastado é aumentando a A_r (Fig. 60) (STOTERAU, 2004).

Figura 60 – Representação da área real de contato e área aparente de contato, em que A_a apresenta a área total e A_r , área de contato (STOTERAU, 2004).

A leitura física das ondulações (picos e vales) é feita através de perfilômetros de contato físico que utiliza o método *Stylus*, que é uma ponta diamantada em velocidade controlada e constante, que percorre a superfície horizontalmente, e amplifica as movimentações verticais contidas na rugosidade. O perfil de uma superfície pode ser definido como a linha produzida pelo percorrimto de uma ponta *Stylus* sobre a superfície. A razão da amplificação ou magnificação dependerá da rugosidade da superfície. A imagem abaixo representa a codificação de magnitude entre a superfície real mensurada e a representação em escala. Os picos demonstrados em escala menor aparentam-se muito maiores que a medida real, na qual resulta a compressão dos distanciamentos (Fig. 61).

Figura 61 - (a) Perfil de superfície real, com grande magnitude. (b) (c) compressão das distâncias percorridas em escalas 1:5 e 1:50 e maneira como é apresentada nos gráficos (HUTCHINGS, 1992).

Para superfícies polidas ou planas, o método *Stylus* é substituído pelo método óptico de medição de superfície, devido ao diâmetro da ponta diamantada possuir de $2\mu\text{m}$ e ser grosseira, para vales estreitos (Fig.62). Portanto, a ponta *Stylus* é utilizada apenas na etapa de pré-formação em que os picos e vales possuem grande dimensão. O método óptico utiliza a interferência de 2 feixes de luz, que refletidos na superfície da amostra, detectam a profundidade dos vales e a elevação dos picos através do foco, podendo avaliar a rugosidade da superfície em área quadrada e gravadas através de um fotodiodo (HUTCHINGS, 1992).

Figura 62 – Diâmetro grosseiro da ponta *Stylus* analisando picos e vales.

O parâmetro superficial comumente avaliado nos perfis adquiridos, tanto de modo linear, quanto em área é o R_a (*Average Roughness*), ou seja, a média aritmética dos valores absolutos de afastamentos (h_i) do perfil médio, formalmente definida pela equação a seguir, a qual está sendo utilizada neste trabalho para avaliação de rugosidade (Fig. 63 e Eq. 13):

$$R_a = \frac{1}{l} \int_{x=0}^{x=l} |h_i| dx \quad (13)$$

Figura 63 - Definição de R_a , média aritmética entre picos e vales (STOTERAU, 2004).

As etapas de lapidação com superfícies mais rugosas, da pré-formação ao facetamento, foram analisadas com o Rugosímetro Kosakalab Surfcorder 1700α e as amostras polidas, com o Microscópio Confocal LEICA DCM3D, devido à precisão e resolução de cada equipamento.

Na prática diária de uma indústria de lapidação de diamantes, não são feitas medidas de rugosidade em todas as superfícies polidas. A qualidade do polimento é analisada através da planicidade e linearidade da união entre duas facetas, suas arestas, com uma lupa 10x.

9.3.1. Rugosímetro Kosakalab

O Rugosímetro Kosakalab Surfscorder 1700α, foi utilizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície – LFS da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. O Rugosímetro é um instrumento usado para medir textura e ondulações no eixo z (Fig. 64).

Figura 64 - Rugosímetro Kosakalab Surfscorder SE1700α – LFS.

O método utiliza um transdutor que converte os deslocamentos verticais mecânicos da ponta *Stylus* em sinais elétricos amplificados (HUTCHINGS, 1992).

A magnitude irá depender da rugosidade da superfície, permitindo configurações entre as medidas de magnitude de 100 - 100.000.

Para o grupo de amostras rugosas utilizadas nesta técnica, foram configurados os padrões: Cutoff 0.8mm (0.1-2μm), MAG (amplitudes) 500-1000-2000 / Range de 800 a 80 μm, Effectivity Length de 2.400mm (apresentado nos gráficos recortes de 0-800) e F. Profile GAUSS de 4.800 pontos.

O contato com a superfície é feito com uma ponta diamantada modelo AA5 *Stylus*, de diâmetro de 2μm e força de 0.7mN/70mg, seguindo os padrões ISO97/JIS2001 de medição. A ponta *Stylus* é de uso comum do LFS e encontrava-se usada por muito tempo, e devido a este fator, é possível que ocorram mudanças nos valores da leitura para menores medidas, devido a subjeções em que a ponta estaria mais arredondada que uma nova. Entretanto todas as amostras foram ensaiadas com a mesma ponta, demonstrando medidas válidas se comparadas entre si.

O equipamento possui resolução de amplitudes até $0,0005\ \mu\text{m}$, porém para amostras polidas, demonstrou o número mais baixo de $0,002\mu\text{m}$ o que equivale a $2,0\text{nm}$, e que impossibilita a comparação com o Microscópio Confocal com medidas menores. Os equipamentos possuem metodologias díspares, o que determina o segmento de análise apropriada. Portanto apenas as amostras com rugosidade maiores das etapas pré-formação e facetamento foram analisadas com o rugosímetro físico Kosakalab SE1700 α .

As amostras foram limpas através de imersão em acetona P.A., com 10 minutos de vibração no equipamento de ultrassom, estando inclinadas a 90° para não depositar partículas na superfície. Para as análises, as amostras foram afixadas em massa plástica, para assegurar a planicidade e fixadas através de um planificador (Fig. 65). O rugosímetro possui uma mesa antivibratória da marca Mitutoyo.

Figura 65 - Equipamento para planificar superfície de medição sobre massa plástica.

Através dos ensaios, foi quantificada a média aritmética entre três medidas consecutivas em pontos diferentes, de medidas aproximadas, para obtenção de valores de R_a . Os gráficos demonstrados sobre rugosidade são o apontamento de uma destas três medidas, nas quais foram selecionadas. Os softwares utilizados para a geração dos gráficos foram o OriginPro 8.0 e Excel 2003, a partir de dados absolutos coletados no rugosímetro. A distância percorrida, perpendicular à direção de polimento, foi colocada no eixo das abcissas e os valores de amplitude do perfil, no eixo das ordenadas. Os gráficos podem ser visualizados no capítulo 11.

9.3.2. Microscópio Confocal Leica DCM3D

O Microscópio Leica DCM3D é um método de análise de rugosidade não invasivo e de alta resolução vertical de até 0.1nm. O equipamento foi utilizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) (Fig. 66), localizado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, no Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo, com acompanhamento do Prof. Dr. Henrique Kahn.

A obtenção das imagens é feita através de um feixe de laser incidente a 90° sobre a amostra e através de digitalizações por unidade, ou seja, a focalização e escaneamento da superfície linha por linha, camada por camada, as imagens são agrupadas, fazendo a reconstrução tridimensional da topografia.

Figura 66 - Equipamento Microscópio Confocal Leica DCM3D (LCT - Laboratório de Caracterização Tecnológica).

A focalização é feita através do eixo Z e a aquisição da imagem em secções nos eixos x e y. Após as aquisições, os dados são importados para o software LeicaScan DCM3D, que gera micrografias em 2D, 3D ou perfis de rugosidade lineares e por área quadrada (Figs. 67 a 69). As análises foram feitas apenas de modo linear.

Figura 67 - Imagem 3D criada no Leicamap DCM3D mostrando a inclinação do topázio polido com óxido de alumínio com degradê de cores entre o azul escuro e o vermelho, em que a parte azul é a parte mais baixa, e vermelha, a mais alta.

Figura 68 - Tabela demonstrativa dos parâmetros obtidos em cada análise e leitura linear para geração perfil de rugosidade (perpendicular à direção do polimento).

Figura 69 - Perfil de rugosidade gerado pelo Microscópio Confocal LEICA DCM3D para cada ponto de medição.

Com as amostras polidas, foi definido o *Cutoff* de 0.08 mm para um *Ra* menor que 0.02 μm , para amostras polidas, filtro Gaussian #1, *Threshold* de 1,5%, amplitude 0%, fonte de luz de 188 até 198, opção de fechamento de superfície (*Restored*) selecionado, com lente objetiva de 100x, abrangência de 768 x 576 pixels de área / 127.32 x 95.45 μm^2 e com fechamento de superfícies de 99% a 100%.

Ao definir o ponto mais baixo de foco de imagem, a referência inicial foi definida e em seguida definido o ponto mais alto e a inicialização da obtenção da imagem. Para as amostras polidas, foi necessária uma média de 50 a 120 planos para cada amostra, sendo a distância entre os planos de 0.20 μm .

Testes foram feitos com a alteração do número do *Threshold* de 1,5% para 1,0% e 3,0%, e, com estas mudanças, a resolução de *Ra* demonstrou variações na escala de 0,1 nanômetro.

O *Threshold* é editado para que quanto maior a porcentagem, o software tenha a disposição de ignorar pixels com baixa capacidade de fechamento e a diminuição de picos, que significam erros de sistema. O *Threshold* pode ser regulado no segundo software conectado à edição das imagens, Leica Map DCM3D 6.0, sendo utilizado, neste software, para conectar pontos no topo e no vale, diminuir relevos que são muito grandes, esconder defeitos de leitura, ou simular efeitos de desgaste. Segundo instruções do equipamento, o valor padrão para uso do *Threshold* é de 5% e a escolha da medida de 1,5% foram a opção de manter a leitura com maior proximidade do real. O Software não permite mudanças de *Threshold* menores que 1,0%.

Em cada amostra, foram feitas três medições de rugosidade lineares e com os valores de *Ra*, obtidas a sua média aritmética.

Os perfis de rugosidade foram medidos de modo linear, perpendicularmente à direção de polimento, de modo a empregar a mesma técnica de varredura utilizada com o Kosakalab. Foram feitos testes de leitura seguindo a mesma direção do polimento e as medidas apresentaram-se menores, cerca de 0,1 a 5 nm. Locais com grandes vales ou poros foram desprezados. Em algumas amostras, não foi possível identificar a direção de polimento, devido à ausência de pequenos riscos na superfície.

Para as amostras polidas, padronizou-se a unidade de medida em nanômetros, sendo feitas todas as leituras nesta medida. Os resultados de rugosidade podem variar um ou dois nanômetros apenas por conter pequenos sulcos ou vales e apresentar diferenças grandes, devido à alta resolução.

Para obter três medidas em cada amostra, cada uma foi linearmente localizada para que estivessem dentro do grau de 1 nanômetro de variação. No entanto, um nanômetro é suficiente para identificação de melhor polimento.

9.3.3. MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons, emitidos termionicamente a partir de um filamento de cátodo de tungstênio ou hexaboreto de lantânio (IGC - tungstênio) e acelerados através de um ânodo. Este feixe passa através de pares de bobinas de varredura na coluna do microscópio e é focalizado por lentes condensadoras, em um feixe com ponto focal muito fino, com tamanho variando de 0,4 a 0,5nm (Configuração do MEV no IGC de 0,3nm). Quando o feixe primário interage com a amostra, os elétrons perdem energia por dispersão e absorção em volume, em forma de gota (Fig. 70). O tamanho do volume de interação, depende da energia dos elétrons do número atômico dos átomos da amostra e da densidade da amostra.

Para serem detectados, os raios eletromagnéticos resultantes da interação do feixe eletrônico com a superfície da amostra devem retornar e atingirem o detector.

A imagem formada a partir do sinal captado na varredura eletrônica de uma superfície pode apresentar diferentes características, uma vez que a imagem resulta da amplificação de um sinal obtido de uma interação entre o feixe eletrônico e o material da amostra. Diferentes sinais podem ser emitidos pela amostra. Dentre os sinais emitidos, os mais utilizados para obtenção da imagem são originários dos elétrons secundários e dos elétrons retroespalhados. Os elétrons secundários (SE – *Secondary Electron*) são de baixa energia (<50eV), formam micrografias de alta resolução (3-5nm), sendo o contraste formado pelo relevo da amostra. Os elétrons retroespalhados (BSE – *backscattering electron*) possuem energia que varia entre 50eV até o valor da energia do elétron primário, sendo aqueles que sofreram espalhamento elástico que em interação com a

amostra obtém imagem através da topografia e principalmente através dos elementos químicos presentes na amostra e contraste em função do número atômico (DEDAVID et al, 2007).

Neste trabalho, priorizou-se a obtenção de micrografias com maior resolução do relevo da amostra, adquiridos através dos elétrons secundários.

Figura 70 - Localização dos sinais emitidos pela amostra e relação de voltagem para elementos leves e pesados (DEDAVID, 2007).

O Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir micrografias com aumentos de estudo de 5x até 800.000x.

As micrografias obtidas no Microscópio Eletrônico de Varredura LEO 440, foram realizadas no Instituto de Geociências, com o Dr. Isaac Jamil Sayeg. Os aumentos utilizados foram: 22x, 200x, 500x e 3000x. As amostras foram afixadas em *stubs* com fita de carbono e recobertas com pulverização de ouro com 10 a 15nm de espessura, através do equipamento Sputter Coater. As análises foram feitas nos grupos de amostras: SiC100, C120, C180, C220 e C600 e DC500. As micrografias destas etapas (pré-formação) foram feitas apenas nas amostras lapidadas no Brasil, porque a foram desgastadas com o rebolo diamantado, altamente abrasivo e a necessidade estava em verificar apenas o comportamento de fraturas e deformações resultantes de granulações maiores. Na Alemanha foi utilizado o carbeto de silício que é menos abrasivo. As análises foram comparadas aos resultados no Rugosímetro Kosakalab.

9.3.4. MEV-FEG

O Microscópio Eletrônico de Varredura de Alta Resolução (MEV-FEG), possui o mesmo padrão de funcionamento do MEV, anteriormente relatado, porém com possibilidades de aumentos maiores.

O microscópio adquire aumentos maiores, devido ao gerador de elétrons ser composto com um cristal de tungstênio (FEG) de 10nm de espessura, e quando aquecido através de um grande potencial elétrico, gera feixes a frio, causando um gradiente potencial na superfície emitida, o chamado *Field Electron Emission*, campo elétrico de emissão. O emissor de elétrons *Field Electron Emission* é usado para produzir um feixe de elétrons menor em diâmetro, mais coerente e até três ordens de magnitude maiores com densidade ou brilho do que com os emissores termiônicos convencionais (Fig. 71), abaixo.

O equipamento MEV-FEG da marca FEI, modelo Quanta 600 FEG, com detector de EDS, tecnologia SDD, da marca Bruker, modelo Xflash Quantax 400 e software analisador Esprit, foi utilizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) localizado na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Minas, com acompanhamento do Prof. Dr. Henrique Kahn, operadoras M. Sc. Liz Zanchetta D'Agostino e Sheila Schuindt do Carmo, possibilitando altos aumentos de até 100.000x, ideal para a visualização de superfícies polidas.

Figura 71 - Tipos de emissores de elétrons (a) filamento de tungstênio (b) Hexaboreto de lantânio (c) FEG – Field Emission (AUSTRALIAN MICROSCOPY, 2014).

As amostras foram afixadas em *stubs* com fita de carbono e recobertas com pulverização de platina com 10 a 15nm de espessura. O tipo de detecção foi o ETD (*Electron Transfer Dissociation*), ou seja, elétrons secundários, com *work distance* de 10.0mm e diferenças potenciais médias de 10.00kV.

9.4. Propriedades mecânicas das gemas

As propriedades físicas e o resultado mecânico gerados nas superfícies após lapidação são resultados diretos da composição química e estrutura cristalográfica de cada mineral.

Os átomos e íons contidos em uma estrutura cristalográfica são ligados em uma disposição periódica ordenada em translações tridimensionais. Os átomos, nesta estrutura, são atraídos uns aos outros através da força de atração em perder e ganhar elétrons ou compartilhar elétrons. As ligações químicas que prevalecem para as gemas são as iônicas ou as covalentes.

Conforme a 1ª e 2ª regra de Linus Pauling, a relação da força da ligação está relacionada ao número de coordenação determinada pela relação entre os raios do cátion e do ânion. Quanto maior for a carga do cátion e menor o seu número de coordenação, mais forte será a sua ligação com o ânion. Estruturas mais estáveis possuem cátions pequenos, consequentemente dureza mais elevada e resistência à dissolução. As estruturas cristalográficas dos minerais mantêm a tendência de serem quimicamente estáveis e altamente simétricas (LIMA-DE-FARIA, 1994; CHVÁTAL, 1999).

Quando relacionamos estruturas cristalinas, as adesões, ou seja, interações da superfície dos minerais com discos ou rebolos, efeitos mecânicos podem ocorrer, sendo eles denominados: compressão, tração, torção, cisalhamento e flexão, relacionando a força de coesão entre os átomos e sua possibilidade de distensão e escorregamento.

Portanto, o comportamento dos minerais submetidos a processos mecânicos está diretamente relacionado com a atração exercida entre os átomos e íons. Através destas relações podem-se citar padrões de elasticidade, dureza e clivagem.

9.4.1. Tenacidade

Tenacidade é a resistência que um mineral oferece à fratura ou à deformação. A tenacidade é um termo mecânico que representa a habilidade de um material em absorver energia até a sua fratura. Os termos utilizados são: frágil, maleável, sêctil, dúctil, flexível ou elástico (KLEIN e HURLBUT, 1993).

Os minerais gemológicos com ligações iônicas, que quebram ou se transformam em pó são tratados como frágeis, ou seja, possuem baixo nível de elasticidade. Há um limite de ruptura entre as ligações atômicas à determinada tensão aplicada, como descrito na letra (a) da figura 72.

Figura 72 - Tipos de deformação em relação à tenacidade. (a) Frágil (b) Frágil-dúctil (c) Frágil-dúctil (d) apenas dúctil (ERI-U, 2014).

9.4.1.1. Deformação

Segundo a mecânica de sólidos, quando o material sofre algum tipo de tensão, o resultado é que ele se deforma, ou seja, suas partículas são deslocadas da posição original.

Quando a tensão é aplicada e retirada dentro de um certo limite, as partículas voltam à sua posição inicial e não ocorre nenhum tipo de deformação. Este fenômeno é nomeado como comportamento elástico, em que a tensão e a transformação são proporcionais entre si, até que a carga aplicada seja liberada.

Porém, quando o sólido submetido à tensão ultrapassar o limite de elasticidade, o seu formato original não se recupera e ocorre o comportamento plástico ou a deformação plástica. A tensão não é mais proporcional à deformação. Neste caso, a estrutura atômica é quebrada em suas ligações originais e combinadas novamente a átomos vizinhos, com remoção da tensão. Isso ocorre devido ao aquecimento pontual, uma vez que um grande número de átomos ou moléculas se movem uns aos outros.

9.4.2. Clivagem

A clivagem ocorre em planos bem definidos de ligações atômicas fracas, permitindo que a gema seja dividida em dois pedaços. Assim se formam superfícies planas (READ, 1991). Estes planos são sempre paralelos aos planos cristalográficos dos minerais.

Neste trabalho, os minerais que possuem clivagem são: topázio perfeita (001), berilo imperfeita (0001) e espodumênio perfeita (110) à 94°. Porém apenas o espodumênio mostrou a clivagem no processo de lapidação como sendo perfeita e altamente sensível às variações térmicas e choques mecânicos.

Minerais com clivagem são lapidados com a faceta inclinada em relação a estes planos.

Minerais que não possuem clivagem podem apresentar superfícies planas chamadas partição, ou seja, a quebra ocorre em discretos intervalos ao longo de contatos geminados, como no caso do coríndon ou da labradorita.

O mineral, quando clivado, apresenta uma superfície completamente plana e brilhante em qualidade compatível ao polimento.

Com o intuito de comparar o brilho de uma superfície clivada com o da polida, utilizou-se uma superfície de clivagem do espodumênio e as medidas foram feitas com o equipamento Reflectivity Meter, comparando com faces planas do mesmo mineral polido com CeO e AlO em feltro. Os resultados são mostrados na tabela 11.

Tabela 11 - Média aritmética entre medidas do brilho em mineral clivado e sua comparação com amostras polidas.

Espodumênio		
Média de 6 pontos		
Face com Clivagem	Polimento com CeO	Polimento com AlO
29,67	26,17	30,00

Dos dados, conclui-se que o mineral polido pode ter brilho igual ou mais brilhante que a superfície clivada. Sendo assim, é possível atingir altos graus de brilho, compatíveis à clivagem, através de maneiras artificiais, como o polimento.

9.4.3. Dureza

A dureza na gemologia é medida através da grandeza de Mohs.

A dureza de Mohs é definida como a resistência que um mineral oferece ao ser riscado por um objeto pontiagudo. O grau de dureza é determinado através da observação comparativa da dificuldade em que um mineral risca o outro (SCHUMANN, 2006).

A dureza depende da coesão ou força de atração entre os átomos, podendo ser definida como a resistência superficial à abrasão (LIDDICOAT, 1990; LIMA-DE-FARIA, 1994).

No entanto, a dureza para tribologia é definida como a resistência à penetração de um corpo duro, chamado endentador, sobre a superfície, e caracteriza o comportamento do mineral (ILUIC, 1980), a chamada dureza Vickers e Knoop.

A dureza está intimamente ligada à cristalografia e às ligações químicas. Quando um mineral atinge um limite determinado de coesão, as partículas desagregam causando a ruptura, porém a dureza deve ser medida neste limite da quebra, o limite de ruptura (KLOCKMANN e RAMDOHR., 1947).

Materiais cristalinos possuem direção de dureza variável devido às forças de atração e distâncias interatômicas diferentes em cada eixo. Quanto mais próximos estiverem os átomos e maior for a sua carga, maior é a dureza (CORRENS, 1969). A temperatura em que o mineral está inserido também é fator variável da dureza.

Neste trabalho os minerais com estruturas cristalográficas diversas foram avaliados através da dureza Vickers. Esta experiência poderia definir com melhor precisão a dureza nos diferentes eixos cristalográficos. Os minerais utilizados nesta tese se dividem em isótropos e anisótropos. Os isotrópos possuem distâncias interatômicas homogêneas em três direções, já os anisótropos são heterogêneos nas três dimensões. No entanto, segundo Correns (1969) a dureza não é igual em todas as faces do mineral, tanto nos anisotrópicos, quanto nos isotrópicos, sendo confirmado este dado nas análises abaixo (Fig. 73) (CORRENS, 1969; READ, 1991; KLEIN e HURLBUT., 1993)

Figura 73- Comportamento da dureza nos eixos cristalográficos (CORRENS, 1969).

Para medir a variação da dureza, os minerais desta tese foram analisados na sua dureza Vickers nas diferentes faces cristalográficas.

9.4.3.1. *Microdureza Vickers*

O equipamento utilizado foi o Microdurômetro Micromet 2100, marca Buehler, que mede dureza em Vickers e Knoop, representados pelos símbolos HV e HK (Hardness Vickers – Hardness Knoop), respectivamente. As medidas foram feitas em Vickers.

A análise é baseada na força requerida para pressionar um endentador contra a superfície do material, em que o penetrador resulta em uma impressão cuja forma e profundidade podem ser medidas. O equipamento permite que um penetrador de diamante, com geometria piramidal, seja forçado contra o corpo de prova. As cargas aplicadas variam de 1g até 1kg. A impressão resultante é observada sob um microscópio e medida em suas diagonais. Essa medição é então convertida em um número índice de dureza. Os ensaios de Microdureza Vickers foram realizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície (LFS) da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (Fig. 74).

Figura 74 - Micrômetro Micromet 2100. (LFS – Laboratório de Fenômenos de Superfície).

Para preparação dos corpos-de-prova, minerais, com suas morfologias externas cristalográficas conservadas, foram cortados de modo que cada superfície de análise representasse uma face cristalográfica em conformidade ao eixo cristalográfico. O método de análise exige que os corpos-de-prova estejam embutidos em baquelite ou resina acrílica transparente, de modo que a superfície de análise esteja precisamente paralela à sua base.

Para efetuar as análises, as gemas foram embutidas no LCT (Laboratório de Caracterização Tecnológica) em resina acrílica transparente, na qual foi utilizada catalisador para maturação. Após maturação, as amostras foram polidas (Fig. 75).

Figura 75 – Amostras embutidas em resina acrílica mostrando em cada face aparente a face do eixo cristalográfico (a) granada (b) topázio (c) berilo (d) turmalina (e) espodumênio e (f) quartzo.

As cargas selecionadas para o ensaio foram de: 10g/98.07mN, 50g/490.3mN e 100g/980.7mN.

Foi utilizada uma objetiva de aumento de 10x (M10/0.25) para localizar o ponto a ser analisado e em seguida a objetiva de aumento de 100x (MPlan100/0.90) para focalizar a impressão. A ocular de medição permite ajustar as linhas verticais no centro utilizando os comandos giratórios localizados nas extremidades do conjunto ocular.

O ângulo entre as faces da pirâmide é de 136°, o que representa o ângulo de vértice entre a tangente das faces e entre a esfera com diâmetro D e o diâmetro da pirâmide de $d=0,375$ (Fig. 76). A dureza de Vickers é dada pela razão entre a carga aplicada sobre a área projetada da endentação. Em que HV significa dureza Vickers, d é o diâmetro quadrado da impressão da endentação e P a carga aplicada (Eq. 14).

$$HV = \frac{1.854}{d^2} P.$$

(14)

Figura 76 – Esquema do perfil do indutor e das medidas das impressões diagonais (ILUIC, 1980).

A dureza da endentação (HV) é medida através da impressão residual na superfície, medindo o diâmetro de suas duas diagonais. Para medir as diagonais do baixo relevo criado pelo indutor, primeiramente, é necessário conferir a

integridade da impressão. Para os minerais usados, que são materiais frágeis, cargas altas, acima de 100g, poderão fraturar a superfície. Neste caso, as impressões fraturadas foram descartadas. O tempo de realização da endentação varia entre 10 -15 segundos, tempo em que a carga é aplicada e removida.

Os fraturamentos e o formato da impressão residual são obtidos através do efeito da energia mecânica no material. Durante o carregamento, tensões são induzidas no mineral de forma radial e a área de comportamento plástico aumenta. Com o descarregamento, tensões adicionais são induzidas na superfície pela área abaixo da zona plástica. Esta é denominada zona elástica, na qual os minerais possuem limites reduzidos de elasticidade em comparação com metais. A zona plástica absorve esta tensão e deforma permanentemente, liberando a tensão em forma de fraturas (Fig. 77) (FISCHER-CRIPPS, 2007).

Figura 77 - Imagem superior, zonas ou intervalos do comportamento mecânico de materiais. Sistema de fraturamento através do endentador (a) fraturas radiais (b) fraturas laterais (c) fraturas ao meio (d) fratura semicircular (FISCHER-CRIPPS, 2007).

A variação de dureza pode ser vista através da deformação da marca impressa. Para minerais de dureza anisotrópica, a impressão assume forma de losango. Para minerais com característica elástica, as arestas externas curvam-se para dentro e em minerais, com pouca elasticidade, as arestas externas curvam-se para fora (Fig. 78).

Figura 78 - Impressões residuais feitas com indutor piramidal de diamante de base quadrada.
(a) Impressão normal (b) abaolada para dentro (Pile-up – material elástico ou maleável) (c)
abaolada para fora (material duro - Sink-in) (FISCHER-CRIPPSS, 2007).

As impressões, realizadas nos minerais gemológicos, apresentaram formatos abaolados para dentro (Pile-up) e fraturas radiais como mostrado na figura 79. O resultado das análises significa que possuem baixo grau de elasticidade e cisalham facilmente devido ao reduzido limite elástico.

Figura 79 – Impressões Pile-up em minerais gemológicos (a) granada 100g (110), (b) topázio 100g – (eixo b), (c) berilo 100g (eixo a1), (d) turmalina 100g (eixo a1), (e) espodumênio 100g (110 – plano paralelo a clivagem), (f) quartzo 100g (110).

Foram feitas cinco medidas em cada eixo cristalográfico com as seguintes cargas: 10g, 50g e 100g. Os gráficos a seguir representam os resultados da média aritmética de três medidas para cada carga e eixo (Figs. 80 a 85). Ocorreram tentativas de realização de medidas com 5g e, as mesmas não produziram efeito, devido à marca impressa ser pequena demais, confundindo-se com as porosidades da superfície, colocando em risco a precisão das medidas, sendo estas descartadas.

Foi constatado que ambos minerais, isotrópicos (granada) e anisotrópicos (topázio, berilo, turmalina, espodumênio, quartzo), apresentam variações de dureza entre os eixos cristalográficos, denominada dureza anisotrópica nos diferentes eixos. A consequente anisotropia de dureza pode interferir nas taxas de desgaste e pressão durante o processamento.

Não foi possível identificar uma forma de comparação exata entre as escalas Vickers e Mohs. Porém quando comparadas às durezas obtidas nas medidas abaixo (Figs.80 a 85), e o valor em Mohs dos minerais utilizados é possível constatar que o topázio e berilo apresentam as maiores durezas em Mohs (8 / 7,5-8), respectivamente, deveriam apresentar as maiores durezas em Vickers, sendo compatível apenas com o topázio, que apresenta HV de 775,78 (10g-eixo C) à 1592,50 (100g-bissetriz). Em seguida, os dois minerais granada, turmalina, quartzo e espodumênio que apresentam dureza granada 6,5-7,5, turmalina 7,0, quartzo 7,0, e espodumênio 6,5-7, mostraram durezas semelhantes em HV, sendo o quartzo o mais duro.

Conclui-se que os minerais possuem durezas anisotrópicas. Esta variação de dureza interfere na pressão exercida em relação à perda massa para cada eixo.

Figura 80 – Valores de HV (Hard Vickers) nos diferentes eixos cristalográficos da granada. A granada possui estrutura cristalina cúbica e a diferença de dureza nos diferentes eixos são diferentes, porém aproximados.

Figura 81 - Valores de HV nos diferentes eixos cristalográficos do topázio.

Figura 82 - Valores de HV nos diferentes eixos cristalográficos do berilo.

Figura 83- Valores de HV nos diferentes eixos cristalográficos da turmalina.

Figura 84- Valores de HV nos diferentes eixos cristalográficos do espodumênio.

Figura 85- Valores de HV nos diferentes eixos cristalográficos do quartzo.

9.4.3.2. *Direções de polimento em função da anisotropia de dureza*

A partir da constatação de que os minerais possuem durezas anisotrópicas e indicadores nas superfícies das faces cristalográficas externas, que indicam a direção de crescimento, foram feitas experiências variando as direções de polimento em relação ao crescimento dos minerais.

O mesmo procedimento é utilizado no polimento de diamantes e assim foi avaliada a necessidade de analisar um comportamento semelhante com as gemas coradas. Os minerais foram polidos em disco de liga de chumbo e estanho e com pó de óxido de alumínio para topázio, berilo e turmalina e com pó de óxido cério para quartzo. As análises não foram feitas para todos os grupos de minerais usados nesta tese.

Com o Reflectivity Meter foram observados os seguintes resultados, descritos nas tabelas 12 a 15. Cada valor é a média de 6 leituras. A técnica comporta uma margem de erro de 10% para mais ou para menos nas medidas, podendo também ser influenciada pela variação de índice de refração do eixo cristalográfico.

Porém, pode ser demonstrado que o melhor polimento do topázio foi no eixo c. Esta região, normalmente, não é utilizada como mesa na lapidação, devido à pequena área, zoneamentos de cor e paralelismo com a clivagem. A mesa geralmente é colocada perpendicular ao seu formato longitudinal. O

polimento acontece na mesma direção de crescimento, que apresentou a segunda melhor superfície (Tab. 12).

Tabela 12 – Índices de brilho que indicam planicidade de superfície em relação às direções de polimento para topázio imperial indicando a diferença de brilho em função da posição cristalográfica.

TOPÁZIO IMPERIAL - Posicionamento da amostra	Índices de Brilho - Média 3 valores
Eixo C	28.00
Paralelo à direção de crescimento - Vertical	25.83
Direção de crescimento - polimento diagonal	24.33
Perpendicular à direção de crescimento - horizontal	23.17

Através da experiência prática de lapidação, constatou-se que o berilo é um mineral homogêneo ao polimento. Porém, as análises demonstraram melhores resultados na direção paralela ao crescimento (Tab. 13).

Tabela 13 - Índices de brilho que indicam planicidade de superfície em relação às direções de polimento para berilo indicando a diferença de brilho em função da posição cristalográfica.

BERILO – Posicionamento da amostra	Índice de Brilho - Média 3 valores
Eixo C	23.50
Paralelo à direção de crescimento	24.83
Perpendicular à direção de crescimento	23.50
Diagonal à direção de crescimento	23.83

A turmalina possui forte estriamento em posicionamento vertical, indicando a crescimento. As análises pelo Refletômetro mostraram que a qualidade é indiferente em relação ao crescimento, porém através de sensibilidade manual, o mineral apresenta maior resistência perpendicular à direção de crescimento e maiores possibilidades de quebra. A turmalina fratura facilmente com variações de calor. O polimento na face do eixo c é mais resistente que a face paralela ao crescimento e poderá afetar na aquisição de superfícies planas. Amostras que possuem variações de cores radiais ao eixo c são lapidadas com a mesa perpendicular a este eixo, posicionando desta forma o foco de atenção de quem visualiza para uma face que não terá o melhor polimento (Tab. 14).

Tabela 14 - Índices de brilho que indicam planicidade de superfície em relação às direções de polimento para turmalina indicando a diferença de brilho em função da posição cristalográfica.

TURMALINA - Posicionamento da amostra	Índices de Brilho – Média 3 valores
Melância - eixo c	24.50
Verdelita- Paralelo à direção de crescimento	27.00
Verdelita - Perpendicular à direção de crescimento	27.00

Através do contato manual de polimento, o quartzo mostrou comportamento homogêneo. Porém os resultados demonstraram melhores superfícies seguindo a mesma direção de crescimento e em diagonal à mesma. Um fator interessante observado durante o polimento, foi que em polimento diagonal, a superfície destaca placas paralelas à superfície, percebidas apenas, quando observadas com luz refletida, não sendo possível seu registro através de fotografias. Este fenômeno é acentuado com o uso do polimento com feltro, óxido de cério e água (Tab. 15).

Tabela 15 - Valores de direções de polimento para quartzo indicando a diferença de brilho em função da posição cristalográfica.

QUARTZO- Posicionamento da amostra	média
eixo c	21.00
Paralelo a direção de crescimento	21.50
Em diagonal a direção de crescimento	21.83
Perpendicular à direção de crescimento	21.00

Pelos resultados obtidos conclui-se que o melhor posicionamento para o polimento é paralelo à direção de crescimento para todos os minerais. Esta direção é empiricamente utilizada pelos lapidários, em função da experiência de aproveitar maior quantidade do mineral.

10. Resultados

Os ensaios tribológicos permitiram reproduzir nos minerais os mecanismos de danos encontrados em condições semelhantes à lapidação de gemas, sendo assim os itens investigados foram:

- Estudo das topografias de minerais frágeis com estruturas cristalinas isotrópicas e anisotrópicas, que sob pressão exercida com o uso de materiais e processos díspares resultam em superfícies rugosas a planas, com a diminuição do grão abrasivo (Rugosidade);
- Alterações morfológicas na superfície decorrentes do efeito mecânico, como deformação plástica e amorfismo (Planicidade e Refletividade);
- Os efeitos ópticos gerados pela interação entre a superfície do mineral e a luz (Refletividade) e
- Estudo dos pós de polimento e lubrificantes como fator preponderante na qualidade de superfícies.

Na Figura 86, está definido o raciocínio do tribossistema. Os itens analisados e os equipamentos utilizados relacionam metodologicamente o sistema utilizado.

Figura 86 – Raciocínio de análises nas etapas de pré-formação, polimento e discussões ao final.

Os objetivos específicos de cada ensaio foram (Fig. 86):

- Rugosidade (Rugosímetro - Kosakalab, Confocal) e microscópio eletrônico de varredura- MEV): verificar o efeito superficial causado nas diferentes estruturas cristalinas; o efeito dos vales e deformação de picos; a influência da morfologia dos grãos de polimento e das combinações de lubrificantes;
- Qualidade de brilho da superfície (Reflectivity Meter, Rugosímetro e MEV): Comparação do comportamento topográfico entre as etapas e
- Tentativa de correlação entre superfície de maior planicidade com material de polimento e lubrificante e determinação de melhor material para cada mineral.

As amostras foram polidas com pós de polimento semelhantes no Brasil e na Alemanha, porém apenas os pós de óxido de alumínio e óxido de cério são passíveis de comparação e determinação de melhor polimento entre a lapidação dos dois países. Materiais de polimento como o pó de diamante, variantes de

óxido de alumínio e óxido de cromo, não foram utilizados de modo semelhante nos dois países e participam como experiências.

Apresentam-se a seguir os resultados desses ensaios.

10.1. Pré-formação e Facetamento

As etapas de pré-formação e facetamento são caracterizadas pela grande perda de massa, devido ao processo ser altamente abrasivo. A pré-formação utiliza rebolos verticais, com diâmetro aproximado de 30-50 cm, com água como lubrificante e rotação aproximada de 500 rpm. Neste caso, cerca de 60% do material é removido.

No facetamento, são usados discos horizontais, com diâmetro aproximado de 15-25cm e lubrificação de água. A sua rotação média é 500 rpm. A tensão aplicada entre o corpo e contra-corpo é empírica e manual, ou seja, o operador ou lapidário exerce a pressão que lhe for conveniente, tendo como base, suportes denominados *dop-sticks*. Neste caso, o mineral é afixado no suporte com ceras de durezas diferentes, sendo estas específicas para cada objetivo, dependendo do calor aplicado.

Para conformar a faceta desejada é necessário, em média, 10 min de desgaste por faceta.

Nesta etapa, cerca de 10% do material é removido, somando um total de 70% de perda do material durante todo o processo.

Os lapidários selecionam de duas a três etapas de pré-formação e então segue o facetamento.

As medidas foram registradas em todas as etapas de pré-formação, facetamento e polimento existentes nas oficinas de lapidação, com o objetivo de adquirir os perfis de rugosidade de cada etapa e definir entre duas ou três etapas como as ideais. A conclusão com a escolha das etapas está descrita no final deste item.

Para as etapas de pré-formação e facetamento foram feitas as análises apenas com as amostras feitas no Brasil.

Os ensaios de rugosidade foram feitos de modo linear, perpendiculares à direção de polimento, de modo a captar o perfil da trilha de desgaste. A

rugosidade é avaliada pelo índice Ra, o que significa o valor médio entre o pico e vale da superfície rugosa.

A evolução da superfície, nas diferentes etapas de lapidação, foi analisada através da rugosidade com rugosímetro físico Rugosímetro Kosakalab Surfcomer 1700α e através de micrografias no MEV LEO 440. As etapas demonstradas foram: carbeto de silício #100 (SiC100), rebolo diamantado #120 (C120), #180 (C180), #220 (C220), #600 (C600) e disco diamantado #500 (DC500).

As comparações são feitas seguindo a ordem: granada, topázio, berilo, turmalina, espodumênio e quartzo.

Os perfis de rugosidade das amostras de **granada**, mostrados na figura 92, a seguir, demonstraram que a primeira etapa usando SiC100 (carbeto de silício), foi menos agressiva se comparada com os rebolos diamantados, mesmo tendo valor granulométrico semelhante à primeira etapa de rebolo diamantado. Entre as etapas com rebolo diamantado, as granulometrias #120 e #180 são as mais rugosas, com grandes picos e vales de grande inclinação. A inclinação é decorrente do resultado obtido com discos ou rebolos desgastados, no qual imprimem-se irregularidades nas superfícies. Sendo assim o lapidário deve ter o cuidado de planificar o disco ou rebolo à cada utilização, conforme a figura 87 pode mostrar.

Figura 87 – Imperfeições na superfície do disco de facetamento decorrente do trabalho exaustivo.

As amostras C220 apresentam superfície menos rugosa que a de granulometria mais fina que é a C600. A C220 e o disco de facetamento DC500 demonstram graus de rugosidade semelhantes, aproximando-se também da superfície trabalhada com SiC100. Porém o disco de facetamento mostrou a superfície mais próxima de plana e adequada à sua função (Fig. 88).

Figura 88 – Perfis de rugosidade para as amostras de granada. Valores de Ra: SiC100 (0.883), C120 (1.869), C180 (1.684), C220 (0.659), C600 (1.043), DC500 (0.363).

Através das micrografias da superfície das amostras de granada é possível analisar (Fig. 89) graus de fraturamento e de deformação plástica nas etapas de pré-formação e maior área deformada no facetamento. É esperado que o aumento da superfície plana seja acompanhado pelo aumento da área com deformação plástica.

Figura 89 – Evolução das etapas de pré-formação em amostras de granada em que é possível verificar fraturas conchoidais nas figuras (c) e (d) e deformação plástica na última etapa de facetamento (f) (3.000x). Etapas (a)SiC100 (b)C120 (c)C180 (d)C220 (e)C600 (f)DC500.

Para as amostras de **topázio** a análise de rugosidade demonstrada no gráfico a seguir (Fig. 90) indicam picos e vales menores, porém maior inclinação em algumas amostras, se comparados com as amostras de granada.

Espera-se que a rugosidade decresça paralelamente à diminuição do tamanho do grão abrasivo. Porém, neste caso este fenômeno não ocorreu, e a etapa que apresenta picos e vales maiores é a C220. Destacam-se números elevados de Ra em materiais abrasivos de C120 e C180. Picos pontuais como o circulado em laranja na etapa de disco de facetamento (Fig. 90), representam uma irregularidade superficial, ou seja, fraturamentos localizados. Com exceção das etapas C120 e C180, a diminuição de granulometria das etapas foi acompanhada pela diminuição do Ra, definindo o resultado esperado.

Figura 90 - Perfis de rugosidade para as amostras de topázio. Valores de Ra: SiC100 (0.594), C120 (3.903), C180 (3.671), C220 (0.569), C600 (1.053), DC500 (0.536).

A superfície das amostras de topázio mostrado nas micrografias (Fig. 91) demonstrou que o desgaste do topázio, orientado com sua face paralela à face basal, demonstra feições de clivagem. A deformação plástica também não é perceptível nas primeiras etapas, aparecendo apenas nas etapas com *meshes* mais finos, C600 e DC500.

Figura 91 - Evolução das etapas de pré-formação em amostras de topázio em que é possível verificar feições de clivagem nas imagens de (a) até (d) e deformação plástica nas duas últimas etapas (e) e (f) (3.000x). Etapas (a)SiC100 (b)C120 (c)C180 (d)C220 (e)C600 (f)DC500.

Na topografia das amostras de **berilo**, as rugosidades das etapas usando SiC100 e do facetamento DC500, primeira e última etapa, são semelhantes e demonstraram maior planicidade. As etapas de pré-formações usando os abrasivos C120 e C180, apresentam picos compatíveis e aproximados ao SiC100 e DC500, porém maior inclinação. As amostras usando abrasivo C220 e C600, mostraram picos e vales com grande distanciamento, o que resulta em alta rugosidade (Fig. 92).

Figura 92 - Perfis de rugosidade para as amostras de berilo. Valores de R_a : SiC100 (0.975), C120 (2.198), C180 (4.017), C220 (0.961), C600 (0.936), DC500 (0.513).

Para a superfície das amostras de berilo, as micrografias mostram na figura 93 fraturamento conchoidal em grandes proporções e uma pequena porcentagem de deformação plástica em todas as etapas, intensificando-se no facetamento. O fraturamento intensivo pode ser o resultado de impacto e vibração dos rebolos, que precisam ser constantemente planificados.

Figura 93 - Evolução das etapas de pré-formação em amostras de berilo em que é possível verificar fraturas conchoidais nas imagens (a) até (d) e deformação plástica nas três últimas etapas (d) até (f) (3.000x). Etapas (a)SiC100 (b)C120 (c)C180 (d)C220 (e)C600 (f)DC500.

Nas amostras de **turmalina**, a topografia gerada com o SIC100 é a mais plana. As superfícies adquiridas porém são semelhantes e altamente rugosas. As etapas intermediárias C120 e C180 possuem picos e vales menores que as etapas seguintes C220 e C600, o que não acompanha o raciocínio de diminuição de rugosidade com diminuição do grão abrasivo. Já a etapa DC500, mostra picos pontuais decorrentes de fraturamentos pontuais (Fig. 94).

Figura 94 - Perfis de rugosidade para as amostras de turmalina. Valores de Ra: SiC100 (1.731), C120 (1.667), C180 (3.380), C220 (0.776), C600 (1.186), DC500 (0.711).

A superfície das amostras de turmalina na figura 95 com faces perpendiculares ao eixo c apresentam fraturamento em menor escala e deformação plástica localizada determinando a direção do desgaste. As deformações são mais frequentes nas etapas do uso abrasivo SiC100, C600 e do facetamento DC500, em que o grau abrasivo é menor. Portanto há de se concluir, que a diminuição de grão abrasivo favorece a deformação plástica e a planicidade de superfície.

Figura 95 - Evolução das etapas de pré-formação em amostras de turmalina em que é possível verificar feições de deformação plástica desde a primeira etapa (3.000x). Etapas (a)SiC100 (b)C120 (c)C180 (d)C220 (e)C600 (f)DC500.

Os perfis de rugosidade das amostras de **espodumênio**, indicada na figura 100, mostram proximidade de picos e vales entre as etapas, apresentando a C120 inclinação e a C220 picos pontuais de fraturamento. A amostra de superfície com maior planicidade é a DC500, resultado compatível com todos os outros minerais, menor granulação e maior planicidade. A inclinação é resultante do disco com topografia irregular (Fig. 96).

Figura 96 - Perfis de rugosidade para as amostras de espodumênio. Valores de R_a : SiC100 (1.032), C120 (0.993), C180 (3.854), C220 (0.652), C600 (0.890), DC500 (0.611).

As micrografias do mineral espodumênio, como mostrado na figura 97, evidenciam a clivagem perfeita em camadas grossas nas primeiras etapas e com camadas menores nas etapas finais C600 e DC500. A deformação plástica é pouco aparente, por ser um mineral facilmente clivado. Portanto, a superfície polida não será decorrente da deformação plástica e, sim, da diminuição de granulação e de distanciamento de clivagem.

Figura 97 - Evolução das etapas de pré-formação em amostras de espodumênio em que é possível verificar feições de clivagem em uma e duas direções. A deformação plástica é vista apenas a imagem (d) (3.000x). Etapas (a)SiC100 (b)C120 (c)C180 (d)C220 (e)C600 (f)DC500.

A variação de rugosidade nas amostras de **quartzo**, como indicado na figura 98, mostrou picos e vales maiores para todas as amostras, se comparadas com as amostras anteriores. No entanto, a rugosidade com maior planicidade é a etapa do facetamento, o que está de acordo com o esperado (Fig. 98).

Figura 98 - Perfis de rugosidade para as amostras de quartzo. Valores de Ra: SiC100 (0.576), C120 (1.587), C180 (3.197), C220 (0.520), C600 (1.160), DC500 (0.189).

A deformação plástica para as amostras de quartzo mostrados na figura 99, não é perceptível.

Figura 99 - Evolução das etapas de pré-formação em amostras de quartzo é possível verificar fraturas diversas e nenhuma deformação plástica (3.000x). Etapas (a)SiC100 (b)C120 (c)C180 (d)C220 (e)C600 (f)DC500.

Como dito anteriormente, as amostras registraram todas as etapas existentes na oficina de lapidação no Brasil, porém este trabalho visa identificar o menor número de etapas com maior eficiência. A etapa de facetamento é obrigatória, para minerais facetados, que é o foco deste trabalho, entretanto a escolha será apenas entre as etapas de pré-formação.

As oficinas de lapidação utilizam rebolos de um mesmo material com decréscimo de tamanho dos grãos abrasivos, seja o material diamante ou carbeto de silício. Os rebolos diamantados são mais abrasivos e desbastam com maior rapidez, porém é necessário que o operador tenha experiência para que não perca material. Já com o uso dos rebolos de carbeto de silício, a abrasão é menos agressiva e desgastam com menor intensidade, permitindo ao operador maior tempo e precisão.

No entanto, **conclui-se** nesta análise, que a primeira etapa SiC100 pode ser descartada, devido sua baixa capacidade de abrasão, já que esta etapa está isolada entre os rebolos diamantados, impossibilitando a evolução gradual da

planicidade da superfície. As etapas seguintes C120 e C180, demonstraram-se semelhantes, e seria ideal o uso apenas do C120, menos abrasiva e coerente. Entre as etapas C220 e C600, também semelhantes, pode ser usada a C220. Para definir o formato com maior precisão, pode ser útil o uso de mais uma etapa, o rebolo C600, e em seguida a etapa obrigatória do facetamento DC500.

10.2. Experiência de Polimento (CrODPbSn)

O óxido de cromo participa das análises por ser comumente usado nas oficinas de lapidação no Brasil, apesar do fato de que ele é considerado tóxico em outros países, e, no Brasil, é utilizado por possuir baixo custo e ter efeito de polimento semelhante aos outros pós de polimento. A granulação do pó não é uniformizada, portanto é possível que se tenha grãos maiores e menores no mesmo *mesh* escolhido. Este fator é verificado no item 10.7.3 deste trabalho.

A planicidade dos minerais indicada pelos valores de Ra (média entre o distanciamento de picos e vales) é indicada na tabela 16, em que se destaca a granada como mineral de maior planicidade e o quartzo, o mineral que apresentou maior rugosidade devido à porosidade superficial. As amostras apresentam superfícies inclinadas referentes a irregulares no contato do rebolo, portanto a cor mostrada nas figuras das análises na tabela 16, indica estas irregularidades, em que o azul escuro é o lado mais baixo e, o vermelho, o mais alto, em degradê de cores.

Tabela 16 - Valores em Ra (nm) e imagens 2D do local de análise do polimento de gemas com o material óxido de cromo.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Medidas de Ra (nm) Brasil - ISO4287						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
CrO	1,380	1,900	2,140	2,383	3,373	6,837

As micrografias das superfícies dos minerais polidos com óxido de cromo demonstram riscos na escala de 100 nanômetros que representam os grãos maiores contidos na mistura do pó (Fig. 100).

Figura 100 - Amostras polidas com CrO e Disco de Chumbo e Estanho no Brasil. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).

10.3. Experimento de Polimento (CDPbSn / CDCuOI / CDPbSnAS)

O pó de diamante, ou pasta diamantada, é tida pelos lapidários como um material que propicia o melhor polimento de gemas em menos tempo.

Através de experiência prática na preparação das superfícies, o óleo de soja ou oliva usado como lubrificante para o polimento de diamantes possui alta viscosidade e alta adesão entre o mineral e o disco, sendo difícil o uso para gemas coradas. O óleo lubrificante não possui o fator de oxidação e o desgaste favorece apenas o deslizamento com o pó de polimento. Quando se usa água como lubrificante em gemas coradas, que são em sua grande maioria silicatos,

possui também o fator de combinação química, além do desgaste por deslizamento de grão, sendo assim melhor indicado para gemas coradas.

Com o uso da água como lubrificante, pode-se utilizar a adição do sabão como veículo de deslizamento de grãos semelhante ao óleo. O sabão também é útil para manter o pó de diamante em suspensão (mineral com alta densidade e facilmente decantado). O tempo de polimento é menor com o uso de pó de diamante em relação aos outros materiais pela sua alta dureza e grãos angulosos, produzindo superfície plana e brilhante com rapidez.

O pó de diamante foi adquirido por possuir indicação própria para o polimento de minerais, porém sua morfologia angulosa não foi eficiente. É necessário que a verificação da morfologia do grão durante a aquisição para o polimento. As morfologias dos grãos devem ser aproximadas a formatos esféricos.

Conforme mostrado na figura 101 é possível verificar que o polimento feito no Brasil com disco de liga de chumbo/estanho e óleo de soja, contraditoriamente, produziu superfície com maior planicidade nas amostras de granada, topázio e quartzo e as polidas com disco de chumbo/estanho, água e sabão na Alemanha, mostraram melhores resultados com as amostras de berilo, turmalina e espodumênio. As amostras que foram polidas com disco de chumbo/estanho, pó de diamante e óleo de oliva apresentaram alta rugosidade e foram descartadas do gráfico, sendo demonstrados os índices de Ra, na tabela 17. A tabela com os números de Ra está descrita no anexo 3.

Figura 101 - Gráfico de representação da rugosidade em Microscópio Confocal Leica DCM3D, utilizando os materiais gemológicos analisados nesta tese, com o pó de diamante, disco de chumbo e estanho e óleo de soja no Brasil, pó de diamante, disco de chumbo e estanho e água e sabão na Alemanha, indica que o polimento com óleo de oliva pode ser eficiente para o polimento de granada, topázio e quartzo.

Tabela 17 – Valores em Ra(nm) e imagens 2D do local de análise de minerais gemológicos com polimento com pó diamantado, disco de chumbo e estanho e óleo de oliva, em oficina na Alemanha.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D – Medidas em Ra (nm) Alemanha - ISO4287						
C-DCu-Oliva	24,467	25,767	17,433	20,167	264,947	69,700

Entretanto, quando as micrografias nas figuras 102 a 104 são analisadas, é possível verificar que as superfícies dos dois primeiros grupos que utilizaram óleo são bastante riscados em duas direções e mostrando superfícies irregulares e fraturadas. Já o último grupo, polido com disco de chumbo e estanho, pó de diamante, água e sabão, na Alemanha, figura 104, apresentou superfície com maior planicidade e melhor polimento, sendo o resultado de rugosidade com índice maior para a granada, topázio e quartzo. A variação de tamanho de grão do pó de diamante utilizado no Brasil e na Alemanha é de cerca de 1 micrômetro. No capítulo 10.7.3.1, é possível verificar os valores de granulação, porém o valor de granulometria média para o Brasil está em 1,786µm e para a Alemanha

0,469 μ m. O pó de diamante obtido na Alemanha foi intencionalmente adquirido com menor granulometria.

Figura 102 - Amostras polidas com C e Disco de Chumbo e Estanho e Óleo de Soja no Brasil. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).

Figura 103 - Amostras polidas com C e Disco de Cobre e Óleo de oliva na Alemanha. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).

Figura 104 - Amostras polidas com C e Disco de Chumbo e Estanho, Água e Sabão na Alemanha. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).

10.4. Experimentos de Polimento com Diamantine (AlO)

Durante as preparações das amostras na Alemanha, houve a necessidade de buscar novos materiais de polimento, através da sua aplicação e percepção de comportamentos variados no processo de polimento.

Na oficina estavam disponíveis: o Diamantine e o GE6 para polimento em minerais com durezas menores ou iguais que a do quartzo. Segundo as especificações do fornecedor, Wilhelm Kruel, os dois são óxido de alumínio, sendo o GE6 com granulometria menor, descrito com detalhes no capítulo 10.7.3.1.

Foram feitas experiências utilizando o pó denominado Diamantine, disco de uma liga de chumbo/estanho, usando lubrificante de água e com a adição de limão. O limão foi utilizado em substituição ao vinagre que é utilizado por alguns lapidários como “segredo” de produzir uma superfície plana.

Ao analisarmos os números relacionados ao Ra de cada amostra, na figura 105, é possível determinar que os minerais que foram polidos com limão, são mais planos, com exclusão das amostras de quartzo. A tabela com os números de Ra está descrita no anexo 3.

Figura 105 - Gráfico de representação da rugosidade em Microscópio Confocal Leica DCM3D, utilizando os materiais gemológicos analisados nesta tese, com diamantine, disco de chumbo/estanho e água, e diamantine, disco de chumbo/estanho, água e limão ambos na Alemanha, indica que o uso de limão foi eficaz para todos os minerais com exceção do quartzo.

As micrografias a seguir mostram a superfície de minerais polidos com diamantine, água e adição de limão. É possível verificar na figura 106 a qualidade do polimento utilizando água e limão e na figura 107, o Diamantine apenas com água. Comparando as superfícies obtidas nos dois processos é possível verificar superfícies com menores quantidades de riscos com a adição de limão. O limão, neste caso, se comporta como um ácido leve em que é favorecida a alteração das moléculas no contato entre os corpos, propiciando um segundo tipo de desgaste além dos pós de polimento, que é a alteração química superficial.

Figura 106 - Amostras polidas com Diamantine e Disco de Chumbo e Estanho, Água e Limão na Alemanha. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).

Figura 107 - Amostras polidas com Diamantine e Disco de Chumbo e Estanho e Água na Alemanha. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzto (20.000x).

10.5. Experimentos de Polimento com GE6 (AIO)

A experiência realizada com o material de polimento GE6 estava em verificar a diferença da superfície com o uso do sabão. Foi possível verificar que os minerais granada e topázio apresentaram melhores resultados apenas com o uso da água como lubrificante. Para as amostras de berilo, turmalina, espodumênio e quartzo, os melhores resultados foram alcançados com o uso de água e sabão, conforme visualizado na figura 108. Podendo ocorrer variações de 10% nos valores que representam as limitações da técnica. A tabela com os números de Ra está descrita no anexo 3.

Figura 108-Gráfico de representação da rugosidade em Microscópio Confocal Leica DCM3D, utilizando os materiais gemológicos analisados nesta tese, com GE6, disco de chumbo e estanho e água, e GE6, disco de chumbo e estanho, água e sabão ambos na Alemanha, indicando o uso do sabão adicionado ao lubrificante eficiente para o berilo, turmalina, espodumênio e quartzo.

Entretanto, quando visualizamos as micrografias a seguir, nas figuras 109 e 110, o grupo polido com a adição de sabão (Fig. 110) encontra-se com superfície mais plana, nos minerais, berilo, turmalina, espodumênio e quartzo, o que condiz com os valores de rugosidade acima, em que apenas a granada e o

topázio (Fig. 109) mostraram melhores superfícies apenas com água. O sabão como dito anteriormente favorece o deslizamento dos grãos do pó de polimento.

Todas as superfícies demonstraram- se semelhantes e brilhantes, quando vistas a olho nu.

**Figura 109 - Amostras polidas com GE6, Disco de Chumbo e Estanho e água na Alemanha.
(a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzzo (20.000x).**

Figura 110 - Amostras polidas com GE6, Disco de Chumbo e Estanho, água e sabão na Alemanha. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).

10.6. Discussões entre os experimentos de polimento

Os experimentos com diferentes pós de polimento e lubrificantes, demonstrados acima, foram realizados de modo a comparar a planicidade de superfície gerada com estes materiais e com os materiais padrões que são, óxido de alumínio e óxido de cério. O mineral que apresentou maior número de Ra, ou rugosidade, foi o quartzo.

O gráfico da figura 111 mostra a comparação dos valores de Ra obtidos com o Microscópio Confocal Leica DCM3D para os diferentes pós de polimento utilizados nesta tese. Limitações da técnica conferem erro de 10% do valor para mais ou para menos.

Para as amostras de quartzo o melhor resultado foi com GE6, disco de chumbo e estanho, água e sabão. Para o espodumênio dois polimentos adequados e semelhantes, sendo eles variantes de óxido de alumínio, Diamantine com disco de chumbo e estanho, água e limão e GE6, disco de chumbo e estanho, água e sabão. Para as amostras de turmalina, o polimento com óxido de cério e também com óxido de alumínio, no Brasil. Para as amostras de berilo, o polimento adequado foi usando o óxido de alumínio comum tanto no Brasil, quanto na Alemanha. As superfícies das amostras de topázio mostraram melhor superfície com óxido de alumínio (Brasil), Diamantine, disco de chumbo e estanho, água e limão e GE6 com lubrificante de água e sabão. Para as

amostras de granada o polimento com óxido de cromo ou óxido de alumínio mostraram-se adequados.

Os pós de polimento foram analisados quanto ao tamanho médio dos seus grãos e morfologia, porém não é possível compará-los, como está mostrado nas (Figs. 112 e 113) e também explicado no capítulo 10.7.3.1, o óxido de alumínio aglomera-se e estes valores para este material não é real. O pó de diamante mostrou-se com menor granulação, porém não demonstrou melhores superfícies.

Portanto, variantes do óxido de alumínio (tamanho de grãos) e ácidos (limão) foram adequados para todos os minerais.

Figura 111 - Comparação de polimento (planicidade de superfície-Ra) com o uso de pós de polimento utilizados nesta tese.

Figura 112 - Comparação de tamanho de grãos de polimento de todos os pós utilizados nesta tese, com as micrografias em MEV-FEG.

Figura 113 – Relação da morfologia dos grãos. Todas as micrografias possuem o mesmo aumento (50.000x) com exclusão das que indicam aos aumentos com 70.000x.

10.7. Metodologia e tratamento de análise de superfície

A qualidade de superfície de um determinado material polido é diferenciada pelo efeito de suas características físicas em relação à química do pó de polimento, lubrificante e condições mecânicas do processo.

As condições de aquisições de superfícies obtidas nas oficinas de lapidação no Brasil e na Alemanha, foram definidas ao longo de anos através de experiências passadas por gerações. A escolha do material de polimento e

lubrificante são tradicionalmente definidas pela dureza dos minerais, sendo: para minerais com dureza maiores (>7): granada, topázio, berilo, turmalina e espodumênio devem ser polidos com óxido de alumínio (Al_2O_3) e minerais com dureza menores ou iguais (≤ 7), como o quartzo, com óxido de cério (CeO_2). Estas definições são confirmadas por Sinkankas (1984) e Fischer (1986). Oficinas, no Brasil, utilizam adicionalmente o óxido de cromo (Cr_2O_3), para todas as durezas de minerais, porém, na Alemanha, é considerado material tóxico à saúde e não recomendado.

Através de entrevistas informais de campo, feitas com lapidários e pessoas da área, cerca de 70% das pessoas acham como melhor material para polimento, o pó de diamante. No entanto, a sua granulação deve ser homogênea, muito fina, o lubrificante pouco viscoso e a adição de sabão para favorecer o deslizamento dos grãos.

Da mesma forma que os minerais possuem dureza anisotrópica, os grãos de pó de polimento produzidos a partir de minerais naturais ou sintetizados, também as possuem, podendo interferir no grau de dureza nas diferentes faces do grão e variação na taxa de desgaste. Por exemplo, no caso do diamante a direção paralela ao eixo a_3 é menos dura do que paralela à face do octaedro (READ, 1991).

A morfologia externa no grão de polimento é decorrente ao seu formato cristalino e à forma com que foi produzido. O enquadramento do grão, quanto ao seu formato, pode se dividir em duas classes: os angulosos ou lamelares (formato em placas).

Produtores que não possuem sistema de controle de qualidade, não homogeneízam o tamanho dos grãos em uma gama de *meshs* e produzem materiais com variações granulométricas, o que prejudica o polimento, como é mostrado com o exemplo do pó de óxido de cromo (Cr_2O_3).

Foram feitos testes de granulometria com o equipamento Malvern, seguida de análises químicas com Difratomia e Fluorescência de Raios X. Além disso foram feitas micrografias em MEV-FEG para visualizar o formato dos grãos. Os materiais analisados são: óxido de alumínio (Al_2O_3), óxido de cério (CeO_2), óxido de cromo (Cr_2O_3) e diamante (Carbono) utilizados no Brasil e na Alemanha.

10.7.1. Lubrificantes

Na lapidação de gemas, todas as etapas utilizam água ou óleo como lubrificante.

Os lubrificantes possuem a função de arrefecimento do processo, distribuição de carga e o carregamento de resíduos desbastados no mineral. Estes fatores são essenciais ao processo de polimento, porque os minerais são sensíveis a variações de temperatura, podendo ocorrer fraturas sempre que aquecidos, formando pó durante o desgaste do mineral. Este material retirado é aparentemente amorfo e quando misturado com o lubrificante formam um filme (GRILLO et al., 2000). O lubrificante sendo água ou ácido favorece a oxidação superficial, fazendo com que a superfície do mineral seja alterada. Outro fator importante, quanto ao uso do lubrificante para a lapidação de minerais, é o controle de atrito e de desgaste, possibilitando maior controle sobre o processo manual.

Nas etapas de pré-formação e facetamento, é adicionada água como lubrificante e o abastecimento é contínuo. No polimento, a lubrificação é feita manualmente, ou através de gotas, juntamente com o pó de polimento, quando o lapidário achar necessário.

10.7.2. Tipos de pós de polimento

Óxido de alumínio (Al_2O_3): vendido no comércio com nomes variados, alumina, diamantine, GE6, pó de safira, Linde A, Linde B, entre outros. O pó pode ser branco, avermelhado e azulado. O óxido de alumínio é insolúvel (SINKANKAS, 1984).

A fase cristalina mais estável recebe o nome α -alumina. Na forma de monocristal, seja natural ou sintético a α -alumina é denominada coríndon. Este mineral possui estrutura cristalina hexagonal com cátions de Al^{3+} que preenchem dois terços dos sítios octaédricos e rodeados por ânions de O^{2-} em empacotamento hexagonal e dureza 9 Mohs (OLIVEIRA, 2012).

O óxido de alumínio possui alto ponto de fusão, sendo utilizado pela indústria como material refratário, com alta condutibilidade térmica (NANUM, 2014).

Óxido de cério (CeO_2): nomeado comercialmente como óxido de cério, óxido cérico ou dióxido de cério é um óxido de metal raro e pode ser branco ou amarelado. É produzido através da calcinação de oxalato de cério ou hidróxido de cério. É solúvel apenas em ácido sulfúrico ou ácido nítrico concentrado (SINKANKAS, 1984). Além de material para polimento, é também usado como componente cerâmico para sensibilizar vidro fotossensível, absorve fortemente a radiação ultravioleta e funciona como catalisador. O cério também forma óxido de cério (III – Ce_2O_3), mas a fase mais estável à temperatura ambiente é CeO_2 (NANUM, 2014).

Óxido de cromo (Cr_2O_3): vendido no comércio como: pó verde, cromo verde, cromo ou óxido de cromo verde, possui coloração fortemente esverdeada e é insolúvel. É produzido em escala industrial através da conversão de cromita para chromia, por ataques por enxofre e também pela decomposição de nitrato de cromo ou pela decomposição exotérmica de dicromato de amônia. A estrutura cristalina é hexagonal. É um material duro (8 – 8,5 Mohs) e frágil. Não é facilmente atacado por ácidos ou bases. Sua granulometria normalmente não é uniforme e, em alguns países, é considerado tóxico quando inalado (SINKANKAS, 1984; NANUM, 2014).

Carbono (diamante): oferecido no comércio com os nomes diamante, pó de diamante, diamantado; tem cor cinza claro, amarelo claro ou branco; possui enorme variações granulométricas no mercado e é insolúvel. Pode ser formado por compostos sintéticos ou naturais industriais, como, por exemplo, os carbonados, diamantes negros e borts. É comercializado em pó ou em pasta (SINKANKAS, 1984).

10.7.3. Métodos de análise dos pós de polimento

Para análise da composição química, granulometria e aparência dos pós de polimento foram utilizadas três técnicas descritas a seguir.

10.7.3.1. Mastersize 2000, Malvern Ver. 5.54

O equipamento foi utilizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), no Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

A metodologia Malvern foi utilizada, nesta tese, para mensurar a variação de tamanho dos grãos dos pós de polimento utilizados no Brasil e na Alemanha.

O equipamento Mastersize Malvern 2000 usa a técnica de difração de laser para medir o tamanho das partículas e a intensidade de luz incidente na superfície das amostras em movimento, imersas em água deionizada (IR 1,330). Para evitar aglomerados é utilizado um ultrassom e dispersante Calgon (hexametáfosfato de sódio).

Os grãos medidos são em sua natureza tridimensionais e possuem valores e volumes variados. O equipamento coleta estes valores e converte os volumes irregulares para volumes calculados esféricos. Assim define as medidas com os seus diâmetros, segundo Alan Rawle em artigo sobre o funcionamento do equipamento Malvern Instruments Limited (sem data). A resolução da medição tem capacidade de análise de 0.020 a 200.000 μm .

No Brasil, foram utilizados para análise os pós de Al_2O_3 , óxido de alumínio, CeO_2 , óxido de cério, Cr_2O_3 , óxido de cromo e C, diamante. Na Alemanha, foram utilizados os pós de Al_2O_3 , CeO_2 , C, e variantes de Al_2O_3 , como o GE6 e o Diamantine.

Segundo os laudos gerados pelo LCT (Laboratório de Caracterização Tecnológica), interpretam-se as curvas de variação da granulometria pelos índices: $D[v, 0.1]$, diâmetro da esfera equivalente (de mesmo volume) abaixo do qual estão 10% das partículas, $D[v, 0.5]$ diâmetro da esfera equivalente (de mesmo volume) abaixo do qual estão 50% das partículas e $D[v, 0.9]$ diâmetro da esfera equivalente (de mesmo volume) abaixo do qual estão 90% das partículas. Os outros dois índices $D[3.2]$, que representam diâmetro médio de Sauter, cuja relação superfície/volume é a mesma para todas as partículas e $D[4,3]$ momento de volume médio (diâmetro médio de Brouckere), que indica o ponto central em torno da qual gira a frequência de volume de distribuição.

Para as amostras compradas no Brasil, define-se o Cr_2O_3 como o mais fino, porém com maior variação de tamanho de grãos, seguido do pó de

diamante (C), o CeO_2 e por último o do Al_2O_3 (Fig. 114). Os materiais Al_2O_3 e CeO_2 foram utilizados no polimento por um lapidário que faz lapidações especiais residente em São Paulo e os outros materiais Cr_2O_3 e pó de diamante (C) são utilizados pela empresa JM, localizada no centro de São Paulo, em sua lapidação diária, sem registro de origem.

Figura 114 - Gráfico de representação do tamanho dos grãos de polimento em micrômetros do volume total no Brasil.

Os valores de Al_2O_3 referentes à porcentagem do tamanho do grão, conforme visualizado na (Fig. 115 e Tab. 18), mostrou-se discrepante em relação aos outros pós. O material ao tato demonstrou-se mais fino que os outros pós e grosseiro diante as análises de Malvern. Conclui-se que o material está aglomerado, apesar do uso de dispersante e ultrassom. Os átomos contidos nas moléculas do material de polimento possuem eletronegatividade, que define o seu poder de atração com outros átomos. O óxido de alumínio se comparado com os outros materiais utilizados neste trabalho, possui o elemento alumínio que tem apenas três orbitais e maior eletronegatividade, portanto tem maior poder de atração e consequentemente maior força de aglomeração.

Tabela 18 - Descrição dos dados obtidos em Malvern, materiais obtidos no Brasil.

Resultado Malvern - Tamanho de Partículas (μm)						
Materiais	IR	D < 10%	D < 50%	D < 90%	D [3.2]	D [4,3]
AlO	1,78	5,761	23,016	48,806	10,915	25,585
CeO	1,88	0,412	2,259	7,681	0,884	3,325
C	2,42	0,549	1,786	3,969	1,208	2,074
CrO	2,52	0,491	1,158	4,529	0,98	2,575

Figura 115 - Gráfico de representação do tamanho das partículas no Brasil.

Para os pós de polimento utilizados na Alemanha, o diamante foi adquirido propositalmente como pó mais fino, da marca Saint-Gobain, da loja Otto Eigner (Idar-Oberstein), demarcado na embalagem 0,5 - 1 μm .

O CeO_2 utilizado na Fachhochschule Trier diariamente pelos estudantes, adquirido na loja Wilhelm Kruehl, demonstrou-se o segundo mais fino. Em seguida os pós Diamantine e GE6 vendidos também na loja Wilhelm Kruehl, tidos como semelhantes, categoriza o Diamantine como mais fino que o GE6. O nome GE6 é utilizado apenas nesta loja e o nome Diamantine é normalmente utilizado para granulações menores de óxido de alumínio (Figs. 116 e 117 e Tab. 19).

O mais espesso dos pós de polimento foi o Al_2O_3 , de uso da Fachhochschule Trier para materiais mais duros e por último o SiC com granulometria #320 utilizada para pré-polimento. O óxido de alumínio repete os níveis de aglomeração, tanto no óxido de alumínio comum, quanto nas variações Diamantine e GE6. O material Al_2O_3 apresenta-se bastante fino, visualmente, porém nas análises, mais grosso, decorrente da aglomeração.

Figura 116 - Gráfico de representação do tamanho dos grãos de polimento na Alemanha.

Tabela 19 - Descrição dos dados obtidos em Malvern, materiais obtidos na Alemanha.

Resultado Malvern - Tamanho de Partículas (μm)						
Materiais	IR	D < 10%	D < 50%	D < 90%	D [3.2]	D [3,4]
AlO	1,78	13,076	39,075	70,172	16,279	40,836
CeO	1,88	1,188	3,137	9,829	2,454	4,595
Diamantine	2,42	2,086	12,273	30,677	4,642	14,651
GE6	2,42	5,517	22,897	53,367	9,287	26,628
SiC#325	1,729	22,152	35,904	57,35	33,467	38,091
C	2,42	0,304	0,469	0,704	0,441	0,489

Figura 117 - Gráfico de representação do tamanho das partículas na Alemanha.

Ao considerar que o óxido de alumínio se apresenta fino ao tato e grosseiro nas análises devido ao poder de atração entre as partículas, foram feitas análises em Malvern com diferentes dispersantes, sendo os mesmos utilizados no processo de lapidação, ou seja, água com detergente, água com limão ou água com limão junto ao detergente e conclui-se que ao adicionar limão a capacidade de atração entre as partículas aumenta, fazendo com que os grãos se aglomerem e fiquem maiores. Porém quando o limão é adicionado juntamente ao detergente, perde a ação de congruência.

O limão por ser um ácido carboxílico fraco de composição $C_6O_8H_7$, possui os elementos carbono e oxigênio de raios atômicos pequenos com alta eletronegatividade, ou seja, possuem poucos orbitais eletrônicos, está mais próximo ao núcleo e alta força de atração. Porém o grau de acidez e perda de (H^+) está relacionada à eletronegatividade como também ao número de camadas nos orbitais. Átomos eletronegativos não se estabilizam facilmente com (H^+), portanto liberam este átomo e quanto maior o número de orbitais mais reativos ficam estes átomos possibilitando a também liberação de (H^+). Quando existe essa instabilidade eletrônica, mais facilmente os átomos buscam novas ligações. Átomos altamente eletronegativos como alumínio, carbono e oxigênio, constituintes do pó de polimento e limão, quando misturados, formam novas ligações com alta atração e se aglomeram.

Segundo Soares (2009), o óxido de alumínio nanoparticulado é altamente reativo por possuir maior área exposta e quando em contato com outra partícula, aumenta a densidade de carga superficial. Portanto, as partículas sendo atraídas por forças intermoleculares eletrostáticas (Forças de Van der Waals), favorecem a aglomeração.

Segundo os dados abaixo é possível verificar a experiência com outros dispersantes (Tab. 20 e Fig.118).

Tabela 20 - Óxido de alumínio combinado com diferentes materiais para avaliar o teste de aglomeração.

Resultado Malvern - Tamanho de Partículas (μm)						
Materiais	IR	D < 10%	D < 50%	D < 90%	D médio	D V médio
AIO (água)	1,78	13,076	39,075	70,172	16,279	40,836
AIO (água+detergente)	1,78	11,658	39,002	70,059	15,789	40,626
AIO (água+limão)	1,78	19,604	55,670	421,548	24,861	134,655
AIO (água+detergente+limão)	1,78	9,954	38,405	68,893	15,059	39,826

Figura 118 - Gráfico de representação do tamanho das partículas com combinações de óxido de alumínio com outros materiais para conferir o poder de aglomeração.

10.7.3.2. Difração de Raios X

A difratometria de raios X corresponde a uma das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos. O raio X é uma onda eletromagnética com a mesma natureza da luz visível, porém com um comprimento de onda pequeno ($0.1\text{nm} = 10\text{\AA}$) e mais penetrante, sendo o tamanho conhecido do espaçamento atômico em sólidos de 1nm . Os raios x se encontram no espectro eletromagnético entre os raios gama e os raios ultravioleta ($\lambda = 0.5\text{-}2.5\text{\AA}$). A energia (E) de um fóton de raios X é relacionada com o seu comprimento de onda λ . Para o estudo dos cristais, os fótons devem possuir energias no intervalo entre 10 e 50 keV. Como os raios X possuem menor comprimento de onda do que a luz visível e energia mais elevada, podem penetrar mais facilmente no material do que a luz visível, no entanto, isto varia com a densidade do material (UFSC, 2014).

As amostras são preparadas em formato de pó, em que os raios X são emitidos a determinado ângulo e captados no ângulo oposto. Os grãos de materiais posicionados para análise possuem estrutura cristalina, podendo ser medidos um ou mais materiais ao mesmo tempo. Os raios X ao atingirem a amostra, são espalhados elasticamente. Segundo o ponto de vista da física

ondulatória, a onda eletromagnética emitida é instantaneamente absorvida pelos elétrons dos átomos da estrutura do material e reemitida, sendo que cada elétron atua como um centro de emissão de raios X, sem perda de energia, identificando o material pelo tamanho das distâncias interatômicas. Se os átomos que geram este espalhamento estiverem arranjados de maneira sistemática, como em uma estrutura cristalina (através do método de difração do pó), apresentando entre eles, distâncias próximas ao do comprimento de onda da radiação incidente, são verificadas as relações de fase entre os espalhamentos periódicos e efeitos de difração em vários ângulos.

O choque de feixes de elétrons do cátodo (emissão) para o ânodo (alvo) produz o espectro contínuo, que resulta da desaceleração do elétron durante a penetração no ânodo e o raio X característico do material, que é produzido em alta voltagem, tem como resultado transições eletrônicas específicas de átomos individuais dentro do material.

O modelo de átomos de Bohr exemplifica que o núcleo do átomo é formado por prótons e nêutrons, e rodeados de camadas eletrônicas chamadas por K, L, M, N, O, P, Q e quando a aceleração de elétrons é suficiente para ser deslocada de camadas, o raio X produz um comprimento de onda que depende exatamente da estrutura em que está sendo bombardeado. A transição da camada L para a K gera raios X $K\alpha$, e da M para a K, raios X $K\beta$, que é descrita em picos paralelos no gráfico. Cada material, se mais de um, colocados em grão, possuem uma orientação cristalográfica, sendo possível através da emissão e coleta de raios X determinar a orientação e estrutura cristalina. (UFSC, 2014).

Para a análise das amostras deste trabalho, foi utilizado o equipamento de Difração de raios X, da marca Panalytical, modelo X'Pert PRO com detector X'Celerator, no Laboratório de Caracterizações Tecnológicas (LCT) do Departamento de Engenharia de Minas da Universidade de São Paulo, com as condições de análise para a obtenção dos difratogramas: tubo de Cu ($\lambda=1,540598 \text{ K}\alpha_1$), energia 45mA 40keV, faixa angular $2,5-70^\circ$ (2θ), passo angular $0,02^\circ$, tempo/passo de 30s.

A identificação das fases cristalinas foi obtida por comparação do difratograma da amostra com os bancos de dados PDF2 do ICDD - International

Centre for Diffraction Data (2003) e PAN-ICSD – PANalytical Inorganic Crystal Structure Database (2007). O software utilizado foi o X'Pert HighScore Plus.

Os materiais analisados foram os pós de polimento utilizados no Brasil e na Alemanha com o intuito de definição da composição química. Foram feitas duas análises para cada mineral para determinação da composição, Difração e Fluorescência de raios X. Os difratogramas estão dispostos no anexo 4.

Para os materiais obtidos no **Brasil**: o óxido de alumínio apresentou fases compatíveis com a ficha catalográfica 01-08-2266 *AluminumOxide*. Portanto a definição é que o material é um óxido de alumínio (Fig. 119).

Figura 119 – Difractometria do óxido de alumínio do Brasil em comparação com a ficha 01-081-2266 (Aluminium Oxide).

Para o óxido de cério, os picos obtidos foram comparados com três fichas catalográficas: 01-081-0792 CeriumOxide CeO_2 , 01-089-5168 Lanthanum Oxide LaOF , 01-083-0652 Monazites (Ce), syn; $\text{Ce}(\text{PO}_4)$, em que se identifica a relação entre os elementos terras raras de números atômicos aproximados e frequentemente unidos, cério e lantânio e sua possível obtenção com o mineral monazita, fonte de elementos terras raras como tório, lantânio e cério. O óxido de cério, conforme descrito por Wolcyryz e Kepinski (1992) que descreve a ficha com que foi identificado o material na difração de raios X, já o material brasileiro

é decorrente de materiais catalisados de Pd/CeO₂, podendo coexistir três fases CeO₂, CeOCl, e Pd e impregnação de HCl (Fig. 120).

Figura 120 - Difratometria do óxido de cério do Brasil em comparação com as fichas - 01-081-0792 CeriumOxide CeO₂, 01-089-5168 Lanthanum Oxide LaOF, 01-083-0652 Monazite.

O óxido de cromo, apresentou picos distintos e facilmente caracterizados em comparação com a ficha catalográfica de *Chromium Oxide*. (Fig. 121).

Figura 121 - Difratometria do óxido de cromo do Brasil em comparação com a ficha Chromium Oxide.

A amostra de carbono (diamante) utilizada no Brasil, apresentou picos semelhantes aos picos de carbono pré-estabelecidos com a ficha: 01-075-0624 Diamond e pequena porcentagem de quartzo compatível com a ficha 01-085-0754 Quartz. Os contaminantes de quartzo foram detectados em Fluorescência de raios X (Fig. 122).

Figura 122 - Difractometria do pó de diamante do Brasil em comparação com as fichas 01-075-0624 (Diamond), 01-085-0794(Quartzo).

Para os materiais obtidos na **Alemanha**, foram analisados: as três variações de óxido de alumínio (AlO, Diamantine e GE6), óxido de cério, diamante (C) e o carbetto de silício utilizado na pré-formação. As variações de óxido de alumínio utilizaram a mesma ficha catalográfica de comparação, *Aluminium Oxide*, certificando-se da composição química similar entre as amostras (Figs. 123, 124 e 125).

Figura 123 - Representação gráfica da composição química de óxido de alumínio da Alemanha em Difratometria de raios X.

Figura 124 - Representação gráfica da composição química de óxido de alumínio (GE6) da Alemanha em Difratometria de raios X.

Figura 125 - Representação gráfica da composição química do pó de óxido de alumínio (Diamantine) da Alemanha, em Difratoimetria de raios X.

O óxido de cério usado na Alemanha, foi comparado com a ficha 01-089-8435 Cerium Oxide $\text{Ce}_{11}\text{O}_{20}$, como descrito por Kümmerle e Heger (1999). O material utilizado para pesquisa foi a estrutura refinada de CeO_2 com o crescimento de monocristal de Fluorita (CaF_2) de estrutura cúbica e suas variações em posições e quantidades atômicas, $\text{Ce}_7\text{O}_{12}/\text{Ce}_{11}\text{O}_{20}$ (Fig. 126).

Figura 126 - Representação difratométrica do óxido de cério da Alemanha em comparação com a ficha 01-089-8435 Cerium Oxide; $\text{Ce}_{11}\text{O}_{20}$.

O carbeto de silício #320, de coloração verde musgo, utilizado na última etapa de pré-formação com rebolo de feltro, foi comparado com a ficha catalográfica *Silicon Carbide*, sem qualquer contradição quanto à sua composição química (Fig. 127).

Figura 127 - Representação difratométrica do carbeto de silício da Alemanha em comparação com a ficha Silicon Carbide.

O pó de diamante comprado em Idar-Oberstein em baixa granulação da marca Saint-Gobain, foi comparado à ficha catalográfica *Diamond*, porém as análises de fluorescência de raios X detectaram porcentagens de óxido de níquel que podem ocorrer menores que 5% no total, no entanto inexistentes quando analisadas em Difração de raios X (Fig. 128).

Figura 128 - Representação difratométrica do pó de diamante da Alemanha em comparação com a ficha Diamond.

10.7.3.3. Fluorescência de Raios X

A análise por fluorescência de raios X é um método quali-quantitativo baseado na medida das intensidades dos raios X característicos emitidos pelos elementos da amostra. Os elétrons emitidos por tubos de uma fonte excitam os elementos constituintes das amostras, os quais, por sua vez emitem linhas espectrais com energias características do elemento e cujas intensidades estão relacionadas com a concentração do elemento na amostra.

Quando um elemento de uma amostra é excitado, tende a ejetar os elétrons do interior dos níveis atômicos, e os elétrons dos níveis mais afastados realizam um salto quântico para preencher a vacância. Cada transição eletrônica constitui uma perda de energia para o elétron e esta energia é emitida na forma de um fóton de raio X, de energia característica e bem definida para cada elemento (NASCIMENTO, 1999).

As análises foram feitas em equipamento de Fluorescência de raios X, localizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT) com supervisão do Prof. Dr. Henrique Kahn. O equipamento de Fluorescência de Raios X é da marca Axios Advanced, do fabricante Panalytical. Foi utilizada a fluorescência

por dispersão de energia (ED-XRF, *energy dispersive X-ray fluorescence*), sem perda de fogo e as amostras foram preparadas com o pó de materiais de polimento utilizados no Brasil e na Alemanha.

As amostras de pó diamantado, com composição em carbono, apresentam elementos químicos em sua análise que podem não ser reais. O elemento carbono não é identificado em análises de fluorescência de raios X, devido à sua baixa densidade de elétrons. Portanto, as análises com pó de diamante não demonstram carbono, e todos os outros materiais constituintes que são descritos fazem parte de uma pequena amostra e são evidenciadas como 100% da análise (Tab. 21 e 22), a seguir.

O óxido de cromo obtido no **Brasil** apresenta composição química com 99.1 de Cr_2O_3 , o que descarta possibilidades de contaminação com outros materiais. O óxido de alumínio (99.9) de Al_2O_3 . O óxido de cério com CeO_2 (57.7), La_2O_3 (24.8), quantidade significativa de F com (9.28) e SiO_2 com (3.42), que não é demonstrado na Difração de Raios X e (2.69) de P_2O_5 , elemento constituinte da Monazita. O diamante apresentou grande porcentagem de quartzo, o que é confirmado na Difração de raios X (Tab. 21).

Tabela 21 - Dados referentes à fluorescência de raios X de pós de polimento obtidos no Brasil.

Amostras Obtidas no Brasil	Óxido de cromo	Óxido de alumínio	Óxido de cério	Diamante
F	nd	nd	9.28	nd
Na_2O	0.14	nd	nd	2.08
MgO	nd	nd	0.17	nd
Al_2O_3	0.08	99.9	1.14	4.93
SiO_2	0.09	0.03	3.42	73.4
P_2O_5	nd	nd	2.69	0.17
SO_3	0.13	0.01	0.24	4.29
Cl	nd	nd	0.04	1.85
K_2O	nd	nd	nd	1.01
CaO	0.04	nd	0.12	2.18
TiO_2	nd	nd	nd	2.24
Cr_2O_3	99.1	nd	nd	nd
MnO	nd	nd	nd	4.53
Fe_2O_3	0.10	0.02	0.12	2.43
NiO	nd	nd	nd	0.72
CuO	0.29	0.04	0.30	nd
ZrO_2	nd	nd	nd	0.17
La_2O_3	nd	nd	24.8	nd
CeO_2	nd	nd	57.7	nd

Para as amostras obtidas na **Alemanha**, o óxido de alumínio, Diamantine e GE6 demonstraram-se sem contaminantes em suas composições químicas, o óxido de cério apresentou porcentagens de CeO_2 (69.5), La_2O_3 (23.9) e F (6.29) confirmando a presença de Fluorita descrita por Kümmerle e Heger (1999), o carbeto de silício com (99.9) de SiO_2 , e o pó diamantado da Saint-Gobain com presença NiO (56.6) que não pode ser levada em consideração em alta porcentagem, devido à ausência da quantificação de carbono (Tab. 22).

Tabela 22 - Dados referentes à fluorescência de raios x de pós de polimento obtidos na Alemanha.

Amostras obtidas na Alemanha	Óxido de alumínio	Óxido de cério	AlO - Diamantine	AlO - GE6	SiC # 320	Diamante
F	nd	6.29	nd	nd	nd	nd
Na_2O	0.208	nd	0.312	nd	nd	nd
Al_2O_3	99.6	0.068	99.6	99.9	0.042	nd
SiO_2	0.073	0.180	0.040	0.020	99.9	10.0
P_2O_5	nd	0.028	nd	nd	nd	1.823
SO_3	0.008	0.014	0.004	nd	nd	nd
Cl	nd	0.017	nd	nd	nd	nd
K_2O	nd	nd	nd	nd	nd	1.75
CaO	0.028	0.040	0.024	nd	nd	10.1
TiO_2	nd	nd	nd	nd	0.014	nd
V_2O_5	nd	nd	nd	nd	0.029	nd
MnO	nd	nd	nd	nd	nd	4.151
Fe_2O_3	0.049	nd	0.022	nd	0.020	15.5
Co_3O_4	0.012	nd	nd	nd	nd	<0,001
NiO	0.007	nd	0.005	0.003	0.010	56.6
CuO	0.043	nd	nd	0.028	nd	nd
Ga_2O_3	0.010	nd	0.005	0.002	nd	nd
ZrO_2	0.006	nd	nd	nd	nd	nd
La_2O_3	nd	23.9	nd	nd	nd	nd
CeO_2	nd	69.5	nd	nd	nd	nd

As comparações entre Difratometria e Fluorescências de raios X, podem ser comparadas com as análises de MEV-FEG-EDS. As análises em EDS são menos precisas, por permitirem análises pontuais, podendo haver contaminações superficiais.

10.7.3.4. MEV-FEG

O equipamento MEV-FEG, Microscópio Eletrônico de Varredura de campo de emissão (*FEG – Field Emission Gun*) foi utilizado no Laboratório de Caracterização Tecnológica (LCT), já descrito anteriormente, e utilizado com as mesmas configurações em que foram feitas as micrografias de superfícies polidas descritas neste trabalho.

Os materiais utilizados para análise foram os pós de polimento obtidos no Brasil e na Alemanha com o intuito de visualizar a morfologia do grão, correlacionar o tamanho de grão definidos no equipamento Malvern e comparar as composições químicas analisadas em Difração e Fluorescência de raios X com a captação EDS (Energy Dispersive x-ray detector). As análises em EDS são feitas de forma pontual, escolhendo o local a ser analisado através do modo retroespalhado (backscattering) para visualização da diferença de densidade atômica e escolha adequada. Foram feitas cerca de três análises pontuais consecutivas para confirmação dos resultados.

As preparações das amostras foram feitas através da pulverização do pó de polimento sobre os *stubs* cobertos com fita de carbono, sem adição de qualquer substância.

O material, óxido de alumínio, obtido no Brasil demonstrou a 50.000x grãos nanométricos, que em visualizados a aumentos menores demonstram grãos agregados com arestas agudas. Os grãos maiores são agregados e possuem numerações que se enquadram nas medidas granulométricas obtidas pelo equipamento Malvern. É possível verificar os aglomerados (Fig.129).

Figura 129 - Micrografias de óxido de alumínio obtido no Brasil (a) 500x (b) 4.000x (c) 7.000x (d) 16.000x (e) 30.000x (f) 50.000x.

A análise em EDS foi feita através de três medidas pontuais e o gráfico abaixo representa uma das análises, que possibilitou a comparação equivalente com as medidas em Difração e Fluorescência de raios X, mantendo a composição com elementos de Al, O e Pt, que demonstra o recobrimento de platina (Fig. 130).

Figura 130 - Gráfico de composição química pontual gerado por EDS em óxido de alumínio do Brasil.

O óxido de cério obtidos no Brasil apresenta formato lamelar e não apresentam agrupamentos sólidos. As análises em Malvern são equivalentes e a granulação nanométrica (Fig. 131).

Figura 131 - Micrografias de óxido de cério obtidas no Brasil (a)20.000x (b)30.000x (c)50.000x (d) 100.000x.

A análise de EDS demonstrou composição com os elementos cério e lantânio, oxigênio e platina, que confirmam os resultados anteriores (Fig. 132).

Figura 132 - Gráfico de composição química pontual gerado por EDS em óxido de cério do Brasil.

O óxido de cromo obtido no Brasil é demonstrado nas micrografias como sólidos arredondados e nanométricos com grãos maiores em medidas micrométricas, o que demonstra a irregularidade de granulometria do produto, podendo gerar superfícies riscadas, resultado de material de baixo custo e sem padrões de qualidade (Fig. 133).

Figura 133 - Micrografias de óxido de cromo obtidos no Brasil (a)20.000x (b)30.000x (c)30.000x (d)50.000x.

A análise de EDS em óxido de cromo demonstrou semelhança com as análises químicas anteriores, porém com pequena porcentagem de AlO e Pt. O elemento platina está presente no recobrimento da amostra e o AlO não foi detectado em Fluorescência de raios X, podendo ser decorrente de contaminações superficiais (Fig. 134).

Figura 134 - Gráfico de composição química pontual gerado por EDS em óxido de cromo do Brasil.

O pó de diamante obtido no Brasil demonstrou-se com feições cúbicas e com arestas agudas a ponto de apresentar danos ao risco da superfície, como podemos verificar nas micrografias das superfícies polidas com ele. A granulometria nanométrica é compatível com as medidas de Malvern e não apresenta agregações (Fig. 135).

Figura 135 - Micrografias de pó de diamante obtidos no Brasil (a)5.000x (b)13.000x (c)30.000x (d)50.000x.

Os dados de EDS sugerem uma composição química entre carbono, quartzo, oxigênio e platina, que são compatíveis com as medidas anteriores em Difração e Fluorescência de raios X (Fig. 136).

Figura 136 - Gráfico de composição química pontual gerado por EDS em pó de diamante do Brasil.

Para os materiais adquiridos na Alemanha, o carbetto de silício, de granulometria maior, é referente à etapa de pré-formação. A gama granulométrica varia entre as dezenas 20 a 60 micrômetros e possui formato angular o que facilita o desbaste acentuado requerido nesta etapa (Fig. 137).

Figura 137 - Micrografia de carbeto de silício originário da Alemanha (a) 400x (b)5.000.

A análise de EDS se apresentou clara quanto às fases químicas com silício, carbono e platina, o que confirma as análises anteriores em Difração e Fluorescência de raios X (Fig. 138).

Figura 138 - Relação de fases químicas em análise pontual de EDS do Carbeto de Silício adquirido na Alemanha.

As três variantes de óxido de alumínio adquiridas na Alemanha, demonstradas abaixo, apresentam semelhanças entre o óxido de alumínio comum e o diamantine, com formato hexagonal, formação em camadas, o que significa que este material é natural. Já o GE6, apresenta grãos lamelares e arredondados, o que significa que é um material precipitado ou sintetizado.

Todas as amostras mostram grãos agregados em escala micrométrica o que representa a aglomeração das partículas (Figs.139, 141 e 143).

Figura 139 - Micrografias de óxido de alumínio obtido na Alemanha (a)400x (b)5.000x (c) 15.000x (d)50.000x.

As análises pontuais de EDS são equivalentes nas três amostras, com fases químicas em AlO, O e Pt, o que confirma as análises químicas anteriores (Figs. 140, 142 e 144).

Figura 140 - EDS de óxido de alumínio obtido na Alemanha.

Figura 141 - Micrografias de diamantine, utilizado na Alemanha (a)400x (b)20.000x (c)20.000x (d)50.000x.

Figura 142 - EDS de material diamantine obtido na Alemanha.

Figura 143 – Micrografias do material GE6 utilizado na Alemanha (a)400x (b)5.000x (c)20.00x (d)100.000x.

Figura 144 – EDS do material GE6 com fases químicas em óxido de alumínio. Material obtido na Alemanha.

O óxido de cério, material de característica lamelar e nanométrica, apresenta grãos maiores aglomerados, porém em menor escala que o óxido de alumínio, variando em dimensões de 4 micrômetros (Fig. 145). Nas análises em EDS, as fases químicas em O, Ce, La, e Pt são características do óxido de cério, demonstrando que o La sempre acompanha o Ce e os orbitais eletrônicos do Ce são demonstradas nos picos (Fig. 146), a seguir.

Figura 145 - Micrografias de CeO utilizado em oficina na Alemanha (a)10.000x (b)30.000x (c)70.000x (d)100.000x.

Figura 146 - EDS do material CeO obtidos na Alemanha e identificação de fases químicas em Ce e La.

O último material de polimento, pó de diamante, adquirido propositalmente com granulação menor que o utilizado no Brasil, realmente apresentou granulações menores em 50%. Os grãos são nanométricos (200-400nm), com feições cúbicas e angulares. A análise em EDS demonstrou claramente a fase eletrônica de carbono (Figs. 147 e 148).

Figura 147 - Micrografia de pó de diamante Saint-Gobain utilizado na Alemanha (a)10.000x (b)50.000x.

Figura 148 - EDS de pó de diamante obtido na Alemanha, com fase química em carbono.

11. Discussões

Diante das hipóteses sugeridas no decorrer desta tese, objetivou-se a identificação do adequado processo de polimento para cada mineral.

O mineral analisado individualmente é o fator central nesta etapa do trabalho. Dentre os minerais escolhidos, todos são silicatos, mas apresentam diferenças nas estruturas cristalinas, na dureza e na tenacidade, e quando combinados com o processo de polimento, reagem com os materiais em contato, resultando em superfícies próprias para cada mineral. As comparações que seguem são feitas apenas sobre o processo de facetamento, com o uso de disco de polimento, óxido de alumínio ou óxido de cério e água, excluindo o uso de feltro. As superfícies produzidas no Brasil e na Alemanha são comparadas entre si. Não foram considerados os experimentos usando os materiais: Diamantine, GE6, óxido de cromo e pó de diamante, sobre os quais já foram comentados no capítulo 11.

Para cada mineral, foram tiradas conclusões primeiramente através dos valores de Ra obtidos em Microscópio Confocal LEICA DCM3D, e em seguida, através do “Reflectivity Meter” com valores relacionados ao brilho da superfície. Os valores de brilho são comparados com as micrografias em MEV, do mineral e do pó de polimento. O tamanho do pó de polimento é correlacionado com a qualidade da superfície.

Os valores obtidos de rugosidade (Ra) e de brilho foram obtidos com a média aritmética de seis medições e podem apresentar margem de erro de 10% para mais ou para menos.

As amostras de **granada** apresentaram o valor de Ra mais baixo com o polimento de óxido de alumínio, disco de estanho e água no Brasil e com o óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água na Alemanha. Os valores são 1,360 para o Brasil e 2,070, na Alemanha. Com os valores aproximados, a diferença enquadra-se na margem de erro de 10%. (Tabs. 23 e 24) (Figs.149 e 150).

Tabela 23- Valores de Ra obtidos em Microscópio Confocal para as condições de lapidação no Brasil, demonstradas no gráfico da figura 142.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Valores de Ra (nm) - ISO4287 - BRASIL						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
AlO- DiscoPb e água	1,360	1,660	1,753	1,433	2,487	2,847
CeO- Disco Pb e água	1,827	2,370	2,257	1,520	2,760	2,470

Figura 149 - Gráfico de valores de Ra obtidos por processos de polimento no Brasil.

Tabela 24- Valores de Ra referentes às análises realizadas em Microscópio Confocal para as condições de lapidação na Alemanha, demonstradas no gráfico da figura 143.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Valores de Ra (nm) - ISO4287 - ALEMANHA						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
AlO – DiscoPb/Sn-água	2,070	5,243	1,730	2,983	2,860	3,117
CeO – DiscoPb/Sn-água	4,463	9,687	8,860	5,263	6,917	2,967

Figura 150 - Gráfico de valores de Ra obtidos por processos de polimento na Alemanha.

Para os ensaios de brilho, o valor mais alto é o que reflete maior quantidade de luz e maior planicidade. Os valores apresentados podem oscilar entre ± 1 , enquadrando-se na margem de erro e também nas variações de eixos cristalográficos de cada superfície analisada.

Portanto a condição que resultou em superfície mais brilhante para as amostras de **granada** foi o polimento com óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água tanto nas amostras polidas no Brasil, quanto na Alemanha (Tab. 25, Fig. 151).

Tabela 25 - Valores referentes à reflexão da luz em granada no Brasil.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
1SiC100	8	7	6	8	7	6	7,00
1C120	6	5	6	6	5	6	5,67
1C180	7	7	6	7	7	6	6,67
1C220	4	6	5	4	4	5	4,67
1C600	5	6	4	5	4	4	4,67
1DC500	8	8	9	8	8	8	8,17
1CeO	37	36	37	37	36	37	36,67
1AlO	40	39	40	38	37	38	38,67

Figura 151 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para granada no Brasil.

Como mencionado por Yuan et al. (2003), o polimento adquire melhor qualidade quando a composição e dureza do pó de polimento é semelhante à composição do material utilizado. Portanto, é possível perceber este fenômeno nos valores de brilho nas etapas de pré-formação com SiC. O brilho aumenta concomitantemente com a diminuição do grão, alcançando valores aproximados aos valores de polimento, conforme mostrado na (Tab. 26 e Fig. 152). Este fenômeno ocorre com todos os minerais desta tese, porque todos possuem como base, tetraedros de sílica.

Tabela 26 - Valores referentes à reflexão da luz em granada na Alemanha.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
1SiC120	9	9	9	9	10	10	9,33
1SiC300	12	13	13	12	11	13	12,33
1SiC400	25	24	21	23	23	22	23,00
1SiC500	33	33	34	35	32	33	33,33
1DC500	8	7	7	7	8	7	7,33
1F320	30	29	29	28	29	28	28,83
1FCeO	37	37	37	36	36	37	36,67
1FAIO	40	39	39	39	39	39	39,17
1CeO	30	31	32	32	30	32	31,17
1AIO	39	39	39	39	39	39	39,00

Figura 152 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para granada na Alemanha.

Com a visualização das micrografias em MEV-FEG das superfícies polidas com óxido de alumínio no Brasil e na Alemanha, é possível verificar (Figs. 153 e 154), que a morfologia do pó de óxido de alumínio é semelhante nas duas amostragens, porém demonstrando graus de aglomeração distintas, aparentando maior junção das partículas no óxido de alumínio da Alemanha. Os valores obtidos com os ensaios em Malvern revelaram que o óxido de alumínio obtido no Brasil é mais fino com valor médio (D_{50}) 23,016 μ m e o obtido na Alemanha, de valor médio de 39,075 μ m. O pó de óxido de alumínio era mais fino que todos os outros pós ao tato. Ao compararmos as micrografias de superfícies, as amostras de granada polidas no Brasil estão completamente planas, apenas mostrando resíduos superficiais e as amostras de granada polidas, na Alemanha, apresentam ainda riscos perceptíveis ao microscópio. Entretanto as superfícies estão semelhantes.

Figura 153 - Superfície de granada polida com óxido de alumínio no Brasil (a). A figura à direita mostra uma imagem do pó de óxido de alumínio (b).

Figura 154 - Superfície de granada polida na Alemanha com óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água (a). A figura à direita mostra micrografia do pó de óxido de alumínio(b).

Portanto, confirma-se que o material para o polimento da granada é o óxido de alumínio, água e disco de liga de chumbo e estanho. A granulação do pó de óxido de alumínio conferida no Malvern mostrou-se com valores elevados devido à aglomeração das partículas, entretanto quando o pó é adicionado ao processo de polimento e é pressionado entre o corpo e o contra-corpo, é diminuído em partículas menores, garantindo a melhor qualidade. As comparações entre os valores obtidos em cada análise podem ser conferidas na tabela a seguir (Tab. 27).

Tabela 27 - Identificação de valores ideais para granada, conforme as análises realizadas.

GRANADA	Ra (nm)	Pó de polimento	Tamanho médio D<50% (µm)	Contra-corpo	Lubrificante	Brilho
Brasil	1,360	Óxido de alumínio	23,016	Disco Pb	Água	38,67
Alemanha	2,070	Óxido de alumínio	39,075	Disco Pb/Sn	Água	39,00

As amostras de **topázio** apresentaram o valor de Ra mais baixo com o polimento de óxido de alumínio, disco de estanho e água no Brasil e com o óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água na Alemanha. Os valores são 1,660 para o Brasil e 5,243 para a Alemanha. Neste caso, em que a diferença entre os dois índices excedeu 10% de margem de erro, conclui-se que o polimento no Brasil demonstrou-se melhor. Estes dados podem ser observados nas tabelas 23 e 24 e nas figuras 149 e 150.

Para os ensaios de brilho, o polimento com óxido de alumínio foi eficiente para as duas superfícies polidas, tanto no Brasil quanto na Alemanha, mesmo o último possuindo maior rugosidade (Tabs. 28 e 29, Figs. 155 e 156).

Tabela 28 - Valores referentes à reflexão da luz em topázio no Brasil.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
2SiC100	8	9	8	8	9	8	8,33
2C120	8	8	7	8	8	7	7,67
2C180	3	3	3	3	3	3	3,00
2C220	4	3	4	4	4	4	3,83
2C600	5	4	6	3	3	3	4,00
2DC500	8	9	8	7	7	7	7,67
2CeO	20	21	20	20	21	20	20,33
2AlO	27	28	27	26	26	26	26,67

Figura 155 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para o topázio no Brasil.

Tabela 29 - Valores referentes à reflexão da luz em topázio na Alemanha.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
2SiC120	10	10	10	9	11	10	10,00
2SiC300	10	10	10	9	9	9	9,50
2SiC400	20	18	20	18	19	18	18,83
2SiC500	22	22	23	21	22	23	22,17
2DC500	8	8	7	8	8	7	7,67
2F320	16	14	15	16	16	15	15,33
2FCeO	26	26	27	25	26	26	26,00
2FAIO	28	28	28	28	27	27	27,67
2CeO	26	26	26	27	27	27	26,50
2AlO	28	28	28	28	28	28	28,00

Figura 156 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para o topázio na Alemanha.

Com a visualização das micrografias em MEV-FEG das superfícies polidas das amostras de topázio polidas com óxido de alumínio no Brasil e óxido de alumínio na Alemanha é possível verificar (Fig. 157) resíduos nas superfícies polidas no Brasil e pequenos riscos nas polidas na Alemanha, porém as duas superfícies são equivalentes.

Figura 157 - Superfície da amostra de topázio polido no Brasil, com óxido de alumínio, disco de estanho e água (a) e topázio polido na Alemanha, com óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água (b).

Portanto confirma-se que o melhor material para o polimento do topázio é o óxido de alumínio com água e disco de estanho. As comparações entre os valores obtidos em cada análise podem ser conferidas na tabela 30.

Tabela 30 - Identificação de valores ideais para topázio, conforme às análises realizadas.

TOPÁZIO	Ra (nm)	Pó de polimento	Tamanho médio D<50% (µm)	Contra-corpo	Lubrificante	Brilho
Brasil	1,660	óxido de alumínio	23,016	Disco Pb	água	26,67
Alemanha	5,243	óxido de alumínio	39,075	Disco Pb/Sn	água	28,00

As amostras de **berilo** apresentaram o valor de Ra semelhantes para o polimento realizado nos dois países. Os valores são 1,753 para o Brasil e 1,739 para a Alemanha (Tabs. 23 e 24 e Figs.149 e 150).

Quando analisamos os valores de brilho, a reflectância também encontra-se dentro da margem de erro ± 1 , para cima ou para baixo, definindo o melhor polimento com o óxido de alumínio (Tabs. 31 e 32, Figs. 158 e 159).

Tabela 31 - Valores referentes à reflexão da luz em berilo no Brasil.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
3SiC100	4	4	4	4	4	4	4,00
3C120	3	4	4	3	4	4	3,67
3C180	3	4	4	3	4	4	3,67
3C220	4	4	4	4	3	3	3,67
3C600	4	3	4	4	4	4	3,83
3DC500	7	8	8	7	6	6	7,00
3CeO	25	25	25	23	24	23	24,17
3AlO	24	22	25	23	22	23	23,17

Figura 158 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para o berilo no Brasil.

Tabela 32 - Valores referentes à reflexão da luz em berilo na Alemanha.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
3SiC120	8	7	6	8	6	6	6,83
3SiC300	7	7	7	7	7	7	7,00
3SiC400	19	19	20	21	20	21	20,00
3SiC500	20	20	22	20	19	19	20,00
3DC500	4	4	4	4	4	5	4,17
3F320	18	19	20	19	19	18	18,83
3FCeO	24	24	24	24	23	23	23,67
3FAIO	25	25	25	25	25	25	25,00
3CeO	23	23	23	22	23	23	22,83
3AlO	25	25	25	24	25	25	24,83

Figura 159 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para o berilo na Alemanha.

Com a visualização das micrografias em MEV-FEG das superfícies polidas com óxido de alumínio no Brasil e óxido de alumínio na Alemanha é possível verificar (Fig. 160) pequenos riscos nas polidas no Brasil e riscos em grande quantidade nas polidas na Alemanha.

Figura 160 - Superfície do berilo polido no Brasil com óxido de alumínio, disco de estanho e água (a) e berilo polido na Alemanha com óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água (b).

Portanto confirma-se que o melhor material para o polimento do berilo é o óxido de alumínio com água e disco de liga de chumbo e estanho. As comparações entre os valores obtidos em cada análise podem ser conferidas na tabela 33.

Tabela 33 - Identificação de valores ideais para berilo, conforme as análises realizadas.

BERILO	Ra (nm)	Pó de polimento	Tamanho médio D<50% (µm)	Contra-corpo	Lubrificante	Brilho
Brasil	1,754	óxido de alumínio	23,016	Disco Pb	água	24,17(CeO)/24,17(AlO)
Alemanha	1,730	óxido de alumínio	39,075	Disco Pb/Sn	água	24,83

As amostras de **turmalina** apresentaram o valor de Ra mais baixo com o polimento de óxido de alumínio, disco de estanho e água no Brasil e com o óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água na Alemanha. Os valores são 1,433 para o Brasil e 2,983 para a Alemanha. Os valores são aproximados e define-se o polimento semelhante nos dois países Estes dados podem ser observados nas (Tabs. 23 e 24 e Figs.149 e 150).

Para os ensaios de brilho, o polimento com óxido de alumínio foi mais eficiente tanto no polimento realizado no Brasil, quanto no da Alemanha, mostrando índices de refletividade idênticos. (Tabs. 34 e 35, Figs. 161 e 162).

Tabela 34 - Valores referentes à reflexão da luz em turmalina no Brasil.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
4SiC100	5	5	4	5	5	4	4,67
4C120	4	3	4	4	3	4	3,67
4C180	3	4	4	3	4	4	3,67
4C220	3	4	4	3	4	4	3,67
4C600	4	4	4	4	4	4	4,00
4DC500	6	7	8	6	7	6	6,67
4CeO	26	26	27	25	26	27	26,17
4AlO	29	28	28	27	26	27	27,50

Figura 161 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho a turmalina no Brasil.

Tabela 35 - Valores referentes à reflexão da luz em turmalina na Alemanha.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
4SiC120	6	6	6	6	6	6	6,00
4SiC300	6	7	7	7	7	8	7,00
4SiC400	22	21	20	20	20	21	20,67
4SiC500	21	21	21	21	21	21	21,00
4DC500	5	5	5	5	4	5	4,83
4F320	24	24	23	25	24	23	23,83
4FCeO	24	27	24	25	25	24	24,83
4FAIO	28	27	28	28	28	28	27,83
4CeO	27	26	24	26	26	26	25,83
4AlO	28	27	28	28	27	27	27,50

Figura 162 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para a turmalina na Alemanha.

Com a visualização das micrografias em MEV-FEG das superfícies polidas com óxido de alumínio no Brasil e óxido de alumínio na Alemanha é possível verificar (Fig. 163) manchas e resíduos superficiais para a polida no Brasil, podendo ser resultado do processo de recobrimento e riscos com picos arredondados para a polida na Alemanha, mostrando-se plana em maior parte da área da amostra.

Figura 163 - Superfície de turmalina polida no Brasil com óxido de alumínio, disco de estanho e água (a) e turmalina polida na Alemanha com óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água (b).

Portanto confirma-se que o melhor material para o polimento para a turmalina é o óxido de alumínio com água e disco de liga de chumbo e estanho.

As comparações entre os valores obtidos em cada análise podem ser conferidas na tabela abaixo (Tab. 36).

Tabela 36 - Identificação de valores ideais para turmalina conforme as análises realizadas.

TURMALINA	Ra (nm)	Pó de polimento	Tamanho médio D<50% (µm)	Contra-corpo	Lubrificante	Brilho
Brasil	1,433	óxido de alumínio	23,016	Disco Pb	água	27,50
Alemanha	2,983	óxido de alumínio	39,075	Disco Pb/Sn	água	27,50

As amostras de **espodumênio** apresentaram o valor de Ra também semelhantes para o polimento nos dois países. Os valores são 2,487 para o Brasil e 2,860 para a Alemanha (Tabs. 23 e 24 e Figs.149 e 150).

Para os ensaios de brilho, as amostras polidas também apresentaram índices semelhantes, dentro das margens de erro de 10% para o polimento nos dois países (Tabs. 37 e 38, Figs. 164 e 165).

Tabela 37 - Valores referentes à reflexão da luz em espodumênio no Brasil.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
5SiC100	16	17	15	16	17	15	16,00
5C100	9	7	8	9	7	8	8,00
5C180	12	14	13	12	14	13	13,00
5C220	6	5	7	9	8	10	7,50
5C600	5	6	7	6	6	7	6,17
5DC500	6	6	7	8	6	7	6,67
5CeO	28	29	31	27	26	26	27,83
5AlO	30	29	29	28	28	29	28,83

Figura 164 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para o espodumênio no Brasil.

Tabela 38 - Valores referentes à reflexão da luz em espodumênio na Alemanha.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
5SiC120	9	9	11	11	10	7	9,50
5SiC300	8	8	10	10	11	10	9,50
5SiC400	27	27	25	27	28	26	26,67
5SiC500	20	22	26	19	20	22	21,50
5DC500	5	6	5	6	5	5	5,33
5F320	16	18	16	17	16	16	16,50
5FCeO	26	27	28	26	29	28	27,33
5FAIO	30	30	30	30	30	30	30,00
5CeO	26	26	26	26	27	26	26,17
5AlO	30	30	28	29	29	30	29,33

Figura 165 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para granada na Alemanha.

Com a visualização das micrografias em MEV-FEG das superfícies polidas com óxido de alumínio no Brasil e óxido de alumínio na Alemanha é possível verificar (Fig. 166) menor quantidade de riscos na amostra polida no Brasil.

Figura 166 - Superfície de espodumênio polido no Brasil com óxido de alumínio, disco de estanho e água (a) e superfície polida na Alemanha com óxido de alumínio, disco de chumbo e estanho e água (b).

Portanto confirma-se que o melhor material para o polimento do espodumênio é o óxido de alumínio com água e disco de liga de chumbo e estanho. As comparações entre os valores obtidos em cada análise podem ser conferidas na tabela abaixo (Tab. 39).

Tabela 39 - Identificação de valores ideais para o espodumênio, conforme as análises realizadas.

ESPODUMÊNIO	Ra (nm)	Pó de polimento	Tamanho médio D<50% (µm)	Contra-corpo	Lubrificante	Brilho
Brasil	2,487	óxido de alumínio	23,016	Disco Pb	água	28,83
Alemanha	2,860	óxido de alumínio	39,075	Disco Pb/Sn	água	29,33

As amostras de **quartzo** apresentaram o valor de Ra mais baixo com o polimento de óxido de cério, disco de estanho e água no Brasil e com o óxido de cério, disco de chumbo e estanho e água na Alemanha. Os valores são 2,847 para o Brasil e 2,967 para a Alemanha, portanto os polimentos nos dois países

encontram-se semelhantes. Estes dados podem ser observados nas (Tabs. 23 e 24 e Figs.149 e 150).

Para os ensaios de brilho, o polimento com óxido de cério foi eficiente e semelhante nos dois países, mostrando índices de refletividade idênticos (Tabs. 40 e 41, Figs. 167 e 168).

Tabela 40 - Valores referentes à reflexão da luz em quartzo no Brasil.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
6SiC100	3	4	4	3	4	4	3,67
6C100	3	3	3	3	3	3	3,00
6C180	2	2	2	2	2	2	2,00
6C220	3	3	3	3	2	2	2,67
6C600	3	3	3	2	2	2	2,50
6DC500	4	4	4	3	3	3	3,50
6CeO	23	23	23	21	21	21	22,00
6AlO	22	23	22	21	21	20	21,50

Figura 167 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para o quartzo no Brasil.

Tabela 41 - Valores referentes à reflexão da luz em quartzo na Alemanha.

AMOSTRA	VALORES DE BRILHO						MÉDIA
6SiC120	7	7	6	6	7	6	6,50
6SiC300	5	5	4	5	4	4	4,50
6SiC400	9	8	7	8	7	7	7,67
6SiC500	11	10	11	11	11	12	11,00
6DC500	3	3	3	3	3	4	3,17
6F320	20	19	19	20	19	19	19,33
6FCeO	22	21	20	22	20	21	21,00
6FAIO	20	19	20	19	18	20	19,33
6CeO	22	22	22	22	22	22	22,00
6AIO	22	21	22	22	22	22	21,83

Figura 168 - Gráfico de demonstração dos valores de brilho para o quartzo na Alemanha.

Com a visualização das micrografias em MEV-FEG das superfícies polidas com óxido de cério no Brasil e na Alemanha (Fig. 169), é possível verificar resíduos superficiais na amostra polida no Brasil e isenção de riscos na polida na Alemanha, sendo semelhantes. A micrografia do pó de óxido de cério, localizado à direita da figura, mostra morfologia e tamanho de grãos semelhantes. Porém, nos valores obtidos para o pó de óxido de cério através das análises em Malvern, verificou-se que o valor médio (D_{50}) do grão obtido no Brasil é mais fino ($2,259 \mu\text{m}$) do que na Alemanha ($3,137 \mu\text{m}$), também dentro da margem de erro de 10%, o que equipara os materiais obtidos nos dois países.

Figura 169 - Superfície de (a) quartzo polido no Brasil com óxido de cério, disco de estanho e água (b) pó de óxido de cério obtido no Brasil (c) superfície polida com óxido de cério, disco de chumbo e estanho e água (d) pó de óxido de cério obtido na Alemanha.

Portanto, confirma-se que o melhor material para o polimento do quartzo é o óxido de cério com granulometria com média variável entre 2,259μm, disco de liga de chumbo e estanho e água como lubrificante. As comparações entre os valores obtidos em cada análise podem ser conferidas na tabela 42.

Tabela 42 - Identificação de valores ideais para o quartzo conforme as análises realizadas

QUARTZO	Ra (nm)	Pó de polimento	Tamanho médio D<50% (μm)	Contra-corpo	Lubrificante	Brilho
Brasil	2,470	óxido de cério	2,259	Disco Pb	água	22,00
Alemanha	2,967	óxido de cério	3,137	Disco Pb/Sn	água	22,00

Os dados obtidos nesta tese foram comparados com dados de artigos, mencionados a seguir, em que o objetivo estava em adquirir superfícies extremamente planas. Este tipo de polimento é feito de modo industrial em que a superfície planificada é a funcionalidade do produto. Já na lapidação de gemas, a planicidade da superfície está relacionada à qualidade do brilho e atratividade da gema. Portanto quanto melhor for o polimento maior a refletividade da luz.

No artigo descrito por Yuan et al. (2003), o fator que define a obtenção de superfícies planas é a seleção de um pó abrasivo fino para minimizar contatos de força mecânica e quanto maior a velocidade, maior é a taxa de desgaste. O pó abrasivo não deve ter dureza maior que o mineral polido. Neste artigo, o autor também mostrou o uso do óxido de alumínio com #4000 *mesh* no polimento de quartzo, o que é semelhante a 5 μ m, segundo *Scientific Instrument Service* (2014), com a proposta de obter Ra de 0.5 μ m e também a comparação do polimento de quartzo com três materiais com: óxido de cério (#0.3 μ m), óxido de ferro e sílica em pó (quartzo)(#0.05 μ m), sendo que o quartzo em pó resultou em uma superfície com Ra na escala de 1.4 Ångströms, ou seja, remoção de material em escala atômica.

Neste artigo, o material com *mesh* mais fino utilizado foi o pó de diamante da marca Saint Gobain com valor de diâmetro médio de 0,469 μ m e a superfície adquirida com este pó foi de 2,180nm (Ra) para as amostras de berilo. Conforme mencionado no artigo, o uso de pó de polimento com a dureza elevada à amostra causará riscos e não trará resultados adequados, quanto ao uso de materiais com a mesma dureza. No entanto, a superfície com menor valor de Ra, neste trabalho, foram as amostras de granada polidas com óxido de alumínio, com valor de 1,360nm(Ra), sendo o valor do tamanho do grão desconsiderado, por demonstrar-se em todos os casos, aglomeração. Entretanto são necessários outros testes para a aquisição de superfícies com Ra em angstroms.

Já no artigo escrito por Brown (1987), as superfícies planas são adquiridas através da acidez contida no processo. Minerais compostos por tetraedros de sílica em contato com a água como lubrificante e pós de polimento que contenham oxigênio em sua composição, mantêm-se em contato durante o processo de abrasão, fazendo com que moléculas superficiais sejam alteradas favorecendo além do desgaste mecânico, o desgaste químico também é

realizado. As superfícies obtidas com o uso do limão, mostraram de um modo geral menor rugosidade, conforme mostrado no item 10.4.

No entanto, conclui-se que as experiências realizadas neste trabalho descreveram, de modo científico, a lapidação de gemas, podendo comparar superfícies de gemas polidas com polimentos industriais altamente precisos.

Mesmo que a lapidação de gemas tenha um enfoque artístico, o produto “gema lapidada” é utilizada como joia e pode ser aperfeiçoada.

Neste trabalho, foi possível confirmar os métodos tradicionais de polimento, em que os minerais com dureza iguais ou menores que 7,0 utilizam óxido de cério e minerais com dureza maiores que 7,0 utilizam óxido de alumínio como material de polimento. Porém experiências futuras podem ser feitas com outros materiais com composições químicas semelhantes aos minerais e *meshs* mais finos para obtenção de superfície mais plana e altamente precisa.

As análises nas superfícies polidas nos dois países mostraram qualidades e parâmetros semelhantes. O fator preponderante de obtenção de superfície plana foi a escolha do material para cada mineral, lubrificante e disco de polimento. No entanto, constatou-se que grãos menores resultam em superfícies mais planas, porém o brilho é alterado em pequena escala em relação ao posicionamento do mineral quanto ao seu índice de refração e direção de polimento em relação ao crescimento do mineral, portanto o ideal é que o mineral seja lapidado seguindo orientações cristalográficas.

Fatores como carga aplicada, velocidade de rotação e dureza do pó de polimento são levadas em consideração, porém, neste caso, devido à lapidação de gemas ser uma atividade artística, não foi pontuada nesta tese.

12. Projeto de *Design* de Gemas na *Fachhochschule Trier*

O projeto de *Design* desenvolvido na *Fachhochschule Trier* com acompanhamento do Prof. Theo Smeet e do chefe de oficina, Sr. Winfried Juchem, teve como objetivo desenvolver dois projetos. O primeiro foi a preparação das superfícies dos seis grupos de minerais selecionados para análise posterior, seguindo orientações dos detalhes de lapidação na Alemanha e, em segundo lugar, a lapidação de minerais seguindo conceitos do *Design* de Gemas, com a aplicação de todo conhecimento gerado com acabamento de superfícies com planicidade e alto brilho e o estudo dos ângulos de reflexão, funcionalidade das facetas e estética.

No entanto, o projeto de *Design* de Gemas foi experimental e buscou aplicar os ângulos propostos por Hartig (1974) e verificar as possibilidades de reflexão de luz em formatos facetados.

É conhecido que o processo inicial de criação começa com o estudo do material bruto e, em seguida, a definição do projeto de *Design*. Os minerais foram levados do Brasil, em sua totalidade de até 10 peças brutas de cada grupo mineral e analisados um a um quanto a inclusões, fraturas e zoneamentos de cor.

Os minerais foram cortados e depois desbastados nos rebolos verticais de carbetto de silício (SiC) com duas variações granulométricas, utilizando o goniômetro manual (Fig. 170) para medição contínua do ângulo desbastado. As amostras foram lapidadas com ângulo das facetas entre 40° e 43° , calculadas a partir do ângulo crítico, como mencionado por Hartig (1974) e Kühne e Brepohl (1988) sendo a técnica descrita no item 8.2 desta tese.

Figura 170 - Goniômetro portátil em que o mineral é localizado entre o eixo flexível e a base do transferidor de grau.

Nas amostras brutas foram colocadas facetas com ângulos específicos e ângulos aleatórios, e uma delas foi definida como principal ou mesa. Assim, foi possível analisar a reflexão e a transmissão de luz nas várias facetas.

Em função dos formatos das facetas, foi possível criar efeitos ópticos funcionando como lentes, materiais de refração e ou reflexão de luz.

Facetas em formas de superfícies côncavas ou convexas que podem aumentar ou diminuir uma imagem visualizada através destas, agem como lentes. As facetas planas distorcem ou mudam a angulação de imagens criadas por arestas ou refletem a luz totalmente a um determinado ângulo.

Em outros casos, foram criados desenhos no pavilhão, como círculos ou arestas. Através do processo de reflexão total da luz, os desenhos são espelhados em outras facetas. Se as facetas estiverem radialmente simétricas, repetem o desenho nas outras faces, como acontece em caleidoscópios. As facetas colocadas com o ângulo crítico correto, funcionam como espelhos (Fig. 171).

Figura 171 - Exemplo de Refração e Reflexão de luz, em que duas esferas criadas na aresta ao fundo do cubo, aparecem refletidas na face da base e refratadas na face superior e lateral direita (LINDEMANN, 2012).

Parte das amostras lapidadas foram analisadas com um modelo semelhante ao IdealScope® (ideal-scope.com) (Fig.172). O conceito do IdealScope® é permitir a reflexão de luz colorida (cor interna do cone) nas facetas de pedras lapidadas. No caso de lapidação perfeita, todas as facetas refletem a cor homogeneamente na lupa de observação.

Figura 172 - IdealScope® produzido manualmente.

As imagens da figura 173 demonstram os minerais lapidados e fotografados à luz do dia (imagem à esquerda) e na reflexão da luz (imagem à direita). Os minerais que apresentaram o ângulo ideal para reflexão total da luz mostram facetas na cor rosa, enquanto faces sem o ângulo ideal, mostram-se escuras por falta de reflexão.

Figura 173 - Imagens de oito amostras de quartzo lapidados na Fachhochschule Trier submetidos à análise com IdealScope® e à observação de suas reflexões (fora do cone à esquerda e dentro do cone à direita).

13. Conclusões

Levando em consideração a linha de raciocínio das análises do tribossistema para a lapidação de gemas, as conclusões são feitas em conjunto para o grupo de minerais, objetivando desenvolver gemas lapidadas com melhor qualidade de superfície e brilhância, resultando em gemas com maior valor agregado. Os minerais gemológicos são materiais raros e devem ser trabalhados com alta precisão e aproveitamento total. Para atingir estes objetivos é de extrema importância a conclusão de estudos científicos. Portanto as conclusões deste trabalho estão descritas abaixo:

1. - Os formatos de lapidação facetados apresentados neste trabalho possuem medidas aproximadas à proporção áurea.
2. - Os ângulos das facetas do pavilhão são posicionados de modo a refletir totalmente a luz, levando-se em consideração o índice de refração do mineral. Os ângulos são calculados através da equação de Snell com o feixe incidente à 45° .
3. – As facetas possuem a funcionalidade de:
 - a. Pavilhão, reflexão total da luz e apropriação das qualidades de um espelho;
 - b. Mesa, mudança na direção das imagens criadas pelas arestas do pavilhão e
 - c. Cintura, local para fixação em joias, proteção contra quebras e inscrição de códigos.
4. - O uso do goniômetro permitiu a conclusão de que a pressão exercida na catraca de polimento de Otto Eigner altera em aproximadamente 5% a angulação inicialmente configurada.
5. O uso do Polariscópio é necessário para a identificação do eixo óptico dos minerais que não apresentem faces morfológicas externas aparentes para permitir a lapidação orientada quanto à cristalografia. Desta forma, é

possível determinar a dureza em cada eixo e a direção do polimento adequado.

6. As durezas dos minerais utilizados nesta tese como um todo, são anisotrópicas.
7. Os minerais apresentam melhor planicidade e qualidade de superfície com o polimento na mesma direção de crescimento.
8. A superfície plana gerada com a clivagem do espodumênio gera brilho idêntico ao polido artificialmente no processo de lapidação.
9. A superfície plana gerada através de processos mecânicos, é decorrente do pressionamento da superfície contra materiais em velocidade constante, em desgaste sucessivo e amassamento dos picos existentes gerando deformações plásticas, diminuição de feições de clivagem ou fratura ou amorfismo. A diminuição de contato com força mecânica através das etapas, favorece a planificação da superfície.
10. O tamanho mais fino do pó de polimento, com sua dureza equivalente ao mineral podem produzir superfícies mais planas.
11. O uso de água como lubrificante favorece o escoamento de carga, diminuição de atrito e a alteração química superficial em escala molecular.
12. O uso do limão adicionado ao lubrificante juntamente com óxido de alumínio (Diamantine) proporcionaram menor rugosidade na superfície, mesmo induzindo a aglomeração das partículas.
13. Definições dos minerais com clivagem utilizados nesta tese:
 - a. O mineral espodumênio é altamente suscetível à clivagem em processos de atrito e desgaste mecânicos e

- b. O topázio possui clivagem perfeita e não demonstra fraqueza durante o processo de lapidação.

14. O uso de sabão adicionado ao óxido de alumínio proporcionou melhor qualidade de polimento nos minerais, berilo, turmalina, espodumênio e quartzo. A granada e o topázio apresentaram melhores superfícies apenas com água. O sabão proporciona suspensão das partículas do pó de polimento e maior escoamento de carga aplicada.

15. A escolha do pó de polimento se dá através dos fatores: composição química, granulometria e dureza compatível ao mineral utilizado.

De acordo com as informações adquiridas nesta pesquisa, ficou claro que a lapidação de gemas se insere em um contexto tribológico com a análise científica do material e de seu processamento.

Foi possível determinar o melhor material de polimento para cada mineral, o entendimento dos minerais quanto às características mecânicas, ópticas e químicas. Após este entendimento e o acompanhamento da evolução desta área é necessário que estes minerais sejam testados com outros materiais, abrindo caminho para possibilidades futuras.

14. Considerações futuras

Durante o desenvolvimento desta tese, novos caminhos foram percorridos e necessidades adversas surgiram. Porém foi necessário um julgamento prévio do que era primordial e o que deveria ser colocado em segundo plano.

Portanto, os itens deixados para segundo plano, são complementares ao tema pesquisado e pretende-se que seja continuado em pesquisas futuras, como:

- I. Determinação da dureza dos grãos abrasivos contidos em material de desbaste e polimento.
- II. Uso de pó de polimento do próprio mineral lapidado com *meshs* menores ou iguais a $0,05\mu\text{m}$.
- III. Determinação de coeficiente de atrito nos diferentes eixos cristalográficos com o uso de água como lubrificante, teste com aditivos e pó de polimento com a mesma dureza que o mineral lapidado, através de equipamento de lapidação adquirido e adaptado ao Tribômetro PLINT TE79, pino contra disco com carregamento sob peso-morto de até 20N, localizado no Laboratório de Fenômenos da Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
 - O coeficiente de atrito é conhecido como a razão entre a força de atrito que age na interface de duas superfícies e a carga aplicada sobre o material denominada pelo símbolo μ . Haverá a tentativa de adaptação de disco próprio utilizado na lapidação de gemas.
- IV. - Determinação de taxa de desgaste nos diferentes eixos cristalográficos com o uso de água como lubrificante, teste com aditivos e pó de polimento com a mesma dureza que o mineral lapidado, através de equipamento de lapidação adquirido e adaptado ao Tribômetro PLINT TE79, pino contra disco com carregamento sob peso-morto de até 20N, localizado no Laboratório de Fenômenos da Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
 - A taxa de desgaste é definida através da velocidade, tempo e carregamento da operação e pode variar conforme a dureza

anisotrópica nos diferentes eixos cristalográficos dos minerais. Existe a necessidade do seu cálculo para previsão do consumo x tempo, em equipamentos automatizados.

- Existem estudos na lapidação de diamantes que o mineral desgasta mais rapidamente em uma direção cristalográfica. Neste trabalho, serão feitos testes com gemas coradas.

V. - Determinação de alteração química superficial através da amorfização (Beilby) ou deformação plástica com o uso de lubrificantes ácidos, pó de diamante e pós de polimento que sejam óxidos, através de equipamento de Difração de raios X, localizado no Laboratório de Física Aplicada do Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Utilização de PHmetro, para quantificação de acidez do lubrificante, localizado no Laboratório de Fenômenos da Superfície da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e Microscópio Atômica no Departamento de Engenharia de Materiais na Universidade de São Paulo

- Utilização de ácidos para obtenção de superfícies com maior planicidade.
- A Difratometria de raios X com a caracterização microestrutural de materiais cristalinos, sendo possível determinar a cristalinidade da superfície da gema polida, através da diminuição do ângulo incidente do feixe de análise, para que o mesmo não penetre na gema, mantendo a análise na superfície do mineral. Esta técnica já está sendo empregada em pesquisas pelo Prof. Dr. Sergio Morelhão em materiais cristalinos, que auxiliará o desenvolvimento desta análise.
- Análise da cristalinidade do material removido, podendo ser encontrado material amorfo.

VI. - Avaliação de planicidade superficial das amostras a partir do brilho, através do uso de Reflectivity Meter e Microscópio Confocal (Laboratório de Caracterização Tecnológica- Escola Politécnica da Universidade de São Paulo).

- O Reflectivity Meter é um equipamento utilizado por gemólogos que identifica o mineral pela refração e reflexão da luz, em que a qualidade da planicidade da superfície interfere na dispersão ou foco do feixe de luz, podendo ser utilizado como um rugosímetro óptico.
- O Microscópio Confocal utilizado para análise de rugosidade com alta resolução, possui sistema de focalização de camadas no eixo Z e posterior montagem de topografia tridimensional. É utilizado para medição precisa do grau de rugosidade obtido com cada configuração de processamento adquirido (lubrificante, pó de polimento, disco e gema).

VII. - Desenvolvimento da forma (formatos facetados) a partir de reflexões das luzes internas nas facetas do pavilhão, através do facetamento de minerais gemológicos.

- Utilização de equipamento tradicional de facetamento de gemas e a experimentação de ângulos propícios para cada mineral, com o objetivo de criar novas situações de reflexão.

VIII. - Estudo do comportamento da luz a partir da reflexão total da luz e captação destes feixes, através do desenvolvimento de câmara escura com feixe a laser acoplado, com câmera fotográfica.

- Após a experimentação de ângulos facetados em maquinário tradicional de lapidação, posicionar estes minerais dentro de uma câmara escura, em que um feixe a laser é direcionado para o campo de visualização da gema (mesa) e calcular a quantidade dos pontos refletidos. Em um segundo momento, lapidar um grupo de minerais com os mesmos ângulos exatos de reflexão total da luz ideal para cada mineral identificar o mineral pela mudança do ângulo de reflexão a partir do índice de refração.
- A montagem da câmara escura com feixe à laser e máquina fotográfica, devem ser confeccionadas.

- IX. - Estudo da deformação da imagem em superfícies côncavas e convexas em materiais gemológicos, através de registro de imagens em câmera fotográfica e estudo de ângulos.
- Cálculos matemáticos para definir qual o ângulo do pavilhão exato necessário para a formação de imagens requeridas pelo *Designer*, no desenvolvimento da forma. Os minerais geram diferentes tipos de imagens de reflexão que podem ser configuradas no projeto.
- X. - Aplicação dos conhecimentos científicos ao processo de desenvolvimento criativo de produto, através da percepção de características do material e processo de produção.
- Desenvolver um manual prático através de uma linha de raciocínio para o *Designer* de Gemas utilizar durante o processo de desenvolvimento da forma, com base em conceitos de *Design*, Ciência e Engenharia.

15. Referências Bibliográficas

ACKERMANN, U.; BORNHOLFEN, I.; BRÜGEL, L. *Über Schmuck und Stein*. Zeitgenössische Schmuck- und Objektgestaltung im Fachbereich Edelstein- und Schmuckdesign der Fachhochschule Idar-Oberstein. Arnoldsche Art Publisher, 1996. 165p.

ARGAN, G.C. *Walter Gropius e a Bauhaus*. Versão em Português, tradução do italiano por Joana Angélica D'Avila Melo. Rio de Janeiro. Brasil, 2005. 352p.

AUSTRALIAN MICROSCOPY. Disponível em www.ammrf.org.au. Acesso em: 19 de Fevereiro de 2014.

BHUSHAN, B. *Introduction to Tribology*. John Wiley & Sons, New York. 2002. 735p.

BROWN, N.J. Some speculations on the mechanisms of abrasive grinding and polishing. Lawrence Livermore National Laboratory, CA, USA. Precision Engineering, Butterworth & Co, 0141-6359/87/030129-10 (1987) July Vol 9 No 3. 129-138.

BRUTON, E. *Diamonds*. Second Edition, London, England: N.A.G. Press Ltd, 1978. 544p.

BÜRDEK, B.E. *Design: História, teoria e prática do design de produtos*. Tradução Freddy Van Camp. São Paulo: Ed. Blucher, 2010. 498p.

CAMBRIDGE. Course Pages. University of Cambridge. Banco de dados. Disponível em <http://www.cam.ac.uk/>. Acesso em 13 maio de 2011.

CAMPOS, A. P. *Arte-Joalheria: Uma cartografia pessoal*. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, 2011a. 245f.

CASTAÑEDA, C; ADDAD, J. E.; LICCARDO, A. *Gemas de Minas Gerais*. Ed. Sociedade Brasileira de Geologia, Núcleo de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2001. 208p.

CHVÁTAL, M. *Mineralogia para Principiantes, Cristalografia*. Revisão técnica da tradução por Daniel Atencio, Ph.D.(USP) e Helio Salim, Dr.Sc.(UFRJ), 1999. 232p.

CORRENS, C.W. *Introduction to Mineralogy*. Springer-Verlag. Berlin, Heidelberg, New York. 1969. 485p.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. *Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de materiais poliméricos, metálicos, e semicondutores* [recurso eletrônico]. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2007.

DEER, W. A.; HOWIE, R.A., ZUSSMAN, J. *An introduction to the Rock-Forming Minerals*. Harlow, Essex, England: Logman Scientific & Technical New York, 1992. 696p.

DEUTSCHE STIFTUNG EDELSTEINFORSCHUNG - DSEF. www.dsef.de/html/index.html. Acesso em: 15 maio.2013.

DEUTSCHES EDELSTEINMUSEUM. *Diamant & Idar-Oberstein*. Stiftung Deutsches Edelsteinmuseum, 2006. 78p.

EDELSTEINMINEN STEINKAULENBERG. www.edelsteinminen-idar-oberstein.de/geschichte.html. Acesso em: 02-de junho de 2013.

ENGIN, I. C. Theories on Rock Cutting, Grinding and Polishing Mechanisms. Article by InTech. 2013. 24f.

FACHHOCHSCHULE TRIER, Standort Idar-Oberstein. www.hochschule-trier.de/index.php?id=13709. Acesso em: 02 de junho de 2013.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. *Fundamentos de mecânica de solos e das rochas. Aplicações da estabilidade de taludes*. Editora Curitiba, UFPR, 2009. 602p.

FISCHER-CRIPPS, A.C. *Introduction to Contact Mechanics*. Second Edition. Australia: Springs, 2007. 222p.

FÍSICA-UFPR. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Exatas. Departamento de Física. Disponível em <http://fisica.ufpr.br/viana/fisicab/aulas2/aula30.html>. Acesso em: 29 de agosto de 2014.

GEOARIZONA. Course Pages. The University of Arizona. Banco de dados. Disponível em <http://www.geo.arizona.edu/coursepages>. Acesso em: 10 de maio de 2011.

GIA. *Estimating a Cut Grade Using the GIA Diamond Cut Grading System*. The Gemological Institute of America. 2009

GRILLO, S.E.; FIELD, J.E.; BOUWELEN, F. M. van. Diamond polishing: the dependency of friction and wear on load and crystal orientation. J. Phys.D: Appl. Phys.33. 2000. 985-990.

HARTIG, H. *Edlesteine Schleifen*. Frech-Verlag Stuttgart, 1974. 118p.

HEMENWAY, P. *The Secret Code, the mysterious formula that rules art, nature and science*. Evergreen GmbH, Köln, 2008. 203p.

HUTCHINGS, I.M. *Tribology, Friction and Wear of Engeneering Materials*. Butterworth Heinemann, 1992. 284p.

ILUIC, I. *Tribology of Thin Layers*. Editura Academiei Republicii Socialiste România Bucuresti, România, 1980. 225p.

KIMBERLEY, E. *Geometria do Design: estudos sobre a proporção e composição*. São Paulo, Cosac Naify, 2010. 108p.

KHONSARI, M.M.; BOSSER, E.R. *Applied Tribology. Bearing Design and Lubrication*. Second Edition. John Wiley & Sons, Ltd, 2008. 566p.

KLEIN, C.; HURLBUT, C. S. Jr. *Manual of Mineralogy*. After James D. Dana. John Wiley & Sons, Inc. 21 st ed, 1993. 681p.

KLEIN, G. *Faceting History: cutting diamonds & colored gemstones*. United States of America, 2005. 242p.

KLOCKMANN, F.; RAMDOHR, P. *Tratado de Mineralogia*. Versión de La 12ª Edición Alemana por El Dr. Francisco Pardillo. Editorial Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1947. 730p.

KRAUS, P.D. *Introduction to Lapidary*. Krause publications. United States of America, 1987. 188p.

KÜHNE, K; BREPOHL, E. *Kunsthandwerkliches Schleifen und Verarbeiten von Schmucksteinen*. Leipzig: Fachbuchverl, 1988. 300p.

KÜMMERLE, E.A.; HEGER, G. The Structures of $\text{C-Ce}_2\text{O}_{3+\delta}$, Ce_7O_{12} , and $\text{Ce}_{11}\text{O}_{20}$. *Journal of Solid State Chemistry* 147, 485-500. 1999.8403, 1999. Acesso em 15 de Dezembro de 2013.

LENZEN, G. *Edelsteinbestimmung mit Gemmologischen Geräten*. Verlagsbuchhandlung Elisabeth Lenzen – Kirschweiler, 1984. 318p.

LIDDICOAT, R.T. Jr. *Handbook of Gem Identification*. Gemological Institute of America. United States of America, 1990. Twelfth Edition, Third Printing. 364p.

LIMA-DE-FARIA, J. *Structural mineralogy; an introduction*. Solid Earth Science Library. Kluwer Academic Publishers, 1994. 346p.

LINDEMANN, W. *Munsteiner, The Young Generation, Tom + Jutta Munsteiner*. Arnoldsche Art Publishers, 2012. 224p.

LÖBACH, B. *Design Industrial, bases para configuração dos produtos industriais*. Tradução Freddy Van Camp. Editora Edgard Blücher Ltda, 2001. 208p.

MORAES, D. de. *Limites do Design*. São Paulo: Studio Nobel, 2008. 200p.

MOZOTA, B.B. *Gestão do Design: usando o design para construir valor de marca e inovação corporativa*. Porto Alegre: Bookman, 2011. 343p.

NADUR, A.V. *A Lapidação de Gemas no Panorâma Brasileiro*. 158f. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 2009.

NANUM TECNOLOGIA. Acesso em 31.03.2014. Disponível em <http://www.nanum.com.br/index.php?idIdioma=1>

NASCIMENTO, V. F. F. *Técnicas analíticas nucleares de Fluorescência de raios X por dispersão de energia (ED-XRF) e por reflexão total (TXRF)*. Depto de Ciências Exatas/ESALQ, Lab. de Instrumentação Nuclear/CENA. 1999

OLIVEIRA, R.P. de. *Ultra baixo coeficiente de atrito no deslizamento de Al₂O₃-Si₃N₄: efeito das variáveis químicas (pH e concentração de sílica coloidal)*. Dissertação (Mestrado). São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012. 106f.

OPTICAMPUS.COM. Acesso em 11.08.2014. Disponível em http://www.opticampus.com/popcourse.php?url=nature_light/

OVERY, P. *De Stijl*. Thames and Hudson. 1991. 216p.

PRINCESCOPE.COM. Acesso em 12.08.2014. Disponível em <http://www.pricescope.com/tools/ideal-scope>

RAWLE, A. *Basic Principles of Particle Size Analysis*. Malvern Instruments Limited. USA.

READ, P. G. *Gemology*. Butterworth-Heinemann Ltd, Oxford, 1991. 359p.

SCHUMANN, W. *Gemas do Mundo*. Trad. Por Rui Ribeiro Franco, Mario del Rey. Barueri: Ed. Disal, 2006. 279p.

SINKANKAS, J. *Gem cutting - A lapidary's Manual*. Van Nostrand Reinhold Company, 1984. 365p.

SKOOG, D.A.; WEST, D.M.; HOLLER, F.J.; CROUCH, S.R. *Fundamentals of Analytical Chemistry*. Eighth Edition. Thomson Brooks/Cole, 2004. 1176p.

SOARES, V.F. Dispersão e estabilização de partículas submicrométricas de óxido de alumínio em sistemas líquidos destinados à produção de materiais refratários. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Minas Gerais. 2009. 117f.

STOTERAU, R. L. *Tribologia, EMC 5315*. Universidade de Santa Catarina. Centro Tecnológico do Departamento de Engenharia Mecânica. Apostila, 2004. 172f.

TOLKOWSKY, M. *A Study of the Reflection and Refraction of Light in a Diamond*. E. & F. N. Spon, Ltd., 57 Haymarket, S.W. 1. Estados Unidos da América. 29f. Edited by Jasper Paulsen em 2001, 1919. 139p.

TRÖGER, W. E. *Optical determination of rock-forming minerals*. transl. by Chr. Hoffman in conjunction with the authors. Stuttgart Schweizerbart. 1979

UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina. Material didático, Difração de raios X. 30 pag. Disponível em <http://www.materiais.ufsc.br/lcm/web-carac-II/AulaRaios-X02.pdf>. Acesso em 20/03/2014.

USFACETERSGUILD - UNITED STATES FACETERS GUILD. Faceting Diagrams. Banco de dados. Disponível em www.usfacetersguild.org. Acesso em: 05 de fevereiro de 2014.

VARGAS, GLENN & MARTHA. *Diagrams for faceting, Volume I*. Faceting Instructors University of Texas, Austin, 1988. 166p.

WAHLSTROM, E.E. *Cristalografia óptica*. Tradução Rui Ribeiro Franco. Rio de Janeiro, 1969. 367p.

WOLCYRZ, M.; KEPINSKI, L. *Rietveld Refinement of the Structure of CeOCl formed in Pd/CeO₂ Catalyst: Notes on the Existence of a Stabilized Tetragonal Phase of La₂O₃ in La-Pd-O System*. Institute of Low Temperature and Structure Research, Polish Academy of Sciences. P.O. Box 937, 50-950 Wrocław 2, Poland: Journal of Solid State Chemistry, 99. 1992, 409-413.

YUAN, J.L.; ZHAO, P.; RUAN, J.; CAO, Z.X.; ZHAO, W.H.; XING T. Lapping and polishing process for obtaining super-smooth surfaces on quartz crystal. Research Center of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, PR China. Journal of Materials Processing Technology 138 (2003) 116-119.

APÊNDICE 1 – Valores de Microdureza

Granada	eixo a1	eixo a2	eixo ternário	eixo 110 bissetriz
10g	954,84	734,86	745,66	792,76
50g	1138,66	1122,46	1126,68	1146,14
100g	1263,44	1167,72	1175,88	1272,72

Topázio	eixo a	eixo b	eixo c	bissetriz
10g	1001,74	973,94	775,78	1057,02
50g	1166,16	1217,64	1210,52	1327,44
100g	1277,42	1328,30	1449,14	1592,50

Berilo	eixo a1	eixo c	bissetriz
10g	1064,86	731,64	1004,24
50g	1109,62	718,80	1043,68
100g	1243,66	-	1160,54

Turmalina	eixo a1	eixo a2	eixo a3	eixo c	bissetriz
10g	683,66	793,96	920,38	746,36	814,42
50g	1038,50	1026,76	1128,78	973,82	1168,52
100g	1061,74	1186,06	1151,20	1069,10	1161,64

Espodumênio	eixo a	eixo c	110 clivagem
10g	774,62	731,64	897,64
50g	1159,42	999,44	1146,44
100g	1031,20	1021,80	1263,82

Quartzo	eixo a1	eixo c	bissetriz
10g	725,48	915,64	940,20
50g	1079,38	1119,36	1205,28
100g	1363,34	1384,38	1296,96

APÊNDICE 2 – Micrografias em MEV-FEG (amostras polidas com óxido de alumínio e óxido de cério)

Figura 174 - Amostras polidas com CeO e Disco de Estanho no Brasil. (a) granada-20.000x, (b) topázio-50.000x, (c) berilo 50.000x, (d) turmalina-20.000x, (e) espodumênio-20.000x, (f) quartzo-20.000x.

Figura 175 - Amostras polidas com CeO, Disco de Chumbo e Estanho e água, na Alemanha.
(a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x)

Figura 176 - Amostras polidas com CeO e Feltro na Alemanha (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).

Figura 177 - Amostras polidas com AIO e Disco de Estanho no Brasil. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f) quartzo (20.000x).

**Figura 178 - Amostras polidas com AIO, Disco de Chumbo e Estanho e água na Alemanha
(a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x).**

Figura 179 - Amostras polidas com AlO e Feltro na Alemanha. (a)granada, (b)topázio, (c)berilo, (d)turmalina, (e)espodumênio e (f)quartzo (20.000x)

APÊNDICE 3 – Tabelas com valores de Ra obtidas em Microscópio Confocal LEICADCM3D

Tabela 43 – Valores de Ra dos experimentos realizados com pó de diamante e variantes de discos e lubrificantes obtidos no Microscópio Confocal LEICADCM3D. Na topografia das imagens, o azul significa a parte mais baixa e o vermelho, a mais alta, seguindo o degradê de cores.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Medidas de Ra (nm) Brasil e Alemanha - ISO4287						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
C - Disco de Pb-Sn/Ol.Soja - Brasil	2,217	2,077	2,930	3,390	3,513	4,203
Alemanha - ISO4287						
C-DCu-Oliva	24,467	25,767	17,433	20,167	264,947	69,700
C-Disco PbSn-Água-Sabão / Alemanha	3,283	3,827	2,180	2,390	2,810	5,587

Tabela 44 - Valores de Ra dos experimentos realizados com pó Diamantine (óxido de alumínio) e variantes de discos e lubrificantes obtidos no Microscópio Confocal LEICADCM3D. Na topografia das imagens, o azul significa a parte mais baixa e o vermelho, a mais alta, seguindo o degradê de cores.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Medidas de Ra (nm) Alemanha- ISO4287						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
Diamantine-Disco de PbSn-limão-	1,703	1,777	2,397	1,967	1,393	3,827
Diamantine-Disco de PbSn-Água/Alema nha	1,780	3,200	2,590	3,447	2,543	3,480

Tabela 45 - Valores de Ra dos experimentos realizados com pó GE6 (óxido de alumínio) e variantes de discos e lubrificantes obtidos no Microscópio Confocal LEICADCM3D. Na topografia das imagens, o azul significa a parte mais baixa e o vermelho, a mais alta, seguindo o degradê de cores.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Medidas de Ra (nm) Alemanha- ISO4287						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
GE6-DiscoPbSn-água/Alemanha	2,163	1,677	6,180	5,850	1,740	3,093

GE6-DiscoPbSn-água-	2,920	4,550	2,197	2,353	1,403	2,100

Tabela 46 - Valores de Ra dos polimentos realizados com pó de óxido de alumínio e variantes de discos e lubrificantes obtidos no Microscópio Confocal LEICADCM3D. Na topografia das imagens, o azul significa a parte mais baixa e o vermelho, a mais alta, seguindo o degradê de cores.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Medidas de Ra (nm) Brasil e Alemanha - ISO4287						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
AIO-Disco Pb/Brasil	1,360	1,660	1,753	1,433	2,487	2,847

Alemanha - ISO4287						
AIO-Disco Pb-Sn/Alemanha	2,070	5,243	1,730	2,983	2,860	3,117

AIO-Feltro/Alemanha	2,350	5,453	2,873	4,113	5,700	4,247

Tabela 47 - Valores de Ra dos polimentos realizados com pó de óxido de cério e variantes de discos e lubrificantes obtidos no Microscópio Confocal LEICADCM3D. Na topografia das imagens, o azul significa a parte mais baixa e o vermelho, a mais alta, seguindo o degradê de cores.

Microscópio Confocal LEICA DCM3D - Medidas de Ra (nm) Brasil e Alemanha - ISO4287						
	Granada	Topázio	Berilo	Turmalina	Espodumênio	Quartzo
CeO - Disco Pb/Brasil	1,827	2,370	2,257	1,520	2,760	2,470

Alemanha - ISO4287						
CeO-Disco Pb-Sn/Alemanha	4,463	9,687	8,860	5,263	6,917	2,967

CeO-Rebolo Feltro/Alemanha	6,303	12,833	1,383	5,977	2,337	1,790

APÊNDICE 4 - Um pouco da história de Idar-Oberstein

A pequena cidade de Idar-Oberstein, com uma população estimada em 35.000 pessoas, localizada nas montanhas de Hunsrück na Região da Renânia-Palatinado, no distrito de Birkenfeld, do sudoeste da Alemanha. São cidades gêmeas que se desenvolveram juntas em torno da prática de lapidação de gemas e ourivesaria, em que Idar era a parte relacionada às gemas e Oberstein às joias (Fig. 180).

Figura 180 - Localização de Idar-Oberstein na Alemanha, Castelo Oberstein (Schloss Oberstein) e Igreja na Pedra (Felsenkirche).

Presume-se que os romanos já haviam investigado o local em busca de explorações de minerais, e os primeiros registros datam do século XIV. Por volta de 1400, a área possuía mina para extração de variedades do quartzo, por conta disto, muitos lapidários das regiões vizinhas se mudaram para trabalhar e utilizavam rebolos de arenito para o desgaste dos minerais, que eram movimentadas através da correnteza do rio Nahe, processo conhecido como *schleifscheiben* ou *wasserradgetriebenen sandstein-schleifrädern*. O primeiro moinho de lapidação de ágata foi construído em 1531.

O trabalho era feito pelos lapidários, *Schleifer* ou *Edelsteinschneider*, de maneira tradicional, em que os mesmos apoiavam sua barriga em um banco e, nesta posição, trabalhavam o dia inteiro.

As ágatas locais eram geralmente cinza, azul-acinzentada ou avermelhada. Por não serem fortemente coloridas, utilizavam a técnica de tingimento das ágatas, sendo a variedade mais difícil, o escurecimento.

Por volta de 1800, o trabalho refinado dos lapidários era muito conhecido na Europa e os mesmos recebiam muitos pedidos, ocorrendo desta forma

aumento dos salários, e, em seguida, a crise econômica. A mina de quartzo exauriu-se e em 1830, as ágatas do Brasil foram mencionadas pela primeira vez. Na mesma época, a mineração no Sul do Brasil, que estava iniciando. Muitas famílias de Idar-Oberstein imigraram para o Brasil e muitas famílias do Brasil para Idar-Oberstein para comercializar o quartzo. Estas gemas eram maiores, mais transparentes, com mais listras e mais coloridas que as de Idar-Oberstein. As principais regiões no Brasil eram Soledade e Umuarama.

As pedras eram transportadas de navio, do Rio Grande do Sul a Hamburgo, na Alemanha e de lá eram carregadas por embarcações menores até Bingen, através de carros de boi até Idar-Oberstein.

Ludwig Starklof (1789-1850) foi poeta, fundador do teatro e trabalhou de 1826-1827 com governantes reconhecendo o nexos da casualidade entre educação e desenvolvimento econômico. Reintroduziu o ensino regulamentado e treinamento na indústria de joias e gemas, quando era possível compreender desenho e matemática. Em 1831, foi aberta a primeira escola de artes, mas teve que ser reajustada.

Em Idar-Oberstein existia também a lapidação de diamantes. A primeira companhia Hahn & Co, antes apenas com o comércio de diamantes em Nova York e Idar-Oberstein. Philipp Hahn, um dos sócios, cuidava do comércio em Idar-Oberstein, August Hahn com o comércio em Nova York e August Schaffer em Nova York e Amsterdam. Em 1884, Philipp Hahn comprou 24 máquinas de lapidação por 100 marcos cada uma e ao mesmo tempo muitos aprendizes foram contratados e este foi o início da lapidação de diamantes. (DEUTSCHES EDELSTEINMUSEUM, 2006).

Depois da Segunda Guerra Mundial, Idar-Oberstein precisou reencontrar um novo nicho de trabalho e isso foi construído novamente com o que permanecia em sua tradição e retomou o contato com todo o mundo. Comerciantes de Idar-Oberstein buscavam comprar materiais do Brasil e da África que produziam diferentes tipos de minerais brutos. Neste caso, a África possuía terreno acidentado para extração, possuindo preço mais elevado.

Por volta de 1950, novos artistas começaram a desenvolver novos conceitos, novas técnicas e criaram nova geração de *designs* originais na área de lapidação de gemas, entalhe e camafeu. Os melhores lapidários criadores em Idar-Oberstein do século XX foram: Bernd Munsteiner e, atualmente, seu filho

Tom Munsteiner, Erwin Pauly e, também atualmente, seus filhos Hans Ulrich Pauly e Dieter Lorenz.

Após as revoltas estudantis em 1968, o panorama da educação superior foi reorganizado na República Federal da Alemanha e muitas escolas de engenharia, *Staatsbauschulen*, colégios técnicos, *Werkkunstschulen*, e academias foram convertidas em *Fachhoch-schulen*.

Em 1971, foi formada uma única faculdade no estado de Renânia-Palatinado com vários departamentos em todo o estado. Um deles pela 1ª divisão de Mainz, um departamento de *Design* de Gemas e Joias. Em 1980 com ajuda do Ministério da Cultura, foi aberta em Idar-Oberstein uma nova escola para estes fins *Fachschule für Edelstein- und Schmuckgestaltung*, e, mais tarde, expandiu-se para *Fachhochschule*.

Hoje, Idar-Oberstein é conhecida pela lapidação de excelente qualidade em gemas especiais, comércio de gemas e a com ensino qualificado em joalheria e lapidação artística da Fachhochschule Trier.

Na cidade, existem diversos laboratórios de pesquisa em gemas e metais, tais como: Fundação Alemã de Pesquisa em Gemas (Deutsche Stiftung Edelsteinforschung - DSEF), Laboratório de avaliação de Diamante (Diamant-Prüflabor GmbH - DPL), Associação Alemã de avaliação de gemas e joias (Deutsche Gesellschaft für Edelsteinbewertung mbH - DEGEB), Instituto de Pesquisa de Gemas e Metais Preciosos (Forschungsinstitut für mineralische und metallische Werkstoffe, Edelsteine/Edelmetalle GmbH - FEE) e o Associação Gemológica Alemã (Deutsche Gemmologische Gesellschaft e.V. (DGemG). (Sites: Falang, Allaboutgemstones)

O *Spiessbraten* e *Schwenkbraten* (carne de porco ou de boi) é um prato típico pertencente a cidade de Idar-Oberstein, que teve início no século XIX, quando os prospectores de ágata voltaram do Brasil com a tradição gaúcha do churrasco, invés de usar carvão, utilizavam madeira de *Fagus* ou Faia, como é popularmente chamada. Esta espécie de madeira também utilizada para defumar o malte, em algumas cervejas, como por exemplo a Budweiser, além de ser usada para fazer papel (*Beechwood*). Este tipo de churrasco é preparado com cebola e especiarias (curry, orégano, páprica, Pimentas cayenne e preta e mostarda) e servido com pão, salada de batatas ou batata frita e algumas vezes com salada de alface americana, cebola e pepino. O tipo de churrasqueira foi

encontrada em ruínas Célticas em comunidades de Idar-Oberstein que datam de 300 a.C. e se adequaram as utilizadas no Brasil (Fig. 181).

Figura 181 - Spiessbraten.

Edelsteinminen (Mina de Pedras Preciosas) em SteinKaulenberg

Os depósitos de ágata na região de Saar-Nahe são mencionados pela primeira vez em 1375 por Otto von Metzger Diemeringen e a mineração foi interrompida em 1875. A galeria de basalto com inclusões de drusas e geodos de ametista, quartzo fumê, jaspe e ágata possuem 65m de comprimento e 282m² com até 3 andares. Após 1978, a Sociedade de *SteinKaulenberg*, o escritório de Mineração da Renânia-Palatinado e alguns túneis foram fechados e um deixado para visitação turística com uma galeria de cerca de 400 m (EDELSTEINMINEN, 2013) (Fig.182).

Figura 182 - Imagens do interior da galeria (EDELSTEINMINEN, 2013).

Deutsches Edelsteinmuseum

O Museu Alemão de Gemas foi inaugurado em 1859 e aberto até os dias atuais, possui três andares e uma coleção de mais de 10 mil exemplares entre minerais e gemas lapidadas de todo o mundo. Possui sistemas explicativos do processo tradicional de lapidação de gemas e funciona diariamente (Fig. 183).

Figura 183 - Imagens do *Deutsches Edelsteinmuseum* (Museu Alemão de Gemas), minerais de kunzita e processo de lapidação de gemas tradicional.

Fachhochschule Trier (Campus Idar-Oberstein)

O conceito de *Design* de Gemas surgiu em 1609 quando era necessário que o trabalho com gemas melhorasse, e de 1715 até 1745, surgiram as primeiras oficinas para profissionalizar pessoas a trabalhar com ágatas

A Fachhochschule Trier surgiu em 1980 com a divisão das escolas de Trier, tendo os primeiros professores: Ingeborg Bornhofen e Udo Ackermann. O professor de Mainz, Prof. Sigfried Bauer passou para Idar-Oberstein e o Prof. Rolf Müller foi nomeado reitor provisório. O ensino começou no semestre de inverno de 1986, alojados temporariamente nos velhos pavilhões escolares com oficinas pertencentes à antiga escola para fins comerciais. Em 15.4.1988, o novo prédio foi concluído e a escola se mudou para o local que se encontra atualmente.

A filosofia da escola é de não definir o que é certo ou errado e, sim, de contestar as escolhas, provocar decisões, sugerir o uso de outros materiais, para forçar a sua reorientação e incentivar o campo da liberdade e da individualidade. Na educação acadêmica, os estudantes devem e podem experimentar e tentar novos meios, adquirindo desta forma a técnica e o conhecimento formal que o fará apto a atuar por si só profissionalmente. O posicionamento do aluno, nesta opção acadêmica, é de criar objetos através do diálogo, de abertura e grande

curiosidade. Um processo vital, em que ele acentua os seus poderes de decisão, a sua personalidade, sem qualquer tipo de regra.

A segmentação em *Design de Gemas e Joias (Fachbereich Gestaltung - Edelstein und Schmuckdesign)* possui cursos para graduação como Bachelor em Artes e Mestrado em Artes. O estudante possui aulas e acompanhamento individual com os professores (Ute Eitzenhöfer, Theo Smeets e Lothar Brügel). A escola possui oficinas de lapidação, joalheria, marcenaria e pintura, estúdio fotográfico e a opção de trabalhar com qualquer tipo de material (Figs.184 e185).

Figura 184 - Orientação dos ambientes internos da escola.

Figura 185 - De cima para baixo, da esquerda para a direita, imagem escola, corredor principal, oficina de lapidação e oficina de joalheria.

APÊNDICE 5 - Apresentação do tema da tese na Fachhochschule Trier

Em meio às apresentações dos alunos de Bacharelado e Mestrado de *Design de Joias e Gemas*, foi mostrado resumidamente o conteúdo científico desenvolvido nesta tese e quais eram os pontos a serem desenvolvidos na escola. Os questionamentos dos professores e alunos foram em relação ao brilho gerado na reflexão de luz, o porquê da busca, o que era bonito ou feio, o que era estética, e porque os seres humanos se interessam pelo brilho. A proposta em criar facetas para brincar com a reflexão de luz pode ser algo muito mais instintiva do que meramente o entendimento científico da reflexão de luz. A discussão com cunho filosófico permitiu inúmeros questionamentos.

Para interação dos alunos com o trabalho, foram construídas réplicas do instrumento IdealScope® e os mesmos conseguiram visualizar nas gemas lapidadas, as facetas que refletiam a luz pela cor rosa intensa (Fig. 186).

Figura 186 - Apresentação de tese em Fachhochschule Trier.

ENTREVISTAS COM ALUNOS DA FACHHOCHSCHULE TRIER

Petr Dvorak (www.dvorakart.com)

Petr Dvorak é aluno regular do curso de mestrado na Fachhochschule Trier. Nasceu na Checoslováquia, hoje República Checa em 1954, e trabalhou como aprendiz de gravador com 15 anos e depois cursou *Design* de Joias na "Art School Turnov CZ", trabalhando anos após na Soluna Prague, grande empresa joalheria pertencente ao governo Checo. Com a invasão comunista, Petr e sua mãe se mudaram para Viena, na Áustria em 1980, onde tem um estúdio de criação de joias em que trabalha temporariamente nos períodos de férias do mestrado. Começou o mestrado em 2011, com o objetivo de testar novas soluções e estar em meio às ideias jovens.

Possui personalidade estabelecida na relação ideia e produto e suas peças traduzem o seu modo de pensar. Normalmente, utiliza materiais como titânio, vidro e granada, com uma tecnologia especial desenvolvida e patenteada por ele: desenvolve novos fechos para cada joia, cada um com um princípio especial de encaixe e as engrenagens de mobilidade sempre trazem algo novo.

Para desenvolvê-las, utiliza as técnicas de joalheria como laminação, solda elétrica entre outras e utiliza técnicas livres de lapidação para conformar os minerais que utiliza, como obsidiana e ágata.

Ao desenvolver suas peças, faz normalmente desenhos detalhados, sendo estes realizados ou não. Possui tato artístico em perceber formatos naturais e a vida é sua inspiração (Fig. 187).

Figura 187 - De cima para baixo, da esquerda para direita - Peças em titânio, vidro e granada, embalagem e foto pessoal junto à sua bancada de trabalho.

Anna Ameling

Anna Ameling nasceu em Mannem, Alemanha em 1983 e estudou na Hochschule Mannheim für Gestaltung, *Design* Gráfico, com o trabalho de conclusão para Bachalariado - "Lanterna Mágica, Modelos da vida em Slides - *Das Herz der Anna Ameling*" (2004-2008) e na Hochschule Trier - Idar-Oberstein für Schmuck, *Design* de Gemas e Joias, com o trabalho de conclusão para obtenção do título de Mestrado "*Kleinodien - Reliquiare - Altäre*" (2009-2013).

Suas criações representam sonhos e histórias sobre a sua vida. Anna Ameling é uma pessoa delicada e de pensamentos profundos, que tem o hábito de escrever em um diário suas ideias e pensamentos, com uma caneta de um tom especial de azul, uma caligrafia ornamentada, podendo também fazer pequenos desenhos. Este diário é o seu companheiro em todos os momentos.

As joias desenvolvidas por ela mostram harmonia em cores e proporções como tamanho e composição. O aprendizado da técnica não é uma dificuldade para ela, porque pode desenvolver camafeus ou gravação em metal e também cravações, atingindo um grau de perfeição que é aceitável para o seu objetivo. Desta forma, pode desenvolver suas ideias, sem bloqueá-las buscando a perfeição. A sua personalidade em desenvolver é bem estabelecida, porque atingiu o seu objetivo e está satisfeita com o seu desenvolvimento. Ela desenvolve embalagens com o mesmo propósito em que desenvolve as joias.

Segundo Anna, o próximo passo é fazer um intercâmbio em outro país em que na área de joalheria possa se inspirar, aprender e criar algo novo, começar do zero novamente, um momento novo (Fig. 188).

Figura 188 - Joias desenvolvidas por Anna Ameling.

Héctor Lasso (<http://hectorlassojewellery.blogspot.de/>)

Héctor Lasso é estudante regular do curso de Mestrado da Fachhochschule Trier. Ele nasceu na Colômbia, Bogotá, em 1976 e estudou joalheria na *Universidad de los Andes* (Bogotá - CO) de 1996 até 2001 onde recebeu um diploma de Bacharelado em Belas Artes.

Formado, trabalhou quatro anos como joalheiro autônomo e em 2005, aos 28 anos, foi para Paris. Ele não tinha a intenção de estudar joalheria em Paris, mas aconteceu de em um ano e meio, estudar joalheria na *Lycée Nicolas Flamel*, trabalhar como joalheiro e aprender a língua Francesa.

Na segunda metade de 2006, foi para Estrasburgo, no leste Francês, onde estudou joalheria na *Ecole des Arts Décoratifs*, com enfoque em Joalheria Contemporânea. Depois de Estrasburgo voltou à Paris, e, em 2011, mudou-se para Idar-Oberstein para fazer o curso de mestrado em *Design* de Gemas e Joias na *Fachhochschule Trier*, o que se estende até os dias de hoje.

Hoje, Héctor é um *Designer* de Joias completo, porque trabalha com o desenvolvimento livre de joias em prata, ouro e titânio; modela em cera, usa

técnicas variadas de joalheria, como solda elétrica e fundição, sabe lapidar gemas e também modela em Rhinoceros. Nada pode ser limitante em seu processo criativo.

Ele ganhou um concurso em Idar-Oberstein em 1º lugar no 43th German Jewellery and Gemstones Award, em 2012, com o tema "Stars of Hollywood". A joia premiada foi um anel em prata com cinco turmalinas em formato de cubo e que quando visto pelo topo uma estrela de cinco pontas se forma entre os cinco cubos.

Héctor expõe as suas joias em feiras e galerias, produz embalagens e modos de exposição das mesmas nos eventos. Héctor Lasso é uma marca e pretende no futuro ter uma empresa com este nome, desenvolvendo alta joalheria (Fig. 189).

Figura 189 - Hector Lasso em primeira imagem e joias desenvolvidas por ele, através de protótipos manuais e computadorizados e fundição.

APÊNDICE 6 - Experiências em oficinas e laboratórios

Durante a estadia na cidade de Idar-Oberstein, foram feitas quatro importantes visitas, quando a doutoranda pôde experimentar e aprender com novas tecnologias, compartilhando o conhecimento.

A primeira foi no Laboratório Gemológico Alemão, *Deutsche Gemmologische Gesellschaft*, com orientação do Prof. Dr. Ulrich Hemm, pode analisar gemas com Refratômetro, Polariscópio e Microscópio binocular Schneider, Espectroscópio e Dicroscópio e fazer experiências com o equipamento de feixe a laser, que fez parte do conteúdo desta tese (Fig. 190).

Figura 190 - Deutsche Gemmologische Gesellschaft.

A segunda experiência foi na oficina do Tom Munsteiner, na qual pôde trabalhar por um dia, aprendendo junto ao Mestre de Oficina, Wolfgang Thom. Aprendeu a lapidar duas gemas com dois diferentes processos. O primeiro processo foi o de formato livre ou cabochão e o outro facetado, com discos de facetamento, polimento com o uso da lapidação tradicional, Jamb-peg (Fig. 191).

Figura 191 - Doutoranda e Tom Munsteiner em sua oficina.

A terceira experiência foi com a família de gravadores, Roth. O pai Hans Dieter Roth e o filho Andreas Roth.

Com o Andreas Roth a doutoranda aprendeu a desenhar em baixo-relevo em minerais transparentes e também a fazer camafeus. O trabalho de Andreas é bastante detalhado e demorado (Fig. 192).

Figura 192 - Doutoranda e Família Roth.

A quarta experiência foi em parceria com o Prof. Theo Smeets da *Fachhochschule Trier*, quando foram à empresa Medidia em Idar-Oberstein, para ver as máquinas à laser e o trabalho preciso efetuado pela empresa. A Medidia é especialista em ferramentas com pontas de diamante, que podem ser cortadas à laser e afiadas manualmente. Trabalha também com lapidação de diamantes sintéticos para a indústria joalheria. Possui uma máquina de gravação à laser que pode fazer gravações com precisão de 0.06 micrometros. A máquina é da BLS Gemscriptor (<http://www.gemscriptor.com>) (<http://www.medidia.de/page/>).

Desenvolver esta tese foi algo enriquecedor por permitir a ampliação dos conhecimentos teóricos e práticos, interação com pessoas capacitadas e a informação de lugares especializados em lapidação de gemas. Com o desenvolvimento de conhecimento, a doutoranda pode desenvolver embasamento teórico e capacidade crítica.

Sincera gratidão ao Instituto de Geociências e à Universidade de São Paulo.