



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG



Dissertação de Mestrado

"Estudo de Ferramenta Computacional para Análise de Parâmetros em Gemas Lapidadas: Quartzo hialino"



Autor: Adriano Aguiar Mol
Orientador: Prof. Luiz S. Martins Filho
Co-Orientador: Prof. Ronílson Rocha



Outubro de 2004



REDEMAT

REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

UFOP – CETEC – UEMG

Adriano Aguiar Mol

"Estudo de Ferramenta Computacional para Análise de Parâmetros em Gemas Lapidadas: Quartzo Hialino"

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT, como parte integrante dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Área de concentração: Análise e Seleção de Materiais

Orientador: Prof. Luiz S. Martins Filho

Co-Orientador: Prof. Ronílson Rocha

Ouro Preto, outubro de 2004

M717e Mol, Adriano Aguiar.
Estudo de ferramenta computacional para análise de parâmetros em gemas lapidadas: Quartzo Hialino [manuscrito]. / Adriano Aguiar Mol. – 2004. xii, 113f.: il. color., graf. , tabs., mapas.

Orientador: Prof. Dr. Luiz S. Martins Filho.

Co-Orientador: Prof. Dr. Ronilson Rocha.

Área de concentração: Análise e seleção de materiais.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Ouro Preto. Escola De Minas. Rede Temática em Engenharia de Materiais – UFOP/CETEC/UEMG.

1. Materiais – Análise - Teses. 2. Gemas (mineralogia) - Teses. 3. Lapidação – Teses. 4. Pedras preciosas – Teses. 5. Quartzo. 6. Redes neurais (Computação). I. Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. II. Rede Temática em Engenharia de Materiais. III. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais IV. Universidade do Estado de Minas Gerais. V. Título.

CDU: 553.8

Catálogo: sisbin@sisbin.ufop.br

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu dileto avô Mário e à minha querida filha Ana.

Agradecimentos

Aos colegas da REDEMAT;

Aos companheiros do PROGEMAS-MG, pelos ideais compartilhados;

Aos colegas e amigos da UEMG, especialmente prof^a. Bernadete Teixeira, M.O.Q.;

Ao professor Américo Tristão Bernardes, pela acolhida e direção;

Aos professores orientadores Ronílson Rocha, pelas boas idéias e Luiz Martins, por
segurar a luz no fim do túnel;

Às irmãs Natália, Lívia e Iara, pelo carinho;

Aos pais Hugo e Ângela, pelas coisas boas da vida;

À Kith, por tudo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	4
1.2 Justificativa	4
2. FUNDAMENTOS	8
2.1 Lapidação	9
2.1.1 Evolução dos modelos de lapidação	9
2.1.2 Processos de lapidação.....	21
2.1.3 Interação da luz com a matéria	30
2.1.4 Diagrama de Lapidação	41
2.1.5 Modelo Ótimo.....	43
2.2 Modelos geométricos para as gemas.....	50
2.2.1 Simulação computacional	51
2.3 Quartzo	55
2.3.1 Propriedades.....	58
3. METODOLOGIA	64
3.1 Revisão bibliográfica: conclusões.....	64
3.2 Variáveis do problema e parâmetros de modelamento	66
3.3 Redes neurais artificiais.....	70
3.3.1 Desenvolvimento histórico	71
3.3.2 Aplicações utilizando RNAs.....	75
3.4 Projeto da ferramenta de análise	80
4. VALIDAÇÃO DA PROPOSTA	85

5.	CONCLUSÃO	90
5.1	Trabalhos futuros	91
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
	ANEXO A.....	99
	ANEXO B.....	110

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolução da exportação brasileira de gemas brutas e lapidadas no período de 2000-2003.....	5
Figura 2.1: Colar do período Halaf (TAIT, 1986).....	10
Figura 2.2: Contas de ouro e lapis-lazuli (gema azul opaca composta dos minerais lazurita e pirita) encontradas nas escavações da cidade suméria de Ur (c. 2.500 a.C.) (TAIT, 1986).....	11
Figura 2.3: Colares da 18ª Dinastia egípcia (c. 1370-1350 a.C.) construídos com contas de ouro, de cornalina e de pasta de vidro azul, contendo uma escultura de escaravelho em lapis-lazuli (TAIT, 1986).....	11
Figura 2.4: Colar fenício da região de Tharros, Sardenha (c. 700 a.C.) em ouro e contas de cornalina entalhada. (TAIT, 1986).	11
Figura 2.5: Colar e brincos do tesouro de Cartago (400 d.C., na atual Tunísia), compostos de ouro, pérolas, safiras azuis (variedade de coríndon) e esmeraldas (variedade verde de berilo) (TAIT, 1986).....	12
Figura 2.6: Broche do século XIII de origem francesa ou inglesa, mostrando cabochões de safira e rubi (variedade vermelha de coríndon) (TAIT, 1986).	12
Figura 2.7: Tipos de cabochão.	13
Figura 2.8: Parte central de um diadema grego do período helenístico (200 a.C.), feito em ouro com lascas de granadas lapidadas em forma de cabochões. (TAIT, 1986).....	13
Figura 2.9: Anel holandês da segunda metade do século XVI com diamante <i>point cut</i> (KOCKELBERGH et al, 1990).	16
Figura 2.10: Octaedro com plano de clivagem e três vistas do modelo <i>table cut</i>	16
Figura 2.11: Tipos de cortes em rosa: (A) <i>six rose</i> , (B) <i>cross rose</i> e (C) <i>rose recupée</i>	16
Figura 2.12: Vista superior de variações do (a) corte mesa: (b) <i>trap</i> , (c) <i>step</i> cujo padrão de facetamento mostra facetas retangulares, e (d) tesoura com facetadas “cruzadas”.	17

Figura 2.13: Pingente espanhol da época da Inquisição (c. 1680) mostrando esmeraldas menores quadradas e retangulares modelo <i>table cut</i> e esmeralda maior em cabochão redondo (TAIT, 1986).	17
Figura 2.14: Evolução do modelo brilhante a partir do corte table (A): <i>eight cut</i> (B), brilhante português (C) e brilhante padrão (D).....	18
Figura 2.15: Adaptações do corte brilhante para as formas (a) pêscoço, (b) oval e (c) <i>navete</i> ou <i>marquise</i> (HURLBUT ET AL, 1990).	19
Figura 2.16: Ametista bicolor lapidada por Berndt Munsteiner.	20
Figura 2.17: Ametista lapidada por Michael Dyber (WISE, 2003).	20
Figura 2.18: Facetas em forma de meia-lua que caracterizam o padrão de facetamento barion. Corte tipo <i>old-mine</i> , modelo “ <i>Four Hummers II</i> ”, <i>copyright</i> de Bob Keller (2001).	21
Figura 2.19: Nomenclatura das partes de uma gema, em elevação frontal.....	22
Figura 2.20: Vista superior de gemas ilustrando formas (a) redonda, (b) oval, (c) <i>navete</i> (ou <i>marquise</i>), (d) gota (ou pêscoço), (e) <i>cushion</i> , (f) quadrada, (g) retangular (<i>baguette</i>), (h) octogonal e (i) octogonal (<i>emerald cut</i>) (LAPIDART, 2003).....	22
Figura 2.21: Modelo de lapidação brilhante na forma pêscoço.	23
Figura 2.22: Partes do modelo redondo brilhante padrão: (A) facetas do <i>rondiz</i> , (B) facetas <i>estrela</i> , (C) facetas <i>estrela da coroa</i> e (D) <i>rondiz</i>	23
Figura 2.23: Forma da gema lapidável a partir do bruto, inclusão e linha de serra (LAPIDART, 2003).....	24
Figura 2.24: Gema formada fixa no dop com lacre (LAPIDART, 2003).....	26
Figura 2.25: Dop com gema fixada e instalado na máquina de lapidar, em ângulo de 90° em relação ao disco de corte, LAPIDART, 2003).....	27
Figura 2.26: Gema em contato com o disco de corte, em um ângulo de aproximadamente 40° (LAPIDART, 2003).....	28
Figura 2.27: Etapa do facetamento que mostra (a) uma faceta <i>estrela</i> cortada na coroa de uma gema redonda tipo brilhante e (b) a primeira <i>carreira</i> completa, cortada no mesmo ângulo (adaptado de LAPIDART, 2001).....	28
Figura 2.28: Etapas do facetamento da coroa do modelo SRB, onde o pavilhão (a) é cortado a 90°, a primeira <i>carreira</i> (b) é cortada a 33 graus, a segunda (c) a 28°, a terceira (d) a 16° e a mesa (e) a zero grau.	29

Figura 2.29: Facetas principais da coroa e do pavilhão do modelo redondo brilhante padrão.	30
Figura 2.30: Representação do comprimento de onda.	31
Figura 2.31: Esquema lustrando as possibilidades de interação da luz com um sólido parcialmente transparente (NASSAU, 1996).....	32
Figura 2.32: Lei da reflexão: feixe incidente e refletido apresentam ângulos iguais (WEBSTER, 2001).....	32
Figura 2.33: Ilustração da refração: ao se propagar em um meio mais denso o feixe de luz se aproxima da normal à interface dos meios (WEBSTER, 2001).	33
Figura 2.34: Reflexão total.....	35
Figura 2.35: Ilustração da brilhância: feixes de luz sendo internamente refletidos e retornados à perspectiva do observador.	36
Figura 2.36: Ilustração da dispersão de um feixe de luz branca em gema lapidada.....	37
Figura 2.37: Modelamento 3D de gema lapidada com IR equivalente ao diamante e ao quartzo, respectivamente.	37
Figura 2.38: Feixe de luz com campo eletromagnético não polarizado (a) e feixe plano-polarizado (b) (GREEN et al, 2001e).	40
Figura 2.39: Diagrama de lapidação do modelo SRB (STRICKLAND, 2002)..	42
Figura 2.40: Modelos de lapidação patenteados Princess Pluss e Royal Asscher cut.	45
Figura 2.41: Seção bidimensional do diamante utilizada por Tolkowsky.	46
Figura 2.42: Proporções definidas por Tolkowsky (COWING, 2003).	47
Figura 2.43: Ilustração da movimentação da gema promovida pelo observador (cuja perspectiva é representada pelas setas).	48
Figura 2.44: No modelo adotado pelo GIA, os valores dados aos ângulos de saída das gemas variam com o co-seno ao quadrado do ângulo (HEMPHILL et al, 1989).....	49
Figura 2.45: Resultados do GIA: (A) WLR em função do tamanho de mesa e ângulo da coroa; e (B) WLR em função do tamanho de mesa, ângulo da coroa e ângulo do pavilhão (HEMPHILL et al, 1998).....	50
Figura 2.46: Lapidação do pavilhão completa em modelo SRB no software GemCad.....	51

Figura 2.47: Modelo 2 <i>Spin Star</i> renderizado sob as condições de iluminação (a) Aleatório ou RANDOM, (b) Co-seno ou COS e (c) Isométrico ou ISO (GRAHAN, 2004).	52
Figura 2.48: Esquema ilustrando a geometria utilizada para a renderização no programa GemRay.	53
Figura 2.49: Padrões de iluminação: Co-seno (COS) e aleatório (RANDOM) (STRICKLAND, 1983).	54
Figura 2.50: Poliedro (gema lapidada) inserido em cubo de aresta da mesma medida do rondiz.....	55
Figura 2.51: Principais depósitos minerais da Província Gemológica Oriental do Brasil (PEDROSA-SOARES, 2001).	57
Figura 2.52: Formas de cristais trigonais (SCHUMANN, 1997).	59
Figura 2.53 : Esquema das trocas iônicas do quartzo (FAVACHO, 2001).	61
Figura 2.54: Caminhos óticos percorridos por feixes de luz na transmissão em gemas de geometrias diferentes.....	62
Figura 3.1: Tipos de simetria apresentados por gemas facetadas: (a) tripla, (b) quádrupla, (c) quádrupla, (d) sêxtupla e (e) óctupla.	67
Figura 3.2: Esquema de camadas de nodos de processamento em RNAs (TATIBANA, 2003).....	71
Figura 3.3: Neurônio artificial.	72
Figura 3.4: Interpretação geométrica do papel das camadas escondidas em um espaço bidimensional de entrada de dados (JAIN et al, 1996).	74
Figura 3.5: Taxonomia de RNAs <i>feed-forward</i> e <i>feedback</i> (JAIN et al, 1996).	74
Figura 3.6: Funções de ativação para um neurônio: (a) sgn; (b) semi-linear; e (c) sigmóide.....	76
Figura 3.7: Esquema da estrutura de camadas da rede neural utilizada.	82
Figura 4.1: Gráfico do treinamento da rede com o algoritmo traingdx.	89

RESUMO

A lapidação de gemas consiste no processo de beneficiamento desses minerais com o objetivo de ressaltar alguns efeitos óticos como cor, brilho e transparência. Uma das técnicas de lapidação mais utilizadas é o facetamento, que gera gemas lapidadas na forma de poliedros. Os resultados obtidos com esta técnica podem ser mesuráveis em termos de desempenho ótico e aproveitamento em peso, e são controlados pela variação de proporções entre as partes principais de uma gema facetada.

O trabalho apresenta uma revisão sobre as técnicas e processos de lapidação buscando obter o conhecimento necessário para a delimitação do problema da interação da luz com o material na forma de um poliedro. Constatada a carência de estudos aprofundados sobre este problema em relação às gemas brasileiras, definiu-se pela utilização do quartzo incolor hialino. Este é um material gemológico de baixo valor unitário encontrado em abundância no país com múltiplas possibilidades de agregação de valor via lapidação diferenciada, no chamado design de lapidação.

Utilizando um conjunto de diferentes modelos de lapidação desenvolvidos para o quartzo, o estudo concentra-se em dois principais resultados do facetamento, o aproveitamento e a brilhância. Os poliedros e seus resultados são analisados utilizando um software tipo CAD específico para simular o facetamento de gemas. Para verificar a relação entre as proporções entre as partes de um quartzo incolor facetado e estes dois resultados, foi desenvolvida uma ferramenta computacional baseada em Redes Neurais Artificiais (RNAs). RNAs são sistemas computacionais de processamento de dados inspirados no funcionamento do cérebro humano, associando dados como o fazem as redes sinápticas dos neurônios.

Os resultados mostram uma taxa de erro considerada baixa entre os conjuntos de dados de treinamento e de estimação via RNAs, confirmando a relação de dependência utilizada na modelagem da ferramenta e a hipótese de que sistemas baseados em RNAs são adequados para essa classe de problemas.

ABSTRACT

Lapidary is the art of fashioning gemstones with the purpose of enhancing optical effects such as color, transparency and brilliance. Faceting is one of the most usual lapidary techniques and it is performed by cutting planes on the surface of a gemstone to produce a multifaceted shape. Its results can be measured by optical performance or yield achievement, and depend on proportional relations between the parts of a faceted gemstone.

This research revises existing lapidary techniques and procedures aiming at studying the interaction between light and gemstone as a polyhedron. Scarce studies on the topic were found about colored gemstones, contrarily to the gemstone diamond. The material elected for analysis is Crystal-quartz, for it is an abundant and inexpensive gemological material with marked value addition potential when subjected to advanced lapidary techniques.

Two major results of faceting were focused in the study of a sample group of lapidary diagrams designed for crystal-quartz: brilliance and yield. The different polyhedra and their results were analyzed with commercial software which simulates the faceting of a gemstone. The relations between the parts of faceted crystal-quartzes and the two objectives were processed by a computational tool based on Artificial Neural Networks (ANN). ANNs are computational systems inspired on the functioning of the human brain structure to simulate data assignment similarly to the manner it is processed by the synaptic network of the brain's neurons.

The research's results are low error-rate between the groups of training data and the estimation performed via ANNs. Said results seemingly confirm both the relation of dependency used in the tool's design and the hypothesis that computational systems based on ANNs adequately apply to the problem under scrutiny.

1. INTRODUÇÃO

Os minerais geralmente denominados *gemas* são aqueles que se destacam dos demais por possuírem uma ou mais características “especiais”, como cor, brilho, transparência, dureza ou raridade (WEBSTER, 2001). São elementos ou compostos químicos homogêneos de ocorrência natural, formados a partir de processos inorgânicos. Por sua beleza, intimamente ligada à sua transparência, ao seu brilho e às diversas cores em que são encontradas, as gemas foram utilizadas ao longo da história do homem nas mais variadas formas, em geral, associadas a objetos de adorno. Pela sua raridade, a esse tipo de material foi atribuído alto valor em sua troca com outros materiais.

Encontram-se exemplos das tentativas de aprimoramento das características óticas das gemas desde os primórdios da civilização, visando o aumento da beleza e conseqüentemente do valor das mesmas. Essas tentativas incluem os chamados métodos de melhoramento (*enhancing*) que visam a alteração de cor mediante tratamento térmico, irradiação e tingimento ou a diminuição de inclusões via preenchimento de fraturas. Outra forma de agregar valor às gemas é a lapidação, objeto de estudo deste trabalho.

A lapidação consiste no processo de beneficiamento das gemas a partir do seu estado em bruto, com o intuito de “*eleva o conjunto das qualidades óticas, que constituem seu encanto essencial, a um grau de perfeição superior*” (METTA, 1960).

Cada um dos efeitos óticos ocorrentes nas gemas (como brilho, cor e transparência) pode ser ressaltado em um diferente tipo de lapidação. Esse conceito configura o que neste projeto será denominado *modelo de lapidação*: uma forma geométrica tridimensional na qual um mineral será lapidado visando um objetivo específico.

Com o passar do tempo, a evolução das técnicas de lapidação resultou em modelos cada vez mais sofisticados, visando ressaltar características intrínsecas às espécies minerais utilizadas. Desta forma, os principais modelos de lapidação utilizados atualmente na indústria joalheira mundial consistem em poliedros projetados para apresentar diferentes efeitos e objetivos, tais como:

- Controle do grau de saturação (intensidade) da cor da gema;
- Maximização do retorno de luz incidente na gema à perspectiva do observador (brilhância);
- Distorção da luz no interior da gema;
- Obtenção do maior aproveitamento em peso do material bruto, uma vez que esta é sua unidade de medida para fins de comercialização;
- Permitir a fixação da gema no metal, pela cravação, quando da construção da jóia.

Além da lapidação, que é a forma mais imediata de agregação de valor às gemas, outros componentes que designam o preço de gemas lapidadas são a intensidade de cor, a presença de inclusões e o tamanho (medido na prática pelo peso). Para auxiliar a formação desse preço, os dois primeiros aspectos dispõem de tabelas comparativas para classificação e o último pode ser diretamente medido com uma balança. Entretanto, é consensual que ainda não existe um perfeito entendimento da maneira como a qualidade da lapidação afeta o valor das gemas (HEMPHILL et al, 1998; GREEN et al, 2001a; SASIÁN et al, 2003). Por este motivo, alguns estudos vêm sendo realizados visando gerar modelos quantificáveis para o estudo do problema da aparência de gemas lapidadas, principalmente para o diamante. Para as demais gemas, muito pouco é pesquisado, ficando o desenvolvimento de modelos específicos limitado. Com estudos dessa natureza, é possível projetar modelos que sejam comprovadamente mais eficientes em ressaltar determinadas características intrínsecas às gemas e aumentar seu valor.

O principal modelo de lapidação atualmente utilizado para a maior parte das gemas é realizado com a técnica de facetamento, que consiste em criar pequenas faces na superfície das gemas. As gemas beneficiadas com esta técnica são geralmente transparentes, e um dos efeitos óticos buscados é a maximização do retorno da luz que incide na gema à perspectiva do observador.

O objeto do presente estudo inclui aspectos dos materiais, da óptica física e geométrica, do projeto do poliedro a ser obtido na lapidação utilizando a técnica do facetamento, e da ferramenta computacional que se pretende utilizar no auxílio ao projeto: as Redes Neurais Artificiais (RNAs).

RNAs são sistemas computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano, cuja capacidade de processamento de informações é devida às interligações dos neurônios que formam o sistema nervoso humano. Seu princípio é a utilização de rotinas de programação compostas de um grande número de unidades de processamento simples (neurônios) interligados por conexões com pesos associados. Essa forma de análise de dados é indicada para problemas com grande número de variáveis, geralmente, de relações não-lineares. O estudo de modelos de lapidação via modelamento matemático tradicional e métodos de ótica geométrica vêm demonstrando que, quanto mais próximo da realidade são os modelos, mais se verifica o alto grau de complexidade das relações entre os parâmetros de lapidação e seus resultados (HEMPHILL et al, 1998; GREEN et al, 2002). Um sistema computacional baseado em Redes Neurais Artificiais pode “aprender” as relações entre parâmetros de lapidação a partir de um conjunto de dados cujos resultados são conhecidos. Se este aprendizado for bem sucedido, o programa poderá aplicar esse conhecimento na análise de modelos em construção, configurando-se como uma ferramenta útil no auxílio ao projeto de lapidação.

O material gemológico escolhido para estudo no presente trabalho foi o quartzo incolor, denominado hialino, pela combinação de fatores como grande oferta de material disponível, baixo custo por unidade de peso, baixo valor agregado e possibilidades de ganhos suplementares através de tratamentos que melhorem sua cor.

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é verificar a adequação de sistemas baseados em Redes Neurais Artificiais para utilização nos problemas de interação da luz com gemas lapidadas na forma de poliedros gerados em computação gráfica e com as propriedades óticas do material quartzo incolor (hialino).

Para este fim, buscou-se obter o conhecimento necessário para a delimitação do problema através da revisão bibliográfica de diferentes áreas, a saber:

- Lapidação: conhecimento técnico do processo, modelos, objetivos, parâmetros e tecnologia;
- Óptica física: fenômenos que governam a interação da luz com a matéria;
- Material (quartzo hialino): propriedades óticas e mineralógicas;
- Modelamento virtual: softwares que permitem a visualização, alteração de parâmetros e quantificação das propriedades óticas dos modelos de gemas lapidadas;
- RNAs: técnicas de programação necessárias para o desenvolvimento da ferramenta computacional de análise de modelos de gemas lapidadas.

1.2 Justificativa

A indústria joalheira mundial é o destino final da maior parte das gemas lapidadas e movimenta anualmente cerca de quatorze bilhões de dólares em exportações entre os diversos países, segundo o Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM, 2004). O principal exportador mundial é a Itália, país com insignificante produção mineral, mas com eficiente indústria joalheira que exporta cerca de quatro bilhões de dólares anualmente. O Brasil exportou nos últimos três anos vinte e cinco milhões de dólares, o que equivale a 0,17% do mercado internacional.

Por outro lado, os dados do mesmo instituto referentes à exportação de gemas em bruto colocam o Brasil como o principal exportador nos últimos três anos, com exportações anuais de trinta milhões de dólares, responsável por cerca de 25% da produção mundial de gemas coradas (excetuando-se diamantes, esmeraldas, rubis e safiras). Entretanto, verifica-se nas estatísticas de exportações de gemas lapidadas, produto de maior valor agregado, desprezível participação brasileira, com cerca de 0.04% de um mercado que é seis vezes maior em relação às gemas sem beneficiamento. Segundo dados do IBGM para o mesmo período, o Brasil exportou míseros 350 mil dólares em 2002¹. Cabe ressaltar o valor irrisório destes dados oficiais e apontar a provável discrepância com a realidade.

Acompanhando-se a evolução das exportações de gemas entre os anos 2000 e 2003 (Figura 1.1), observa-se nesta seqüência histórica o quadro economicamente sombrio de aumento das exportações em bruto e a queda das exportações de gemas lapidadas. Segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC, 2003), “*ainda hoje, nossas gemas são majoritariamente exportadas em estado bruto*” e, desta forma, o país perde a possibilidade de que esta indústria amplie sua atuação para além do início da cadeia produtiva de um setor estratégico, deixando de agregar valor a estas matérias primas.

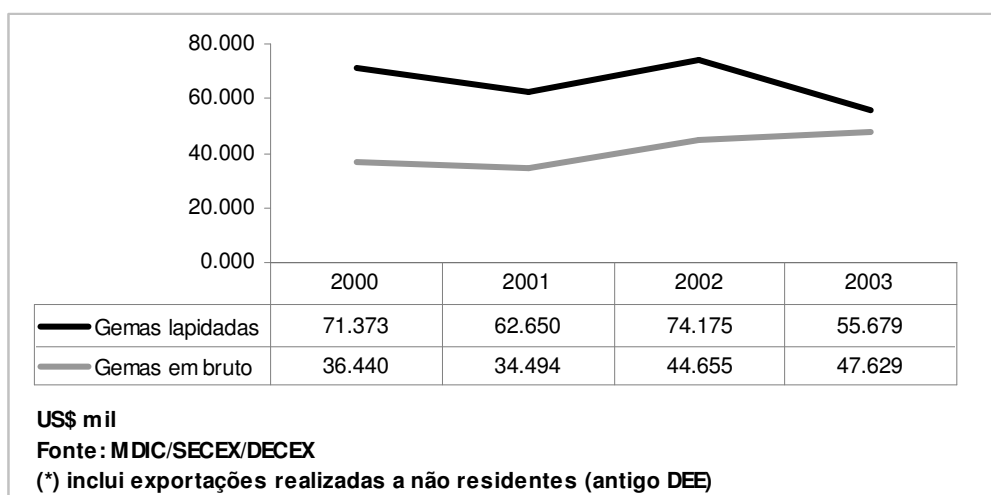


Figura 1.1: Evolução da exportação brasileira de gemas brutas e lapidadas no período de 2000-2003.

¹ Somatório anual das exportações de diversas gemas, excetuando-se esmeraldas, rubis e safiras, sendo que as duas últimas não apresentam significativa produção no país.

Em 2004 foi apontado entre os gargalos ao desenvolvimento da cadeia produtiva de gemas e jóias o baixo nível de eficiência econômica e tecnológica devido à utilização de técnicas de lapidação rudimentares (MDIC, 2004). O melhor aproveitamento do recurso mineral disponível forneceria ao mercado alternativas de ganhos suplementares para a economia. O estudo dos modelos de lapidação permite identificar a inserção do design como fator de agregação de valor ao produto mineral, conforme observa TEIXEIRA (2001):

“Ainda que concentre em seu território o maior número de riquezas minerais do país, estas, sem beneficiamento interno acabam sendo exportadas quase sempre em estado bruto, o que significa que ‘Minas Gerais está agregando pouco valor às suas matérias-primas’. Este patrimônio, que a natureza oferece, poderia ser mais bem difundido se melhor aplicado em jóias, cujo potencial no Estado é tanto uma vocação, quanto uma tradição”.

O design, mais do que cosmética que encobre a função do produto, engloba seu desenvolvimento desde seus estágios iniciais e tem interfaces com a comunicação, marketing e a sociologia das comunidades globalmente interligadas atualmente. Nesta ótica, a competitividade das indústrias está intimamente ligada à implantação de uma cultura de design, como um dos mais importantes instrumentos para o aprimoramento dos bens de consumo aqui produzidos, segundo o Programa Brasileiro de Design do Ministério da Indústria, do Comércio e do Turismo (MDIC, 1995).

O design aplicado ao setor de gemas e jóias e ações de fomento realizadas pelo governo federal, como o programa de Implantação do Fórum de Competitividade para a Cadeia produtiva de Gemas e Jóias do MDIC, vem contribuindo para que as empresas obtenham ganhos de mercado em âmbito nacional e internacional, mostrando crescimento acentuado das exportações dos principais produtos do setor (Tabela 1.1), com impacto também no comércio de gemas brutas, lapidadas e jóias.

Entretanto, a revisão bibliográfica realizada neste projeto aponta que o design de lapidação é pouco difundido e a pesquisa sobre o assunto, incipiente.

Tabela 1.1: Exportações brasileiras do capítulo 71 da NCM referentes ao período de Janeiro-Agosto de 2003 e 2004 (US\$ mil).

Principais Itens	2003	2004	% 03 / 04
Diamantes em Bruto	12.308	6.739	-45
Diamantes Lapidados	7.022	13.073	86
Pedras Preciosas em Bruto	22.561	26.108	16
Rubis, Safiras e Esmeraldas Lapidadas	3.184	4.868	53
Outras Pedras Preciosas Lapidadas	22.487	32.270	44
Obras e Artefatos de Pedras	6.900	7.511	9
Ouro em Barras, Fios e Chapas	221.601	281.313	27
Produtos de Metais Preciosos p/ Indústria	28.594	22.606	-21
Joalheria / Ourivesaria Metais Preciosos	17.524	26.301	50

Fonte: MDIC/SECEX/DECEX

Elaboração: IBGM

(*): Não inclui exportações realizadas a não residentes (antigo DEE)

2. FUNDAMENTOS

Esse capítulo apresenta uma revisão bibliográfica das áreas do conhecimento envolvidas no presente trabalho visando abordar os vários fatores que influenciam a aparência de uma gema lapidada. Dentre estes fatores, estacam-se a interação da luz com o material-gema na forma de um poliedro, a forma deste poliedro, a qualidade do polimento de sua superfície, o tipo de luz, a iluminação e as condições de observação (HEMPHILL et al, 1998).

A revisão inicia-se na seção 2.1 pela discussão do tema da lapidação em geral (seu desenvolvimento histórico, técnicas, processos e nomenclaturas), seguida da descrição dos fenômenos da óptica física relevantes para o entendimento do problema e dos modelos geométricos para as gemas. São também apresentados alguns estudos realizados sobre o assunto e seus respectivos modelos descritos.

Na seção 2.2 são apresentados os parâmetros geométricos relevantes ao problema, o programa computacional que será utilizado para visualização dos modelos de lapidação e a descrição do modelamento matemático adotado.

A seção 2.3 trata das características mineralógicas e propriedades do material escolhido para estudo neste trabalho, o quartzo.

A apresentação dos principais temas envolvidos no presente projeto é finalizada na seção 2.4 com uma descrição das redes neurais artificiais, base da ferramenta computacional de análise de projetos de lapidação.

2.1 Lapidação

Para a compreensão do tema estudado, são discutidos os seguintes tópicos:

- Perspectiva histórica da evolução dos principais modelos de lapidação utilizados;
- Descrição das partes de uma gema lapidada, etapas e processos de produção;
- Descrição dos fenômenos físicos que governam o comportamento da luz em contato com o material na forma do poliedro;
- Descrição dos parâmetros que alteram o comportamento ótico de um modelo de lapidação e do programa computacional utilizado para a visualização dos modelos;
- Descrição dos principais modelamentos matemáticos desenvolvidos para o estudo do comportamento ótico de modelos de lapidação.

2.1.1 Evolução dos modelos de lapidação

Modelos Primitivos

Alguns autores apontam as origens da lapidação na região da Índia e Paquistão, onde se realizava exploração mineral e beneficiamento de gemas (safiras, diamantes e turmalinas, principalmente) há 3.000 anos (SCHUMANN, 1997). Entretanto, considerando-se que o processo de lapidação pressupõe modelos que buscam realçar alguma característica intrínseca das gemas, encontram-se objetos mais antigos. Um dos primeiros exemplares de gemas lapidadas, datado de 5.000 a.C., foi encontrado na região de Arpachiya, Iraque. Consistindo de lascas polidas de obsidiana (espécie de vidro natural, SiO_2 de estrutura cristalina amorfa), as gemas que mostram estes primitivos modelos de lapidação faziam parte de um colar construído com argila e conchas (Fig. 2.1).

O polimento, princípio da lapidação, gera o brilho em uma superfície pela diminuição da sua rugosidade (WEBSTER, 2001). Acredita-se que a técnica utilizada nessa época era a abrasão com fibras naturais de bambu ou conchas misturadas a coríndon em pó.

A primeira técnica reconhecida de lapidação é a glíptica, que consiste em esculpir por abrasão com um material de maior dureza, criando-se figuras, símbolos ou desenhos na superfície das gemas (SCHUMANN, 1997). Esses grafismos podem ser feitos no lado superior (aparente) de uma gema opaca ou no lado inferior de uma gema transparente, para serem visualizados através da mesma. Os mais antigos exemplares dessa técnica foram encontrados pelos arqueólogos nas ruínas das primeiras civilizações do Egito e Mesopotâmia (sumérios, babilônios e assírios).



Figura 2.1: Colar do período Halaf (TAIT, 1986).

Com o passar do tempo, o homem foi desenvolvendo diferentes soluções para a utilização das gemas em seus objetos de adorno, acompanhando a evolução da ourivesaria. Um destes primitivos modelos de lapidação utilizava gemas em formas de contas, em diversos colares e brincos através de furos que permitiam a passagem de fios, de maneira bastante simples. Às contas de gemas, encontram-se geralmente associados diversos outros materiais como vidro, metal, sementes e ossos, em objetos de adorno construídos pela maioria das populações ao longo da história. As Figuras 2.2, 2.3 e 2.4 mostram exemplos desse corte.



Figura 2.2: Contas de ouro e lapis-lazuli (gema azul opaca composta dos minerais lazurita e pirita) encontradas nas escavações da cidade suméria de Ur (c. 2.500 a.C.) (TAIT, 1986).



Figura 2.3: Colares da 18ª Dinastia egípcia (c. 1370-1350 a.C.) construídos com contas de ouro, de cornalina e de pasta de vidro azul, contendo uma escultura de escaravelho em lapis-lazuli (TAIT, 1986).



Figura 2.4: Colar fenício da região de Tharros, Sardenha (c. 700 a.C.) em ouro e contas de cornalina entalhada. (TAIT, 1986).

Nos primórdios da lapidação, também era possível transformar em gemas esféricas polidas os pequenos seixos encontrados nos leitos dos rios ou em depósitos de aluvião, derivados de antigos cristais que perderam suas faces, arestas e vértices pelo trabalho de rolamento. Outros modelos buscavam realçar o brilho e a forma geométrica dos cristais através do polimento de suas faces naturais, como o prisma hexagonal do berilo ou o octaedro do diamante, como ilustra a Figura 2.5:



Figura 2.5: Colar e brincos do tesouro de Cartago (400 d.C., na atual Tunísia), compostos de ouro, pérolas, safiras azuis (variedade de coríndon) e esmeraldas (variedade verde de berilo) (TAIT, 1986).

Ainda no princípio da seqüência evolutiva dos modelos de lapidação surgiu o cabochão (Figuras 2.6 e 2.7). Em sua forma mais comum, este corte apresenta uma superfície curva convexa, em forma de domo, e uma superfície plana, que determina sua base. Neste tipo de corte utilizam-se diferentes graus de curvatura das superfícies, o que gera cabochões altos, médios e baixos, de acordo com a maior ou menor curvatura da parte superior.



Figura 2.6: Broche do século XIII de origem francesa ou inglesa, mostrando cabochões de safira e rubi (variedade vermelha de coríndon) (TAIT, 1986).

A lapidação em cabochão é bastante versátil, pois os modelos podem ser adaptados de acordo com as características que se deseja ressaltar no material gemológico. A possibilidade de lapidar formas irregulares permite o aproveitamento da maior parte do material bruto (Fig. 2.8). Suas formas arredondadas facilitam a cravação no objeto, o que minimiza a possibilidade de quebras por não haver a presença de quinas ou concentradores de tensão.

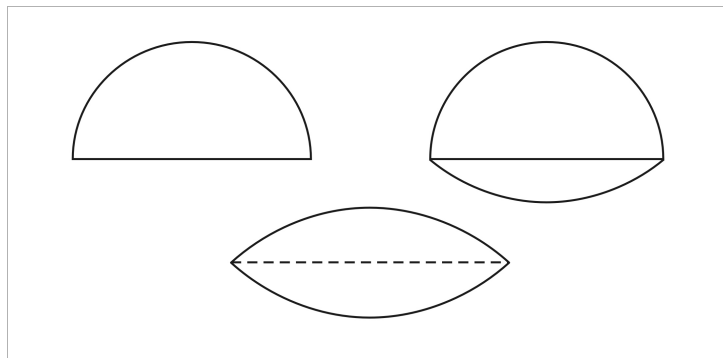





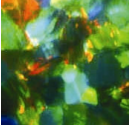
Figura 2.7: Tipos de cabochão.



Figura 2.8: Parte central de um diadema grego do período helenístico (200 a.C.), feito em ouro com lascas de granadas lapidadas em forma de cabochões. (TAIT, 1986).

A lapidação em cabochão pode ser realizada em gemas opacas bem como em transparentes e translúcidas, e é indicada para reforçar em algumas gemas os efeitos óticos causados por reflexão, interferência e refração da luz apresentados na tabela 2.1. Estes efeitos serão explicados no capítulo 2.1.3.

Tabela 2.1: Alguns efeitos óticos reforçados na lapidação tipo cabochão.

<p>Asterismo</p>	<p>Efeito ótico que mostra imagem de estrela criada pela reflexão da luz em fibras que existem em determinadas direções no interior da gema. Reforçado na gema lapidada em cabochão com base paralela ao plano composto por estas direções.</p>	
<p>Acatassolamento</p>	<p>Efeito olho-de-gato. Princípio similar ao asterismo, porém gera uma linha pela reflexão da luz em fibras paralelas. Reforçado na gema lapidada em cabochão com base paralela a estas.</p>	
<p>Adularescência</p>	<p>Fenômeno de interferência com a estrutura interna composta de camadas que gera aparência branco-azulada, quando a gema é girada.</p>	
<p>Opalização</p>	<p>Mudança direcional de cor causada por minúsculas esferas da fase cristobalita presentes no interior da gema que geram o fenômeno de interferência.</p>	

Início do facetamento

Jóias históricas hoje encontradas em coleções das casas reais e museus (como a coleção do British Museum de Londres, que originou a publicação editada por TAIT, 2001) foram datadas pelos historiadores do assunto, permitindo verificar, dentre outros aspectos, o grau de evolução da técnica de lapidação em cada época. Observa-se que até os séculos X e XI, utilizavam-se principalmente os modelos de lapidação obtidos através do entalhe (glíptica), do polimento das faces do cristal (Fig. 2.9), a lapidação em contas e em cabochão.

Segundo Webster (2001), a partir do século XI surgiu na Europa o facetamento de gemas em geral, originando em 1290 a criação da primeira corporação de ofício de lapidação em Paris, e cem anos mais tarde em Nuremberg. A partir desta época, com a evolução das técnicas de metalurgia (surgimento do aço no século XIV) e de fabricação de ferramentas, tornou-se possível construir máquinas capazes de cortar e polir materiais duros como as gemas (principalmente o diamante), com maior precisão. Esta tecnologia

trouxe um avanço ao permitir o corte com relativa precisão das facetas (pequenas faces planas) na superfície das gemas.

De acordo com KOCKELBERGH et al (1990), em 1330 a técnica de corte de diamantes com pó diamantado e disco (*grinding wheel*) já era conhecida em Veneza, cidade que tinha a concessão do comércio com a Síria e Egito, e caminho das caravanas rumo às Índias. Por este motivo, os venezianos monopolizaram o comércio dos diamantes brutos provenientes da Índia até o século XVI, quando os portugueses descobriram uma rota alternativa pela África. Os diamantes brutos eram vendidos para outras cidades onde há indícios da prática de seu beneficiamento, tais como Paris na França, Nuremberg na Alemanha, e Bruges na Bélgica. Para estas gemas, surgiu o *table cut*, modelo de lapidação obtido a partir da clivagem de um plano paralelo às bases das duas pirâmides que formam o octaedro (fig 2.10). Segundo Webster (2001), este modelo já era encontrado em jóias indianas antigas, mas aparece em Nuremberg apenas em 1373. KOCKELBERGH et al (1990) menciona haver um anel de 1400 no Museu do Louvre com um diamante neste corte.

Com este modelo, pela primeira vez as gemas lapidadas funcionam como um prisma retro-refletor, devolvendo a maioria da luz incidente ao olhar do observador. Este efeito é conhecido como *brilhância*, e seu conceito é o ponto de partida da evolução do corte mesa para os diferentes modelos de lapidação utilizados atualmente.

Para a porção superior do octaedro retirada no *table cut* aparecem por volta de 1600 os cortes em rosa (*rose cuts*), como forma de aproveitamento do material (HURLBUT ET AL, 1990). Esses cortes, ilustrados na figura 2.11, também eram bastante utilizados em gemas de cor forte, objetivando a diminuição da saturação de cor².

² A absorção seletiva da luz (explicada no capítulo 2.1.3- Interação da Luz com a Matéria) é influenciada pela distância percorrida no material, de modo que um sólido mais fino absorve menos luz e se torna mais claro do que o mesmo material em geometria mais espessa (SCHUMANN, 1997).

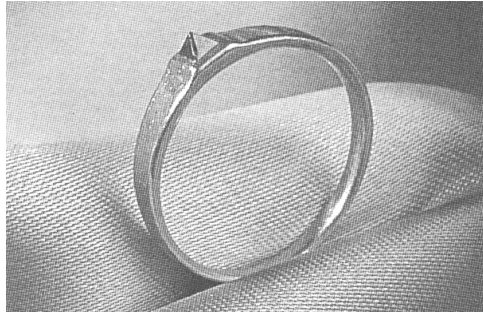


Figura 2.9: Anel holandês da segunda metade do século XVI com diamante *point cut* (KOCKELBERGH et al, 1990).

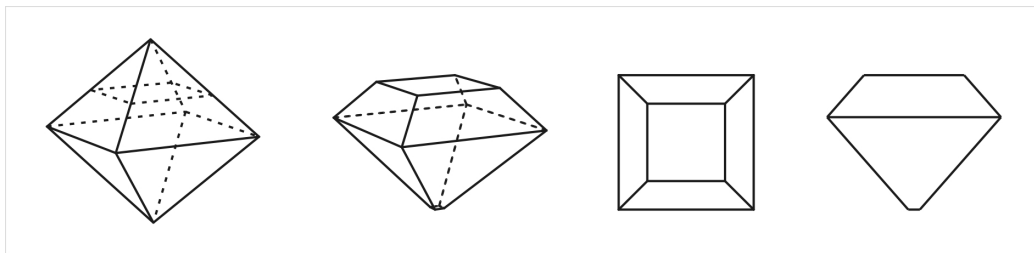


Figura 2.10: Octaedro com plano de clivagem e três vistas do modelo *table cut*.

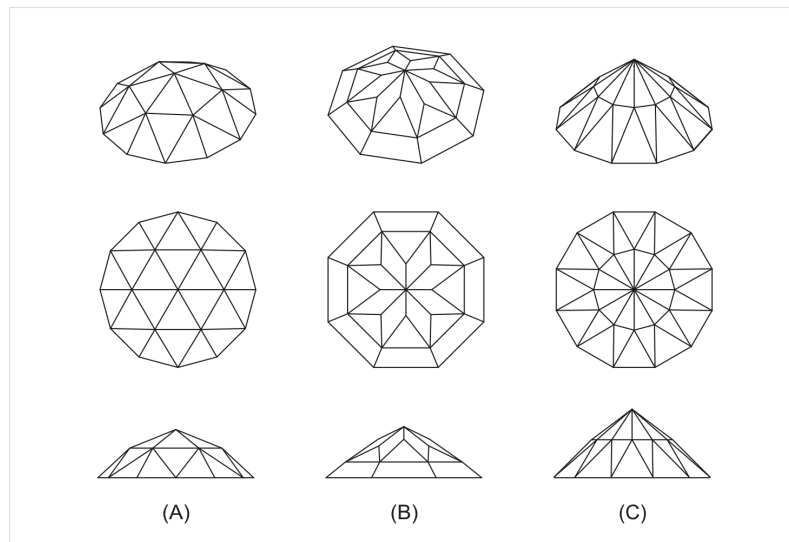


Figura 2.11: Tipos de cortes em rosa: (A) *six rose*, (B) *cross rose* e (C) *rose recupée*.

Os modelos *table cut* evoluíram em duas direções, originando a maioria dos cortes utilizados atualmente. Para modelos retangulares (visando o maior aproveitamento dos cristais de formas alongadas como os berilos e turmalinas), o corte gerou o *step cut* (também chamado de *trap cut*), variação

que apresenta facetas paralelas retangulares, pela divisão das facetas da porção superior das gemas. Suas formas externas podem ser retangulares (quando a lapidação é denominada *baguette*), triangulares ou em forma de losango. O corte *step cut*, por sua vez, evoluiu para os cortes de forma octogonal tipo esmeralda (*emerald cuts*), assim denominados por terem sido amplamente utilizados para esta gema (geram maior aproveitamento a partir da forma alongada do cristal de berilo) (HURLBUT ET AL, 1990). Outra variação desse corte foi o estilo de facetamento tesoura (*scissor cut*), onde as facetas se cruzam em forma de x. A Figura 2.12 ilustra a evolução do corte *table cut* na direção dos modelos esmeralda e tesoura e a Figura 2.13 mostra algumas esmeraldas lapidadas nesse corte. A alteração do posicionamento das facetas gera modelos de aparência diferente, que configura os denominados *padrões de facetamento*.

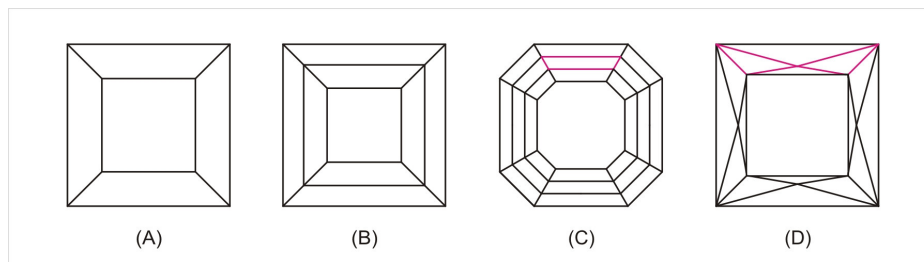


Figura 2.12: Vista superior de variações do (a) corte mesa: (b) *trap*, (c) *step* cujo padrão de facetamento mostra facetas retangulares, e (d) tesoura com facetas “cruzadas”.



Figura 2.13: Pingente espanhol da época da Inquisição (c. 1680) mostrando esmeraldas menores quadradas e retangulares modelo *table cut* e esmeralda maior em cabochão redondo (TAIT, 1986).

Para o diamante, principalmente, a lapidação *table* evoluiu para o corte brilhante (*brilliant cut*), um dos mais populares atualmente, servindo mesmo como sinônimo desta gema. A princípio, a ‘mesa’ ganhou mais lados, sendo os quatro originais duplicados, na lapidação *eight cut*. Com o passar do tempo surgiram diversas variações de quantidades e ângulos de facetas, como no brilhante português, até a padronização no século XX (Fig. 2.14).

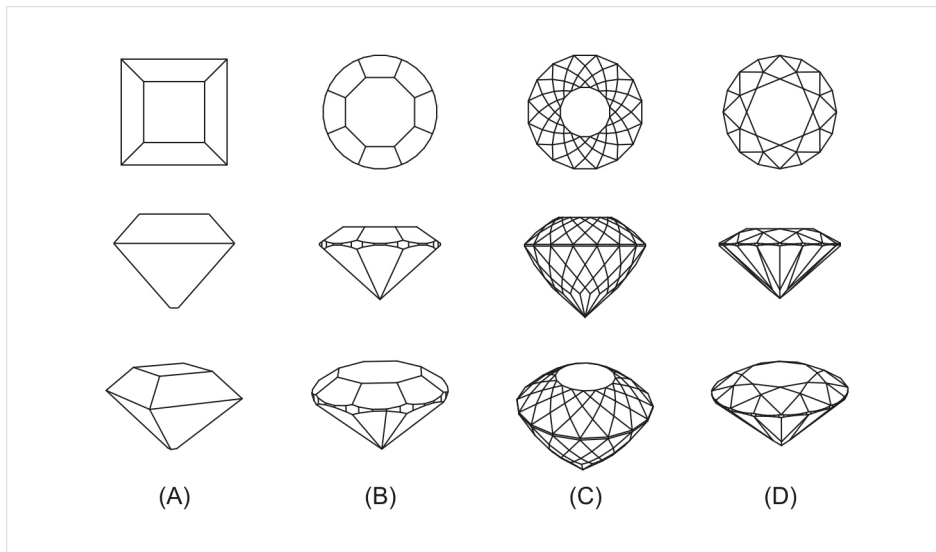


Figura 2.14: Evolução do modelo brilhante a partir do corte table (A): *eight cut* (B), brilhante português (C) e brilhante padrão (D).

Há controvérsias sobre as origens do padrão de facetamento que configura o corte brilhante. Segundo Webster (2001), no final do séc XVII um lapidário estabelecido em Veneza, Vincenzo Peruzzi, desenvolveu um corte brilhante antigo, com as facetas estrelas características, adaptado de gemas trazidas da Índia. Kockelbergh et al (1990) menciona uma carta de 1644 do primeiro ministro francês, Cardeal Mazarin, revelando a posse de um diamante com 16 facetas ao redor de uma mesa, indica suas origens na França e cita a produção em larga escala deste corte na Antuérpia a partir de 1717.

Na segunda metade do século XVII o corte brilhante já era disseminado na Europa (KOCKELBERGH et al, 1990), buscando-se maximizar os efeitos de brilhância e de fogo (dispersão da luz), e um bom aproveitamento do material bruto. Por este motivo o padrão de facetamento foi adaptado para diferentes

formas geométricas (HURLBUT ET AL, 1990) (WEBSTER, 2001), nos chamados cortes-fantasia (*fancy-cuts*) de então, nas formas oval, gota, *navete* (forma de um casco de navio) e *cushion* (forma de almofada) (fig 2.15).

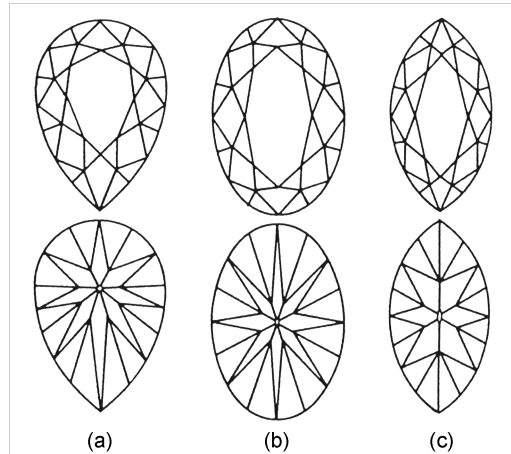


Figura 2.15: Adaptações do corte brilhante para as formas (a) pêssego, (b) oval e (c) *navete* ou marquise (HURLBUT ET AL, 1990).

Esta variedade de formas e suas demais vantagens mencionadas tornaram o corte brilhante o modelo mais amplamente utilizado na lapidação de gemas. Em 1919 o matemático belga Marcel Tolkowsky padronizou as proporções deste corte para a forma redonda, utilizando princípios de óptica geométrica, como será detalhado na seção 2.1.5 - Modelo Ótimo.

Modelos recentes

Em 1940 o lapidário americano Francis J. Sperinsen (em conjunto com a artista plástica Margaret de Patta) criou modelos que utilizavam um novo conceito de lapidação. Estes modelos partiam de um pressuposto contrário ao buscado no modelo brilhante, que tem na devolução da luz ao observador da gema (brilhância) um de seus objetivos principais. Seus modelos, chamados de *lens cuts* e *opticut*s, buscavam distorcer a luz no interior da gema (WISE, 2003).

Este novo conceito foi disseminado a partir dos anos 80 pelo trabalho do lapidário alemão Berndt Munsteiner, criador dos *fantasy-cuts*, de formas assimétricas e padrões de facetamento diferentes (fig 2.16). Seus modelos

utilizam cortes em forma de ‘v’ estrategicamente dispostos na superfície da gema de forma a produzir reflexões internas de luz evidenciem sua forma e cor (HURLBUT et al, 1990).

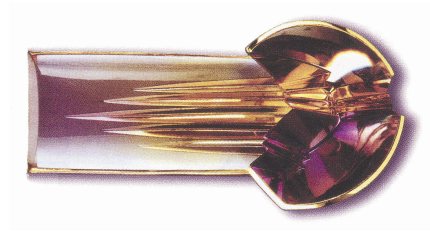


Figura 2.16: Ametista bicolor lapidada por Berndt Munsteiner.

A partir dos anos 90, renomados lapidários americanos como Larry Winn, Michael Dyber, Glenn Lehrer, dentre outros, desenvolveram um conjunto de técnicas similares que se convencionou chamar efeitos holográficos (WISE, 2003). Dentre estas, se destacam o facetamento côncavo (*concave* ou *negative faceting*), onde a faceta não mais é plana, mas forma uma depressão na superfície da gema que funciona como uma lente de aumento. Outras técnicas utilizadas com maestria por estes lapidários são o polimento de perfurações (cilindros, esferas e discos) que agem como refletores internos de luz e a criação de grandes facetas no pavilhão que funcionam como espelhos (fig 2.17).

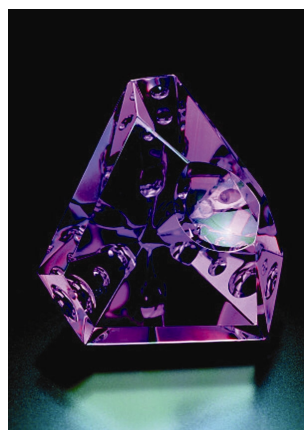


Figura 2.17: Ametista lapidada por Michael Dyber (WISE, 2003).

Merece destaque um outro tipo inovador de corte misto desenvolvido pelo lapidário e autor de livros australiano Basil Watermeyer: o corte tipo

Barion. Inicialmente projetado para maximizar a brilhância de diamantes quadrados e retangulares, este modelo foi adaptado para outras formas e para as demais gemas (WEBSTER, 2001). Os modelos tipo Barion (Fig. 2.18) caracterizam-se por apresentarem facetas em forma de meia-lua dispostas junto ao rondiz no pavilhão, e as demais no padrão de facetamento brilhante (onde as facetas principais se encontram). Geralmente sua coroa é facetada em *step cut*. Este corte permite que gemas de formas mais alongadas ou mais profundas apresentem maior brilhância do que se fossem facetadas tradicionalmente (GRAHAN, 2004).

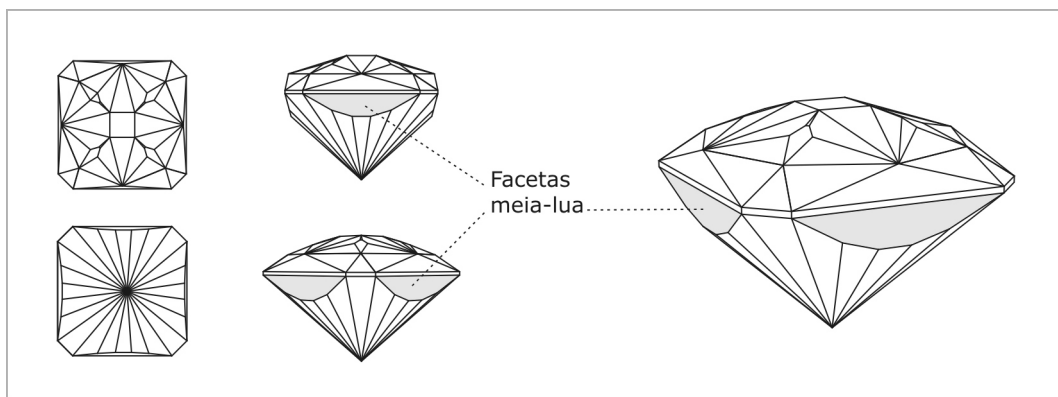


Figura 2.18: Facetas em forma de meia-lua que caracterizam o padrão de facetamento barion. Corte tipo *old-mine*, modelo “*Four Hummers II*”, *copyright* de Bob Keller (2001).

2.1.2 Processos de lapidação

Nomenclatura das partes

Para o bom entendimento da maneira como os parâmetros de lapidação afetam a aparência de uma gema lapidada é necessário o conhecimento dos processos básicos de facetamento e da nomenclatura das partes de uma gema facetada (Fig. 2.19).

A maioria das gemas facetadas apresenta um lado superior (‘frente’ no jargão da lapidação) através do qual a gema é observada. Esta porção é denominada coroa (*crown*, C), onde existe geralmente uma faceta maior

denominada mesa (*table*, T), através da qual observa-se a maior parte das reflexões internas da luz na gema.

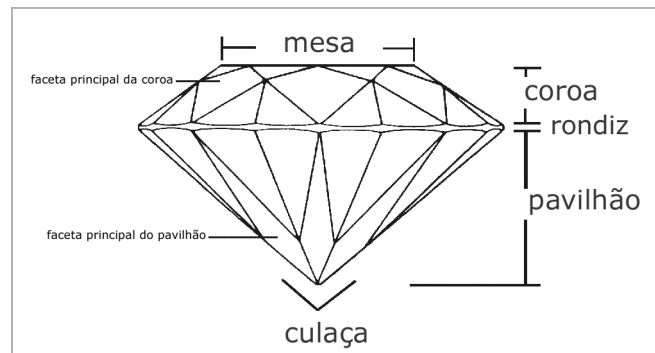


Figura 2.19: Nomenclatura das partes de uma gema, em elevação frontal.

A parte inferior (ou ‘fundo’) é denominada pavilhão (*pavillion*, P). Rondiz (*girdle*, G) é a denominação da separação entre a frente e o fundo, normalmente em um plano paralelo ao da mesa. O rondiz determina geralmente o maior perímetro da gema facetada, de uma vista superior, como ilustrado na Figura 2.20. Sua forma determina a forma da gema, dita redonda se a forma do rondiz for um círculo, por exemplo.

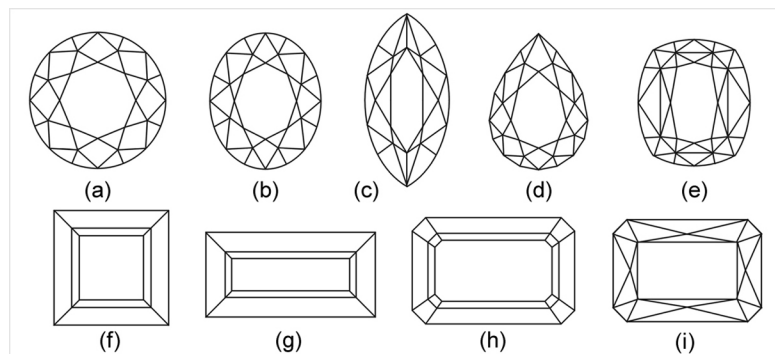


Figura 2.20: Vista superior de gemas ilustrando formas (a) redonda, (b) oval, (c) navete (ou marquise), (d) gota (ou pêra), (e) *cushion*, (f) quadrada, (g) retangular (*baguette*), (h) octogonal (*emerald cut*) e (i) octogonal (LAPIDART, 2003).

As distâncias das gemas lapidadas são geralmente medidas pelo seu comprimento em milímetros, de acordo com as vistas tomadas. Convencionase chamar largura (*width*, W) a distância horizontal de uma gema a partir de uma vista superior (medida pelo comprimento do rondiz) e comprimento

(length, L) a distância vertical. Uma gema quadrada apresenta medidas W e L iguais (relação $W/L=1,00$) enquanto uma gema retangular pode apresentar uma relação $W/L=1,5$. Neste caso, a distância da mesa em sua maior direção (visualizada na vista lateral) é denominada U (Fig. 2.21).

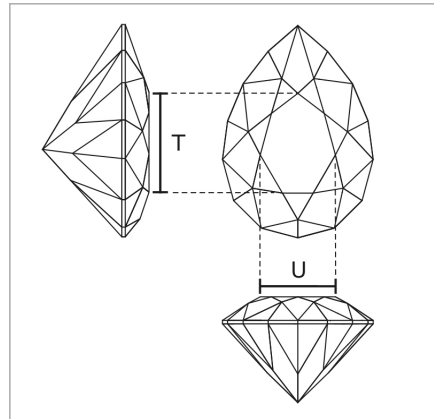


Figura 2.21: Modelo de lapidação brilhante na forma pêra.

O ponto diametralmente oposto à mesa, onde se encontram as facetas do pavilhão, é denominado culaça. Para o modelo brilhante redondo padrão e os demais modelos de lapidação nele baseados, as facetas são nomeadas em relação à sua posição na coroa ou pavilhão (Fig. 2.22).

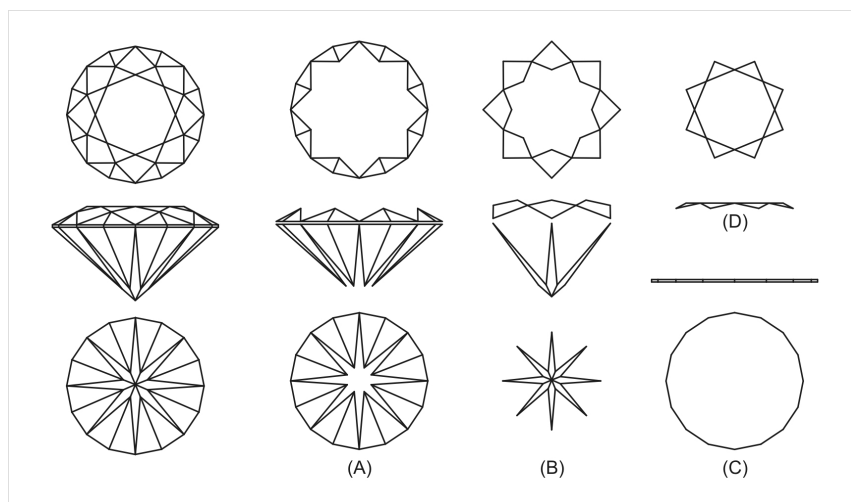


Figura 2.22: Partes do modelo redondo brilhante padrão: (A) facetas do rondiz, (B) facetas principais, (C) facetas estrela da coroa e (D) rondiz.

Os ângulos que as facetas da coroa e pavilhão apresentam em relação ao plano do rondiz controlam a maior parte dos processos de retorno da luz, conforme será visto no capítulo seguinte.

Etapas da lapidação

O primeiro passo do processo de lapidação de uma gema corada consiste em inspecionar visualmente o material bruto e identificar em seu interior a forma da gema lapidada passível de ser obtida. Deve-se observar o melhor aproveitamento (em peso) do material em função da forma original da gema bruta, a disposição das inclusões e das manchas de cor. Nesta etapa, é comum o uso de martelo para separar, via aplicação de pequenos golpes, as partes periféricas da gema que apresentam trincas extensas e que atinjam a superfície.

A segunda etapa consiste em serrar a gema bruta martelada com o uso de serra circular diamantada (onde o diamante é impregnado por fundição ou eletrodeposição na lâmina de metal) de modo a eliminar as partes contendo menores inclusões (ver página 62) e manchas de cor identificadas anteriormente (Fig. 2.23).

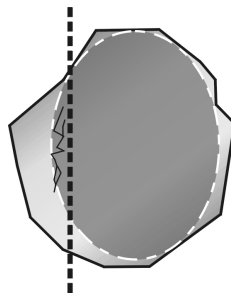


Figura 2.23: Forma da gema lapidável a partir do bruto, inclusão e linha de serra (LAPIDART, 2003).

Nesta fase, de acordo com a experiência do profissional serrador, tem início a busca pelo maior aproveitamento e realce de cor, ao se tentar definir a forma e o posicionamento ideais da gema facetada que será obtida no final do processo. O aproveitamento diz respeito à relação entre o peso da gema em bruto, geralmente medido em gramas e o peso da gema lapidada, geralmente medido em quilates (abreviação cts, do inglês *carats*), sendo um quilate

equivalente a 200 miligramas³. Ferreira in POLLI (1999) apresenta fórmulas para o cálculo do aproveitamento (equações. 2.1 e 2.2), considerando uma única gema lapidada obtida a partir de uma única gema bruta (ignorando para fins de simplificação a possibilidade de se obter diversas gemas lapidadas de um único pedaço de bruto):

...tendo como base a delimitação do que é aproveitável e o(s) tipo(s) de lapidação que é(são) recomendado(s) para aquele tipo ou formato da gema lapidada, através de um paquímetro, mede-se o comprimento, a largura e a altura/espessura deste poliedro idealizado como aproveitável. O volume da parte aproveitável (VPA) e o peso da parte aproveitável (PPA), são obtidos, respectivamente, através das seguintes equações:

$$\text{VPA (cm}^3\text{)} = \text{comprimento (cm)} \times \text{largura (cm)} \times \text{altura (cm)} \quad (2.1)$$

$$\text{PPA (ct)} = \text{VPA (cm}^3\text{)} \times \text{peso específico da gema (g/cm}^3\text{)} \times 5 \quad (2.2)$$

A terceira etapa é a formatação da gema serrada em um poliedro, cujo rondiz apresenta geometria simples (oval, redondo, retangular, quadrado, gota, dentre outras). Esta forma já estará predeterminada, se a etapa da serra tiver sido bem executada. Para este trabalho, utiliza-se um rebolo circular (ferramenta abrasiva em forma de pneu) cuja capacidade de abrasão varia de acordo com a dureza da gema a ser trabalhada. Para quartzos geralmente utilizam-se rebolos de carbetto de silício de 60 a 80 grit, parcialmente imersos em água para refrigeração, ou rebolos diamantados de 120 ou 180 grit, sendo que estes desbastam as gemas em menos tempo, geram menos calor e liberam partículas somente na água, necessitando de menos refrigeração e lubrificação, além de apresentar desgaste homogêneo (MACHADO, 1999). Nesta etapa devem-se observar as proporções entre largura, altura e profundidade, uma vez que a forma da gema lapidada já se evidencia na gema então obtida, dita formada ou *preformed*.

³ O cálculo do aproveitamento é importante para a definição do valor das gemas lapidadas, uma vez que o custo destas será formado pela soma dos custos de matéria-prima e lapidação. A título de exemplo, uma gema pesando 10 gramas, adquirida por R\$ 100,00 o grama, tem um custo de R\$ 1.000,00. Quando lapidada, supondo-se um aproveitamento de 50%, obtém-se uma gema de 05 gramas (ou 25 quilates). Essa gema lapidada apresentará então custo de matéria-prima a R\$ 40,00 por quilate.

A quarta etapa consiste no facetamento propriamente dito, ou seja, na divisão das facetas superficiais do poliedro. Para esta etapa, a gema formada é fixada com o uso de resina especial (geralmente utiliza-se o lacre, misturado com goma-laca à proporção de 10 para 1) em vareta ou dop (caneta no jargão da lapidação, feita de alumínio, madeira ou latão) (Fig. 2.24).



Figura 2.24: Gema formada fixa no dop com lacre (LAPIDART, 2003).

Estando uma porção da gema (frente ou fundo) colada no dop (dita ‘encanetada’), seu lado oposto está disponível para o trabalho. O dop é fixado na máquina de lapidar (Fig. 2.25) que permite transferir para a gema o ângulo no qual a primeira faceta será cortada, em relação ao plano do rondiz.

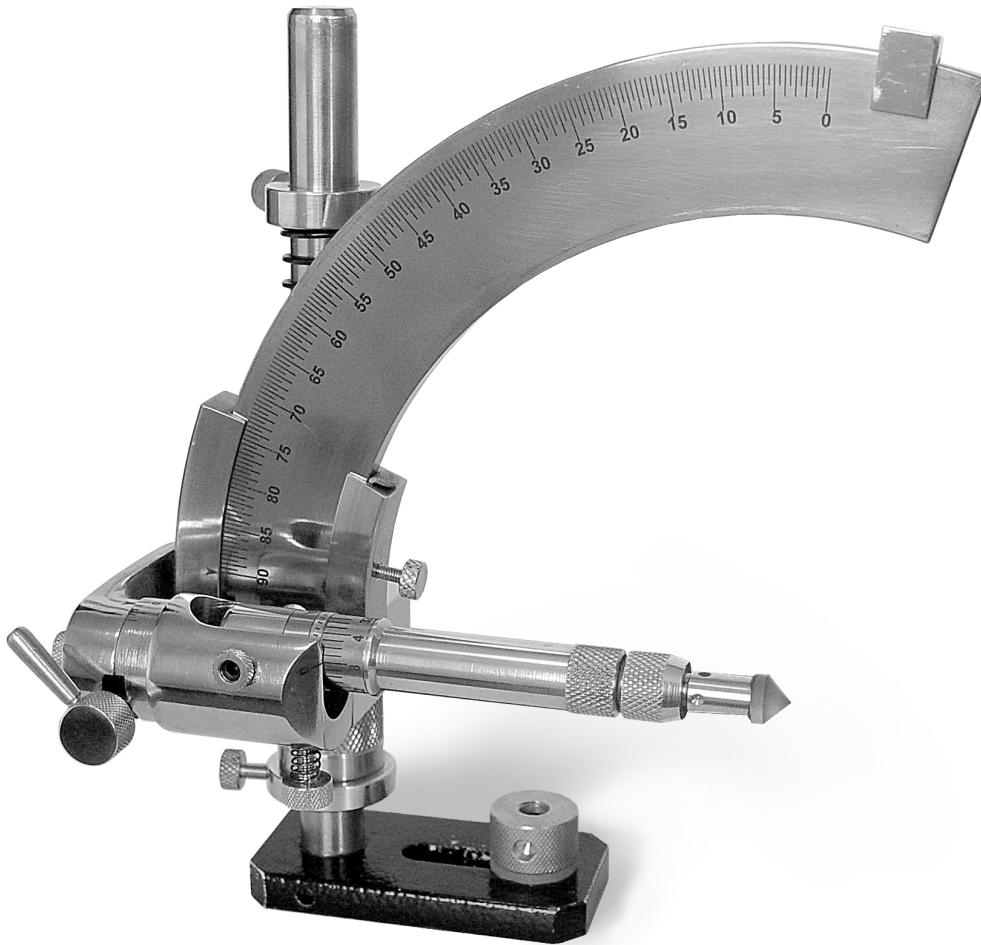


Figura 2.25: Dop com gema fixada e instalado na máquina de lapidar, em ângulo de 90° em relação ao disco de corte (LAPIDART, 2003).

O conjunto é então abaixado e entra em contato com o disco de corte, também chamado disco de talhar, geralmente feito em alumínio, aço ou cobre, e carregado de pó diamantado por pulverização, eletrodeposição ou fundição do metal ao redor das partículas de diamante. Este procedimento gera por abrasão a faceta, uma superfície plana na interface da gema e disco (Fig. 2.26).



Figura 2.26: Gema em contato com o disco de corte, em um ângulo de aproximadamente 40° (LAPIDART, 2003).

O equipamento que fixa o dop (mandril) permite a revolução da gema em 360 graus (a partir de um eixo imaginário que parte do centro da gema, em vista superior). Normalmente este mandril apresenta uma circunferência graduada em 96 divisões (*index gear*), que permite controlar as posições de corte das facetas. O corte de facetas no mesmo ângulo (a partir do rondiz) ao redor da gema forma uma carreira, conforme ilustra a Figura 2.27.

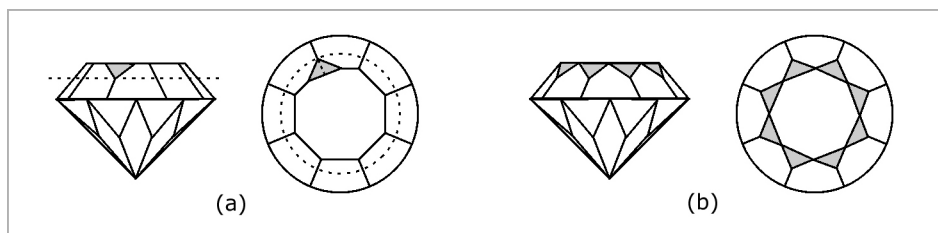


Figura 2.27: Etapa do facetamento que mostra (a) uma faceta estrela cortada na coroa de uma gema redonda tipo brilhante e (b) a primeira carreira completa, cortada no mesmo ângulo (adaptado de LAPIDART, 2001).

Este processo é repetido no corte de carreiras em diferentes ângulos. A Figura 2.28 ilustra as etapas do facetamento da coroa na lapidação redonda do brilhante padrão (*standart round brilliant cut - SRB*).

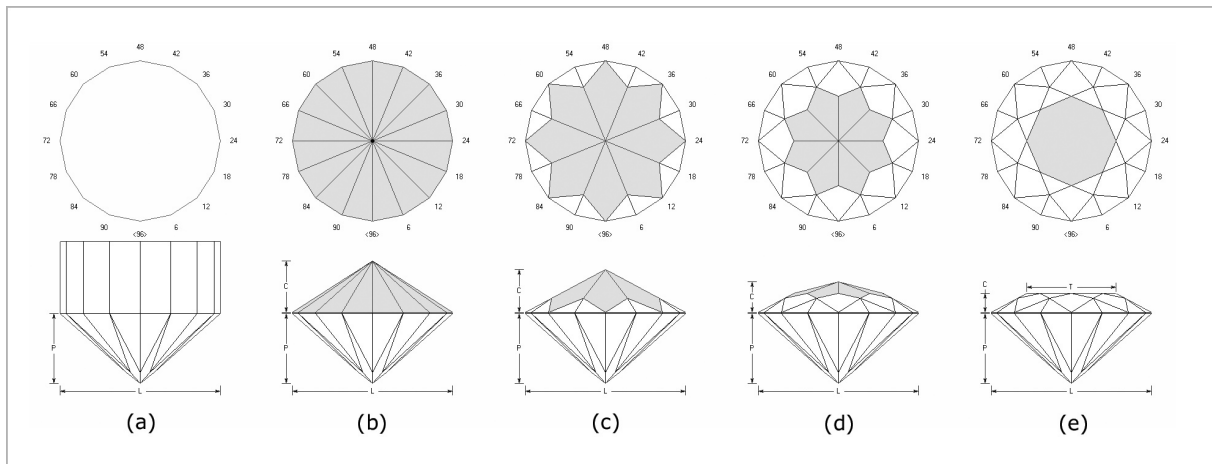


Figura 2.28: Etapas do facetamento da coroa do modelo SRB, onde o rondiz (a) é cortado a 90° , a primeira carreira (b) é cortada a 33 graus, a segunda (c) a 28° , a terceira (d) a 16° e a mesa (e) a zero grau.

Estando facetada a gema, repete-se a mesma seqüência de revoluções e angulações que geraram os cortes de cada faceta, porém desta vez em máquina de lapidar equipada com disco de polimento, promovendo o polimento de cada faceta individualmente. O disco a ser utilizado pode ser de material polimérico (Corian[®]), cerâmico ou metálico (ligas de bronze, estanho, chumbo e antimônio), carregados de pós de polimento (alumina, óxido de cério, óxido de cromo ou pó diamantado) (WEBSTER, 2001).

Quando finalizado um dos lados da gema, transfere-se a mesma para outro dop, de modo a permitir que o trabalho seja realizado na parte que estava anteriormente encoberta pela resina. Como visto, o rondiz é geralmente a região que delimita as duas porções da gema e, para que sua forma seja comprometida, deve-se observar a perfeita transferência que permite que as facetas do pavilhão e da coroa se encontrem em um mesmo plano.

Dentre todas as facetas da coroa e do pavilhão, o conjunto das facetas principais da coroa e do pavilhão controlam a maior parte das reflexões internas. Estas carreiras de facetas (Fig. 2.29) recebem a maior parte dos feixes de luz que incidem na gema e são internamente refletidos. Os ângulos de corte destas facetas devem ser projetados observando-se os ângulos críticos de reflexão total de cada material, conforme será visto no capítulo seguinte.

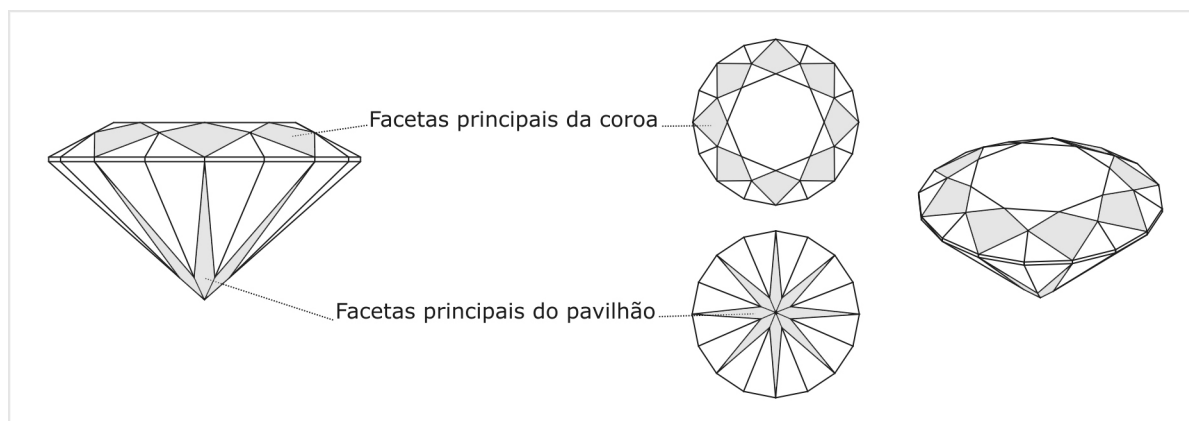


Figura 2.29: Facetas principais da coroa e do pavilhão do modelo redondo brilhante padrão.

2.1.3 Interação da luz com a matéria

Inicialmente, algumas considerações devem ser feitas em relação à natureza da luz, para o estudo de sua interação com a matéria. A teoria atual mostra a luz como uma forma de radiação eletromagnética que apresenta propriedades de partícula e de onda (NASSAU, 1996). Enquanto a maioria das características da luz pode ser explicada pela teoria ondulatória, para o detalhamento dos fenômenos de emissão e absorção é necessária a utilização da teoria quântica, de Max Planck. Essa teoria defende que a luz, como energia, pode apenas ser transmitida (ou absorvida) em pacotes de tamanho definido, chamados quanta ou fótons. A física contemporânea utiliza ambas as teorias ainda não completamente unificadas, na chamada dualidade onda-partícula. Como o trabalho dos gemólogos leva em consideração, principalmente, a propagação de raios de luz através de cristais e equipamentos óticos, a teoria ondulatória explica a maior parte destes mecanismos (WEBSTER, 2001).

Na propagação de uma frente de onda, a distância entre dois pontos de mesma fase e direção de propagação é denominada comprimento de onda (λ), visualizados esquematicamente na Figura 2.30. A amplitude da luz é determinada pela distância entre o pico da curva da onda e sua base, sendo geralmente medida em nanômetros ($\text{nm}=10^{-9}\text{m}$) (WEBSTER, 2001). A distância percorrida pela onda entre cada comprimento de onda constitui

um ciclo, e a quantidade de ciclos completos a cada segundo determina a frequência da luz, medida em *hertz* (velocidade da luz no ar (m/s) dividida pelo comprimento da onda em nanômetros). O espectro de luz visível se concentra entre os comprimentos de onda 430×10^{12} Hz ou 700nm, correspondente à cor vermelha, até aproximadamente 750×10^{12} Hz ou 400nm, região onde a luz tem a cor violeta (WEBSTER, 2001).

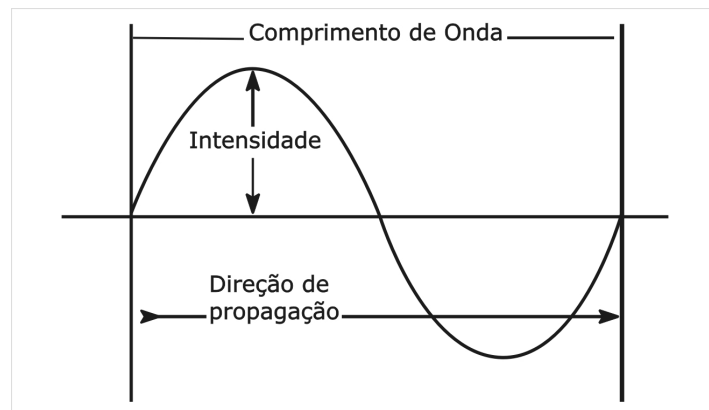


Figura 2.30: Representação do comprimento de onda.

Para a observação da interação da luz com a matéria, considera-se que a frente de onda incide pontualmente como um raio de luz de trajetória perpendicular à frente de onda. Dessa forma, um determinado feixe de luz apresenta diferentes possibilidades de interagir com a superfície de uma substância parcialmente transparente como o quartzo, conforme ilustra a Figura 2.31.

Quando atinge a superfície de separação entre dois meios (A), parte do feixe incidente é refletida de volta no mesmo meio e parte é transmitida através da interface. Utilizando-se as equações de Fresnel é possível calcular a intensidade de cada um desses feixes, em termos de fluxo de energia por unidade de área, a partir do ângulo de incidência, do índice de refração dos meios que fazem interface e do plano de incidência do raio nesta interface.

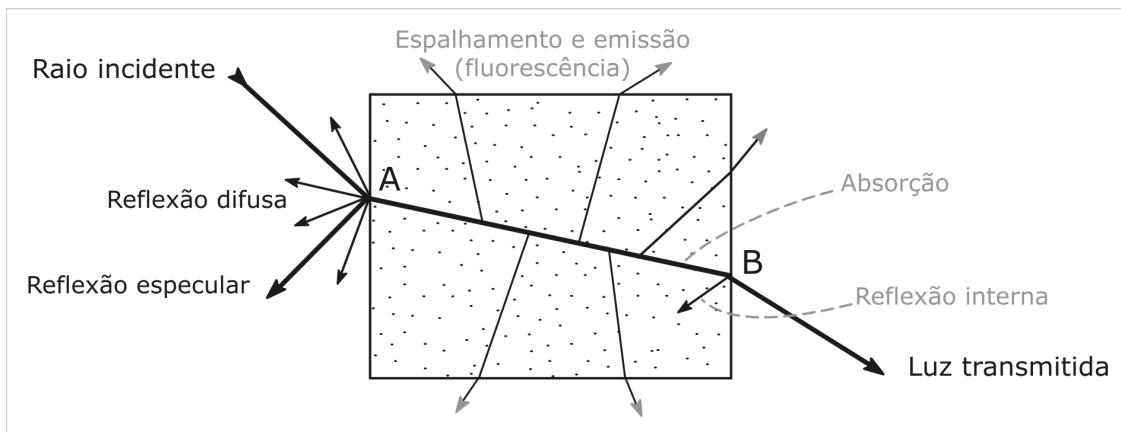


Figura 2.31: Esquema ilustrando as possibilidades de interação da luz com um sólido parcialmente transparente (NASSAU, 1996).

A reflexão que ocorre na interface é função da rugosidade da superfície, predominando a reflexão especular em superfícies mais lisas, ou a reflexão difusa em superfícies mais rugosas (NASSAU, 1996). Em uma superfície polida (que apresenta baixa rugosidade), a reflexão segue o princípio no qual o ângulo de incidência é igual ao ângulo de reflexão (Fig. 2.32). Em superfícies rugosas, a reflexão aparenta não obedecer a este princípio, e não é considerada simétrica ou especular. A natureza da observação não considera as múltiplas reflexões especulares ocorridas nos vales e cumes da superfície rugosa. Este efeito, conhecido como espalhamento (*scattering*), faz com que os raios se espalhem em várias direções.

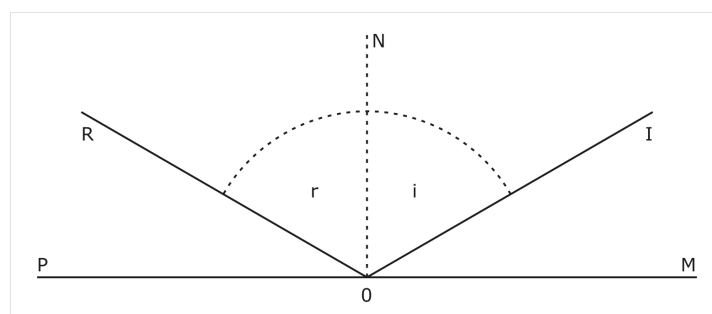


Figura 2.32: Lei da reflexão: feixe incidente e refletido apresentam ângulos iguais (WEBSTER, 2001).

O material de que trata este projeto, quartzo incolor (hialino) (ver seção 2.3), é uma substância de alta transparência, o que permite que o raio que atravessa a interface seja totalmente absorvido ou transmitido no meio. Nessa

interação, enquanto a frequência da luz permanece constante nos diferentes meios, sua velocidade e direção mudam, pela resistência à transmissão no meio opticamente mais denso, o que altera o comprimento de onda e gera o fenômeno da refração (WEBSTER, 2001). Ao se deslocar em um meio mais denso, a velocidade de um feixe de luz é reduzida, o que causa uma mudança na sua direção de propagação aproximando-se da normal à interface dos meios. Este fenômeno pode ser visualizado na Figura 2.33:

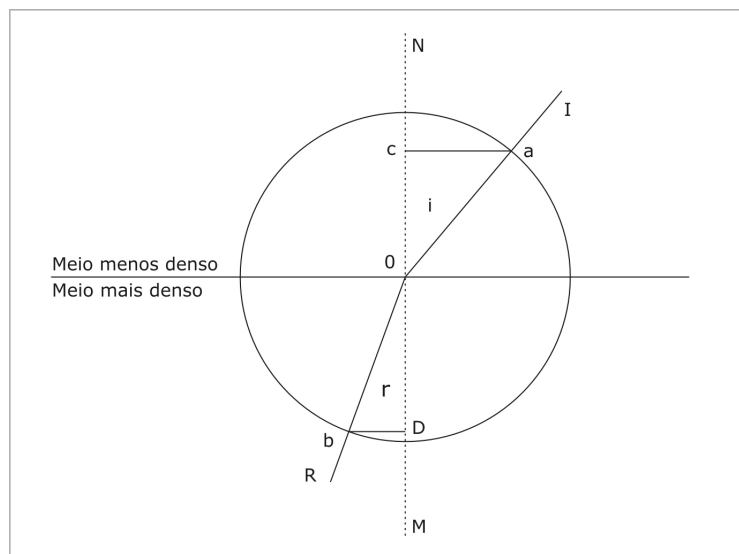


Figura 2.33: Ilustração da refração: ao se propagar em um meio mais denso o feixe de luz se aproxima da normal à interface dos meios (WEBSTER, 2001).

Representando-se geometricamente os feixes de luz por linhas retas (WEBSTER, 2001), o feixe de incidência IO atinge a interface dos meios no ponto de incidência O e é refratado na direção OR . A normal à interface é representada na figura por NM e o ângulo de incidência ION é claramente maior do que o ângulo de refração ROM . Qualquer aumento ou diminuição do ângulo do feixe incidente gera um aumento ou diminuição do ângulo do feixe refratado. Se um círculo está descrito com seu centro em O , cujo raio intercepta ambos os feixes incidente e refratado em a e b , respectivamente, e à normal são traçadas perpendiculares ac e bd , produzem-se dois triângulos retângulos Oac e Obd , cujas hipotenusas são formadas pelos feixes incidente e refratado. Como as hipotenusas dos dois triângulos têm o mesmo tamanho,

sendo ambas da mesma medida (raio do círculo O), a refração pode ser medida pela razão entre os catetos ac e bd .

Esta relação é dada pela lei de Snell (eq. 2.3), onde c representa a velocidade da luz no ar, v a velocidade da luz no meio, n o índice de refração do meio, $\text{sen } i$ o seno do ângulo de incidência e $\text{sen } r$ o seno do ângulo refratado.

$$\frac{c}{v_{(\text{meio})}} = n = \frac{\text{sen } i}{\text{sen } r} \quad (2.3)$$

Se o meio menos denso for o ar (a velocidade de propagação da luz no ar é ligeiramente inferior à sua velocidade de propagação no vácuo, e para todos os efeitos, considerada igual), a razão entre os senos dos ângulos de incidência e de refração equivale ao Índice de Refração do material, designado por n (NASSAU 1996, WEBSTER 2001). O índice de refração dos materiais é sempre maior que 1, uma vez que a velocidade de propagação da luz é sempre menor em um meio mais denso. A tabela 2.2 apresenta as velocidades da luz no ar e no diamante e mostra o índice de refração dessa gema:

Tabela 2.2: Cálculo do índice de refração do diamante (SCHUMANN, 1997).

Velocidade da luz no ar (V_1)	299 700 km/segundo
Velocidade da luz no diamante (V_2)	124 120 km/segundo
<p>Índice de refração do diamante (n_{diamante}) =</p> $V_1 (\text{ar}) / V_2 (\text{diamante}) =$ $299\,700 / 124\,120 =$ $n_{\text{diamante}} = 2,415$	

Retomando a observação da trajetória do raio no interior da matéria na Figura 2.31, na interface entre o meio e a superfície (B) ocorre alguma reflexão interna e transmissão com nova refração do feixe de luz. De acordo

com o ângulo de incidência do raio transmitido nesta interface, pode ocorrer o fenômeno óptico mais importante em se tratando de lapidação, a reflexão total interna, quando o feixe é totalmente refletido de volta no mesmo meio (Fig.2.34) (WEBSTER, 2001).

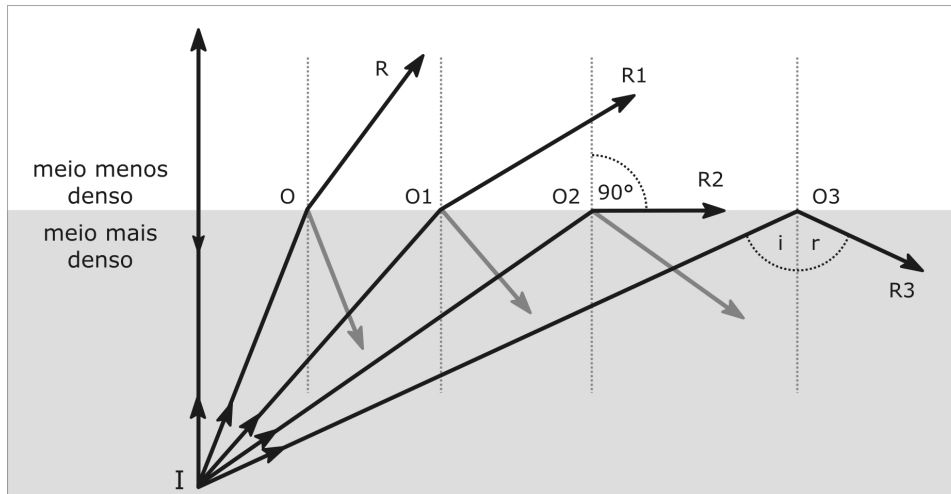


Figura 2.34: Reflexão total

Quando a luz se propaga de um meio mais denso para um meio menos denso, o feixe refratado faz com a normal um ângulo maior do que o ângulo de incidência (o feixe se afasta da normal). Logo, quando o ângulo do feixe incidente (IO) é progressivamente aumentado (IO, IO_1, \dots), o ângulo do feixe refratado (OR, O_1R_1, \dots) é cada vez maior. Desta forma, atinge-se um determinado momento onde um dado raio incidente IO_2 é refratado no segundo meio com um ângulo de 90° em relação à normal (O_2R_2). Este é o chamado ângulo crítico de reflexão total. Todo feixe que incidir em um ângulo maior do que este (como em IO_3) será totalmente refletido de volta ao mesmo meio (O_3R_3). A relação entre o índice de refração (n) e o ângulo crítico (i) é dada pela equação 2.4 (WEBSTER, 2001):

$$\text{sen } i = \frac{1}{n} \quad (2.4)$$

A maioria dos diagramas de lapidação projetados atualmente leva em consideração os ângulos críticos das gemas para projetar modelos de

lapidação que devolvam a maior parte dos raios de luz à perspectiva do observador. Este aspecto das gemas lapidadas é denominado brilhância (Fig 2.35) e será retomado na seção 2.1.5 – Modelo Ótimo.

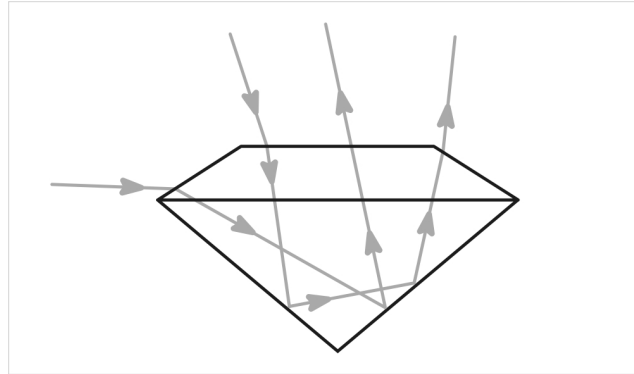


Figura 2.35: Ilustração da brilhância: feixes de luz sendo internamente refletidos e retornados à perspectiva do observador.

Quando um feixe de luz branca é refratado para fora do material, emergindo de um meio opticamente mais denso, os diferentes comprimentos de onda que compõem esta luz sofrem maior ou menor refração, de acordo com sua energia. Os feixes de maior energia (luz violeta) apresentam menores comprimentos de onda e por este motivo sofrem maior refração. Gradativamente, cada comprimento de onda é menos refratado, o que causa a separação da luz branca nas cores do espectro visível. A dispersão da luz nas cores do espectro visível foi explicada por Newton na simples experiência de fazer atravessar um feixe de luz por um prisma (WEBSTER, 2001). Nas gemas, o fenômeno da dispersão da luz ao emergir pela coroa de uma gema lapidada é conhecido como fogo (*fire*). Este efeito, ilustrado a Figura 2.36, é mais observado nas gemas incolores como o diamante e o quartzo, uma vez que a cor das gemas coloridas interfere na observação do fenômeno.

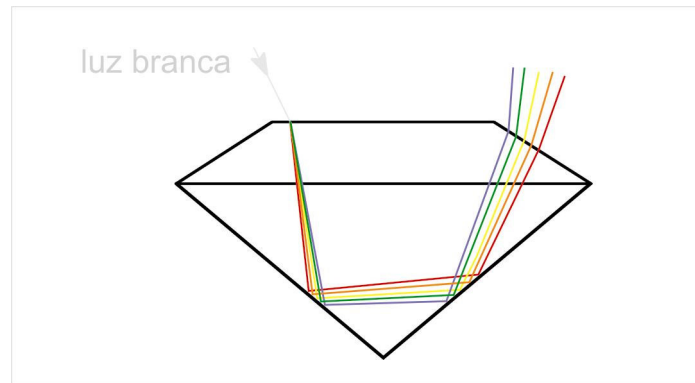


Figura 2.36: Ilustração da dispersão de um feixe de luz branca em gema lapidada.

O brilho de uma gema lapidada, causado pela reflexão da luz na interface entre sua superfície e o meio, é chamado lustre (glare), e depende do índice de refração (IR) da gema e da qualidade do seu polimento. O quartzo e a maioria das gemas, excetuando-se o diamante, algumas granadas e zircônias, apresentam lustre de aparência vítrea (WEBSTER, 2001), e a observação deste fenômeno se confunde na observação da brilhância total da gema. Em geral, um diamante lapidado retorna 17% da luz que incide perpendicularmente em sua superfície externa, enquanto um vidro polido na mesma forma retorna apenas 4% (GREEN et al, 2001c). Esse fenômeno foi modelado na Figura 2.37, que permite visualizar a diferença do lustre entre o diamante (IR=2.42) e o quartzo (IR=1.54), exclusivamente a partir do IR das gemas.

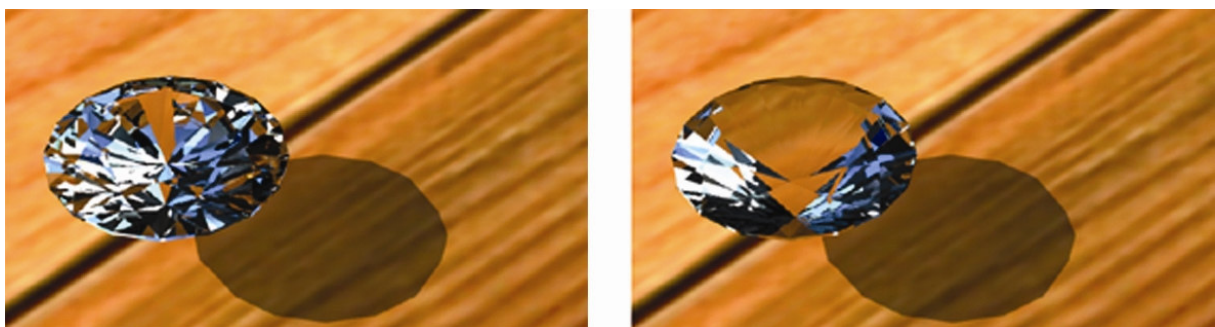


Figura 2.37: Modelação 3D de gema lapidada com IR equivalente ao diamante (esquerda) e ao quartzo (direita).

Fenômenos secundários ao problema

A percepção de uma determinada cor se dá quando uma gema absorve seletivamente diferentes comprimentos de onda, apresentando a cor daqueles que não absorve. Como a luz branca é composta de todas as cores, quando transmitida por um objeto transparente como um vidro de sinal de trânsito vermelho, este absorve praticamente todos os comprimentos de onda azuis, verdes e amarelos, enquanto o vermelho passa livremente. Por esta razão o olho humano percebe a sensação de vermelho. Todos os objetos têm suas cores derivadas da luz que neles incidam ou sejam transmitidas. São os raios absorvidos (invisíveis) que determinam a cor percebida, ou seja, a cor vista é aquela transmitida, e não a cor residual, que é absorvida. As cores residuais das gemas são, entretanto, geradas de forma mais complexa. Alguns comprimentos de onda da luz incidente podem ser especularmente ou difusamente refletidos da superfície da gema, alguns podem interagir com a estrutura atômica da gema e serem seletivamente absorvidos, ou re-emitidos em menores comprimentos de onda como emissões de luminescência, alguns podem ser internamente refletidos e sofrerem dispersão, alguns podem ser espalhados ou sofrerem interferência de difração por estruturas específicas na gema (WEBSTER, 2001). Na ametista, por exemplo, o elemento de impureza ferro causa distorção na rede cristalográfica que gera a absorção pelo material da luz de cor amarela, verde e laranja, o que causa a transmissão da luz (cor) violeta característica. Além disso, a cor apresentada por um objeto difere em três sentidos (WEBSTER, 2001):

- Matiz: é o comprimento de onda predominante, pelo qual a gema pode ser descrita como verde, azul ou vermelha;
- Saturação: é a quantidade de luz branca misturada ao matiz, por exemplo, um cinza é um matiz negro adicionado de branco;
- Intensidade: grau que aquela cor difere de um cinza do mesmo tom.

A luz branca emitida pelo sol (ou qualquer outro corpo a uma temperatura de 6.000° C) consiste em um grande número de comprimentos de onda no espectro visível. A faixa visível do espectro eletromagnético estende-se do λ 780nm (vermelho) a 380nm (violeta), passando pelas demais cores: laranja,

amarelo, verde e azul, que imperceptivelmente misturam-se umas nas outras. Por este motivo o uso de termos como vermelho-amarelado e amarelo-esverdeado é recomendado pelos gemólogos (WEBSTER, 2001). De fato, ao se comparar pequenas porções do espectro visível, um olho treinado pode distinguir entre 100 matizes perceptivelmente diferentes. Somando a isto variações em saturação e intensidade possíveis para cada matiz, são consideradas mais de um milhão de ‘cores’ perceptíveis. Por este motivo a cor percebida de uma gema como água-marinha pode variar entre um matiz ‘verde-azul-acinzentado’, fraco, não saturado, extremamente claro ou um matiz ‘azul profundo’, forte e escuro. Polli (1999), tendo aprofundado o estudo das causas de cor nas gemas através de vários autores, conclui que as teorias sobre as causas da cor em gemas são quatro: teoria do campo cristalino (íons metálicos dispersos e centros de cor), teoria dos orbitais moleculares ou átomos múltiplos, teoria das bandas (de condução)–*band gaps*, teorias da óptica física ou dos fenômenos físicos. O detalhamento do estudo destes modelos exigiria um tratamento do tema além do pretendido neste trabalho.

Dois fatores principais indicam a cor de um objeto além de sua cor residual: a cor sob a qual este é iluminado e o aparelho que interpreta estas imagens, geralmente o olho humano (WEBSTER, 2001). Nesse projeto, para efeitos de simplificação do modelo, o material adotado é incolor e não apresenta cor residual, o aparelho que interpreta estas imagens o faz quantitativamente e a luz incidente é branca. Como diferentes misturas de luzes coloridas compõem a luz branca, para efeitos de padronização a luz adotada para iluminação deve apresentar uma distribuição determinada de comprimentos de onda. A fonte de luz artificial apresenta uma distribuição espectral próxima da luz do dia, como visualizada no hemisfério norte, ou seja, clara e uniformemente distribuída entre 10 e 14hs. A cor de um corpo negro incandescente a 6227°C é a que mais se aproxima desta luz (WEBSTER, 2001).

A polarização dos feixes de luz incidentes nas gemas é um fenômeno relevante no estudo avançado de modelos de lapidação. Em seu estado natural, a luz se comporta como uma onda que apresenta campos eletromagnéticos de vibração das partículas orientados perpendiculares à sua

direção de propagação, em infinitos planos paralelos de igual probabilidade (Fig. 2.38). Ao interagir com material de estrutura cristalina ordenada este funciona como um filtro que orienta o campo elétrico da luz em uma direção, e a luz na forma de uma onda plana é dita linearmente polarizada.

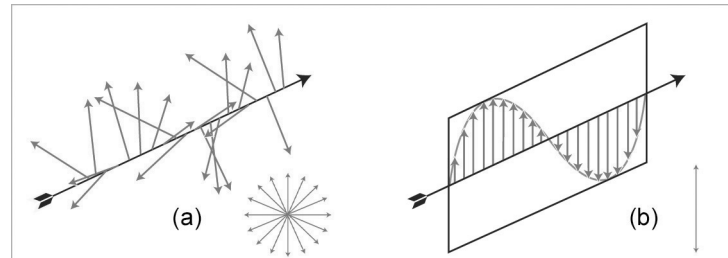


Figura 2.38: Feixe de luz com campo eletromagnético não polarizado (a) e feixe plano-polarizado (b) (GREEN et al, 2001e).

Em cada interação com a matéria o feixe de luz sofre nova polarização e orientação da vibração do campo elétrico a ele associado, configurando o chamado estado de polarização. Estes estados de polarização determinam quanto da energia do raio que será refletida na próxima interface e quanto será transmitida. Por este motivo, ignorar os estados de polarização quando do cálculo de caminhos dos raios de luz em diamantes de diferentes proporções pode trazer resultados inexatos (GREEN et al, 2001e).

Pela anisotropia apresentada pelos minerais não cúbicos (quartzo inclusive), a interação da luz com sua estrutura cristalina faz com que o índice de refração desses cristais não seja necessariamente o mesmo em todas as direções cristalográficas. De acordo com a simetria interna de um cristal, podem ocorrer dois tipos de básicos de comportamento ótico:

- Isotrópico: apresenta igual índice de refração em todas as direções. Ocorre em materiais vítreos e cristais cúbicos como granada, fluorita e diamante.
- Anisotrópico: apresenta índices de refração diferentes nas diferentes direções cristalográficas. Ocorre nos demais sistemas cristalográficos.

Nos cristais anisotrópicos a luz se decompõe em dois raios de vibração perpendicular e de velocidade diferentes devido à estas diferenças entre os índices de refração, que se denominam N (raio lento) e n (raio rápido). A diferença entre os índices de refração extremos ($N-n$) se denomina

birrefringência e é uma propriedade característica de cada cristal. Os materiais de comportamento ótico anisotrópico podem ser ainda classificados em relação aos eixos óticos. Se os cristais apresentam direções y e z equivalentes, diferentes do seu eixo x, este é denominado eixo ótico. Este é o caso de materiais anisotrópicos de cristalização trigonal, como o quartzo. Materiais anisotrópicos podem ainda ser divididos em dois tipos:

- Uniaxial, com dois índices de refração (sistemas tetragonal e hexagonal).
- Biaxial, caracterizado por três índices de refração (sistemas triclínico, monoclínico e ortorrômbico).

Os materiais cristalinos absorvem mais luz em um determinado plano de incidência, o que faz com que a luz seja cada vez mais polarizada ao ser transmitida através do material. Esta anisotropia na absorção de cor gera o dicróismo, algumas gemas apresentam diferentes cores ou saturações dependendo da direção observada, pela diferente absorção da luz nos eixos óticos de cristais que apresentam birrefringência. Nos sistemas trigonal, tetragonal e hexagonal, podem ser identificadas duas cores ou saturações, e as gemas são denominadas dicróicas.

2.1.4 Diagrama de Lapidação

O conjunto de informações necessárias para reproduzir um determinado modelo de lapidação é conhecido como diagrama de lapidação. Os modelos de lapidação podem ser projetados e seus diagramas visualizados em um programa computacional específico de lapidação virtual denominado GemCad for Windows, cujo funcionamento será explicado na seção 2.2.2 – Modelo.

Os dados contidos em um diagrama de lapidação (Fig. 2.39) são: quatro vistas do poliedro (superior, lateral, posterior e elevação frontal, abaixo) e informações relevantes, como nome do modelo, seu autor, data e local de publicação, a gema para a qual foi idealizado (Índice de Refração utilizado), a

quantidade de facetas, o tipo de simetria, a indexação utilizada (revoluções no eixo de simetria central, da vista superior) e suas proporções.

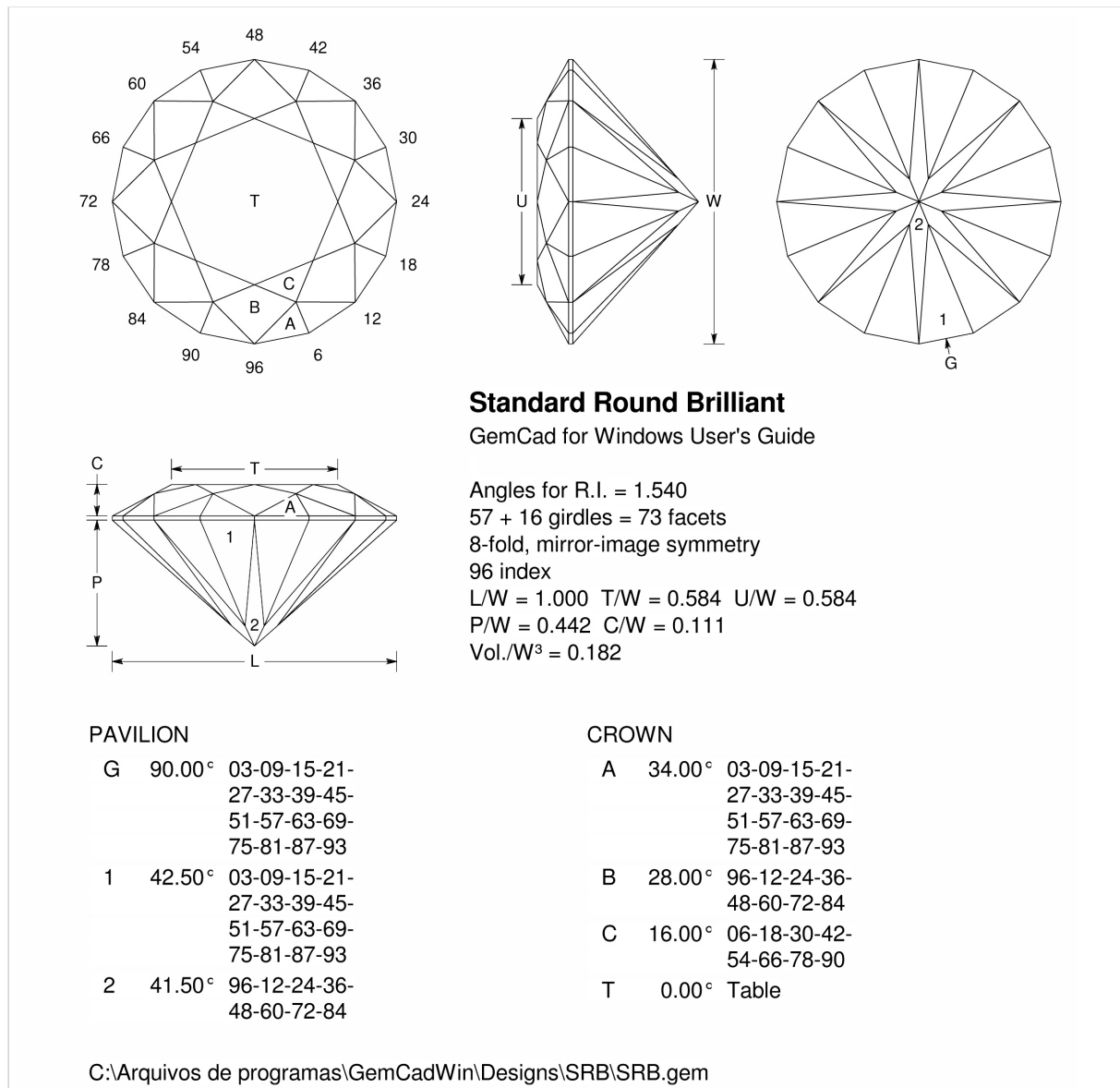


Figura 2.39: Diagrama de lapidação do modelo SRB (STRICKLAND, 2002).

Como a maioria dos modelos provém da literatura inglesa, este projeto adotará a nomenclatura das partes nesta língua, indicada entre parênteses. As proporções do modelo são medidas em relação às partes de uma gema lapidada, como visto na seção 2.1.2 – Processos de Lapidação. Geralmente, são apresentadas as razões entre largura e comprimento (L/W), entre pavilhão e altura (P/W) e entre coroa e altura (C/W).

Normalmente o diagrama apresenta a razão entre a mesa e comprimento (T/W) (existem modelos cujas coroas apresentam diversas facetas de tamanhos similares e nenhuma faceta maior que possa ser considerada como mesa). Quando o modelo não apresenta relação $L/W=1,00$ (ex. forma retangular do rondiz, $L/W=1,4$), indica-se a medida da mesa na vista lateral como U, e o diagrama ilustra a razão entre a mesa e a largura da gema (U/L).

O diagrama mostra também o aproveitamento do modelo de lapidação calculado a partir de um cubo, considerando esta a forma do material bruto a partir do qual a gema foi lapidada (as arestas do cubo tangentes ao plano do rondiz na sua maior direção). A fórmula de aproveitamento utilizada pelo software GemCad é dada então pela razão entre o volume do poliedro obtido e o volume de um cubo de aresta igual à maior medida do rondiz da gema (tomada geralmente pela largura, W) (STRICKLAND, 2002).

Além das informações básicas sobre o modelo, um diagrama de lapidação típico apresenta as carreiras de facetas que formam a coroa e o pavilhão geralmente numeradas em seqüência crescente, de acordo com o ângulo utilizado para seu corte a partir do plano do rondiz; os ângulos necessários para o corte de cada carreira e as divisões do *index* utilizadas para cortar cada faceta individual em uma carreira.

Geralmente, estes dados apresentados em um diagrama de lapidação são suficientes para se lapidar uma gema no modelo desejado. A importância de cada conjunto de facetas nos processos de reflexão e refração da luz no interior das gemas será discutida no capítulo seguinte.

2.1.5 Modelo Ótimo

A evolução histórica da lapidação mostra que o objetivo do desenvolvimento de modelos é maximizar algumas características intrínsecas de um dado mineral precioso para sua utilização como objeto de adorno. Um conjunto de parâmetros que proporciona os melhores resultados (efeitos óticos) para um modelo de lapidação é denominado modelo ótimo.

A título de exemplo, o modelo de lapidação em cabochão é o modelo apropriado para as gemas que apresentam os efeitos óticos descritos na tabela 2.1 (p.14). Especificamente, parâmetros a serem alterados em uma gema lapidada desta forma são a *curvatura do domo superior* que esta deve apresentar de modo a gerar o ‘efeito olho-de-gato’ mais visível, a *proporção entre sua largura e comprimento* de modo a posicionar o olho na maior região e o *polimento ou não do fundo da gema* de maneira a reforçar o efeito. O conjunto desses parâmetros aplicados, que teoricamente configura uma maior visibilidade do acatassolamento, pode ser chamado de modelo ótimo. Para cada gema utilizada na joalheria, existem diferentes efeitos óticos almejados nestes modelos de lapidação.

Diamante, uma breve análise de valor

O diamante é uma das gemas de mais alto valor intrínseco atualmente e diferencia-se das demais por possuir oferta e demanda contínua, pois sua exploração e venda são controladas na maior parte por uma única empresa. A oferta constante (em 1950, METTA cita estimativa de que a África do Sul sozinha era capaz de fornecer diamantes ao mercado mundial por 100 anos) é assegurada pela forma de cartel adotada pela empresa controladora da sua exploração, a *DeBeer's Trading Company* (DTC), empresa que também investe maciçamente em promoção, visando manter a demanda aquecida. Uma das campanhas publicitárias idealizadas para o diamante foi indicada em 1999 como contendo “o melhor *slogan* do século XX”: *Um diamante é para sempre* (DE BEER'S, 2004). Essa campanha foi iniciada em 1947 e incentiva a retenção do produto por gerações, na forma de jóia de família. Outra promoção em escala global criou o produto anel de noivado, “simbolizando na aliança de casamento modelo solitário os ideais de preciosidade e eternidade que representam o símbolo da união de um casal no casamento” (SCHOENUNG, 2003).

A empresa também investe, em conjunto com os *sight-holders*⁴, na pesquisa e desenvolvimento de novos modelos de lapidação, criados e promovidos como cortes com marca registrada, os chamados *branded cuts*. Em 1989 novos modelos de lapidação para diamantes foram propostos por Gabi Tolkowsky para a De Beer's. Seus modelos foram projetados para maximizar o aproveitamento de algumas formas irregulares predominantes devido aos hábitos cristalinos e de clivagem do diamante, ou para melhorar a aparência de gemas que apresentam muitas inclusões ou cor acentuada (WEBSTER, 2001). Cortes patenteados pelos *sight-holders* são o *trillion cut*, de forma triangular e com 50 facetas; o *quadrillion*, retangular com 49 facetas (patenteado pela Âmbar Diamonds); o Princess Pluss da empresa E.P.D Ltd., com 40 facetas a mais do que a lapidação Princess tradicional; o *Royal Asscher Cut* da M. Fabrikant & Sons, dentre vários outros. Com esse tipo de investimento, a empresa que hoje controla mais de 80% do mercado mundial de diamantes, planeja crescer em 50% das vendas nos próximos dez anos (SCHOENUNG, 2003).



Figura 2.40: Modelos de lapidação patenteados Princess Pluss e Royal Asscher cut.

Pela importância desse mercado em termos de valores financeiros movimentados, diversos estudos são feitos visando entender os principais fatores que influenciam a aparência dos diamantes lapidados. Esta aparência pode ser descrita em termos de comportamento ou desempenho ótico (SASIÁN ET AL, 2003).

⁴ Sight-holders são as pessoas físicas (cerca de 120 atualmente) detentoras do direito (*sight*) de comprar parcelas de gemas em bruto para lapidação ou revenda diretamente da DTC.

Modelos ótimos para o diamante

Após o século XVI, a técnica do facetamento já era utilizada para a maioria das gemas transparentes, em diversos padrões de facetamento desenvolvidos a partir do *table cut*. A evolução destes modelos avançava empiricamente no desenvolvimento natural da técnica e uma vez que o custo de experimentações com valioso material gemológico é proibitivo. No século XX, surgiram os primeiros modelos teóricos para tentar explicar o problema.

O primeiro pesquisador a providenciar uma análise matemática da lapidação foi Marcel Tolkowsky, em 1919 (WEBSTER 2001, DODSON 1978, HEMPHILL et al 1998), criando um modelo teórico da interação da luz com o diamante lapidado na forma redonda tipo brilhante. Seu trabalho apresenta um conjunto de proporções encontradas visando maximizar os efeitos de brilhância e fogo para este tipo de corte. O trabalho de Tolkowsky consistia em uma introdução contando a história do corte do diamante, seguido por estudo da Óptica como era então conhecida e a análise da interação de um feixe de luz com uma seção bidimensional do diamante (Fig. 2.41). Nesta análise, Tolkowsky seguiu o caminho de feixes de luz incidentes em um diamante na forma de um triângulo invertido, que representa o pavilhão de uma gema sem coroa, onde a mesa já se inicia no rondiz. As proporções entre altura do pavilhão e comprimento do rondiz definem os ângulos nos quais as facetas principais do pavilhão devem ser cortadas, em relação ao plano da mesa da gema.

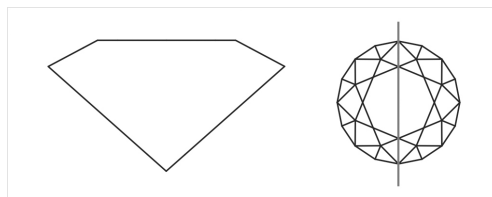


Figura 2.41: Seção bidimensional do diamante utilizada por Tolkowsky.

Considerando os raios incidindo perpendicularmente à mesa, Tolkowsky faz uma análise dos ângulos que o pavilhão deve apresentar para que mais feixes de luz sofram sucessivas reflexões totais internas e sejam devolvidos (como em um prisma retro-refletor) à perspectiva do observador. Utilizando a

mesma abordagem, definiu ângulos para o corte das facetas principais da coroa, visando a maior dispersão da luz (fogo) possível de ser obtida sem sacrificar a brilhância, bem como o tamanho da mesa para uma combinação ótima desses dois fatores. As proporções definidas por Tolokowsky (Figura 2.42) tornaram-se padrão de referência, sendo consideradas pela *Gemmological Association of America* (GIA) o melhor conjunto de proporções para o modelo redondo brilhante até recentemente (DODSON, 1978).

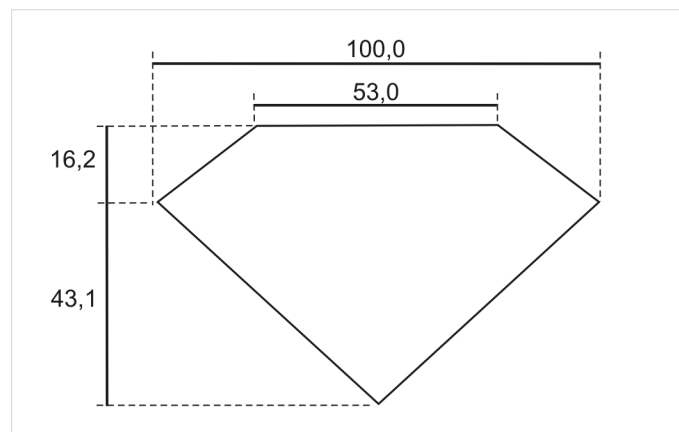


Figura 2.42: Proporções definidas por Tolokowsky (COWING, 2003).

Após Tolokowsky, outros pesquisadores utilizaram métodos similares para obter novos conjuntos de proporções ideais, como Johnsen, Rosch e Eppler (HEMPHILL et al, 1998), sem conseguir alterar muito os valores encontrados pelo primeiro. Ao tipo de resultados encontrados convencionou-se chamar cortes ideais (ideal cuts), e estas pesquisas são as pioneiras na busca de modelos ótimos para gemas lapidadas.

Em 1978, o pesquisador inglês J. S. Dodson propôs um modelo mais avançado para o problema, utilizando recursos computacionais para analisar pela primeira vez um modelo tridimensional do diamante facetado na forma redonda do corte brilhante. Seu trabalho analisava estatisticamente as proporções que geravam os resultados de brilhância, fogo e um novo efeito que compõe a aparência do diamante identificado em 1946 pelo *Gemological Institute of America* (GIA), a cintilação, que consiste na reflexão alternada de flashes de luz pela coroa, mostrando facetas ora iluminadas, ora escuras. A incorporação deste efeito se torna importante para aproximar as condições de

observação do diamante ao que ocorre na realidade, quando o observador inclina lentamente a gema em relação ao plano da mesa, variando sua angulação de aproximadamente zero a 45°. A observação como realizada por Tolkowsky e outros pesquisadores desconsiderava este efeito, pois era realizada de uma perspectiva estática situada a aproximadamente 90° do plano da mesa.

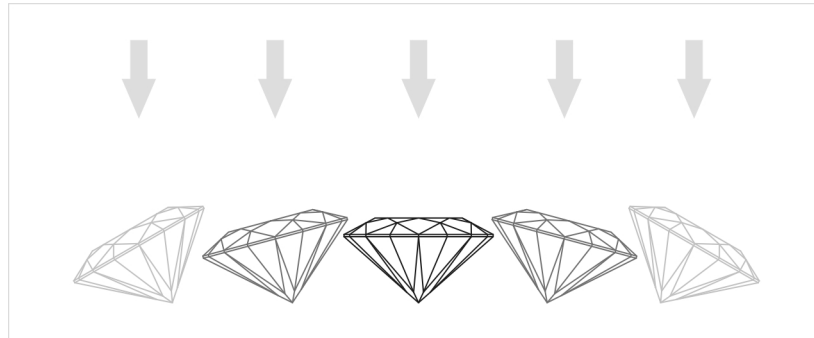


Figura 2.43: Ilustração da movimentação da gema promovida pelo observador (cuja perspectiva é representada pelas setas).

O modelo de Dodson, mais sofisticado em relação aos previamente utilizados, apresenta um grande avanço no estudo do problema. Seus resultados apresentam gráficos para 120 tipos de combinações de proporções, mostrando complexa interdependência dos três aspectos em relação ao ângulo do pavilhão, altura da coroa e tamanho da mesa (DODSON, 1978; HEMPHILL et al, 1998).

Nesta época (e até hoje, apesar de contar com quase cem anos de estudos) já existiam diversos sistemas de classificação da lapidação redonda brilhante padrão que mostram diferentes conjuntos de proporções ideais para o corte de diamantes (ANEXO B). Esta situação levou o *Gemological Institute of America* (GIA), maior instituto de pesquisa gemológica do mundo atualmente, a anunciar em 1991 o início do mais aprofundado estudo já realizado sobre a lapidação destas gemas.

Utilizando um modelo similar ao de Dodson, esses estudos são conduzidos desde 1989 pela equipe do GIA (HEMPHILL et al, 1998) sobre o problema da interação da luz com um diamante lapidado na forma redonda corte brilhante,

sendo o modelo adotado considerado altamente realístico (COWING, 2003). O modelo diferencia-se do adotado por Dodson por atribuir pesos aos ângulos de saída dos feixes de luz que são devolvidos para o observador. Aos feixes que emergem próximos de 90° em relação à gema são computados maior valor do que aos que emergem em ângulos menores, que não são direcionados à perspectiva do observador (Figura 2.44). Utilizando este sistema de medição de brilho, denominado WLR (*weighted light return* – retorno de luz compensado), a equipe do GIA mostra que o modelamento matemático e análise quantitativa via *ray-tracing* são técnicas adequadas ao estudo do problema. Porém, após dezenas de milhares de testes para cada conjunto de proporções e análise das curvas de WLR atingidas (Figura 2.45), a equipe chegou à conclusão de que existem vários conjuntos de proporções nos quais uma gema pode ser lapidada para se atingir resultados de performance ótica similar (HEMPHILL et al, 1998; 2001).

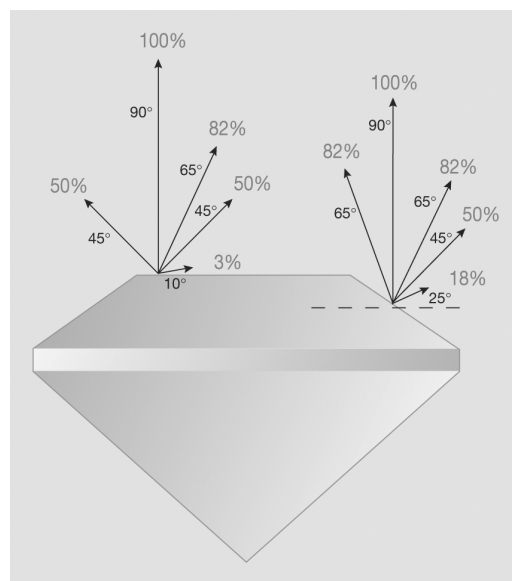


Figura 2.44: No modelo adotado pelo GIA, os valores dados aos ângulos de saída das gemas variam com o co-seno ao quadrado do ângulo (HEMPHILL et al, 1989).

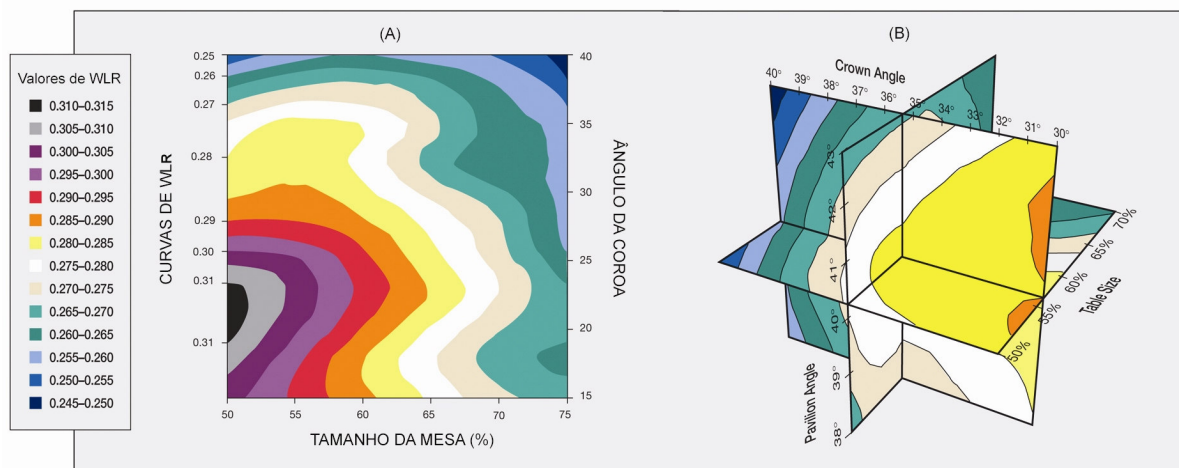


Figura 2.45: Resultados do GIA: (A) WLR em função do tamanho de mesa e ângulo da coroa; e (B) WLR em função do tamanho de mesa, ângulo da coroa e ângulo do pavilhão (HEMPHILL et al, 1998).

Observou-se no levantamento bibliográfico para o presente projeto que a quase totalidade dos estudos realizados sobre modelos de lapidação de gemas são voltados para o diamante, e seus resultados adaptados para as demais gemas. O estudo de modelos ótimos de lapidação para a aplicação em gemas coradas, como o quartzo, por exemplo, é incipiente (SASÍAN et al, 2003).

2.2 Modelos geométricos para as gemas

No modelamento matemático de lapidação o poliedro virtual que representa a gema lapidada é gerado em um software tipo CAD específico para este fim, encontrado comercialmente. Este software fornece cálculos de brilhância e aproveitamento do modelo de lapidação visualizado, de acordo com o material gemológico utilizado. O modelo adotado pelo software para a realização desses cálculos será explicado neste capítulo, uma vez que os valores encontrados serão utilizados para a entrada de dados na ferramenta computacional baseada em RNAs desenvolvida nesse projeto.

2.2.1 Simulação computacional

Para a visualização de modelos de lapidação o software utilizado é o GemCad for Windows, versão 1.09, de Gemsoft Enterprises. Esse programa obedece aos princípios básicos de funcionamento de outros softwares tipo CAD com a vantagem de ter sido desenvolvido especificamente para o projeto de modelos de lapidação, pois simula o funcionamento de uma máquina de lapidação, ao utilizar comandos que controlam a revolução da gema em torno do eixo do mandril e os ângulos de corte de cada carreira de faceta. Com esse programa é possível recriar virtualmente o processo de lapidação, acompanhando-se vistas tridimensionais exatas da gema, à medida que esta vai sendo lapidada (Fig. 2.46).

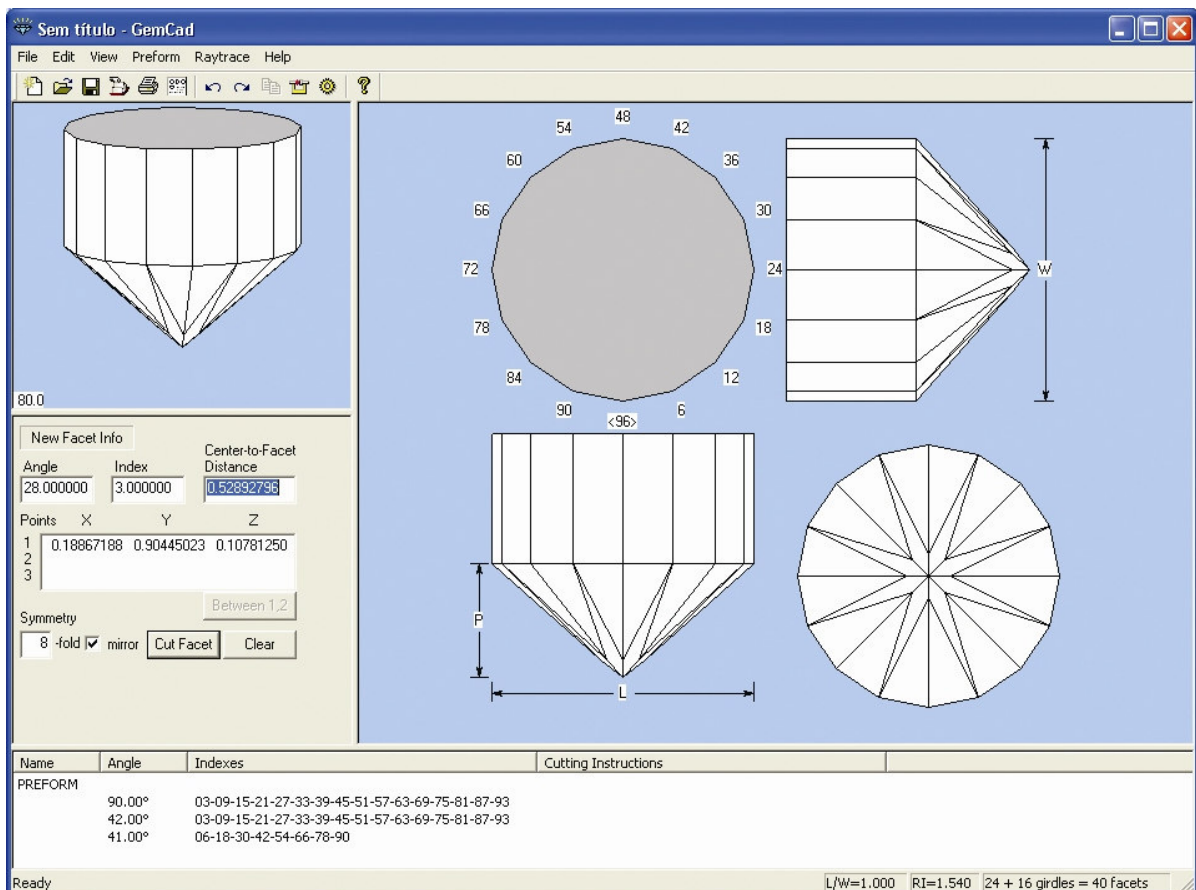


Figura 2.46: Lapidação do pavilhão completa em modelo SRB no software GemCad.

O tipo de arquivo CAD gerado é um objeto tridimensional composto por formas geométricas planas como retângulos, triângulos, losangos e trapézios.

Quando pronto, um modelo de lapidação é representado em um diagrama de lapidação que indica quatro vistas da gema, seus ângulos de corte, indexes e dimensões, como mostrado no cap. 2.1.4.

Este programa apresenta três aplicações principais (STRICKLAND, 2002):

- Projetar um novo modelo de lapidação, utilizando uma ferramenta que simplifica o processo;
- Editar um modelo de lapidação, modificando seu desempenho ótico para diferentes materiais ou deformando o modelo para adequação a uma forma específica de gema bruta;
- Lapidar virtualmente uma gema sem o uso de dispendioso material gemológico.

Para a visualização do desempenho ótico do modelo, o *software* dispõe de um comando que traça feixes de luz incidentes perpendiculares à mesa da gema, permitindo observar o comportamento da luz no interior da gema. Esta ferramenta possibilita corrigir suas proporções de modo a minimizar possíveis perdas de luz que estejam ocorrendo no modelo.

O presente projeto utilizou também o programa GemRay, da mesma companhia, que, consistindo em um programa associado ao GemCad, gera imagens em escala de cinza de uma gema facetada sob algumas condições simuladas de iluminação, conforme ilustra a Figura 2.47:

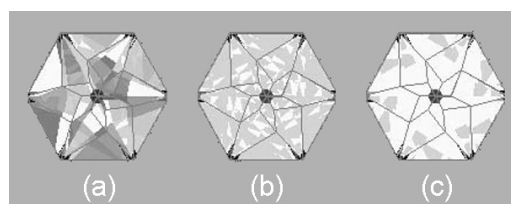


Figura 2.47: Modelo 2 *Spin Star* renderizado sob as condições de iluminação (a) Aleatório ou RANDOM, (b) Co-seno ou COS e (c) Isométrico ou ISO (GRAHAN, 2004).

Para a criação dessas imagens, o GemRay realiza uma medição da quantidade de luz retornada à perspectiva do observador da gema, utilizando

técnicas de *ray tracing* e *rendering*. *Renderização* (rendering), na computação gráfica, é o processo de produção de imagens (na forma de desenho ou fotografia) a partir de um tipo de informação abstrata como gráficos vetoriais ou esqueletos tridimensionais (*wireframe sketch*). *Ray tracing* é um dos métodos utilizados em computação gráfica tridimensional para *renderizar* uma imagem. Funciona ao traçar o caminho percorrido por um feixe de luz na cena visualizada, e calcular sua reflexão, refração, ou absorção, na interseção com qualquer objeto na cena. A cena é o universo que reúne o objeto iluminado, a condição de iluminação e o observador deste conjunto. O modelo adotado pelo programa GemRay posiciona a gema no centro de um hemisfério com seu rondiz paralelo à base da mesma, conforme visualizado na Figura 2.48.

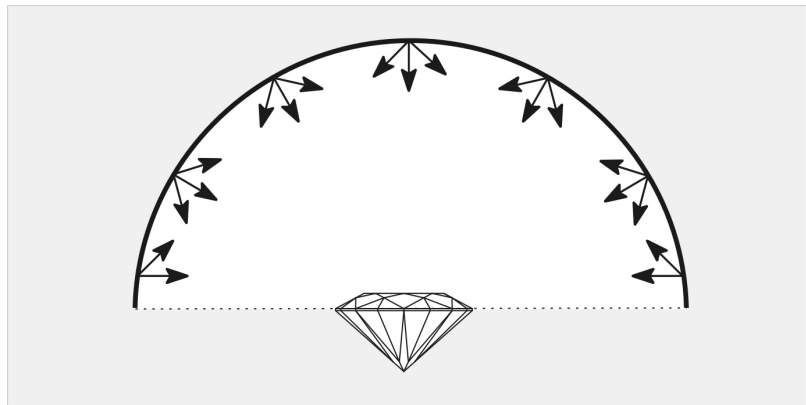


Figura 2.48: Esquema ilustrando a geometria utilizada para a renderização no programa GemRay.

A pesquisa realizada por este projeto não encontrou referência sobre as proporções do hemisfério e da gema. Informa-se apenas “que o hemisfério está a uma grande distância da gema” (STRICKLAND, 1983). As três imagens *renderizadas* da gema (vistas na Figura 2.47) são geradas a partir dos três padrões de iluminação projetados na superfície côncava do hemisfério, observadas de uma vista superior e centralizada pela gema. O modelo de iluminação RANDOM apresenta um padrão aleatório de áreas de luz claras e escuras e fornece uma visualização dos efeitos de cintilação e brilhância da gema (Fig. 2.49).

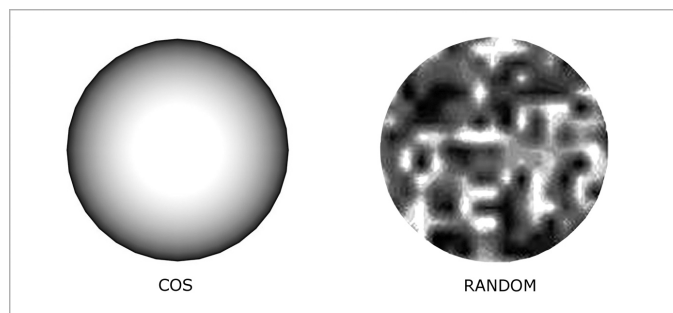


Figura 2.49: Padrões de iluminação: Co-seno (COS) e aleatório (RANDOM) (STRICKLAND, 1983).

No modelo de iluminação COS, a intensidade da luz branca varia com o co-seno do ângulo de inclinação do feixe, a partir de sua posição no hemisfério, ou seja, é mais claro na região diretamente acima da gema e escurece na direção do horizonte. Este modelo fornece uma visualização da direção de onde provém os feixes de luz refletidos na gema, e se presta à análise direcional da brilhância. O modelo ISO apresenta intensidade de luz uniforme em todas as direções, como se o hemisfério fosse uniformemente iluminado. Este tipo de iluminação presta-se à observação da brilhância como observada em condições de iluminação difusa, como ocorre na realidade (STRICKLAND, 2002).

A forma de *ray-tracing* adotada para realizar os cálculos que levam à construção dos modelos *renderizados* é o *ray-tracing* inverso. Nesta técnica são computados apenas os feixes que emergem da gema em direção à posição central do hemisfério (que representa a perspectiva do observador). Pela propriedade de reversibilidade da luz, a direção de propagação dos feixes não altera sua intensidade e frequência, e por isto, o programa considera a luz sendo propagada em sentido contrário ao que acontece na natureza. Esta forma de abordagem do problema minimiza o cálculo necessário para medir todos os feixes de luz em uma cena, inclusive os que não atingem a gema ou a posição de observação (olho do observador).

Como resultado numérico do modelo de lapidação, o software GemCad e seu programa associado GemRay apresentam valores para brilhância e aproveitamento:

- A brilhância é chamada *ISO brightness* (brilhância ISO), definida pelo cálculo da quantidade de luz monocromática que incide em um poliedro de determinado índice de refração e sem cor residual iluminado com o modelo ISO e que retorna à perspectiva do observador.
- O aproveitamento é calculado a partir da relação entre o volume da gema lapidada e do bruto de origem, que o programa considera como um cubo de aresta igual a maior medida do rondiz (L ou W) do modelo de lapidação.

A Figura 2.50 ilustra o posicionamento de uma gema lapidada inserida em um cubo.

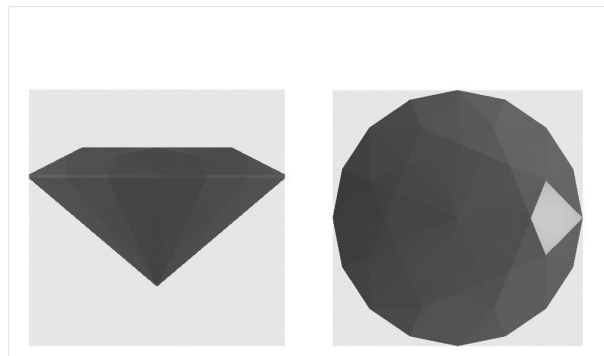


Figura 2.50: Poliedro (gema lapidada) inserido em cubo de aresta da mesma medida do rondiz.

2.3 Quartzo

Existe em Minas Gerais uma das maiores concentrações de depósitos de gemas do mundo, a Província Gemológica Oriental do Brasil, situada entre o meridiano $43^{\circ}30' W$ e o litoral brasileiro, entre os paralelos 15° e 21° . O Estado responde pela maior produção de gemas em bruto no Brasil e é responsável por cerca de 50% das exportações do setor, segundo dados do ano 2001 do Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos (IBGM).

Dentre os principais produtos minerais aqui extraídos, nota-se a produção na Província Gemológica Oriental do Brasil de, principalmente, quartzos, turmalinas, berilos, crisoberilos e espodumênios (Fig. 2.51).

Minas Gerais apresenta também uma das maiores reservas de quartzo gemológico do mundo. Suas principais variedades coloridas, as ametistas (cor violeta), citrino (cor amarela e laranja), quartzo fumê e morion (variedade cinza escura ou preta), por apresentarem na maioria das vezes cores fracas, foram tidas por muito tempo como material de baixa qualidade gemológica e de baixo valor (FAVACHO, 2001). Entretanto, a maioria destes quartzos é beneficiável por tratamentos térmicos e irradiações Gama, o que lhes confere valor comercial muitas vezes superior. Este beneficiamento é conhecido como melhoramento (*enhancement*) ou modificação de cor e permite a produção de variadas tonalidades a partir do quartzo incolor, ametista, citrino e fumê. A crescente aceitação destas gemas no mercado joalheiro internacional torna o quartzo uma matéria-prima importante na oferta de produtos minerais do país. O estudo de modelos de lapidações para o quartzo permite o projeto de modelos que busquem agregar mais valor a estes materiais, ao se constatar que a lapidação é um dos principais fatores que compõem o preço de uma gema.

Quartzo é a denominação de um grupo de minerais de mesma composição química e propriedades físicas similares (SCHUMANN, 1996). Esta também é a denominação da fase estável cristalina do dióxido de silício ou sílica (SiO_2), até a temperatura de 870°C. Após esta temperatura a sílica muda de fase para tridmita, quando ocorre expansão volumétrica e mudança de sistema cristalino de trigonal para monoclinico (ou triclinico). Nova mudança de fase ocorre à temperatura de 1470°C com o surgimento da cristobalita (tetragonal) e fusão à 1728°C (WEBSTER, 2002).

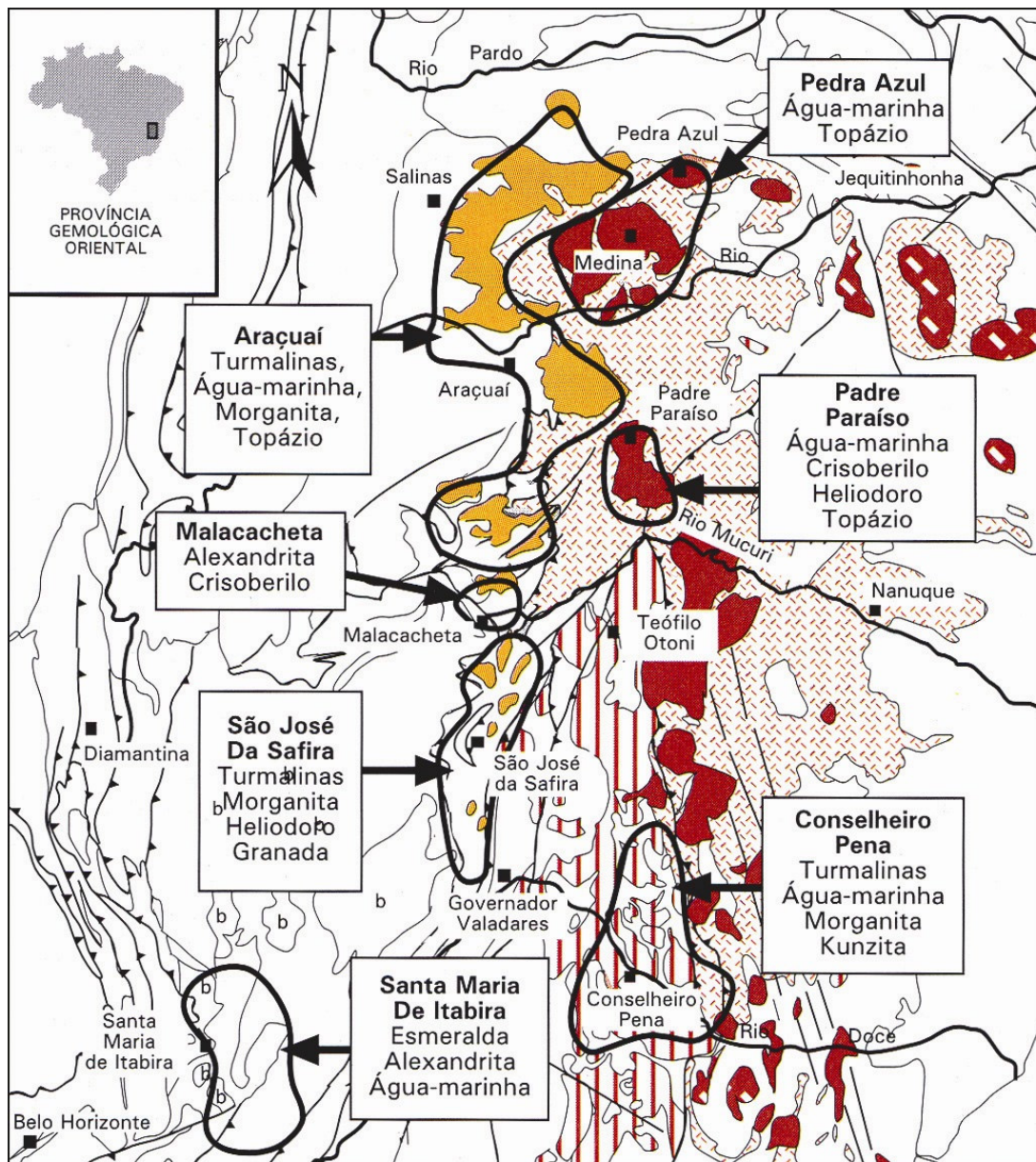


Figura 2.51: Principais depósitos minerais da Província Gemológica Oriental do Brasil (PEDROSA-SOARES, 2001).

O quartzo gemológico pode ocorrer em diferentes formas de cristalização:

- Macrocrystalino: os cristais são visíveis a olho nu (ametista, aventurina, cristal de rocha, citrino, olho de tigre, prasiolita, quartzo fumê, quartzo rosa, etc)
- Criptocrystalino: cristais microscópicos compõem o material (ágata, madeira fossilizada, calcedônia, crisoprásio, jasper, etc).

Este trabalho, por tratar de materiais transparentes, focalizará o primeiro grupo, no qual se encontram as variedades transparentes do quartzo e o material escolhido para análise de seus modelos de lapidação, o quartzo incolor.

2.3.1 Propriedades

A tabela 2.3 apresenta as principais propriedades do quartzo.

Tabela 2.3: Propriedades mineralógicas do quartzo hialino.

Cor	Incolor
Cor de traço	Branco
Dureza (Mohs)	7
Densidade	2,65
Clivagem	Não apresenta
Fratura	Conchoidal - frágil
Sistema cristalino	Trigonal - prismas hexagonais
Composição Química	SiO ₂ - dióxido de silício
Transparência	Transparente
Índice de Refração	1,544 – 1,553
Birrefringência	+ 0,009
Dispersão	0,013 (0,008)
Pleocroísmo	Ausente
Espectro de absorção	Não pode ser avaliado
Fluorescência	Não apresenta

De maneira geral, os minerais conhecidos como gemas são materiais cristalinos, ou seja, tem estrutura regular interna que se repete periodicamente em todas as direções do espaço, com partículas arranjadas de maneira precisa (WEBSTER, 2001). O quartzo apresenta cristalização trigonal, sistema caracterizado por possuir quatro eixos cristalinos, sendo três laterais de igual tamanho que se interceptam a 60 graus e um eixo vertical maior ou menor a 90 graus do plano formado pelos anteriores (Fig. 2.52).

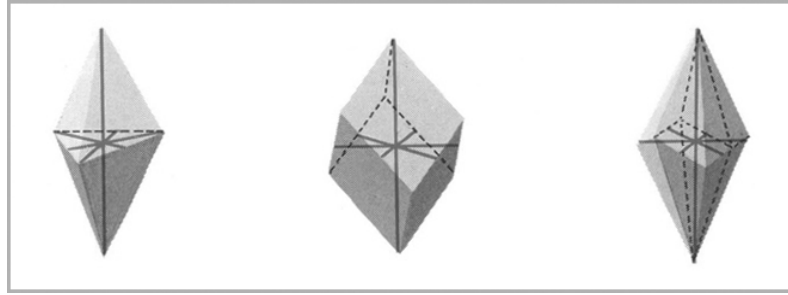


Figura 2.52: Formas de cristais trigonais (SCHUMANN, 1997).

Neste sistema cristalino, o material não apresenta clivagem perfeita, propriedade relativa à coesão dos átomos da rede cristalina do material e que indica a tendência da separação do material em determinados planos cristalográficos. Ao se aplicar pequena tensão (tensão aplicada por um golpe de ferramenta manual, por exemplo) o material que apresenta clivagem perfeita, como um topázio ou kunzita, parte-se em dois no plano de clivagem. Por este motivo, a clivagem é um limitador em termos de lapidação, pois reduz a quantidade de possíveis posicionamentos de um dado modelo de facetamento em uma gema bruta, podendo gerar perdas de material. Quando quebrado em plano diferente ao da clivagem, o quartzo apresenta a fratura dita conchoidal, com pequenas marcas ondulares, seqüenciais, similares às encontradas em conchas marinhas (SCHUMANN, 1997).

Enquanto na maioria dos materiais a dureza é considerada como a resistência à penetração (onde é medida a taxa de deformação do material depois de submetido à compressão de um punção de altíssima dureza), nos minerais em geral mede-se a resistência ao risco, na escala de Mohs (tabela 2.4). Esta escala apresenta uma ordem de 1 a 10, na qual o mineral classificado como de maior valor ‘risca’ o mineral de menor valor, ou seja, quando colocado em atrito com aquele gera um arranhão (risco) na superfície de contato.

Tabela 2.4: Escala Mohs de dureza de risco.

Gema	Dureza (Mohs)
Talco	1
Gipsita	2
Calcita	3
Fluorita	4
Apatita	5
Ortoclásio	6
Quartzo	7
Topázio	8
Coríndon	9
Diamante	10

O quartzo é um material que pode ser tomado como divisor da usabilidade em joalheria para as demais gemas, em relação à dureza de risco. Como objeto portador de alto valor intrínseco, simbólico e de estima, é desejável que uma gema lapidada cravada em uma jóia de uso pessoal mantenha sua aparência por anos a fio. A superfície polida de uma gema, quando de dureza menor que a dureza do quartzo, sofre constante abrasão dos grãos de areia (sílica) contidos nos tecidos, na poeira e em suspensão na atmosfera (SCHUMANN, 1997). Esta abrasão torna a gema opaca e de aparência comprometida, em poucos anos, necessitando ser relapida. É curioso notar que mesmo com esta desvantagem, gemas como a Tanzanita (zoisita de dureza 6-6,5) atingem altíssimos valores de mercado.

As propriedades ópticas do quartzo são assunto de alta relevância para a lapidação, pois governam as características mais perceptíveis das mesmas, sua cor, brilho, lustre e diafanidade. O capítulo 2.0 discorreu sobre a influência das propriedades dos minerais em geral, no problema da lapidação.

A origem da cor nos quartzos, bem como em diversos outros minerais, é devida à presença de impurezas distribuídas na sua rede cristalina, na forma

de elementos de transição. Estes elementos influenciadores de cor (cromóforos) são encontrados com valores de 13 até 15.000 ppm (alumínio, partes por milhão) e 350 ppm (ferro). Estes elementos presentes na gema e sua quantidade são os responsáveis pela absorção de determinados comprimentos de onda, o que gera a transmissão das cores características em que encontram-se os quartzos:

- Rosa: quartzo róseo;
- Violeta com tons de azul: ametista;
- Laranja e amarelo: citrino;
- Marrom-acinzentado: morion ou fumê.

Segundo FAVACHO (2001):

“A aquisição de cor em quartzo está intimamente ligada ao problema da substituição do silício por íons Al^{3+} e Fe . Essa substituição, por sua vez, gera um desequilíbrio eletrônico devido à diferença entre suas valências (fig 2.53). Assim que o desequilíbrio é instalado, ocorre um rápido restabelecimento do equilíbrio por íons monovalentes, como o Li^+ , Na^+ , K^+ , H^+ , que atuam como compensadores eletrônicos”.

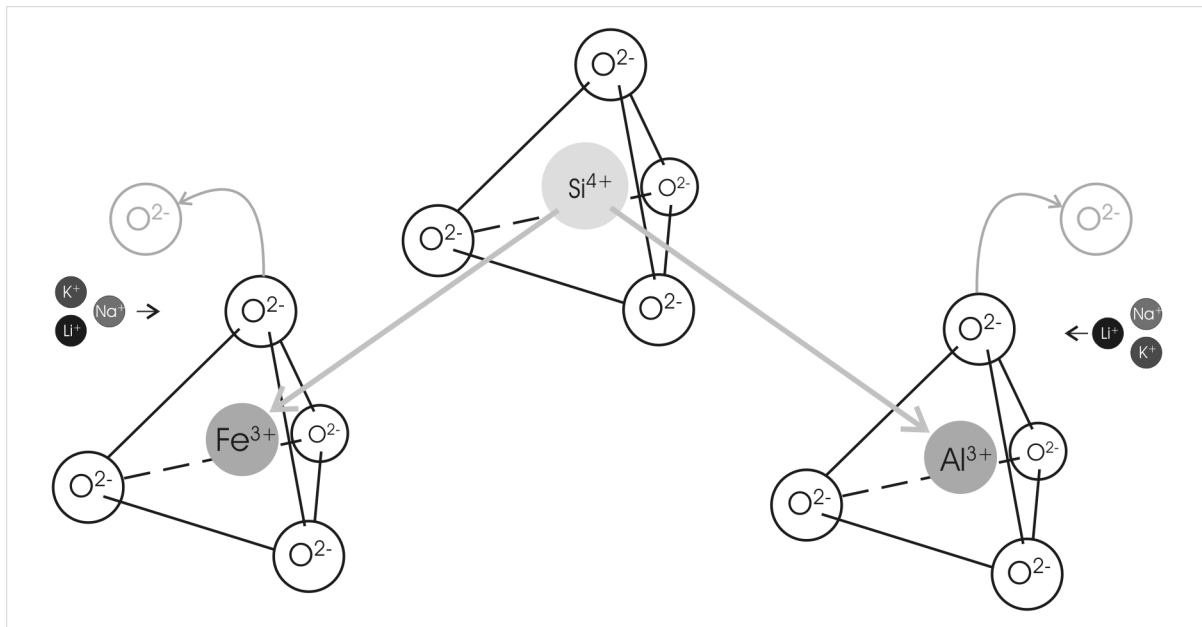


Figura 2.53 : Esquema das trocas iônicas do quartzo (FAVACHO, 2001).

Além da intensidade de cor apresentada pelo material em bruto, o controle da saturação da cor na lapidação é realizado em duas etapas. Como visto anteriormente, cerca da metade do valor de uma gema lapidada é

decorrente da saturação ou intensidade da cor apresentada. Na serra, procura-se colocar as regiões onde a gema apresenta maior saturação de cor no centro do poliedro que será a gema lapidada. As manchas ou camadas onde a saturação de cor é maior em uma gema são denominadas *zonas de cor* e ocorrem principalmente em ametistas e citrinos. Na segunda etapa, quando da formatação e facetamento, geralmente busca-se ajustar a razão entre a altura e a largura ($H/W=(C+P)/W$) do modelo de lapidação para o controle deste efeito. Uma gema dita ‘funda’ apresentará maior saturação de cor, enquanto uma gema dita ‘rasa’ terá aspecto mais claro (Fig. 2.54). Observa-se em uma gema dita alta que os feixes de luz percorrem um caminho ótico mais extenso no interior da gema, enquanto na gema rasa os raios são rapidamente refratados pelo pavilhão para fora da gema, configurando o caso de perda de luz. Este fenômeno faz com que o material absorva menos luz e aparente cor menos saturada, pela influencia isolada de sua geometria.

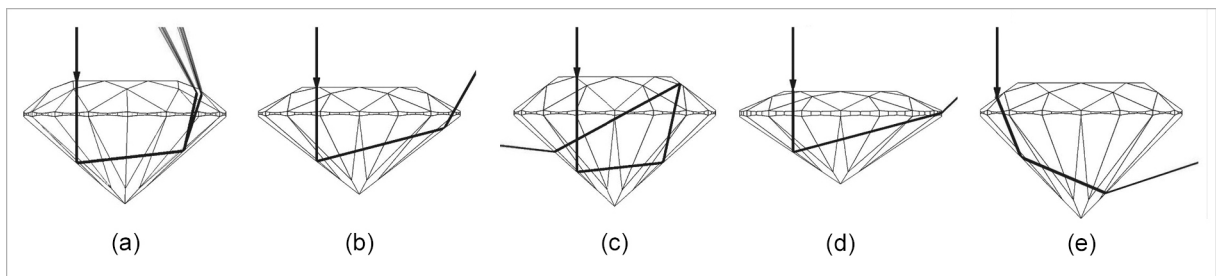


Figura 2.54: Caminhos óticos percorridos por feixes de luz na transmissão em gemas de geometrias diferentes.

Em relação à transparência (diafanidade), algumas variedades de quartzo são caracterizadas como *translúcidas*, principalmente por apresentarem inclusões. Inclusões são irregularidades e descontinuidades visíveis na gema, com ou sem auxílio de instrumentos óticos (CASTAÑEDA e FERREIRA in POLLI, 1999) que afetam a transparência de gemas (NASSAU, 1996). Estas inclusões podem ser descontinuidades físicas como inclusões sólidas (cristalinas ou amorfas), inclusões fluidas, cavidades (fraturas, fissuras, tubos de crescimento, cristais negativos, etc) secas preenchidas ou parcialmente cicatrizadas; ou descontinuidades de propriedades óticas como zoneamento de cor, fenômenos de crescimento, maclas ou geminações, estruturas fluidiais e birrefringência anômala (POLLI, 1999). Outras

variedades como calcedônia e ágata são ditas opacas, por não permitirem a passagem da luz. Este processo ocorre, neste caso, pela natureza microcristalina do material que reflete e refrata a luz até esta ser completamente absorvida ou refletida nos diversos cristais microscópicos que compõem a gema (SCHUMANN, 1997).

A matéria de que trata este projeto, os quartzos incolores (hialinos), é geralmente composta de substância que permite que os raios de luz incidentes sejam na maior parte transmitidos através do material. Este tipo de comportamento caracteriza o material como *transparente*.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada pelo presente projeto consistiu nas seguintes etapas:

- Revisão bibliográfica das áreas que influenciam o problema da interação da luz com a matéria na forma de um poliedro de geometria conhecida;
- Identificação das variáveis do problema e seleção de parâmetros para modelamento;
- Levantamento do universo de dados a serem estudados;
- Projeto da ferramenta de análise;
- Testes e ajustes;
- Análise dos resultados;
- Conclusões.

3.1 Revisão bibliográfica: conclusões

A revisão bibliográfica realizada visando identificar a natureza do problema da interação da luz com uma gema lapidada permite concluir que os resultados da lapidação de gemas utilizando a técnica do facetamento são de duas classes:

- Resultados visuais da lapidação: desempenho ótico
- Resultados materiais da lapidação: aproveitamento em peso.

Os resultados materiais da lapidação são de fácil constatação a partir da simples observação da quantidade de material eliminado no beneficiamento. O

desempenho ótico diz respeito à aparência das gemas em termos de saturação de cor, brilhância (luz branca retornada pela coroa), fogo (dispersão da luz nas cores do espectro visível) e cintilação (flashes de luz refletidos pela coroa). Cada um destes termos representa um conceito complexo de aparência, ainda não rigorosamente definido e dificilmente expresso em termos matemáticos sem a utilização de qualificações e suposições (HEMPHILL et al, 1998).

Os parâmetros que governam estes fatores são ordenados por relevância decrescente para o problema segundo Dodson, 1978; Hemphill et al, 1998; Green et al, 2001a, 2001b, 2001c, 2001d, 2001e, 2001f, 2001j, 2002 e 2003; Sasían et al, 2003. Esses parâmetros são:

- Geométricos:

- Proporções entre as partes da gemas, que podem ser alteradas de modo a controlar ambas as classes de resultados;
- Grau de simetria, que controla principalmente a brilhância, fogo e cintilação;
- Grau de polimento da superfície, que altera a reflexão e refração;
- Condições de iluminação, que influenciam a visualização dos diferentes efeitos que formam a performance ótica (cor, brilho, fogo, cintilação);
- Condições de observação, que influenciam se o observador vê a gema de uma perspectiva estática ou em movimento (*tilt*);

- Materiais:

- Densidade, da qual depende o índice de refração;
- Presença de inclusões no material;
- Ausência de gordura na superfície.
- Anisotropia ótica;

3.2 Variáveis do problema e parâmetros de modelamento

Conhecidos os critérios que definem a aparência das gemas e definidos os parâmetros que alteram esta aparência, é possível formular uma hipótese e propor um modelo a ser utilizado para sua verificação. No presente trabalho optou-se por analisar quantitativamente os dados geométricos de um determinado modelo de lapidação encontrado e verificar, utilizando RNAs, as relações entre estes dados e seus resultados de brilhância e aproveitamento.

Para a simulação em um sistema de processamento de dados baseado em redes neurais artificiais que pretende verificar a aplicação desta solução para o problema em referência, este trabalho obrigatoriamente deve restringir o objeto do estudo, desconsiderando variáveis entendidas como menos relevantes de modo a permitir a exequibilidade da ferramenta. No modelamento utilizado aqui, as simplificações adotadas dizem respeito a algumas propriedades do material e à qualidade da lapidação. Utilizando-se o software GemCad para a construção e visualização dos modelos, são usualmente adotadas as seguintes considerações nos projetos de lapidação:

- Em relação à qualidade da lapidação, as gemas lapidadas virtualmente apresentam simetria perfeita, em relação aos vértices, arestas e planos que formam cada faceta, bem como à forma da gema como um todo (Fig. 3.1);
- Por ser um modelo matemático, os planos que formam as facetas são perfeitamente lisos, apresentando rugosidade mínima, fator que afetaria a aparência das gemas;
- Em relação à natureza do material, a substância que compõe a gema no programa é considerada livre de quaisquer inclusões macro ou microscópicas, trincas e defeitos, que afetariam a interação da luz com a matéria;
- Para evitar que haja refração dependente da absorção seletiva da luz, a gema é completamente incolor, bem como a luz incidente é monocromática;

- A observação da gema será realizada com o tipo de iluminação que evidencia a brilhância, o modelo ISO de iluminação, e a brilhância obtida é a denominada *ISO brightness*;
- Será adotada a perspectiva estática de observação e condições de iluminação adequadas (geometria de hemisfério e iluminação difusa) para a medição deste tipo de brilhância, pois se observou que a variação da direção de observação influencia pouco os resultados obtidos nessa configuração (COWING, 2003).
- A birrefringência que ocorre no quartzo é pequena, e sua influência não altera os resultados de brilhância obtidos para este material. Na prática, seu valor de Índice de Refração é considerado como a média entre o maior (1,553) e o menor índice (1.544), ou seja, 1,5485.

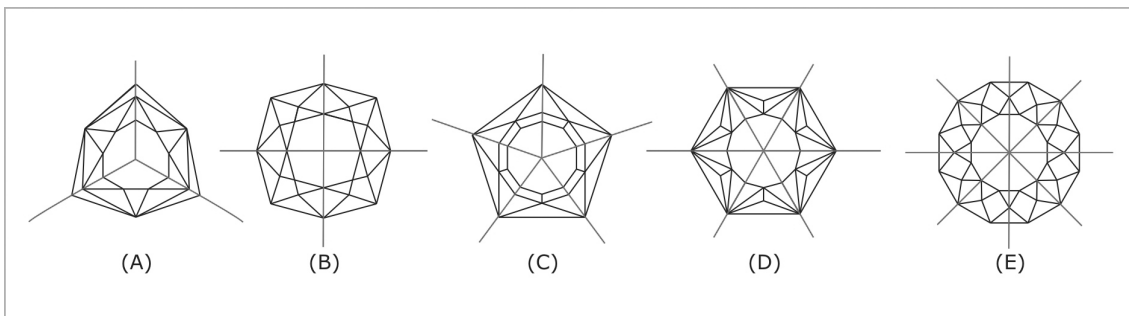


Figura 3.1: Tipos de simetria apresentados por gemas facetadas: (a) tripla, (b) quádrupla, (c) quádrupla, (d) sêxtupla e (e) óctupla.

A partir dessas considerações, nota-se que a perspectiva estática adotada elimina a observação da cintilação e que o efeito ‘fogo’ é minimizado nas gemas coradas, pela presença de cor e por apresentarem geralmente menor dispersão do que o diamante. Por estes motivos, os resultados da lapidação considerados no presente trabalho restringem-se à brilhância e ao aproveitamento.

Para o modelamento assim definido foram consideradas todas as proporções entre as partes de uma gema lapidada que são apresentadas em um diagrama de lapidação, e também a quantidade de facetas. Estes parâmetros são:

- F - quantidade total de facetas

- G - quantidade de facetas no rondiz
- T/W - relação entre a mesa e a largura
- T/L - relação entre a mesa e o comprimento
- P/W - relação entre o pavilhão e a largura
- C/W - relação entre a coroa e a largura
- H/W –relação entre a altura e a largura
- P/H – relação entre o pavilhão e a altura
- C/H – relação entre a coroa e a altura

Foram escolhidos diversos modelos de lapidação que apresentassem variados resultados de brilhância e aproveitamento para formar o conjunto dos dados necessário para o estudo, apresentado na tabela 3.1. Esses modelos foram encontrados em busca na internet que resultou na compilação dos modelos desenvolvidos pelo autor J. Grahan (disponível em www.faceters.com). O conjunto de 62 diagramas de lapidação apresenta formas e padrões de facetamento variados, formando um universo representativo dos modelos de facetamento para quartzo. As figuras que ilustram cada modelo podem ser visualizadas no Anexo A.

Tabela 3.1: Nomes dos modelos de lapidação utilizados no trabalho, parâmetros considerados e valores de brilhância e aproveitamento.

	MODELO	Facetas	Rondiz	T/W	T/L	P/W	C/W	H/W	P/H	C/H	Aprov	Brilh
1	2-6-3 triangle	52	9	0.516	0.490	0.380	0.188	0.588	0.646	0.320	0.187	75.4
2	3 corner triangle	46	12	0.595	0.573	0.418	0.188	0.626	0.668	0.300	0.230	79.2
3	6 star	79	12	0.474	0.457	0.462	0.209	0.691	0.668	0.303	0.254	72.0
4	8 round	57	16	0.490	0.490	0.435	0.168	0.623	0.698	0.270	0.226	78.5
5	9 by check round	33	12	0.268	0.268	0.435	0.209	0.664	0.655	0.315	0.224	92.8
6	acorn tri	70	6	0.532	0.496	0.457	0.166	0.643	0.710	0.259	0.223	74.0
7	begginer check	27	12	0.267	0.267	0.435	0.191	0.646	0.673	0.296	0.216	90.2
8	brilliant marquise	59	16	0.753	0.537	0.437	0.141	0.598	0.731	0.235	0.243	84.6
9	bzzz	101	8	0.482	0.482	0.481	0.175	0.676	0.712	0.259	0.251	70.0
10	china check	25	4	0.442	0.442	0.435	0.169	0.624	0.696	0.271	0.285	82.6
11	circus tent	105	16	0.392	0.392	0.440	0.259	0.719	0.612	0.360	0.241	70.0
12	crazy triangle	18	3	0.000	0.000	0.426	0.123	0.569	0.749	0.216	0.145	76.1
13	cross point	49	8	0.468	0.468	0.445	0.212	0.677	0.657	0.313	0.246	70.7
14	cross	47	8	0.544	0.409	0.511	0.248	0.779	0.656	0.319	0.428	70.6
15	cut corner crazy tri	24	6	0.000	0.000	0.453	0.190	0.663	0.683	0.287	0.188	80.7
16	d qtz round	97	16	0.461	0.461	0.549	0.228	0.797	0.689	0.286	0.316	72.6
17	dagger bottom	41	4	0.393	0.393	0.483	0.214	0.718	0.674	0.298	0.315	74.4

18	double cross square	73	8	0.594	0.594	0.529	0.212	0.761	0.695	0.278	0.363	75.0
19	easy tri	31	12	0.536	0.535	0.399	0.175	0.593	0.672	0.295	0.187	83.7
20	fancy	59	8	0.568	0.473	0.479	0.226	0.726	0.660	0.312	0.373	82.8
21	fanned triangle	52	15	0.303	0.295	0.392	0.213	0.625	0.627	0.341	0.211	88.3
22	frosted star	79	12	0.533	0.514	0.459	0.182	0.661	0.694	0.275	0.251	60.0
23	harlequin square	41	4	0.400	0.400	0.488	0.208	0.717	0.681	0.291	0.319	70.0
24	hopes square	53	12	0.505	0.505	0.460	0.226	0.706	0.651	0.320	0.279	75.0
25	keely cisor	37	8	0.833	0.626	0.466	0.131	0.618	0.755	0.213	0.440	84.0
26	light star	169	16	0.472	0.472	0.449	0.192	0.661	0.679	0.291	0.226	63.5
27	malt squared	53	8	0.463	0.463	0.479	0.232	0.731	0.655	0.318	0.306	72.6
28	mask rectangle	61	12	0.900	0.642	0.596	0.259	0.875	0.681	0.296	0.545	70.0
29	mock emerald	33	8	0.884	0.708	0.499	0.143	0.662	0.754	0.216	0.409	82.7
30	north star	137	16	0.459	0.459	0.437	0.181	0.638	0.685	0.283	0.215	75.0
31	np point	67	9	0.542	0.534	0.430	0.227	0.677	0.635	0.336	0.253	73.6
32	op blade	77	8	0.482	0.482	0.437	0.150	0.607	0.721	0.247	0.202	82.1
33	point square check	24	4	0.000	0.000	0.435	0.225	0.679	0.640	0.331	0.292	88.5
34	astor star	49	8	0.472	0.472	0.537	0.202	0.759	0.708	0.266	0.339	89.2
35	diagonal 1.5	15	4	0.856	0.571	0.500	0.338	0.858	0.582	0.390	0.767	89.4
36	glass triangle	67	12	0.433	0.432	0.447	0.198	0.666	0.672	0.298	0.202	80.0
37	diamond perception	25	6	0.347	0.261	0.361	0.141	0.522	0.692	0.270	0.167	84.6
38	prop	25	8	0.351	0.351	0.458	0.173	0.651	0.704	0.265	0.256	93.2
39	quartz shield	44	10	0.507	0.507	0.426	0.191	0.637	0.668	0.300	0.232	82.8
40	z diamonds	13	4	0.892	0.595	0.500	0.254	0.774	0.646	0.328	0.651	90.7
41	scot plaid	97	6	0.511	0.442	0.469	0.202	0.691	0.678	0.293	0.271	69.2
42	simply x'ed	25	4	0.541	0.541	0.488	0.207	0.714	0.683	0.289	0.324	70.0
43	spin v	37	6	0.458	0.397	0.475	0.276	0.771	0.616	0.358	0.297	65.0
44	starred	71	10	0.471	0.471	0.428	0.176	0.624	0.685	0.283	0.199	89.8
45	step up	49	8	0.493	0.493	0.452	0.153	0.625	0.723	0.245	0.249	80.0
46	straight pedals	55	6	0.566	0.490	0.501	0.243	0.764	0.655	0.319	0.306	76.0
47	strip o	59	12	0.614	0.512	0.485	0.236	0.741	0.655	0.318	0.343	74.0
48	wink	51	10	0.768	0.578	0.485	0.215	0.720	0.673	0.299	0.353	78.2
49	squeezed square	20	4	0.000	0.000	0.458	0.144	0.622	0.736	0.232	0.241	94.6
50	square ziggie	14	4	0.000	0.000	0.466	0.144	0.630	0.740	0.228	0.336	86.4
51	mock check squares	17	4	0.807	0.807	0.466	0.239	0.726	0.643	0.330	0.372	90.3
52	two spin star	30	6	0.000	0.000	0.450	0.164	0.635	0.709	0.259	0.215	92.8
53	glider	12	3	0.913	0.489	0.431	0.127	0.578	0.746	0.219	0.257	81.3
54	huntress	43	12	0.457	0.443	0.447	0.164	0.631	0.708	0.260	0.222	87.9
55	kiss	12	3	0.000	0.000	0.459	0.230	0.709	0.647	0.325	0.174	88.6
56	low boy	45	8	0.713	0.713	0.454	0.129	0.604	0.753	0.214	0.202	75.8
57	spike	19	4	0.305	0.305	0.307	0.106	0.434	0.709	0.245	0.092	93.1
58	spiro	46	12	0.384	0.357	0.441	0.193	0.654	0.674	0.295	0.239	86.9
59	tess's pentagram	23	5	0.820	0.640	0.396	0.175	0.591	0.670	0.296	0.256	82.6
60	triga light house	58	6	0.509	0.492	0.420	0.194	0.633	0.663	0.306	0.204	80.2
61	thorn	17	6	0.840	0.674	0.383	0.130	0.532	0.719	0.243	0.179	91.2
62	zip	15	4	0.656	0.656	0.462	0.099	0.581	0.795	0.171	0.220	89.4

Os parâmetros geométricos de lapidação relevantes para o controle das propriedades ópticas mencionadas no presente projeto dizem respeito às proporções entre comprimento (L), largura (W), mesa (T), pavilhão (P), coroa (C) e altura (H). Sabendo-se que as relações entre as proporções de uma gema

lapidada definem os resultados de brilhância e aproveitamento, define-se a seguinte hipótese:

sistemas baseados em RNAs são adequados para a verificação do problema da complexa interação da luz com um poliedro que representa uma gema lapidada de proporções definidas.

Buscando verificar se esta hipótese é verdadeira, este trabalho analisou os dados referentes às proporções de modelos de lapidação de diferentes formas buscando estabelecer sua relação com os resultados de brilhância e aproveitamento.

3.3 Redes neurais artificiais

As redes neurais artificiais (RNA) são sistemas computacionais de processamento de dados inspirados no funcionamento do cérebro humano, associando os dados como o fazem as redes sinápticas dos neurônios, conforme explica BRAGA (2000):

“RNAs são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples (nodos) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não-lineares). Tais unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais. Na maioria dos modelos, estas conexões estão associadas a pesos, os quais armazenam o conhecimento representado no modelo e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede.”

Estes sistemas apresentam a possibilidade de um desempenho superior aos modelos convencionais da computação algorítmica, que utilizam métodos numéricos para a solução de problemas, em consequência de sua característica intrínseca de paralelismo no tratamento dos dados (conforme ilustra a Fig.

3.2) em um sistema unidirecional de entrada de dados, cruzamento e saídas (BRAGA, 2000).

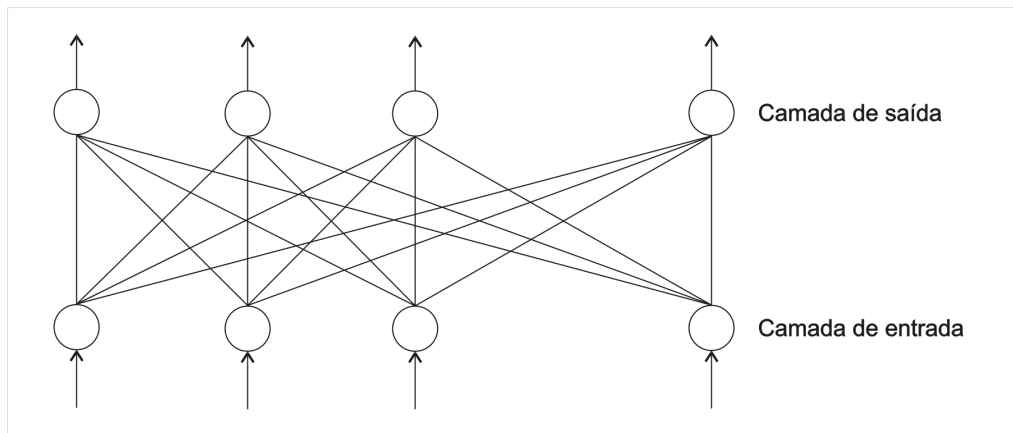


Figura 3.2: Esquema de camadas de nodos de processamento em RNAs (TATIBANA, 2003)

3.3.1 Desenvolvimento histórico

O processo de funcionamento de um neurônio artificial (a *unidade de processamento simples* ou nodo) foi primeiramente imaginado pelo neurofisiologista McCulloch e pelo matemático Walter Pitts (1943), cujo trabalho fazia uma analogia entre o processo de condução de energia elétrica entre as sinapses nas células vivas e o processo eletrônico (JAIN et al, 1996 e TATIBANA, 2003).

Os neurônios biológicos são compostos de um núcleo (que forma o corpo da célula), e filamentos condutores de impulso elétrico. Os filamentos receptores de impulsos são denominados axônios e os transmissores denominados dendritos. O corpo do neurônio recebe o impulso e pode ou não transmiti-lo para outros neurônios através das sinapses, que são as conexões entre neurônios. O conjunto de neurônios ligados por sinapses é a chamada rede neural do cérebro humano, estrutura responsável pelo raciocínio e outras habilidades.

O primeiro neurônio artificial, de funcionamento matemático, foi projetado por McCulloch e Pitts (JAIN et al, 1996), simulando o comportamento do neurônio natural. Este neurônio artificial possuía uma

saída ativada por uma função do somatório de suas diversas entradas, conforme mostra a Figura 3.3:

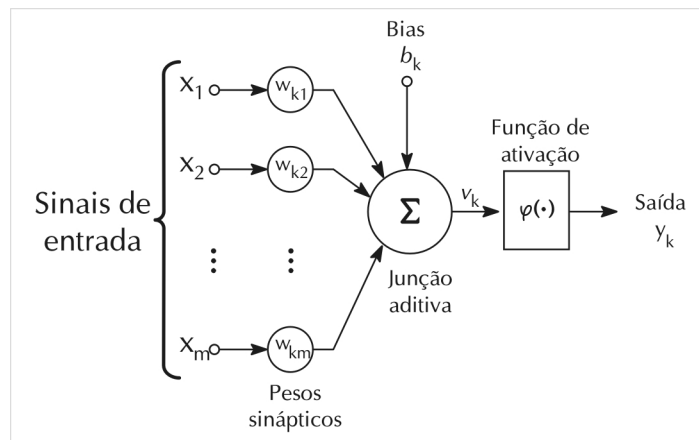


Figura 3.3: Neurônio artificial.

Em 1949, o trabalho revolucionário *The Organization of Behaviour*, do psicólogo Donald Hebb, serviu de inspiração para pesquisadores na área de inteligência artificial de então, ao defender a teoria de que o condicionamento clássico é uma característica geral dos diferentes animais por ser uma propriedade intrínseca aos neurônios (JAIN et al, 1996). A ativação ou não das sinapses que permite o transporte dos impulsos elétricos por um caminho percorrido no cérebro dos animais que possuem sistema nervoso central é responsável pelo condicionamento. O paradigma de que a inteligência está na capacidade de assimilar, errar e aprender com seus erros gerou os primeiros passos na chamada Inteligência Artificial Conexionista (1956). Buscava-se construir um sistema computacional que apresentasse esta estrutura de funcionamento, semelhante ao cérebro humano e capaz de realizar funções similares.

Em 1958, o pesquisador Rosenblatt e colaboradores desenvolveram o primeiro neurocomputador, MARK I PERCEPTRON, para reconhecimento de padrões utilizando um sistema de processamento com redes neurais chamado ADALINE (*adaptive linear network*), utilizado até hoje. Com este modelo de rede linear adaptativa, é possível tratar problemas linearmente separáveis,

alterando-se os pesos das conexões a cada etapa (adaptação) para se determinar a relação entre os dados (TATIBANA, 2003).

Até então as redes neurais apresentavam estruturas simples com uma única camada interna e neurônios ativados por funções (limiar, somatório, exponencial, etc). Este é o conceito das chamadas redes lineares, utilizadas para responder a entradas específicas que geram saídas alvo. Elas são capazes de classificar os dados de entrada que correspondem a determinadas saídas através do ajuste de pesos (*weights*, w) e erros (*bias*, b) relativos à estes dados, e resolvem problemas linearmente separáveis. Uma rede treinada classificará quaisquer entradas em um dos lados da reta ajustada pela rede no seu treinamento, a partir do conjunto de dados oferecido. Em 1950, a teoria de neurocomputação sofreu um grande abalo, quando Minsky e Paperts publicaram seu trabalho mostrando a incapacidade deste tipo de arquitetura em resolver problemas do tipo XOR (OU-EXCLUSIVO).

Em 1982 as pesquisas em RNAs voltaram a estar em voga, tendo o interesse da comunidade científica internacional despertado pelo trabalho de Hopfield propondo a utilização de redes simétricas para otimização. Este trabalho utilizava um algoritmo de aprendizagem com realimentação de dados (feedback), que permite que os pesos (w) associados aos canais de comunicação entre os neurônios das camadas internas sejam alterados por iterações sucessivas (JAIN et al, 1996). O aprendizado se dá pelo ajuste dos pesos das conexões de acordo com os padrões apresentados, e o comportamento inteligente da rede vem das interações entre suas unidades de processamento.

A estrutura de *Perceptron* multicamadas (TATIBANA, 2003) foi concebida para resolver problemas não linearmente separáveis, que não poderiam ser resolvidos pelo modelo de neurônio básico. Problemas de maior complexidade apresentam múltiplas possibilidades de entrecruzamento de dados pelas relações geralmente não-lineares entre suas variáveis. A Figura 3.4 ilustra a maneira como o acréscimo de camadas escondidas possibilita o tratamento de diferentes classes de problemas (JAIN et al, 1996).


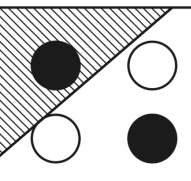
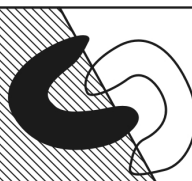
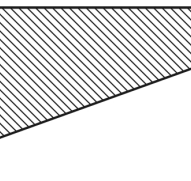
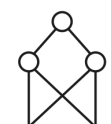
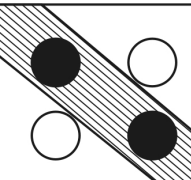
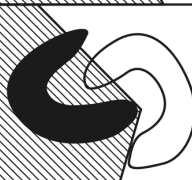
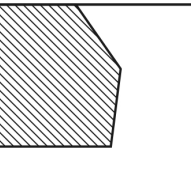
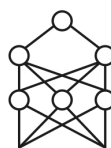
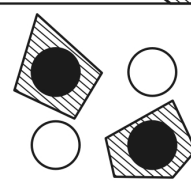
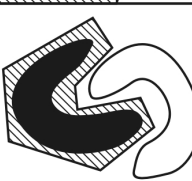
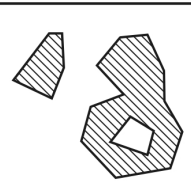
Estrutura	Fronteiras de decisão	Problema XOR (ou-exclusivo)	Problemas de outras classes	Formas das fronteiras
 Uma camada	Divide o plano			
 Duas camadas	Arbitrária (complexidade limitada pelo número de camadas ocultas).			
 Três camadas	Arbitrária (complexidade limitada pelo número de camadas ocultas).			

Figura 3.4: Interpretação geométrica do papel das camadas escondidas em um espaço bidimensional de entrada de dados (JAIN et al, 1996).

Em 1986 Rumelhart e colaboradores criam o modelo de BACKPROPAGATION, algoritmo que retornava o ajuste do erro em direção inversa à de propagação dos dados na rede. Exemplos da arquitetura das redes utilizadas atualmente podem ser vistos na Figura 3.5.

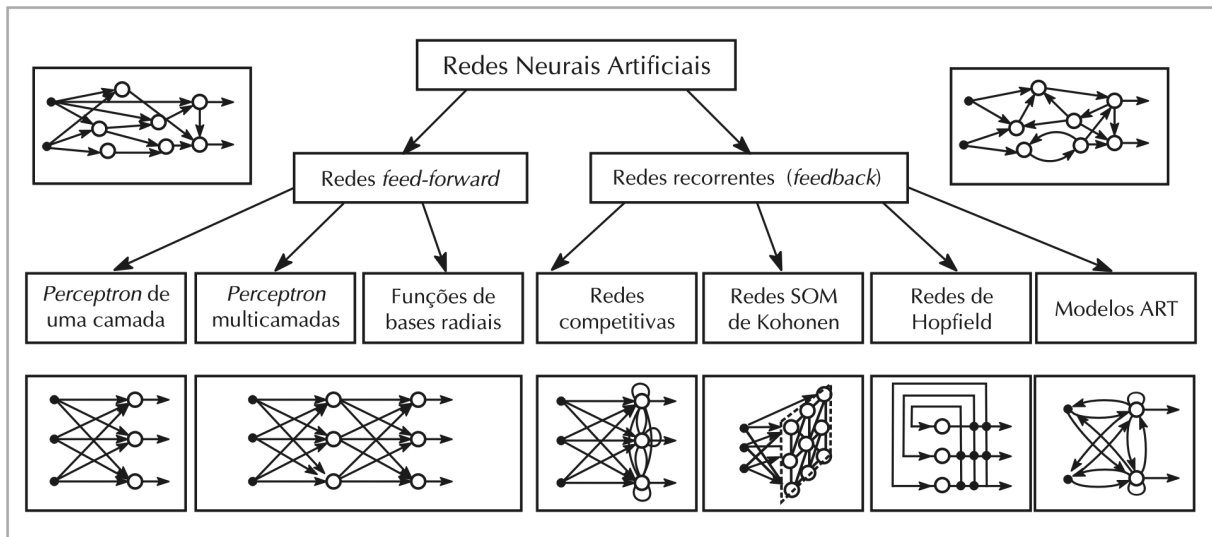


Figura 3.5: Taxonomia de RNAs *feed-forward* e *feedback* (JAIN et al, 1996).

3.3.2 Aplicações utilizando RNAs

Os passos gerais necessários para o desenvolvimento de aplicações utilizando redes Neurais artificiais serão discutidos nesta seção, enquanto a descrição do modelo utilizado especificamente neste projeto se dará no capítulo 3, referente à metodologia.

O primeiro passo no desenvolvimento de um projeto de rede neural é definir matrizes de dados, que contém os dados de entrada, na forma de uma matriz formada a partir dos dados individuais de entrada em linhas ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$), e outra matriz com os resultados correspondentes ($Y_1, Y_2, Y_3, \dots, Y_n$). Os dados X_1, X_2, \dots, X_n e Y_1, Y_2, \dots, Y_n são vetores com dimensão dependendo do número de parâmetros de cada dado de entrada e de saída.

Uma outra definição de projeto diz respeito a estabelecer uma regra que forneça o efeito da entrada total (ou resultante) na ativação de um neurônio. Essa função F_k deve depender da entrada total $s_k(t)$ e da ativação corrente $y_k(t)$, e deve produzir um novo valor para a ativação do neurônio k :

$$y_k(t+1) = F_k(y_k(t), s_k(t)) \quad (3.1)$$

Para a determinação da entrada total $s_k(t)$, na maior parte dos casos, é considerado que cada neurônio fornece uma contribuição aditiva à entrada do neurônio ao qual está conectado. A entrada total do neurônio k é simplesmente a soma ponderada das saídas de cada neurônio conectado mais um bias ou termo de erro θ_k

$$s_k(t) = \sum_j w_{jk}(t) y_j(t) + \theta_k \quad (3.2)$$

A contribuição relativa a um peso w_{jk} é considerada como uma excitação para um valor positivo, e como inibição para um valor negativo. Em alguns casos, são usadas regras mais complexas para combinar entradas, ocorrendo então uma distinção entre entradas de excitação e de inibição. Neurônios com regra de propagação descrita pela equação 2.6 são denominados neurônios *sigma*.

Freqüentemente, a função de ativação é uma função não decrescente da entrada total do neurônio:

$$y_k(t+1) = F_k(s_k(t)) + F_k\left(\sum_j w_{jk}(t)y_j(t) + \theta_k(t)\right) \quad (3.3)$$

ainda que as funções de ativação não se restrinjam à funções não decrescentes. Geralmente, o que se utiliza é um tipo de função limitante: uma função limite mais estrita (e.g. uma função *sgn*), ou uma função linear (ou ainda semilinear), ou então uma função limite suave (Fig. 3.6). Para essa função limitante suave, a principal opção é uma função tipo sigmóide, definida por

$$y_k = F(s_k) = \frac{1}{(1 + e^{-s_k})} \quad (3.4)$$

Em algumas aplicações, pode-se utilizar uma tangente hiperbólica, estabelecendo uma saída entre -1 e $+1$.

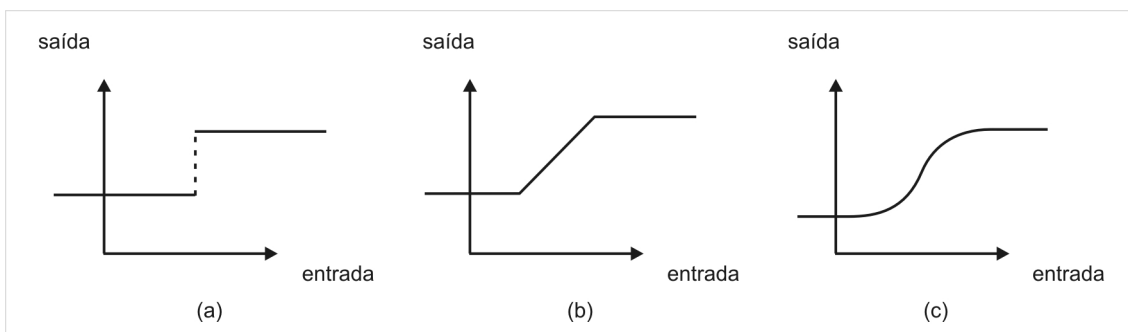


Figura 3.6: Funções de ativação para um neurônio: (a) *sgn*; (b) semi-linear; e (c) sigmóide.

Outra possibilidade é que a saída de um neurônio seja uma função estocástica da entrada total. Nessa situação, a ativação não é determinística, e a saída do neurônio determina a probabilidade p de ter um valor de ativação alto.

A próxima etapa do projeto de uma RNA consiste em definir a estrutura da rede, i.e. selecionar o paradigma neural da rede e sua topologia. A seleção

do paradigma neural refere-se ao tipo de problema a ser abordado, como classificação de padrões, categorização (*clustering*), aproximação de funções, previsão (*prediction*), otimização e controle. A topologia da rede se refere à quantidade de camadas intermediárias que farão o cruzamento dos dados, as chamadas camadas escondidas, que contêm os nodos de processamento e a quantidade destes em cada camada. Geralmente, quanto maior o número de camadas de neurônios, melhor é o desempenho da rede neural, pois maior é a capacidade de aprendizado e a precisão com que ela delimita regiões de decisão, que são os intervalos fixos onde a resposta pode estar (TATIBANA, 2003).

Depois de estabelecida a topologia da rede, deve-se definir o algoritmo de aprendizado ou treinamento, e as funções de ativação de cada neurônio da camada. O algoritmo de treinamento é um conjunto de regras bem definidas para a solução do problema (TATIBANA, 2003) e trata principalmente da maneira como os pesos são modificados. Tipos básicos de formas de treinamento para aprendizado da rede são correção de erro, hebbiana e aprendizado competitivo (JAIN et al, 1996). A forma de aprendizado hebbiana é a mais antiga, derivada do postulado de aprendizado de Hebb, que reforça a sinapse entre células A e B se um dado estímulo de A gera estímulo em B. Matematicamente, pode ser descrita como:

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + ny_i(t)x_i(t) \quad (3.5)$$

onde x_i e y_i são os valores de saída dos neurônios i e j , respectivamente, que estão conectados pela sinapse w_{ij} e n é a taxa de aprendizado (JAIN et al, 1996).

O aprendizado competitivo geralmente é utilizado nos problemas de clusterização ou agrupamento de padrões, onde as unidades de saída competem entre si pela ativação. Um exemplo da rede deste tipo mais simples pode ser visto na Figura 2.57, onde os neurônios de saída são todos interligados e possui cada qual seu peso de ativação. Apenas a saída com o maior (ou menor) valor transmite os dados, ‘vencendo’ a competição.

A forma mais comum de aprendizado é a forma de correção de erro, uma forma de aprendizado supervisionado onde a rede fornece uma saída desejada para cada dado de entrada. Durante o processo de aprendizado, a saída y gerada pela rede pode não ser igual à saída desejada d . O princípio de funcionamento deste algoritmo utiliza o sinal $d-y$ para modificar os pesos da conexões e gradualmente reduzir o erro (JAIN et al, 1996).

Para o treinamento da rede deve ser utilizado um conjunto de dados amplo o suficiente para representar as características mais importantes que se deseja identificar com as redes neurais. Um outro conjunto de dados é utilizado para o teste da rede já treinada, um conjunto que não deve ser utilizado no processo de treinamento. Se o conjunto de teste tiver sido usado no treinamento, os resultados do teste de verificação serão evidentemente viciados: mostrariam erros aproximadamente nulos.

O processo de aprendizado no contexto das RNAs pode ser visto como a adaptação dinâmica dos pesos das conexões (usados para o cálculo da entrada total de cada neurônio) e da arquitetura da rede de modo que esta possa cumprir com eficiência uma tarefa específica (JAIN et al, 1996). A rede deve aprender os pesos de conexão a partir deste conjunto de dados, o que configura uma etapa de treinamento. Seu desempenho melhorará a cada vez que o conjunto de dados for apresentado, quando os pesos associados a cada conexão são melhorados por métodos iterativos. Cada apresentação do conjunto de dados de treinamento à rede é denominada *época*. Esse procedimento é feito através de algoritmos muito complexos baseados em técnicas de otimização e busca de correção de pesos para redução de erros. As correções não podem ser feitas ininterruptamente, alguns critérios devem ser estabelecidos para parar o processo em um dado momento. Esses critérios podem ser em função da redução dos erros abaixo de um valor mínimo aceitável, em função da impossibilidade do algoritmo conseguir diminuir o erro, pode também se basear no tempo de processamento (ou número de tentativas de melhoria), ou ainda em função de critérios baseado em características específicas do algoritmo de treinamento utilizado.

Este modelo de aprendizado, onde são fornecidas à rede as respostas ou saídas referentes aos dados de entrada, é o chamado aprendizado supervisionado. Os pesos são então ajustados de modo a permitir que a rede produza respostas (saídas) mais próximas das conhecidas. No aprendizado não-supervisionado, a rede deve explorar uma estrutura inerente ao conjunto de dados ou correlações entre padrões associados a estes, na ausência de dados de resposta. Existem ainda modelos de redes que utilizam parte dos pesos determinados por aprendizado supervisionado e parte por não-supervisionado, no chamado aprendizado híbrido.

O software utilizado para a programação das RNAs utilizadas nesse trabalho, MATLAB versão 5.2, contém um pacote específico denominado Neural Networks Toolbox que apresenta um conjunto de funções de projeto de redes, de algoritmos de treinamento e de aplicação da rede treinada. Pela natureza do problema estudado no presente trabalho, a de estimar uma relação não linear entre os parâmetros de lapidação (entradas) e as características de brilhância e aproveitamento da gema (saídas), adotou-se uma rede multicamadas com 4 camadas de neurônios, sendo uma de entrada de dados, duas camadas ocultas, e uma camada de saída.

O pacote de funções RNAs do MATLAB fornece uma série de algoritmos de treinamento baseados em diferentes estratégias de correção de pesos para diminuição de erros. O desempenho desses algoritmos difere pela rapidez e pela adequação às características do problema a ser tratado pela rede. Em princípio, não pode ser sistematizada a maneira de escolher qual algoritmo deverá apresentar melhores resultados no que se refere à capacidade de encontrar uma solução (de minimização dos erros) e em tempo mais curto. Resta um processo de tentativa-e-erro na busca do algoritmo que satisfaça os requisitos de tempo e erro mínimo.

Os detalhes do desenvolvimento desse projeto de rede neural são apresentados no decorrer deste capítulo.

3.4 Projeto da ferramenta de análise

Após reunir dados relevantes sobre o problema e definir o modelo utilizado, a etapa seguinte consistiu na programação de um sistema computacional baseado em RNAs a ser utilizado na estimação dos valores de brilhância e aproveitamento. Foi projetada então a arquitetura de redes neurais artificiais como se segue.

Utilizou-se um conjunto de dados com 62 modelos de lapidação, cujos parâmetros são mostrados na Tabela 3.1. Para cada modelo, foram definidos vetores com os 9 parâmetros de entrada (x_1, x_2, \dots, x_{62}), e vetores com os 2 parâmetros de saída (y_1, y_2, \dots, y_{62}). Para o modelo 1, esses vetores têm a forma:

$$x_1 = [52 \ 9 \ 0,516 \ 0,490 \ 0,380 \ 0,188 \ 0,588 \ 0,646 \ 0,320]$$

$$y_1 = [0,187 \ 75,4].$$

Para sua utilização no treinamento da rede neural artificial, os dados foram agrupados em dois grupos: o de treinamento (59 modelos) e o de teste de validação (3 modelos). Em seguida, os dados foram formatados em matrizes de entrada, onde as linhas são os vetores de entrada, e matrizes de saída. A matriz de entrada de treinamento P1 tem, portanto, dimensão 59×9; matriz de entrada de teste P2, dimensão 3×9; matriz de saída de treinamento T1, dimensão 59×2; e matriz de saída de teste T2, dimensão 3×2.

Os modelos escolhidos arbitrariamente para compor o grupo de teste foram 4, 13 e 58, e não foram utilizados no processo de treinamento (pois os resultados dos testes de validação seriam viciados). Desta forma, as matrizes ficaram assim definidas:

$$P_1 = [x_1^T \ x_2^T \ x_3^T \ x_5^T \ \dots \ x_{62}^T]^T$$

$$T_1 = [y_1^T \ y_2^T \ y_3^T \ y_5^T \ \dots \ y_{62}^T]^T$$

$$P_2 = [x_4^T \ x_{13}^T \ x_{58}^T]^T$$

$$T_2 = [y_4^T \ y_{13}^T \ y_{58}^T]^T$$

Segundo uma exigência das funções do pacote de redes neurais utilizado (MATLAB), os dados de saída foram normalizados, isto é, divididos pelo maior valor para estabelecer uma escala de valores entre 0 e 1.

Após formatar os dados, definiu-se a estrutura (S) da rede, em relação à quantidade de camadas escondidas e a quantidade de neurônios em cada uma delas.

$$S=[18 \ 6 \ 2];$$

Definiu-se pela estrutura tipo [18 6 2], ou seja, além da camada de entrada com 9 neurônios, uma segunda camada escondida com dezoito, outra com seis neurônios e uma camada de saída com dois resultados. Segundo Haykin (2001), redes neurais com duas camadas escondidas são capazes de extrair uma relação de qualquer conjunto de dados apresentados, sendo que a primeira camada deve apresentar uma quantidade de neurônios igual ao dobro dos dados de entrada e a segunda deve ter entre a metade da camada precedente e o triplo da camada de saída.

A programação da rede inicia-se na definição dos principais parâmetros adotados para seu funcionamento através de uma função MATLAB, *newff*. Essa função define uma rede neural com fluxo de sinal no sentido exclusivo de uma camada para a subsequente, denominada então feed-forward (no caso contrário, i.e. com retroalimentação de dados, seria feed-back). Os primeiros argumentos dessa função são o conjunto de dados de treinamento (P_1 e T_1), e a estrutura (número de camadas e quantidade de neurônios por camadas, $S=[18 \ 6 \ 2]$). A estrutura de camadas utilizada pode ser visualizada na Figura 3.7.

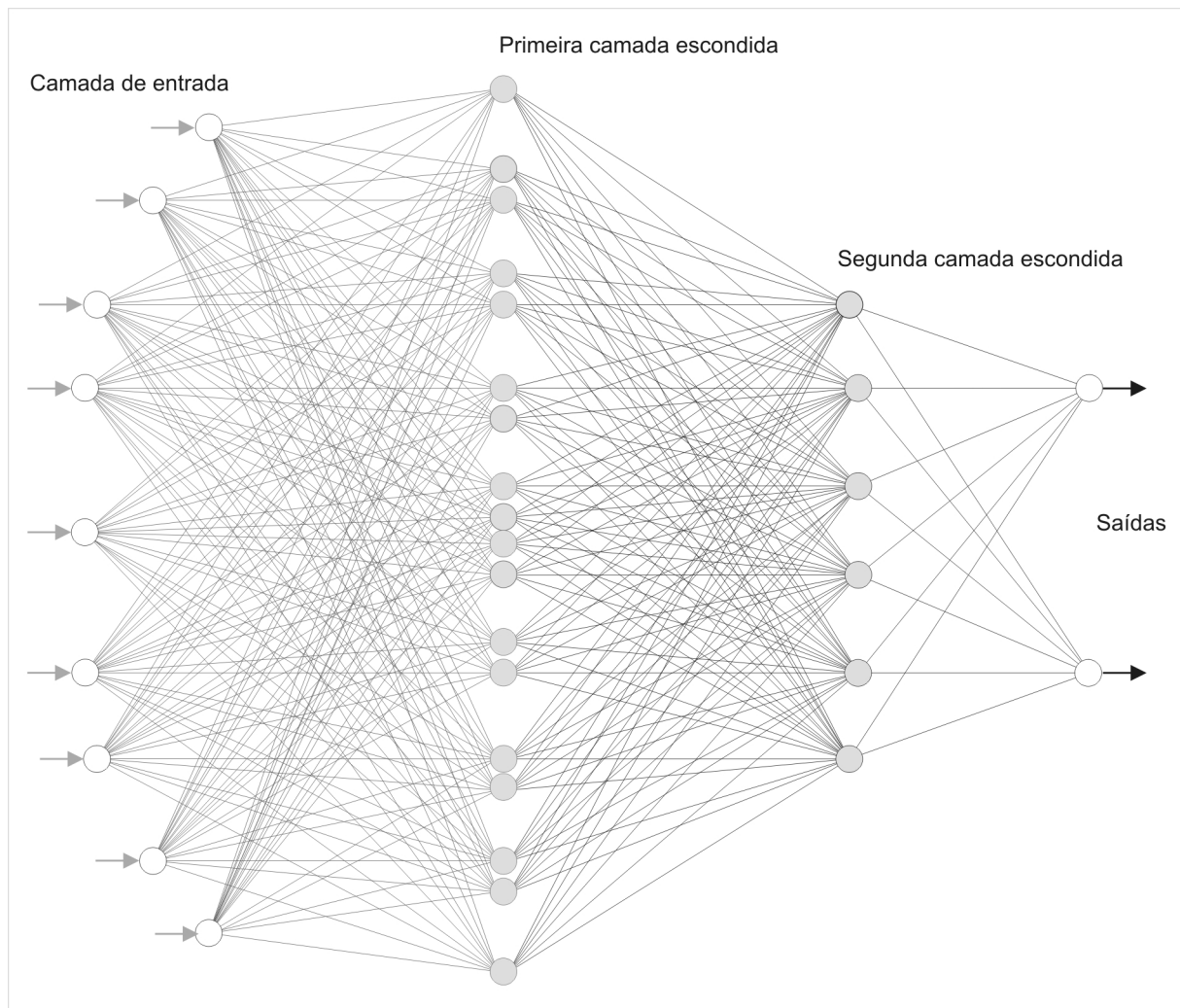


Figura 3.7: Esquema da estrutura de camadas da rede neural utilizada.

Além desses argumentos, é necessário informar a escolha de função de ativação a ser usada pelos neurônios de cada camadas (geralmente, mas não necessariamente, a mesma para todas as camadas). A função escolhida é a sigmóide, que apresenta transição suave entre seu valor mínimo e máximo, i.e. valores de saída variando continuamente entre 0 e 1, é a mais usada normalmente em RNAs para diversos problemas (JAIN et al, 1996).

Os demais argumentos são a forma do cálculo do erro da saída da rede e o algoritmo de treinamento. Para o erro, utilizou-se a forma padrão que calcula uma média quadrática dos erros para cada dado de treinamento. Essa forma é bastante simples e não privilegia erro de um neurônio de saída com relação ao outro (são dois neurônios na camada de saída), tratando igualmente erros positivos e negativos.

Para o treinamento, i.e. determinação dos pesos da rede, utilizou-se uma função baseada em um algoritmo que corrige os pesos e bias de acordo com descida do gradiente de erros. Esse algoritmo consegue treinar a rede enquanto seus pesos, entradas e funções de ativação sejam deriváveis. O esquema de caminho de correção no sentido inverso da rede, chamado *backpropagation*, é utilizado para calcular as derivadas da variável de desempenho com relação aos pesos e *bias*. Cada variável é ajustada de acordo com a descida do gradiente (com um momento mc , ou peso, associado):

$$dX = m_c * dX_{prev} + l_r * m_c * dperf/dX \quad (3.6)$$

onde dX_{prev} é a mudança precedente nos pesos e bias. Para cada época, se o desempenho decresce na direção do valor objetivo, então a taxa de aprendizagem l_r aumenta. Caso contrário, a taxa é ajustada e a mudança que piora a variável de desempenho não é efetivada.

O treinamento de uma rede chega ao fim quando um dos critérios de parada é satisfeito:

- O número máximo de épocas é alcançado;
- O tempo máximo de processamento é alcançado;
- O desempenho é minimizado até o valor desejado;
- O gradiente de desempenho cai abaixo no mínimo (i.e. não ocorrem mais alterações significativas no treinamento);
- Segundo um critério específico das variáveis internas do algoritmo que assinala a impossibilidade de melhorar o resultado do treinamento.

Além dos parâmetros de entrada das funções, o treinamento utiliza outros parâmetros que podem ser definidos pelo projetista da rede (mas cujos valores padrão já estão pré-estabelecidos). Esses parâmetros são: número máximo de épocas de treinamento; desempenho desejado; taxa ou rapidez de aprendizagem; número máximo de falhas de validação; fator de uso de memória/velocidade; gradiente mínimo de desempenho; quantidade de épocas exibidas por vez durante o treinamento; e tempo máximo de treinamento.

Os algoritmos de treinamento, as quantidades de neurônios nas camadas escondidas, o número máximo de épocas de treinamento e outros parâmetros da rede neural projetada foram sistematicamente alterados buscando verificar os valores ideais para o funcionamento da rede. Após essa etapa de testes e ajustes, obtiveram-se os resultados discutidos no próximo capítulo.

4. VALIDAÇÃO DA PROPOSTA

A confirmação da hipótese deste trabalho é dada pela validação dos resultados obtidos com a ferramenta computacional desenvolvida. Essa validação pode ser considerada alcançada quando a rede treinada for capaz de extrair uma relação satisfatória do conjunto de dados estudados, mostrando ser capaz de generalizar a relação aprendida para dados desconhecidos. Para que isso ocorra é necessário que o projeto da rede seja uma representação adequada ao problema estudado. Por isto, é importante observar que o conjunto reunido de modelos de lapidação desenvolvidos para o quartzo apresenta diversas formas e padrões de facetamento, fornecendo uma amostragem representativa das variações existentes para a lapidação dessas gemas.

Observa-se no anexo A duas vistas de cada modelo cujos dados foram utilizados neste projeto. Para a entrada desses dados na programação da rede neural foi necessário realizar a normalização dos resultados dos mesmos a partir dos maiores valores encontrados no conjunto. Para brilho, o modelo 49, (*squeezed square*) apresentava o maior valor, com 94,6% de retorno de luz, sendo por isto tomado como valor de referência pelo qual os outros modelos tiveram seus valores divididos. Para o aproveitamento foi realizado o mesmo procedimento, sendo o modelo 35 (*diagonal 1.5*) o que apresentou maior valor, 0,767, ou 76,7% de aproveitamento.

Para o modelamento do problema é fundamental que os parâmetros escolhidos sejam de fato as variáveis que determinam seus resultados. As teorias encontradas na revisão bibliográfica da forma como os parâmetros geométricos de lapidação alteram os resultados de desempenho ótico tratados neste projeto foram, de acordo com os resultados mostrados a seguir, confirmadas pela aplicação da rede neural artificial.

Estando a rede neural projetada a partir do paradigma neural adequado, e com a utilização dos parâmetros relevantes, buscou-se extrair a informação do conjunto de dados, no processo denominado aprendizagem. Em RNAs, a aprendizagem é controlada pelo algoritmo de treinamento, na forma como este constrói a equação não-linear que governa o problema a partir da definição dos pesos nas conexões entre neurônios.

A primeira etapa de testes de validação consistiu da escolha do algoritmo de treinamento em função do tempo de treinamento e melhoria gradual do desempenho da rede, medido através do erro quadrático médio. No pacote MATLAB, são 15 as funções de treinamento, que utilizam diferentes algoritmos para cálculo iterativo dos valores dos pesos de conexão de neurônios: *trainbfg* (*backpropagation* baseada no método quasi-Newton), *trainbr* (regularização Bayesiana), *traincgb* (*backpropagation* baseada no gradiente do desempenho de Powell-Beale), *traincgf* (*backpropagation* baseada no gradiente de Fletcher-Powell), *traincgp* (*backpropagation* baseada no gradiente de Polak-Ribiere), *traingd* (*backpropagation* baseada na descida do gradiente), *traingdm* (*backpropagation* baseada na descida do gradiente com momento), *traingda* (*backpropagation* baseada na descida do gradiente com taxa de aprendizagem adaptativa), *traingdx* (*backpropagation* baseada na descida do gradiente com momento e com taxa de aprendizagem adaptativa), *trainlm* (*backpropagation* baseada no método de Levenberg-Marquardt), *trainoss* (*backpropagation* baseada na secante do desempenho), *trainrp* (*backpropagation* elástica), *trainscg* (*backpropagation* baseada no gradiente conjugado), *trainwb* (função “por peso e bias”), *trainwbl* (função “por peso e bias” modificada).

Pode-se verificar que uma escolha fundamentada no funcionamento dos algoritmos implicaria em conhecimento aprofundado de cada um deles. O objetivo do treinamento é a obtenção de uma redução no valor do erro quadrático médio numa taxa que indique que o algoritmo consegue encontrar uma direção de diminuição do erro (ou seja, seu gradiente).

Outro aspecto do processo é o tempo de treinamento. No entanto, o tempo gasto para realizar o treinamento não representa um problema verdadeiro, pois a rapidez é apenas um conforto e não uma exigência para que a rede funcione bem depois de treinada. Já com relação ao número de épocas, i.e. apresentação do conjunto de dados de treinamento para ajuste da rede, é preciso evitar um determinado fenômeno: o treinamento excessivo (*over-training*), onde a rede perde a capacidade de generalizar (aplicar seu conhecimento em outro conjunto de dados) e fica especializada nos dados de treinamento. Esse fenômeno é difícil de analisar, restando ter o cuidado com o número de épocas, e verificar os resultados com os testes feitos com dados que não foram utilizados durante o treinamento.

Foram realizados testes com a maior parte dos algoritmos citados, buscando um que atendesse os requisitos de desempenho. Os algoritmos que pareceram indicar uma boa alternativa inicial foram *trainlm*, *traingdm*, *traingda*. Mas aquele que apresentou uma evolução mais favorável no processo de redução do erro, e que confirmou sua adequação na fase de testes da rede, foi o *traingdx* (*backpropagation* baseada na descida do gradiente com momento e com taxa de aprendizagem adaptativa).

Esse algoritmo gerou um erro de treinamento um pouco pior que os testados anteriormente (da ordem de 10^{-3} após 5.000 épocas), porém com variação favorável mais consistente, como se verificou na validação do treinamento da rede. A Figura 4.1 mostra a variação do erro durante o treinamento.

Após o treinamento, a rede analisou o conjunto de dados de teste formado pelos dados dos modelos 3 (*eigth round*), 14 (*cross point*) e 58 (*spiro*):

$$P_2 = [x_4^T \ x_{13}^T \ x_{58}^T]^T$$

$$x_4 = [57 \ 16 \ 0.490 \ 0.490 \ 0.435 \ 0.168 \ 0.623 \ 0.698 \ 0.270];$$

$$x_{13} = [49 \ 8 \ 0.468 \ 0.468 \ 0.445 \ 0.212 \ 0.677 \ 0.657 \ 0.313];$$

$$x_{58} = [46 \ 12 \ 0.384 \ 0.357 \ 0.441 \ 0.193 \ 0.654 \ 0.674 \ 0.295];$$

Os resultados conhecidos de aproveitamento e brilhância, respectivamente, para cada um desses três modelos são:

$$y_4 = [0.226 \quad 78.5];$$

$$y_{13} = [0.246 \quad 70.7];$$

$$y_{58} = [0.239 \quad 86.9];$$

Normalizados, os valores para desses resultados são:

$$T_2 = [y_4^T \quad y_{13}^T \quad y_{58}^T]^T$$

$$T_2 = [[0.2947 \quad 0.3207 \quad 0.3116] \\ [0.8298 \quad 0.7474 \quad 0.9186]]$$

Os resultados obtidos pela rede treinada foram:

$$R_2 = [[0.3008 \quad 0.3251 \quad 0.293] \\ [0.8351 \quad 0.8365 \quad 0.8345]]$$

Ou, em termos de erros percentuais:

$$E = [[0.0207 \quad 0.0136 \quad 0.0590] \\ [0.0064 \quad 0.1192 \quad 0.0915]]$$

O que se observa é que a rede treinada foi capaz de estimar os resultados do conjunto de testes com um erro médio de 5,17%, com erro máximo de 11,9% no caso da brilhância para o modelo 02 (*cross point*). Os erros menores atribuídos ao aproveitamento parecem advir da natureza mais simples da relação geométrica entre os parâmetros e este resultado (por ex. um modelo de relações $H/W=1$ e $L/W=1$ é um cubo de aproveitamento = 1 e brilhância= 0).

Considerando-se as variadas possibilidades (essencialmente geométricas) das características dos modelos de lapidação, as variações de

características físicas, a limitação do conjunto de modelos utilizados no treinamento (mesmo sendo bastante representativo), a grande complexidade da relação entre dados de entrada (F - quantidade total de facetas, G - quantidade de facetas no rondiz, T/W - relação entre a mesa e a largura, T/L - entre a mesa e o comprimento, P/W - entre o pavilhão e a largura, C/W - entre a coroa e a largura, H/W - relação entre a altura e a largura, P/H - relação entre o pavilhão e a altura e C/H - relação entre a coroa e a altura) e os dados de saída (brilhância ISO e aproveitamento), os resultados obtidos podem ser considerados extremamente positivos.

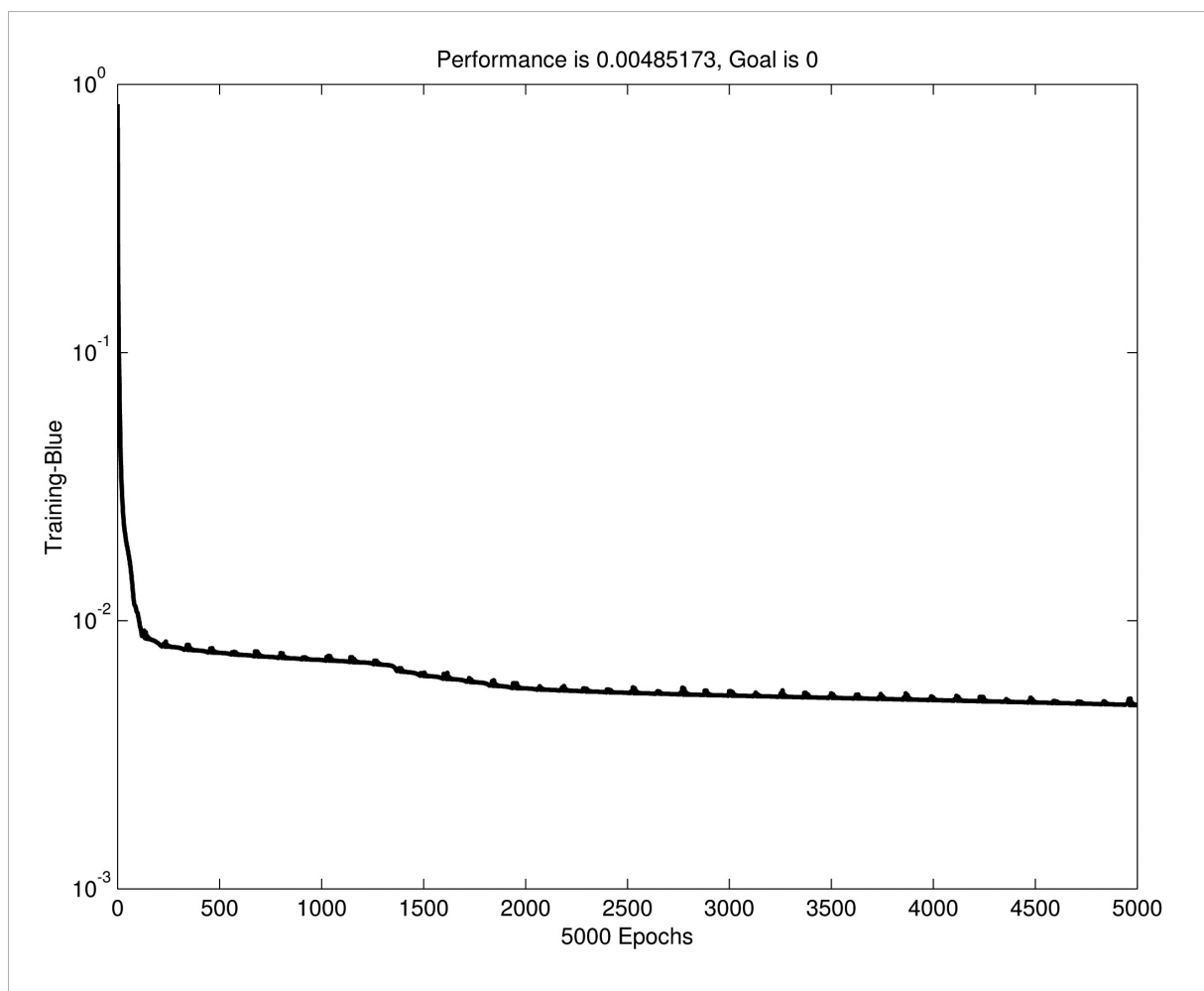


Figura 4.1: Gráfico do treinamento da rede com o algoritmo traingdx.

5. CONCLUSÃO

No decorrer deste trabalho foram observados aspectos técnicos da lapidação, aspectos materiais do quartzo (material escolhido para esse estudo), fenômenos da Óptica Física e técnicas de desenvolvimento de sistemas computacionais baseadas em Redes Neurais Artificiais. Dessa forma, apresentou-se um estudo geral do problema da lapidação como a complexa combinação entre os efeitos físicos que influenciam a aparência de uma gema facetada, como a interação da luz com o material, as propriedades desse material, a forma do poliedro, a medida da rugosidade (polimento) de sua superfície, o tipo de luz incidente, a geometria da iluminação e as condições de observação.

Baseado nestas considerações, construiu-se uma ferramenta computacional de análise dos parâmetros relevantes ao problema da lapidação utilizando RNAs. A essa rede foi apresentado, para seu treinamento, um conjunto de modelos de lapidação desenvolvidos para quartzo na forma de uma matriz de dados considerados relevantes para o problema. Depois de treinada, a rede foi capaz de estimar dois parâmetros importantes para gemas lapidadas, a brilhância e o aproveitamento, referentes a três modelos de lapidação cujos resultados desconhecia, com um erro médio de 5,72%.

Os resultados obtidos com a ferramenta computacional desenvolvida para avaliar um conjunto de dados composto pelos parâmetros de lapidação de modelos com formas diferentes mostram que este tipo de abordagem é válido ao problema de verificação da influência da geometria do modelo nos resultados de interação da luz com a matéria. Mais do que isto, pode-se concluir que sistemas baseados em RNAs são indicados para o tratamento de problemas dessa ordem, pois são capazes de extrair uma relação entre um conjunto de dados que definem funções extremamente complexas, uma vez que os mais recentes estudos sobre o problema, realizados com os métodos tradicionais de modelamento matemático e *ray-tracing*, vêm apontando grande

interdependência entre os parâmetros de lapidação e os resultados da combinação.

Assim, confirma-se a hipótese inicial desse trabalho de que uma ferramenta baseada em redes neurais artificiais é capaz de estimar dois parâmetros de grande importância no projeto de lapidação de gemas.

Esses resultados apontam um caminho a ser estudado com mais profundidade e em maior amplitude, o do desenvolvimento de ferramentas computacionais de auxílio ao projeto de lapidação baseadas em RNAs.

5.1 Trabalhos futuros

Com relação às perspectivas de continuidade do estudo apresentado, coloca-se uma possibilidade interessante de explorar a utilização da ferramenta de análise utilizando RNAs através da ampliação de escopo dos objetivos de projeto.

A utilização de um número considerável de modelos de lapidação, próximo do esgotamento das possibilidades de projetos existentes para o quartzo consiste em uma via de pesquisas visando melhorar os resultados encontrados.

Outra possibilidade de trabalhos futuros aponta para a integração dessa ferramenta com softwares existentes (tipo GemCad), como uma alternativa ao modelamento matemático tradicional na estimação de parâmetros e poderia configurar uma etapa inicial nos projetos de lapidação.

Ao projeto da rede desenvolvida para quartzo incolor podem ser adicionadas variáveis dependentes de absorção seletiva de cor, ampliando a ferramenta para análise de outras variedades de quartzo. Outros materiais gemológicos também podem ser analisados, se alteradas as variáveis que definem o material (como índice de refração e birrefringência).

Dessa forma, pretende-se verificar as possibilidades de expandir a aplicabilidade da ferramenta de análise baseada em RNAs, tornando-a um

aplicativo útil nos projetos que buscam agregar valor às gemas, contribuindo para o estudo de modelos ótimos para as gemas coradas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CALLISTER JR., *Ciência e engenharia de Materiais: uma introdução*. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

CODINA, C. *A joalheria*. Lisboa: Estampa, 2000.

COWING, M. *Diamond brilliance: theories, measurement and judgement*. 2003. Artigo, 21 p. Disponível em <<http://www.acagemlab.com/Article1/Article1.htm#brill024>>. Acesso em setembro de 2004.

DE BEER´S-LVMH CO. *A history of diamonds*. Artigo. Disponível em <<http://www.debeers.com/en/history/timeline/index.html>>. Acesso em setembro 2004.

Departamento de Ingeniería Geológica de la ETSI de Minas de Madrid (UPM). *Cristalografía y Mineralogía*. Compilação de artigos eletrônicos. Disponível em <<http://www.uned.es/cristamine/inicio.htm>>. Acesso em setembro de 2004.

DODSON, J.S. *An statistical assessment of brilliance and fire for the round brilliant cut diamond*. OPTICA ACTA, v. 25, N. 8, p. 681-692, 1978.

FULLÉE, C. *Bijoux du 20eme Siècle*. Apple Press: London, 1992. 125 p.

FAVACHO, M. *Quartzo*. In: CASTAÑEDA, C.; ADDAD, J. E.; LICCARDO, A. *Gemas de Minas Gerais*. Belo Horizonte: SBG-MG, 2001. 288p. Cap. 10.

FAVACHO, M. et al. *Tratamento em gemas*. In: CASTAÑEDA, C.; ADDAD, J. E.; LICCARDO, A. *Gemas de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Gemologia - Núcleo Minas Gerais (SBG-MG), 2001. 288p. Cap.3, p. 53-73.

GRAHAN, J. *What is a Barion?* Artigo. Disponível em <<http://www.faceters.com/askjeff/answer14.shtml>>. Acesso em agosto de 2004.

GREEN, B.; GILBERTSON, A.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *GIA and Its History with Cut.* 2001a. Artigo, 4 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/03_GIA_Cut_History.pdf>. Acesso em abril de 2004.

GREEN, B.; KING, J.; CINO, K.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *Cut-The Least Understood "C".* 2001b. Artigo, 4 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/02_Least_Understood_C.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; REINITZ, I.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *Diamond Optics Part 1: Reflection, Refraction and Critical Angle.* 2001c. Artigo, 4 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/04_Diamond_Optics_1.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; REINITZ, I.; GILBERTSON, A.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *Diamond Optics Part 2: Light Dispersion, Color Wavelengths and Fire.* 2001d. Artigo, 6 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/05_Diamond_Optics_2.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; REINITZ, I.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *Diamond Optics Part 3: The Effects of Polarization States on Light Behavior.* 2001e. Artigo, 4 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/06_Diamond_Optics_3.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; REINITZ, I.; GILBERTSON A.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *The Importance of Three-Dimensionality.* 2001f. Artigo, 4 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/07_Three_Dimensionality.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; REINITZ, I.; GILBERTSON, A.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *What did Marcel Tolkowsky Really Say?* 2001g. Artigo, 5 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/08_Tolkowsky_1103.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; REINITZ, I.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *The Visual Presentation of Information: Part 1.* 2001h. Artigo, 6 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/10_Visual_Presentation_1.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *The Visual Presentation of Information: Part 2.* 2001i. Artigo, 5 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/11_Visual_Presentation_2.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; REINITZ, I.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *Diamond Appearance: The Components of a Computer Model.* 2001j. Artigo, 5 p. Disponível em <http://www.gia.edu/pdfs/12_Components_Computer_Model.pdf>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; HEMPHILL, T.S.; JOHNSON, M.; SHIGLEY, J. *The GIA Diamond Proportion Module: Illustrating How Changes in Individual Proportions Affect the Appearance of a Round Brilliant Cut Diamond.* 2002. Artigo, 4 p. Disponível em <http://www.gia.edu/research/1383/6368/article_detail.cfm>. Acesso em setembro de 2004.

GREEN, B.; JOHNSON, M.; REINITZ, I.; SHIGLEY, J. *Computer Modeling Part 2: A Closer Look at Metrics.* 2003. Artigo, 5 p. Disponível em <http://www.gia.edu/research/1383/10135/article_detail.cfm>. Acesso em setembro de 2004.

HAYKIN, S. *Redes Neurais, princípios e práticas.* 2ª ed. Porto Alegre, Bookman. 2001.

HEMPHILL, T. et al. in *Modeling the appearance of the round brilliant cut diamond: an analysis of brilliance*. *Gems & Gemology*, v. 34, N. 3, p. 158-183, 1998.

HURLBURT JR., C. S.; KAMMERLING, R. C. *Gemology*. 2^a ed. New York, Wiley-Interscience Publications. p. 181-198

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEMAS E METAIS PRECIOSOS (IBGM). 2004. *Boletim Trimestral IBGM Informa*. Brasília, Ano XII. N. 38.

JAIN, A. K.; MAO, J.; MOHIUDDIN, K.M., *Artificial Neural Networks: A tutorial*. *IEEE Computer*, v. 29, N. 3, p. 56-63, 1996.

KELLER, B. *Refractive Index and Critical Angle*. Artigo, 8p. Disponível em: <http://www.rockhounds.com/rockshop/gem_designs/refractive_index/>. Acesso em julho de 2004.

KELLER, B. *Choosing the Best Angles for Your SRB*. Artigo, 2p. Disponível em: <http://www.usfacetersguild.org/articles/bob_keller/best_angles/>. Acesso em julho de 2004.

KLEIN, C.; HURLBUT JR., C. S. *Manual of Mineralogy*, 21st ed. New York: John Wiley & Sons, 1993. p. 593-612.

KOCKELBERGH, I., VLEESCHDRAGER, E., WALGRAVE, J. *The brilliant story of Antwerp diamonds*. Antuérpia: MIM Publishing Co, 1990. p. 26-29.

LAPIDART, *Manual de Lapidação*. Belo Horizonte, 2003. 47p.

MACHADO, G. J. A. *Lapidação de Gemas de Cor*. 64p. Monografia de (Especialização em Gemologia) – DEGEO, Escola de Minas/UFOP. Ouro Preto, 1995.

METTA, N., METTA, A. *As Pedras Preciosas*. São Paulo: Difusão Européia do Livro, 1960. p. 7-56

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC). *Fórum de Competitividade-Cadeia Produtiva do Setor de Gemas e Jóias*. Brasília, 2004. 77 p.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR (MDIC). *Programa Brasileiro de Design*. Brasília, 1998.

NASSAU, K. 1983. *The Physics and Chemistry of Colour: The fifteen causes of colour*. New York, Wiley-Interscience Publications. 454 p.

PEDROSA-SOARES, A. C. Et al. A Província Gemológica Oriental do Brasil. In: CASTAÑEDA, C.; ADDAD, J. E.; LICCARDO, A. *Gemas de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Gemologia - Núcleo Minas Gerais (SBG-MG), 2001. 288p. Cap.1, p. 16-33.

POLLI, G. O. *Tratamento de inclusões em esmeraldas da mina da Belmont, Itabira (MG)*. 1999. 245 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-graduação em evolução crustal e recursos naturais) – DEGEO, Escola de Minas - UFOP, Ouro Preto-MG. 1999.

REINITZ, I.M. et al. *Modeling the appearance of the round brilliant cut diamond: an analysis of fire, and more about brilliance*. *Gems & Gemology*, V. 37, N. 3, p. 174-197, 2001.

REINITZ, I.; JONHSON, M.; SHIGLEY, J. *How Science Works: Understanding the Scientific Method*. 2002. Artigo, 4 p. Disponível em <http://www.gia.edu/research/1383/6368/article_detail.cfm>. Acesso em setembro de 2004.

SASIÁN, J. M.; YANTZER, P.; TIVOL, T. *The Optical Design of Gemstones*, *Optics and Photonics News*, v. 14, N. 4, p. 24, 2003.

SCHOENUNG, M. *The Industry changes face*. Artigo. Disponível em <<http://www.voguegioiello.net/01gio/0305/0500/eindex.shtml#3>>. Acesso em setembro de 2003.

SCHUMANN, W. *Gemstones of the World*. New York, Sterling Publishing Co., Inc. 1997. p. 15-67.

STERNBERG, R. V. Today's revolution in diamond cutting. Artigo, 6 p. Disponível em <<http://www.eightstar.com/docs/TodaysRevolutionInDiamondCutting.htm>> Acesso em setembro de 2004.

STRICKLAND, R. W. 1983. GemRay, GemFrame, and GemFlick User's Guide, Version 1.4. Manual de software, 11p. Disponível em: <<http://gemcad.com/gemray.htm>> . Acesso em julho de 2004.

STRICKLAND, R. W. 2002. *GemCad's Manual. Version 4.51*. Artigo, 57p. Disponível em: <<http://gemcad.com/downloads/gemcadman.pdf>> . Acesso em setembro de 2003.

TAIT, H. *7000 Years of Jewellery*. Londres, British Museum Press, 1986. 254p.

TATIBANA, C.Y.; KAETSU, D.Y. *Homepage de Rede Neurais*. Artigos, 29p. Disponível em: <<http://www.din.uem.br/ia/neurais/>>. Acesso em setembro de 2003.

TEIXEIRA, M.B.S. Design de Jóias. In: CASTAÑEDA, C.; ADDAD, J. E.; LICCARDO, A. *Gemas de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Gemologia - Núcleo Minas Gerais(SBG-MG), 2001. 288p. Cap.12, p. 260-279.

VAN SANT, F. *Design Principles*. Artigo, 2p. Disponível em: <http://www.usfacetersguild.org/articles/fred_van_sant/design_principles/>. Acesso em setembro de 2003.

WEBSTER, R. *Gems: Their Sources, Descriptions and Identification*. Volume 2. Londres, Butterworth & Co. Ltd. p.219-242, 467-499, 603-738. 2002.

WISE, R. W. *Secrets of the Gem Trade: the Connoisseur's Guide to Precious Gemstones*. Brunswick House Press. 2003.

7. ANEXO A

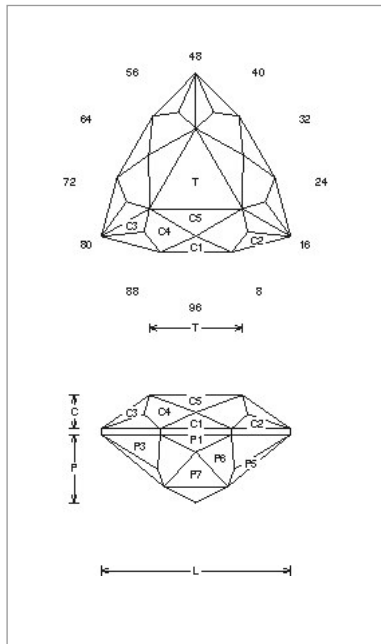
Modelos de Lapidação

Este anexo mostra as vistas superior e elevação frontal de cada um dos 62 modelos utilizados no projeto. São também indicadas as medidas das partes das gemas: altura da coroa (C), altura do pavilhão (P) e largura da mesa (T), além da numeração de cada carreira de facetas na coroa (C1,C2,...) e no pavilhão (P1, P2,...). Quando há uma faceta mesa na gema, a mesma é indicada por T.

ANEXO A

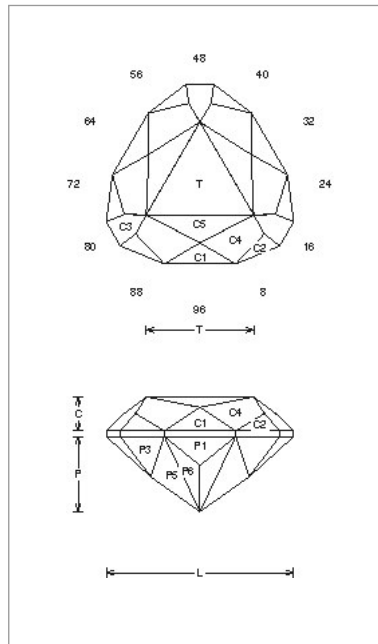
Modelos de lapidação

01



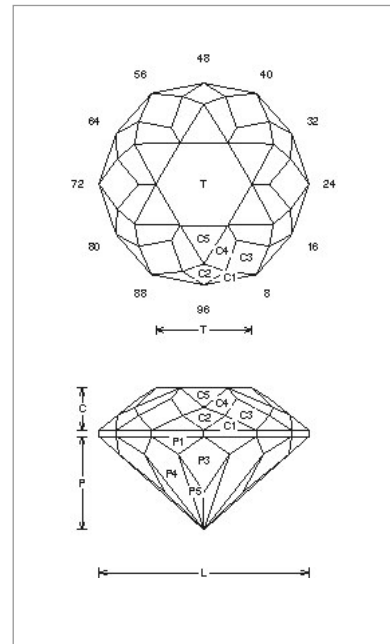
2-6-3 triangle

02



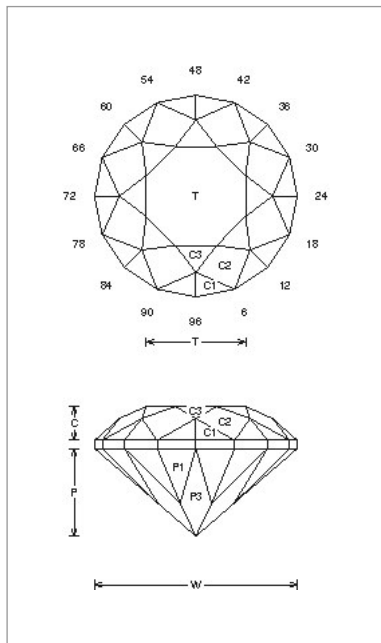
3 corner triangle

03



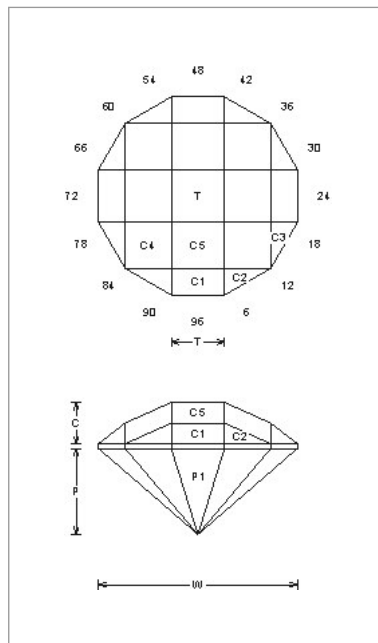
6 star

04



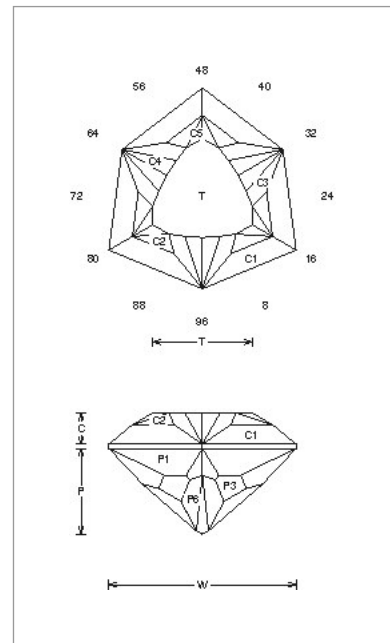
8 round

05



9 by check round

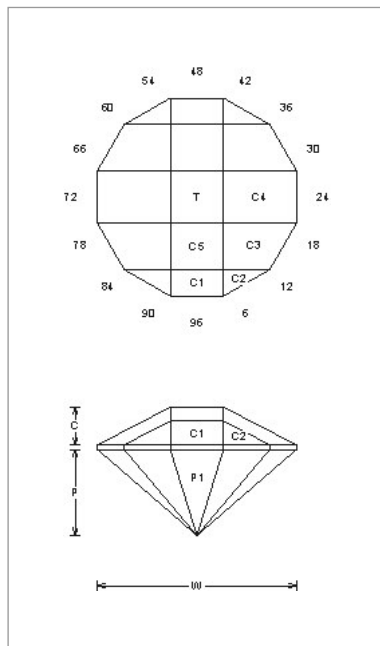
06



acorn tri

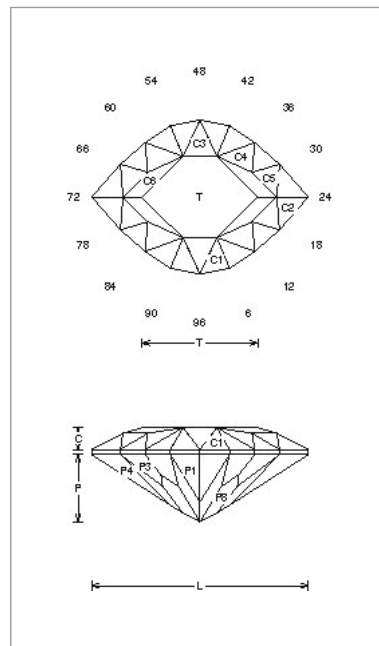
ANEXO A
Modelos de lapidação

07



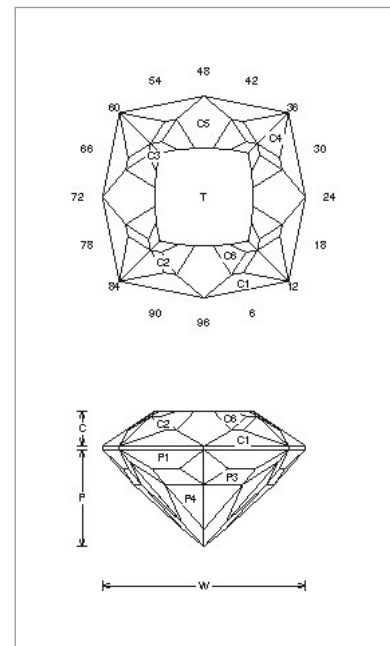
beginner check

08



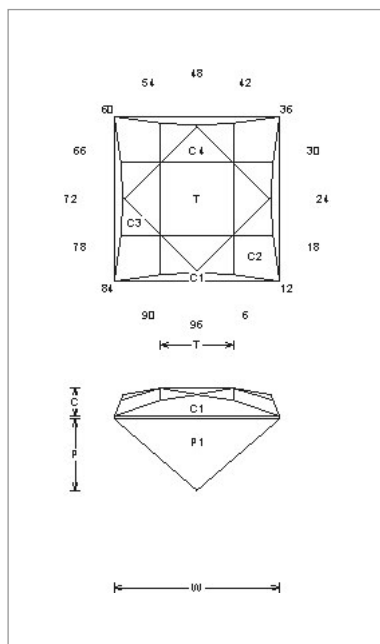
brilliant marquise

09



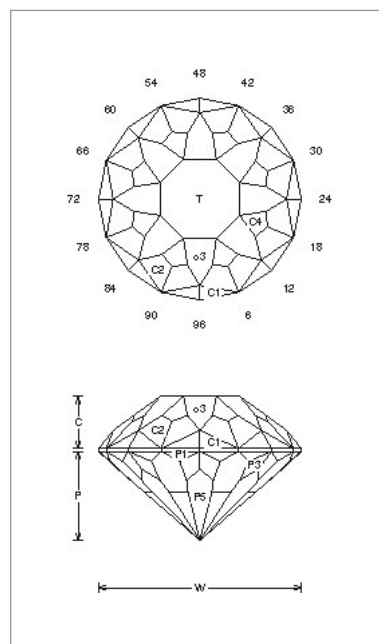
Bzzz

10



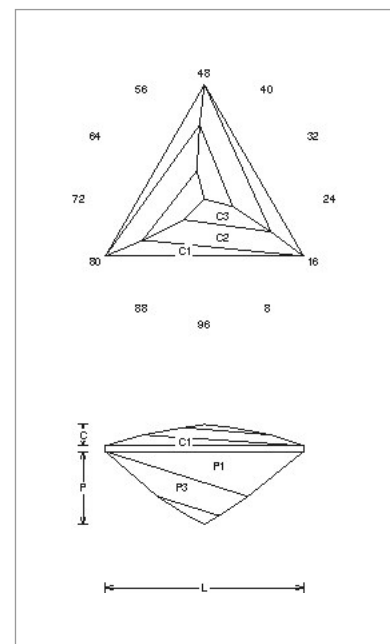
china check

11



circus tent

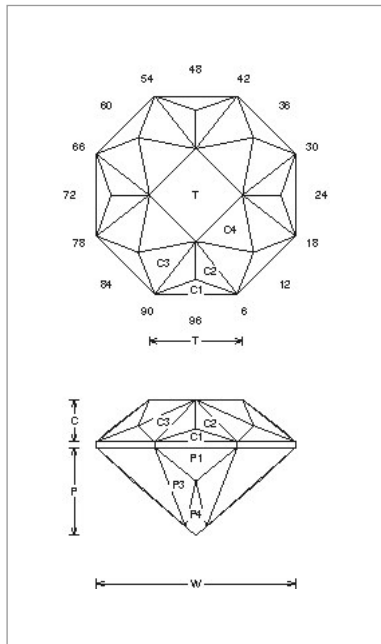
12



crazy triangle

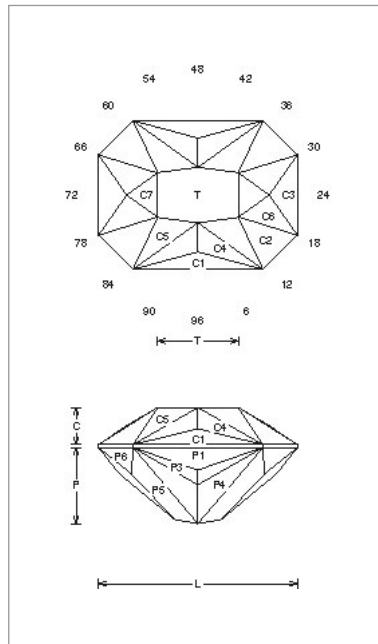
ANEXO A
Modelos de lapidação

13



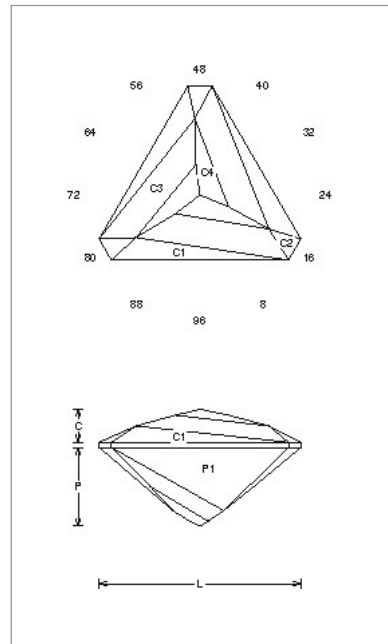
cross point

14



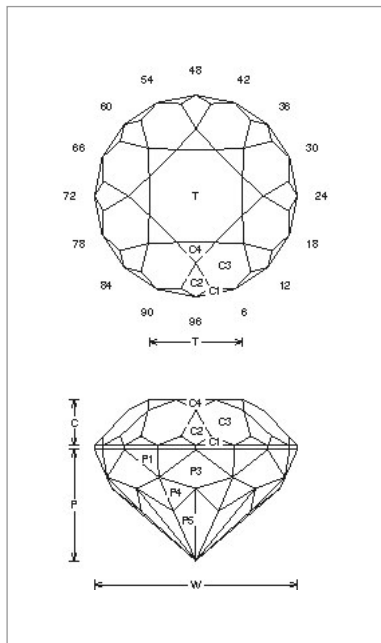
cross

15



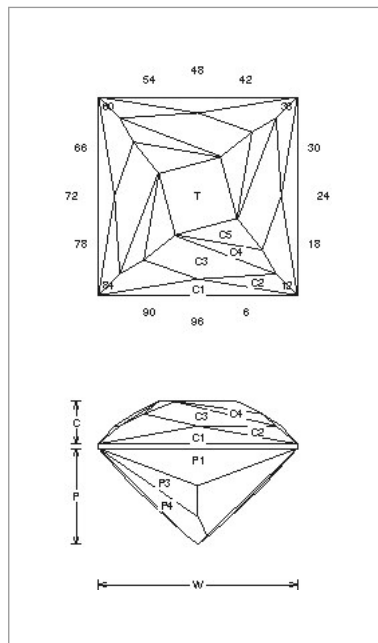
cut corner crazy tri

16



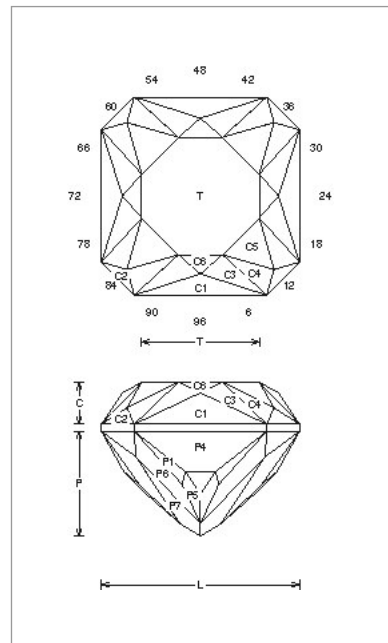
d qtz round

17



dagger bottom

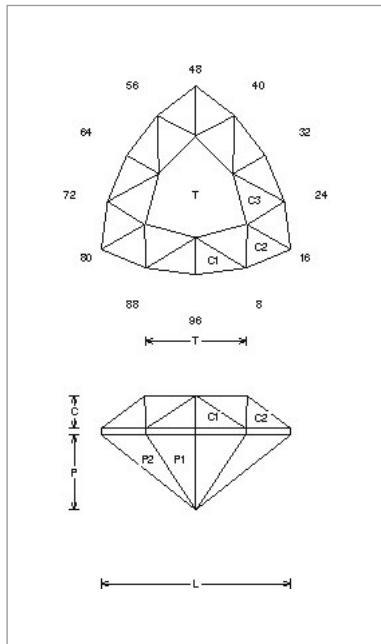
18



double cross square

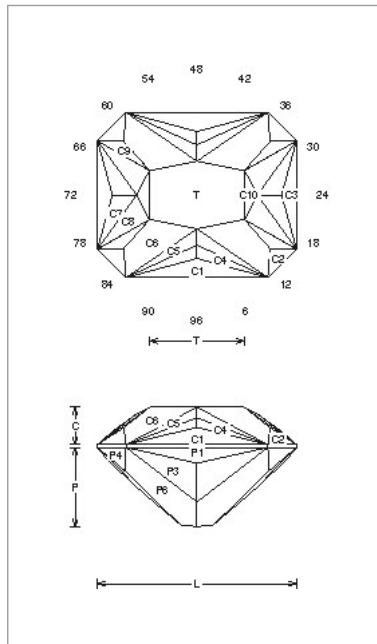
ANEXO A
Modelos de lapidação

19



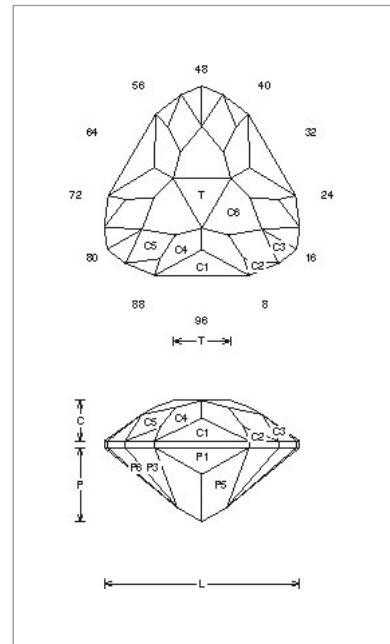
easy tri

20



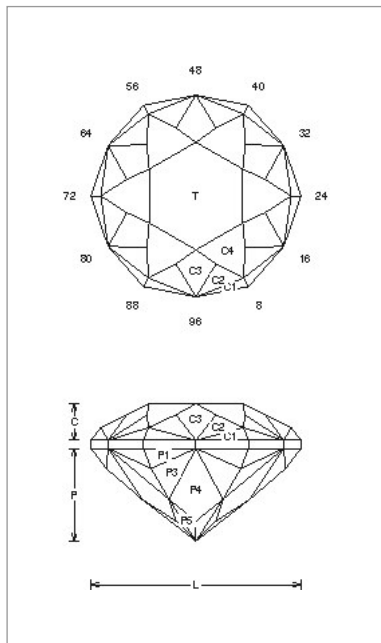
fancy

21



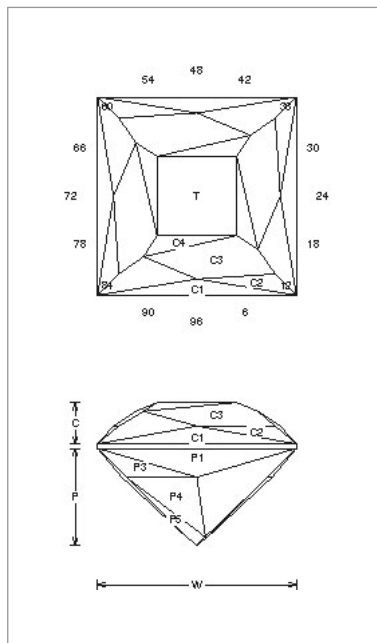
fanned triangle

22



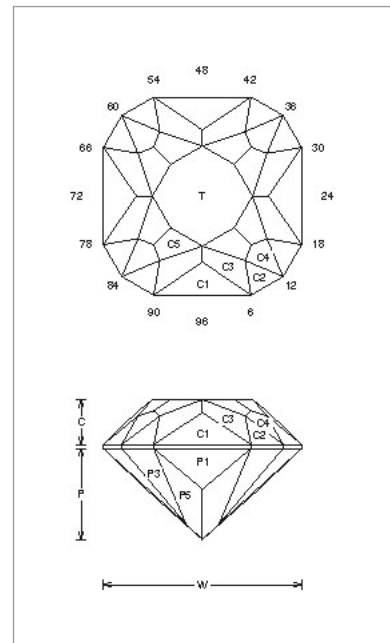
frosted star

23



harlequin square

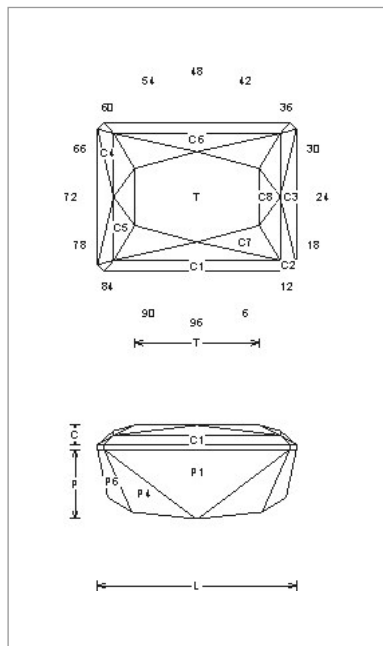
24



hopes square

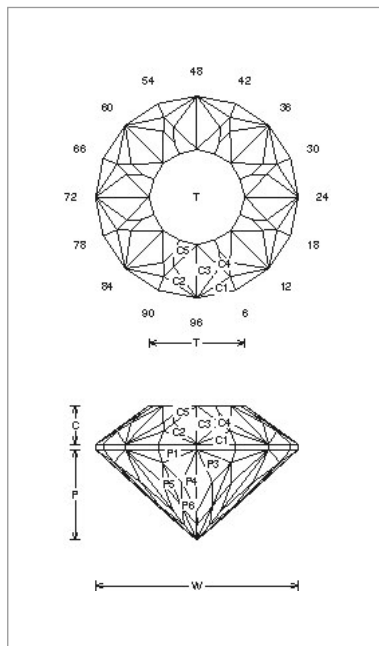
ANEXO A
Modelos de lapidação

25



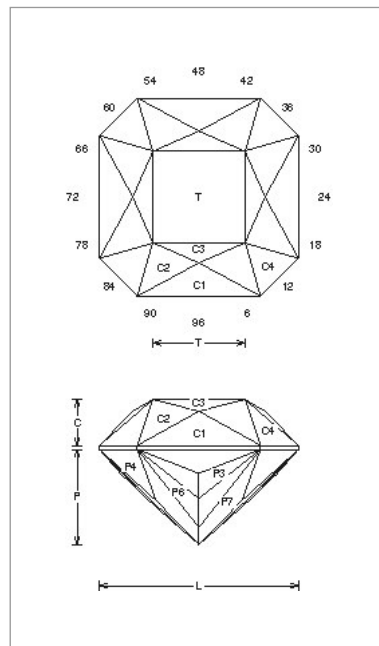
keely cisor

26



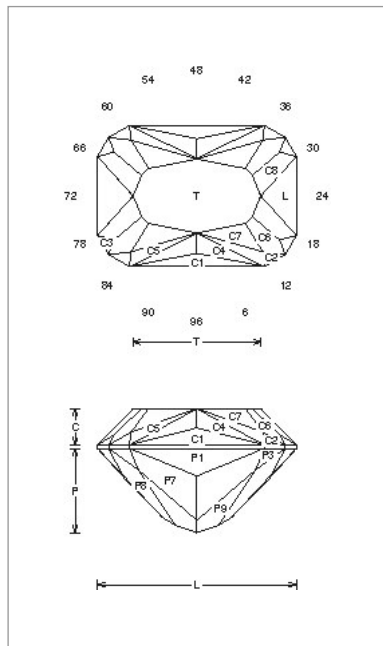
light star

27



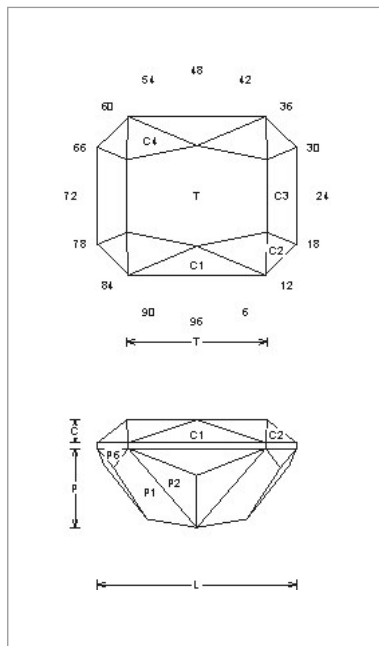
malt squared

28



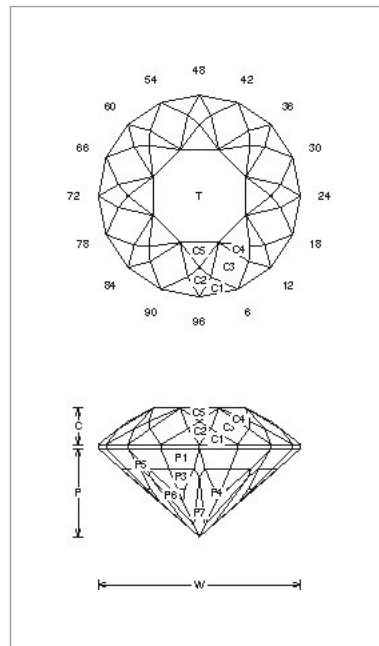
mask rectangle

29



mock emerald

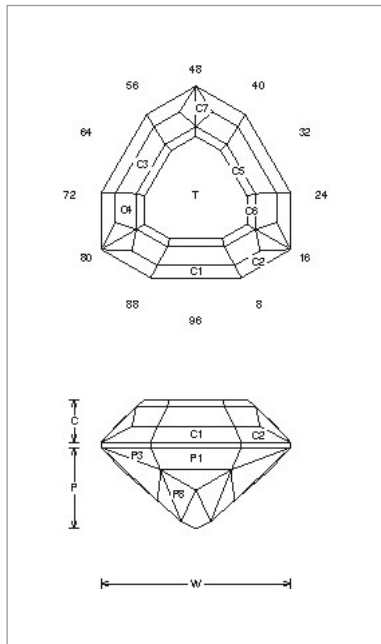
30



north star

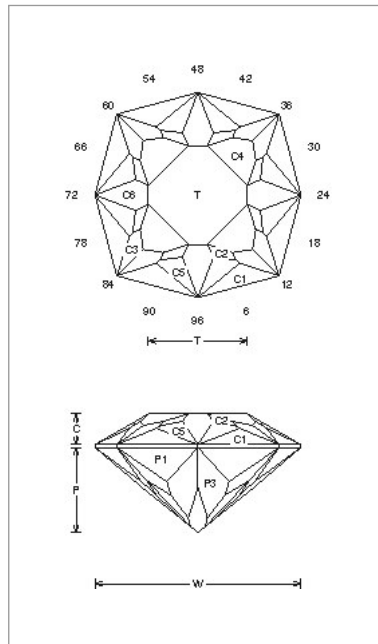
ANEXO A
Modelos de lapidação

31



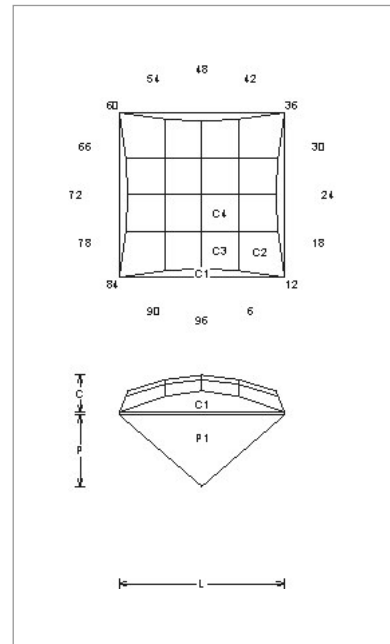
np point

32



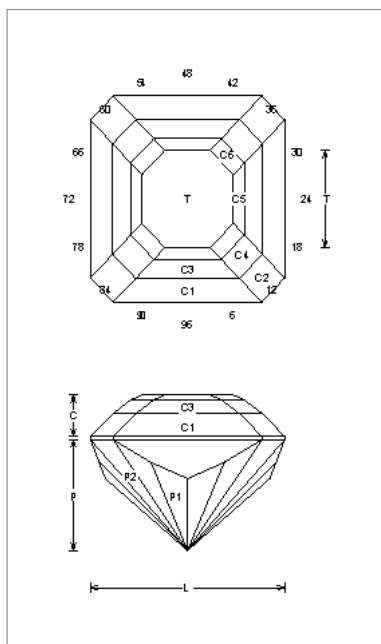
op blade

33



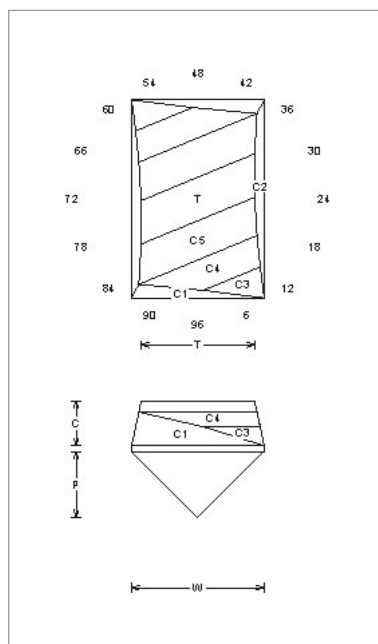
point square check

34



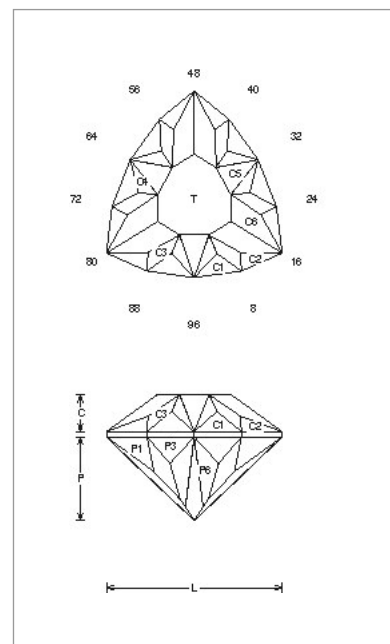
astor star

35



diagonal 1.5

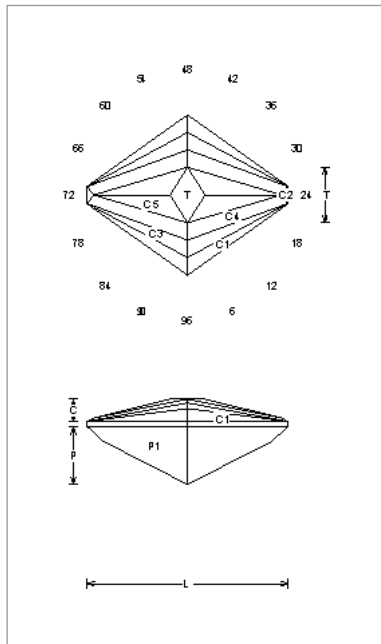
36



glass triangle

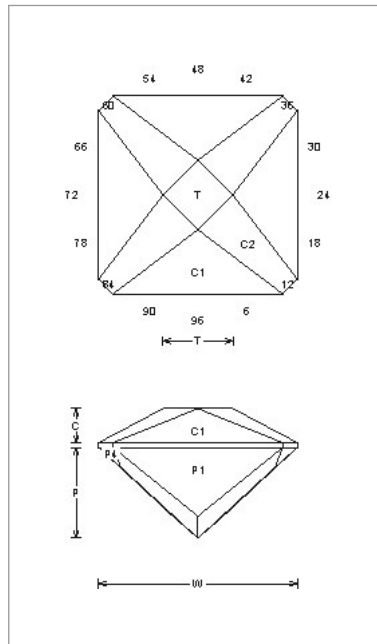
ANEXO A
Modelos de lapidação

37



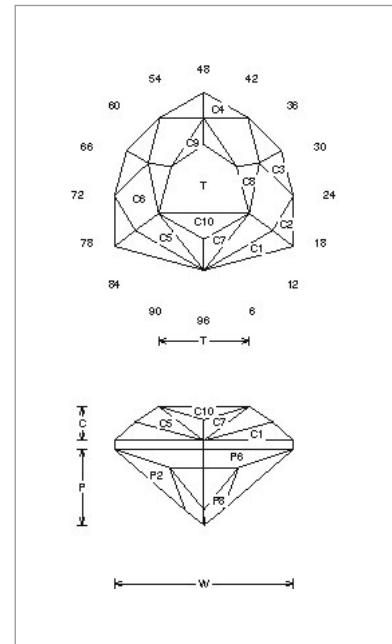
diamond perception

38



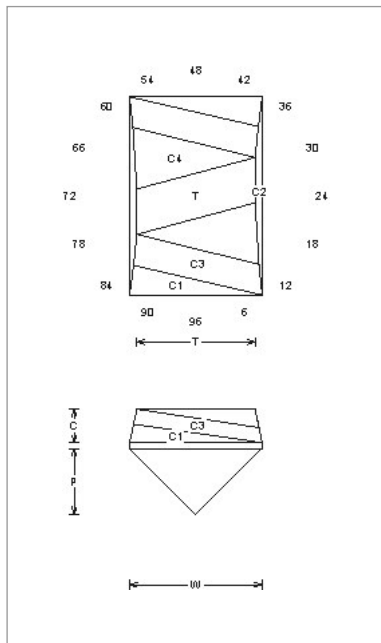
prop

39



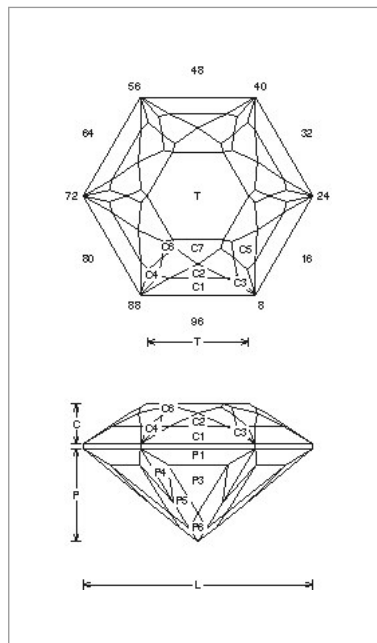
quartz shield

40



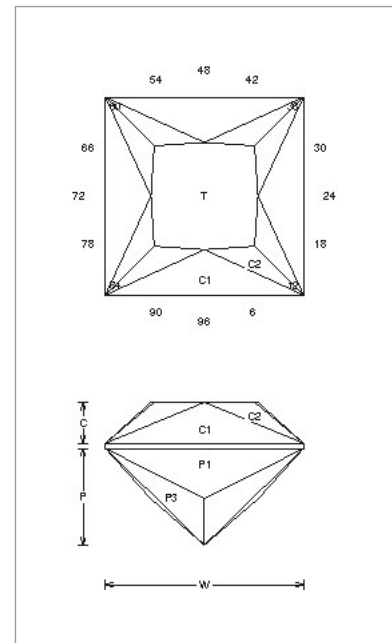
z diamonds

41



scot plaid

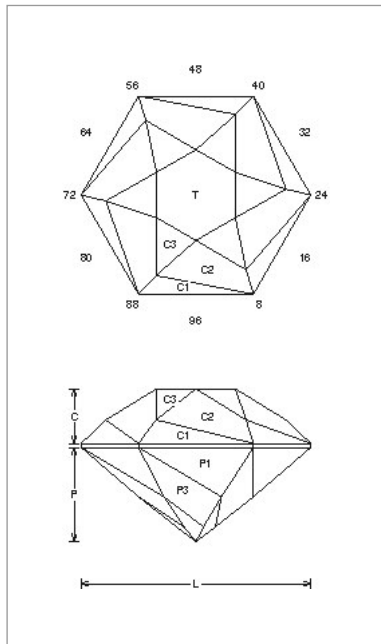
42



simply x'ed

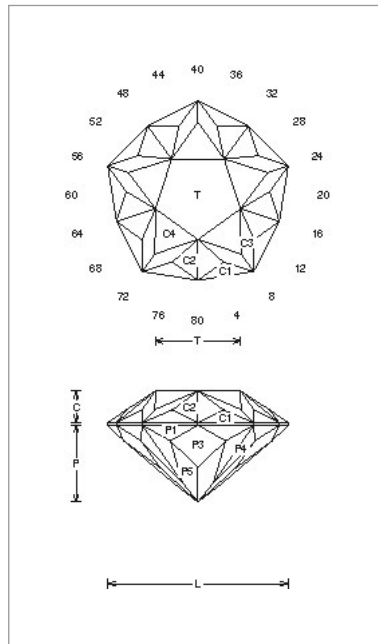
ANEXO A
Modelos de lapidação

43



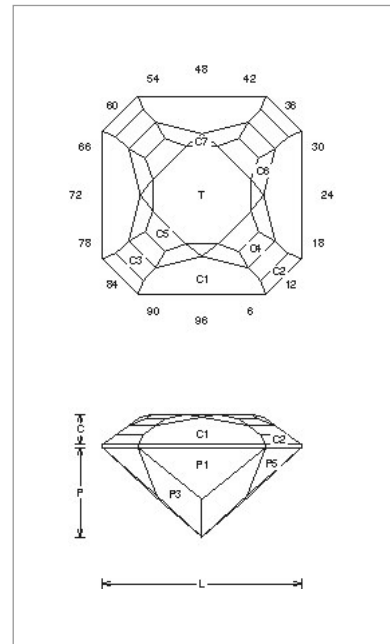
spin v

44



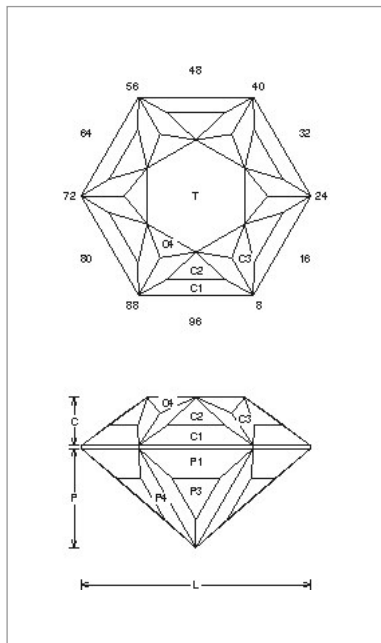
starred

45



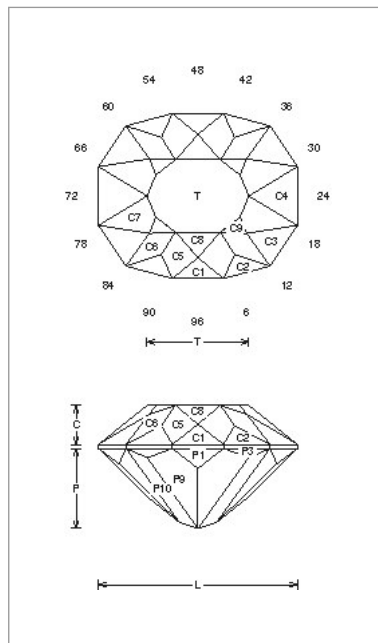
step up

46



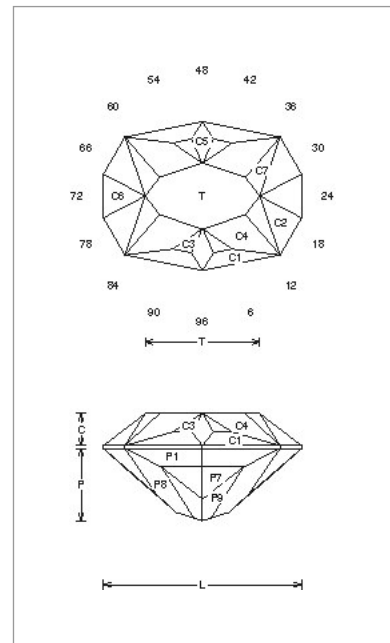
straight pedals

47



strip o

48

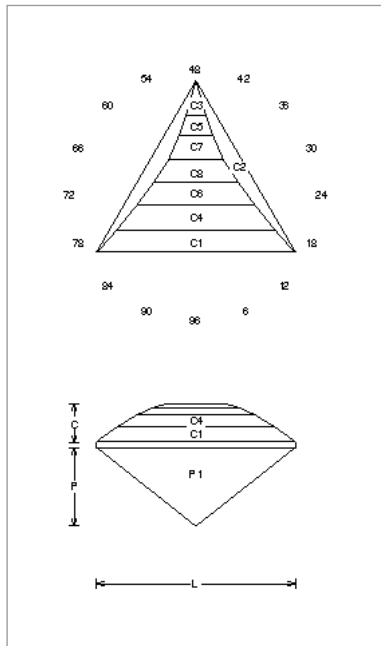


wink

ANEXO A

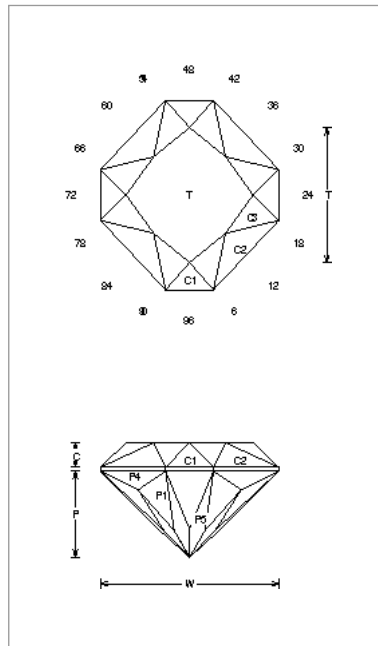
Modelos de lapidação

55



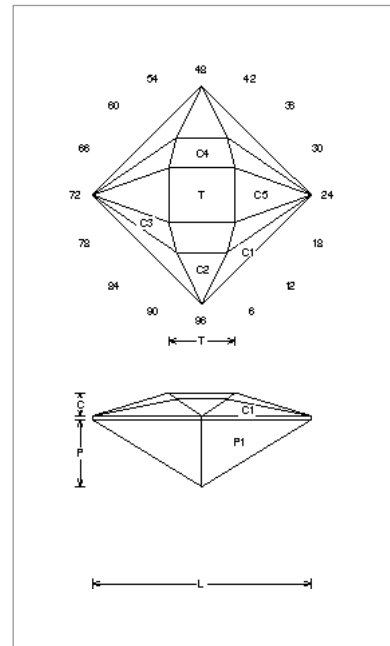
kiss

56



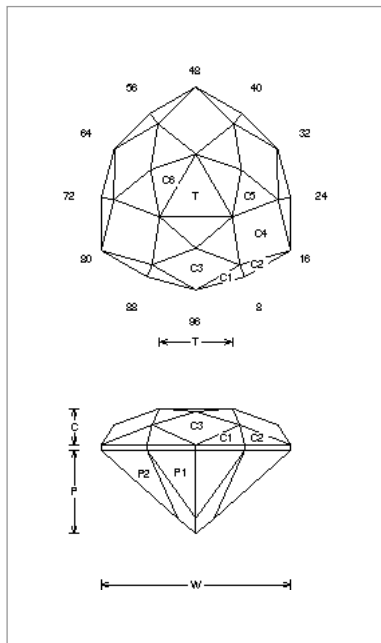
low boy

57



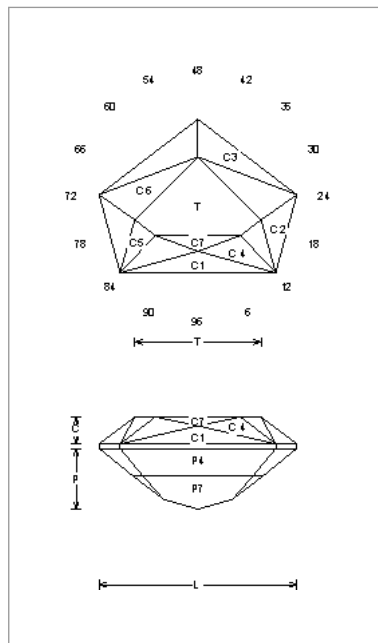
spike

58



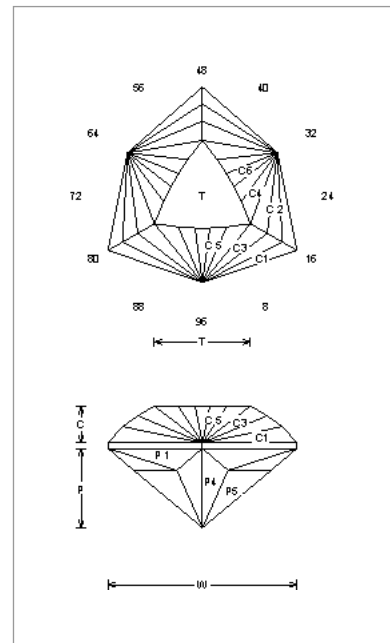
spiro

59



tess's pentagram

60

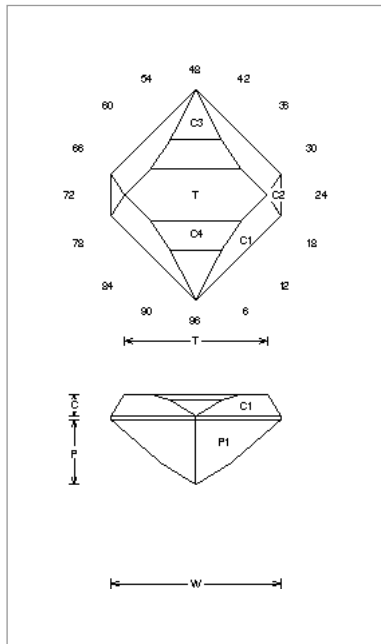


triga light house

ANEXO A

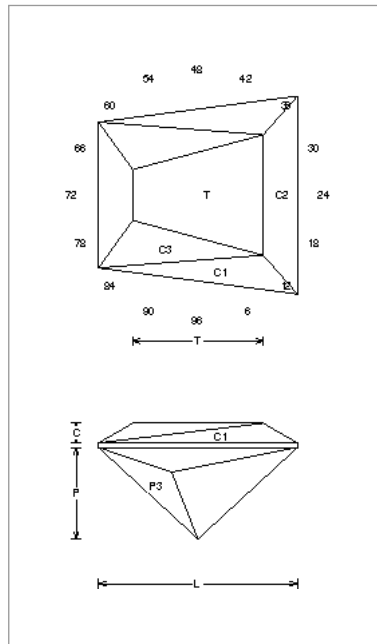
Modelos de lapidação

61



thorn

62



zip

AGA = Accredited Gem Appraisers, 1997, E.U. A.
Classe 1A e 1B = "American Ideal Cut,"
Classe 2A = "International Fine Cut,"
Classe 3A = "U.S. Domestic Average Cut."
AGJ = Association of Gemological Laboratories, 1993, Japão
AGS = American Gem Society, 1997, E.U.A.
AGT = Association of Japan Gem Trust, 1995, Japão
CGL = Central Gem Laboratory, 1993, Japão
EGL = European Gemological Laboratory, E.U.A.
HRD = Hoge Raad voor Diamant, 1993, Bélgica
IGI = International Gemological Institute, 1997, E.U.A.