

# Aplicação de redes neurais artificiais na estimação de parâmetros em projetos de gemas lapidadas

Adriano A. Mol<sup>1</sup>, Luiz S. Martins-Filho<sup>2</sup> & Ronilson Rocha<sup>3</sup>

**Resumo**—Esse artigo aborda o problema de estimação de parâmetros em projetos de lapidação de gemas, utilizando redes neurais artificiais como base para o desenvolvimento de ferramenta computacional de auxílio ao projeto. Conceitos básicos sobre processamento de gemas e sobre os chamados diagramas de lapidação são apresentados. Para a determinação do grau de eficiência de um modelo de lapidação, são propostos dois critérios: a brilhância e o aproveitamento em peso. O material escolhido para o estudo é o quartzo hialino. A validação da ferramenta proposta utiliza testes sobre dados de 62 diferentes projetos de lapidação.

**Palavras-chave**—gemas lapidadas, design de lapidação, redes neurais artificiais

**Abstract**—This paper deals with the problem of parameters estimation on faceted gemstones projects. The proposed approach applies artificial neural networks on a Computer-aided-design (CAD) tool for lapidary design. Basic concepts concerning gemstone processing and faceting diagrams are introduced. Two criteria are proposed to assess the efficiency of a given lapidary design: brilliance and yield. The material chosen is rock crystal quartz. Tests with 62 different lapidary designs were used to validate the proposed CAD tool.

**Keywords**—faceted gemstones, lapidary design, artificial neural networks

## I. INTRODUÇÃO

Os minerais denominados gemas destacam-se por possuírem características especiais como cor, brilho, transparência, dureza e raridade. Pela beleza ligada a essas características, as gemas vêm sendo utilizadas nas mais variadas formas associadas a objetos de adorno. E pela sua raridade, lhes foi atribuído alto valor de troca. Desde os primórdios da civilização, encontram-se exemplos das tentativas de aprimoramento das características óticas, visando aumento da beleza e do valor. Uma das formas mais importantes de agregar valor às gemas é a lapidação, denominação geral do processo de corte e polimento de diversos materiais. As técnicas de lapidação de gemas evoluíram no sentido de obter modelos cada vez mais sofisticados, buscando alcançar controle de saturação da cor, maximizar o retorno da luz incidente à perspectiva do observador, o que se denomina brilhância, obter distorção da luz no interior da gema, melhorar o aproveitamento em peso do material bruto, e permitir a fixação da gema em metais na construção de jóias [1].

Esse trabalho apresenta um estudo da aplicação de redes neurais artificiais (RNA) na estimação de dois parâmetros utilizados na avaliação de valor do resultado obtido num projeto de lapidação de gemas. Os parâmetros definem duas características importantes: a brilhância e o aproveitamento do material bruto. As RNAs têm sido aplicadas em diversos problemas onde é necessário extrair conhecimento de sistemas fortemente não lineares e complexos, e este é o caso da relação entre forma geométrica tridimensional de uma gema lapidada e suas características de brilhância e aproveitamento.

### A. Importância econômica das gemas e jóias

A indústria joalheira mundial é o destino final da maior parte das gemas lapidadas, movimentando anualmente cerca de quatorze bilhões de dólares em exportações entre os diversos países, segundo o Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos - IBGM [2]. 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 equivalente a 0,17% do mercado internacional.

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 apenas 350 mil dólares em 2002.

Segundo o Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC [3], 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. Entre as dificuldades do desenvolvimento da cadeia produtiva de gemas e jóias, destacam-se o baixo nível de eficiência econômica e tecnológica devido à utilização de técnicas de lapidação rudimentares. 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 [4].

<sup>1</sup>Centro de Estudos em Design de Gemas e Jóias - Universidade Estadual de Minas Gerais - CEDJ/UEMG, Av. Amazonas, 6.252 - 30510-000 Belo Horizonte/MG - Brasil. E-mail: mol@uemg.br

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais - RE-DEMAT, Depto de Computação - Universidade Federal de Ouro Preto - DECOM/ICEB/UFOP, 35400-000 Ouro Preto/MG - Brasil. E-mail: luizm@iceb.ufop.br

<sup>3</sup>Depto de Eng. de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais - Universidade Federal de Ouro Preto - DECAT/EM/UFOP, 35400-000 Ouro Preto/MG - Brasil. E-mail: rocha@em.ufop.br

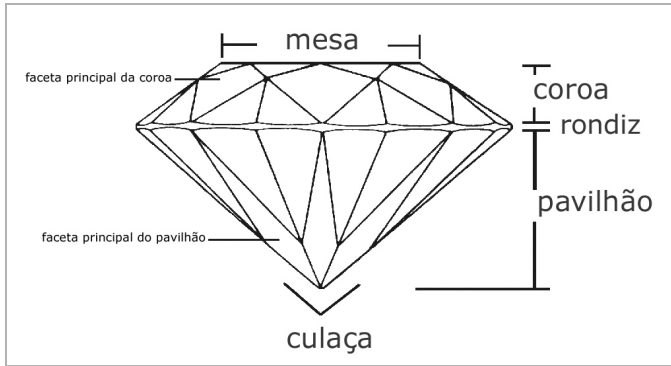


Figura 1. Nomenclatura de um modelo de gema lapidada.

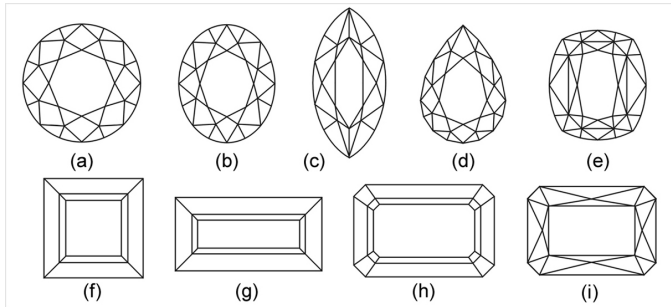


Figura 2. Vista superior de gemas ilustrando formas (a) redonda, (b) oval, (c) navete (ou marquise), (d) gota (ou pra), (e) cushion, (f) quadrada, (g) retangular (baguette), (h) octogonal (emerald cut) e (i) octogonal.

## II. LAPIDAÇÃO

A lapidação para processamento de minerais para fins de adorno tem origem, segundo historiadores, na região do Iraque no século 5 AC. Os primeiros modelos são obtidos pelo polimento das faces naturais de cristais ou de seixos rolados encontrados em depósitos de aluvião. Posteriormente, surge o modelo cabochão, que resulta em gemas de superfície em forma de domo arredondado. Por volta do século 13 DC, melhores resultados óticos são obtidos com os modelos de lapidação facetados, com pequenos cortes por abrasão utilizando pó de diamante ou coríndon e disco plano. As formas se tornam prismáticas visando realçar efeitos óticos importantes como brilho e dispersão da luz. A partir do século XX, esses modelos de lapidação passaram a ser descritos por parâmetros bem definidos, cuja influência na aparência tornou-se objeto de estudos para aprimoramento das técnicas de processamento. A nomenclatura básica de um modelo facetado é mostrada na Figura 1 e seus parâmetros dizem respeito às proporções entre essas partes. Os modelos de lapidação podem apresentar diferentes características quanto às formas. A Figura 2 mostra alguns tipos de geometria mais comuns.

Analisando a interação da luz com uma gema transparente, pode-se destacar os principais fenômenos físicos em termos da óptica geométrica. Quando um feixe de luz incide sobre a superfície da gema, uma parte dele é refletida enquanto outra é transmitida (refratada) através da interface ar-gema. A parte do feixe que percorre o interior da gema repete esse comportamento quando encontra outras

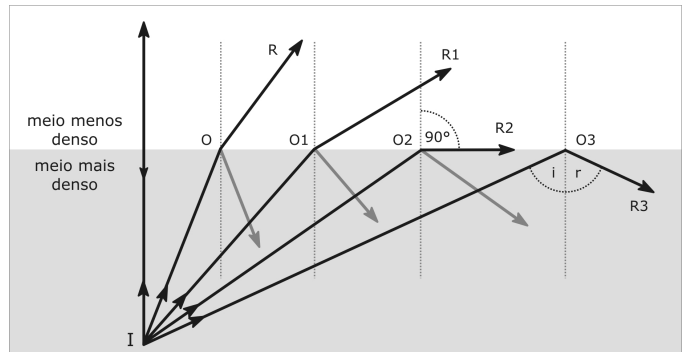


Figura 3. Fenômenos de reflexão e refração da luz numa interface entre dois materiais com índices de refração diferentes.

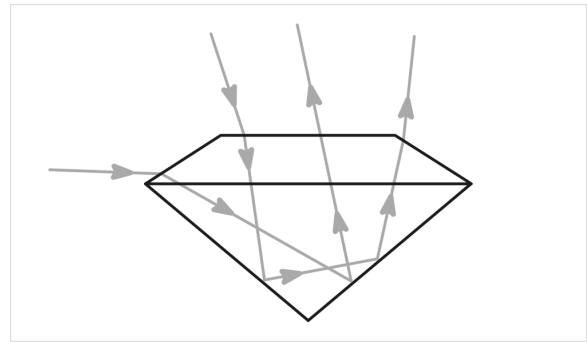


Figura 4. Exemplos de percurso de feixes de luz no interior de uma gema lapidada.

superfícies de interface. A Figura 3 ilustra esse fenômeno ótico, onde se observa que a partir de um certo ângulo, denominado ângulo crítico, o feixe é exclusivamente refletido. A relação entre ângulo incidente e de refração é dada pela lei de Snell, onde  $c$  é velocidade da luz no ar,  $v$  a velocidade da luz no interior da gema,  $n$  o índice de refração da gema,  $\sin(i)$  o seno do ângulo de incidência, e  $\sin(r)$  o seno do ângulo de refração:

$$\frac{c}{v} = n = \frac{\sin i}{\sin r} \quad (1)$$

A Figura 4 mostra como os feixes de luz viajam pelo interior de uma gema. Os ângulos formados pela coroa e pelo pavilhão da gema em relação ao plano do horizonte (rondiz) são definidores de sua geometria e determinam os valores de brilhância, a partir do índice de refração da gema. A brilhância, propriedade fundamental para a valoração de uma gema, pode ser considerada como a porção da luz incidente que é devolvida pela gema após sucessivas reflexões internas para um observador colocado frontalmente sobre a coroa desta.

Outra característica importante de um modelo de lapidação é a relação de aproveitamento entre o peso do material em estado bruto e quando facetado. Como o material bruto se apresenta em formas extremamente irregulares e das mais diversas, para efeitos de comparação, esse critério pode ser convencionado como o percentual de volume da gema lapidada inserida dentro de um cubo, de menor dimensão possível, que contenha essa gema.

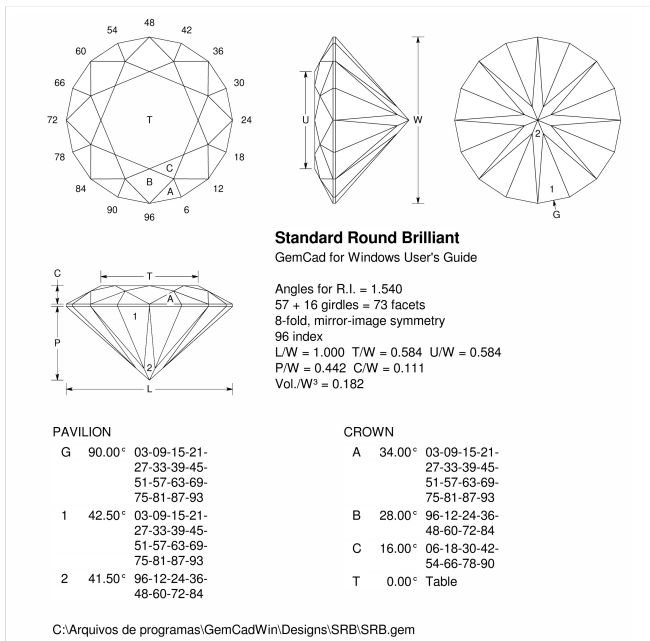


Figura 5. Um exemplo de diagrama de modelo de lapidação (brilhante redondo padrão).

Um modelo de lapidação pode ser definido através de um diagrama onde são descritos todos os parâmetros geométricos, relações entre dimensões e ângulos necessários para o corte de cada faceta, assim como sua quantidade. Um diagrama para o modelo brilhante redondo padrão, gerado no software GemCAD, é mostrado na Figura 5. Este software fornece a partir dos parâmetros geométricos e índice de refração, os resultados de brilhância e aproveitamento dos modelos de lapidação utilizados nesse estudo.

Segundo a hipótese desse trabalho, para a composição do valor de uma gema facetada, dois resultados são considerados determinantes: brilhância e aproveitamento. Os parâmetros que alteram esses resultados são: quantidade total de facetas (F), quantidade de facetas no rondiz (G), relação entre as dimensões da mesa e da largura (T/W), relação entre as dimensões da mesa e do comprimento (T/L), relação entre as dimensões da pavilhão e da largura (P/W), relação entre as dimensões da coroa e da largura (C/W), relação entre as dimensões da altura e da largura (H/W), relação entre as dimensões da pavilhão e da altura (P/H), e relação entre as dimensões da coroa e da altura (C/H) [5], [6]. A Tabela I apresenta os parâmetros dos modelos considerados no trabalho e seus respectivos valores.

### III. ESTIMAÇÃO DE PARÂMETROS

A proposta para estimação de parâmetros do projeto de uma gema lapidada, cujo objetivo é ser base para uma ferramenta computacional para auxílio ao projeto, baseia-se nas RNAs, sistemas computacionais de processamento paralelo e distribuído de dados, inspirados no funcionamento do cérebro humano, associando dados de entradas e saída de maneira similar aos neurônios. Os neurônios ar-

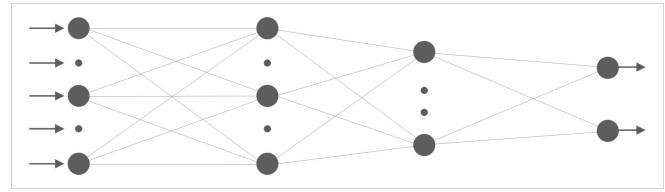


Figura 7. Estrutura proposta para a RNA.

tificiais calculam funções matemáticas, estão organizados em camadas, e são interligados por um número elevado de conexões associadas a pesos.

O primeiro passo no desenvolvimento uma ferramenta computacional baseada em RNAs para uma aplicação específica é definir o tipo de rede, número de camadas, os parâmetros de entrada e saída, e a função de ativação dos neurônios. Além disso, é necessário reunir os dados relevantes sobre o problema, nesse caso, os dados de lapidação descritos na Seção 2 para o quartzo hialino. Nesse trabalho, foi utilizado o pacote de RNAs do MATLAB. Foi projetada uma arquitetura da rede considerando um conjunto de dados com 62 modelos de lapidação, cujos parâmetros são mostrados na Tabela I.

Para sua utilização no treinamento da rede, os dados foram divididos em dois grupos: um de treinamento (59 modelos) e outro de teste de validação (3 modelos). Foram escolhidos arbitrariamente os 3 modelos para compor o grupo de teste (números 4, 14 e 58), não utilizados no processo de treinamento. Os dados de saída foram normalizados, i.e. colocados em uma escala de valores entre 0 e 1. Finalizando o projeto, definiu-se a estrutura da rede em relação à quantidade de camadas escondidas e de neurônios em cada uma delas.

Definiu-se por uma rede tipo *perceptron* multicamadas com a estrutura composta por uma camada de entrada com 9 neurônios, uma camada escondida com 18, outra com 6 neurônios, e a saída com 2 resultados (Figura 7). Segundo [7], redes neurais com duas camadas escondidas são capazes de extrair uma relação de qualquer conjunto de dados apresentados. Além disso, é necessário escolher a função de ativação a ser usada pelos neurônios, nesse caso uma sigmóide, que apresenta transição suave entre seu valor mínimo (0) e máximo (1), muito utilizada em projetos de RNAs [8]. As demais definições de projeto são a forma do cálculo do erro da saída da rede (adotou-se a média quadrática dos erros) e o algoritmo de treinamento. Para o treinamento da rede, utilizou-se um algoritmo *back-propagation* que corrige os pesos e *bias* de acordo com des-cida do gradiente de erros enquanto seus pesos, entradas e funções de ativação forem deriváveis.

### IV. RESULTADOS

A validação da hipótese do trabalho se deu através dos testes com a ferramenta computacional desenvolvida. Os resultados podem ser considerados positivos se a rede treinada for capaz de generalizar a relação aprendida para dados desconhecidos. Para que isso ocorra, além do pro-

TABLE I

MODELOS DE LAPIDAÇÃO UTILIZADOS NO TRABALHO, E RESPECTIVOS PARÂMETROS 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	<i>2-6-3 triangle</i>	52	9	0.516	0.490	0.380	0.188	0.588	0.646	0.320	0.187	75.4
2	<i>3 corner triangle</i>	46	12	0.595	0.573	0.418	0.188	0.626	0.668	0.300	0.230	79.2
3	<i>6 star</i>	79	12	0.474	0.457	0.462	0.209	0.691	0.668	0.303	0.254	72.0
4	<i>8 round</i>	57	16	0.490	0.490	0.435	0.168	0.623	0.698	0.270	0.226	78.5
5	<i>9 by check round</i>	33	12	0.268	0.268	0.435	0.209	0.664	0.655	0.315	0.224	92.8
6	<i>acorn tri</i>	70	6	0.532	0.496	0.457	0.166	0.643	0.710	0.259	0.223	74.0
7	<i>begginer check</i>	27	12	0.267	0.267	0.435	0.191	0.646	0.673	0.296	0.216	90.2
8	<i>brilliant marquise</i>	59	16	0.753	0.537	0.437	0.141	0.598	0.731	0.235	0.243	84.6
9	<i>bzzz</i>	101	8	0.482	0.482	0.481	0.175	0.676	0.712	0.259	0.251	70.0
10	<i>china check</i>	25	4	0.442	0.442	0.435	0.169	0.624	0.696	0.271	0.285	82.6
11	<i>circus tent</i>	105	16	0.392	0.392	0.440	0.259	0.719	0.612	0.360	0.241	70.0
12	<i>crazy triangle</i>	18	3	0.000	0.000	0.426	0.123	0.569	0.749	0.216	0.145	76.1
13	<i>cross point</i>	49	8	0.468	0.468	0.445	0.212	0.677	0.657	0.313	0.246	70.7
14	<i>cross</i>	47	8	0.544	0.409	0.511	0.248	0.779	0.656	0.319	0.428	70.6
15	<i>cut corner crazy tri</i>	24	6	0.000	0.000	0.453	0.190	0.663	0.683	0.287	0.188	80.7
16	<i>d qtz round</i>	97	16	0.461	0.461	0.549	0.228	0.797	0.689	0.286	0.316	72.6
17	<i>dagger bottom</i>	41	4	0.393	0.393	0.483	0.214	0.718	0.674	0.298	0.315	74.4
18	<i>double cross square</i>	73	8	0.594	0.594	0.529	0.212	0.761	0.695	0.278	0.363	75.0
19	<i>easy tri</i>	31	12	0.536	0.535	0.399	0.175	0.593	0.672	0.295	0.187	83.7
20	<i>fancy</i>	59	8	0.568	0.473	0.479	0.226	0.726	0.660	0.312	0.373	82.8
21	<i>fanned triangle</i>	52	15	0.303	0.295	0.392	0.213	0.625	0.627	0.341	0.211	88.3
22	<i>frosted star</i>	79	12	0.533	0.514	0.459	0.182	0.661	0.694	0.275	0.251	60.0
23	<i>harlequin square</i>	41	4	0.400	0.400	0.488	0.208	0.717	0.681	0.291	0.319	70.0
24	<i>hopes square</i>	53	12	0.505	0.505	0.460	0.226	0.706	0.651	0.320	0.279	75.0
25	<i>keely cisor</i>	37	8	0.833	0.626	0.466	0.131	0.618	0.755	0.213	0.440	84.0
26	<i>light star</i>	169	16	0.472	0.472	0.449	0.192	0.661	0.679	0.291	0.226	63.5
27	<i>malt squared</i>	53	8	0.463	0.463	0.479	0.232	0.731	0.655	0.318	0.306	72.6
28	<i>mask rectangle</i>	61	12	0.900	0.642	0.596	0.259	0.875	0.681	0.296	0.545	70.0
29	<i>mock emerald</i>	33	8	0.884	0.708	0.499	0.143	0.662	0.754	0.216	0.409	82.7
30	<i>north star</i>	137	16	0.459	0.459	0.437	0.181	0.638	0.685	0.283	0.215	75.0
31	<i>np point</i>	67	9	0.542	0.534	0.430	0.227	0.677	0.635	0.336	0.253	73.6
32	<i>op blade</i>	77	8	0.482	0.482	0.437	0.150	0.607	0.721	0.247	0.202	82.1
33	<i>point square check</i>	24	4	0.000	0.000	0.435	0.225	0.679	0.640	0.331	0.292	88.5
34	<i>astor star</i>	49	8	0.472	0.472	0.537	0.202	0.759	0.708	0.266	0.339	89.2
35	<i>diagonal 1.5</i>	15	4	0.856	0.571	0.500	0.338	0.858	0.582	0.390	0.767	89.4
36	<i>glass triangle</i>	67	12	0.433	0.432	0.447	0.198	0.666	0.672	0.298	0.202	80.0
37	<i>diamond perception</i>	25	6	0.347	0.261	0.361	0.141	0.522	0.692	0.270	0.167	84.6
38	<i>prop</i>	25	8	0.351	0.351	0.458	0.173	0.651	0.704	0.265	0.256	93.2
39	<i>quartz shield</i>	44	10	0.507	0.507	0.426	0.191	0.637	0.668	0.300	0.232	82.8
40	<i>z diamonds</i>	13	4	0.892	0.595	0.500	0.254	0.774	0.646	0.328	0.651	90.7
41	<i>scot plaid</i>	97	6	0.511	0.442	0.469	0.202	0.691	0.678	0.293	0.271	69.2
42	<i>simply xed</i>	25	4	0.541	0.541	0.488	0.207	0.714	0.683	0.289	0.324	70.0
43	<i>spin v</i>	37	6	0.458	0.397	0.475	0.276	0.771	0.616	0.358	0.297	65.0
44	<i>starred</i>	71	10	0.471	0.471	0.428	0.176	0.624	0.685	0.283	0.199	89.8
45	<i>step up</i>	49	8	0.493	0.493	0.452	0.153	0.625	0.723	0.245	0.249	80.0
46	<i>straight pedals</i>	55	6	0.566	0.490	0.501	0.243	0.764	0.655	0.319	0.306	76.0
47	<i>strip o</i>	59	12	0.614	0.512	0.485	0.236	0.741	0.655	0.318	0.343	74.0
48	<i>wink</i>	51	10	0.768	0.578	0.485	0.215	0.720	0.673	0.299	0.353	78.2
49	<i>squeezed square</i>	20	4	0.000	0.000	0.458	0.144	0.622	0.736	0.232	0.241	94.6
50	<i>square ziggie</i>	14	4	0.000	0.000	0.466	0.144	0.630	0.740	0.228	0.336	86.4
51	<i>mock check squares</i>	17	4	0.807	0.807	0.466	0.239	0.726	0.643	0.330	0.372	90.3
52	<i>two spin star</i>	30	6	0.000	0.000	0.450	0.164	0.635	0.709	0.259	0.215	92.8
53	<i>glider</i>	12	3	0.913	0.489	0.431	0.127	0.578	0.746	0.219	0.257	81.3
54	<i>huntress</i>	43	12	0.457	0.443	0.447	0.164	0.631	0.708	0.260	0.222	87.9
55	<i>kiss</i>	12	3	0.000	0.000	0.459	0.230	0.709	0.647	0.325	0.174	88.6
56	<i>low boy</i>	45	8	0.713	0.713	0.454	0.129	0.604	0.753	0.214	0.202	75.8
57	<i>spike</i>	19	4	0.305	0.305	0.307	0.106	0.434	0.709	0.245	0.092	93.1
58	<i>spiro</i>	46	12	0.384	0.357	0.441	0.193	0.654	0.674	0.295	0.239	86.9
59	<i>tesss pentagram</i>	23	5	0.820	0.640	0.396	0.175	0.591	0.670	0.296	0.256	82.6
60	<i>triga light house</i>	58	6	0.509	0.492	0.420	0.194	0.633	0.663	0.306	0.204	80.2
61	<i>thorn</i>	17	6	0.840	0.674	0.383	0.130	0.532	0.719	0.243	0.179	91.2
62	<i>zip</i>	15	4	0.656	0.656	0.462	0.099	0.581	0.795	0.171	0.220	89.4

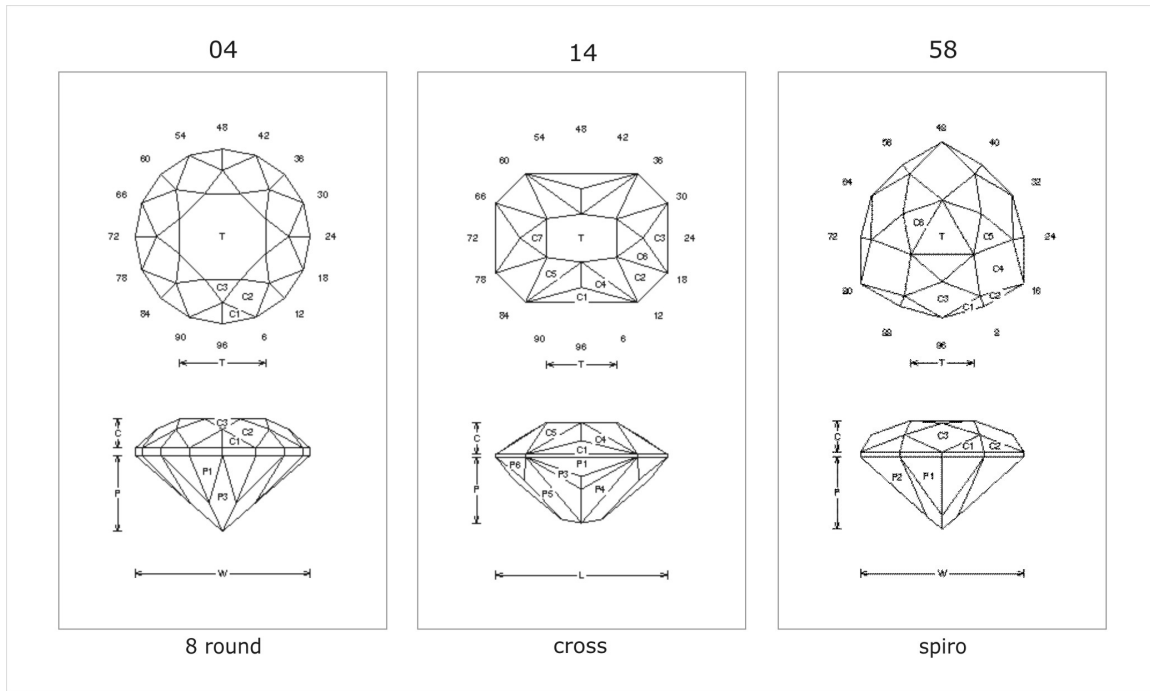


Figura 6. Modelos de lapidação utilizados na validação do projeto de RNA.

TABLE II  
VALORES CONHECIDOS E ESTIMADOS DE APROVEITAMENTO E  
BRILHÂNCIA DOS MODELOS 4, 14 E 58.

modelo/ parâmetro	valor conhecido	valor estimado	erro (%)
<b>4</b> <i>eight round</i> aproveitamento	0,226	0,230	2,1
<b>4</b> <i>eight round</i> brilhância	78,5	79,0	0,6
<b>14</b> <i>cross point</i> aproveitamento	0,246	0,249	1,4
<b>14</b> <i>cross point</i> brilhância	70,7	79,1	11,9
<b>58</b> <i>spiro</i> aproveitamento	0,239	0,225	5,9
<b>58</b> <i>spiro</i> brilhância	86,9	78,9	9,1

jeto adequado da rede, é necessário reunir um conjunto de modelos de lapidação para o quartzo que apresente diversas formas e padrões de facetamento, fornecendo uma amostragem representativa das variações existentes. O processo de treinamento da rede alcançou um erro da ordem de  $10^{-3}$  após 5.000 épocas (apresentações do conjunto de dados no treinamento), com variação decrescente. A Figura 8 mostra a variação do erro durante o treinamento. Ao final desse treinamento, os valores dos pesos das conexões da rede ficaram determinados, representando o conhecimento extraído do problema.

Após o treinamento, a rede analisou o conjunto de dados de teste formado pelos dados dos modelos 4 (*eight round*), 14 (*cross point*) e 58 (*spiro*). Os resultados conhecidos de aproveitamento e brilhância para os três modelos, os resultados estimados pela rede neural, e os respectivos erros de estimativa são mostrados na Tabela II.

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%, e erro máximo de 11,9% no caso da brilhância para o modelo 14 (*cross point*). Os erros menores atribuídos ao aproveitamento parecem advir da natureza mais simples da relação geométrica entre os parâmetros e este resultado (por exemplo, um modelo de relações  $H/W=1$  e  $L/W=1$  representa um cubo de aproveitamento 1 e brilhância 0).

Considerando-se as variadas possibilidades 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, G, T/W, T/L, P/W, C/W, H/W, P/H e C/H) e os dados de saída (brilhância e aproveitamento), os resultados obtidos podem ser considerados positivos.

## V. CONCLUSÃO

Nesse trabalho, apresentou-se um estudo geral do problema da lapidação como resultante da complexa combinação entre efeitos físicos que influenciam a aparência de uma gema facetada, principalmente a interação da luz com o material, as propriedades desse material, e a forma do poliedro. Baseado nestas considerações, construiu-se uma ferramenta computacional de análise dos parâmetros relevantes ao problema da lapidação utilizando RNAs. A rede foi treinada com um conjunto de modelos de lapidação desenvolvidos para quartzo. Depois de treinada, a rede foi capaz de estimar dois parâmetros importantes para gemas lapidadas, a brilhância e o aproveitamento, para três modelos de lapidação cujos resultados desconhecia, com um erro médio de 5,72%.

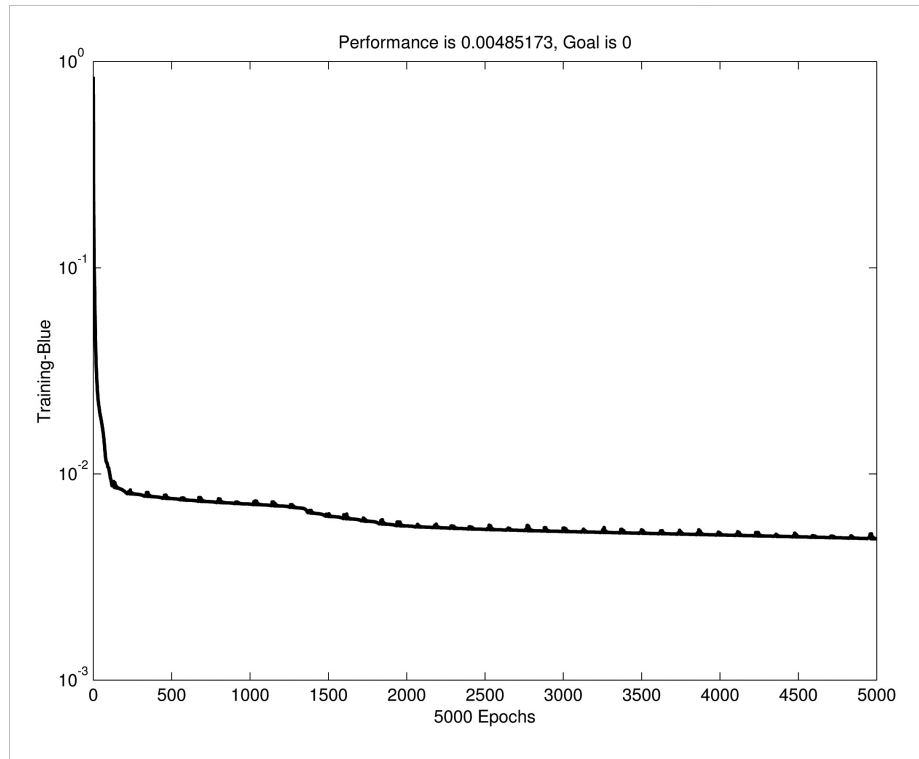


Figura 8. Evolução do erro no processo de treinamento da rede neural.

Os resultados obtidos com a ferramenta computacional proposta mostram que este tipo de abordagem é válido para o 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 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.

Com relação às perspectivas de aplicação do estudo apresentado, coloca-se a possibilidade de explorar a utilização da ferramenta de análise baseada em RNAs através da ampliação de sua aplicação. A melhoria dos resultados pode ser alcançada através da utilização de um número mais expressivo de modelos de lapidação, próximo do esgotamento das possibilidades de projeto existentes para o quartzo. 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, possível ve-

rificar a viabilidade de expansão da aplicação das RNAs nessa área, tornando-a uma alternativa interessante para os projetos que buscam agregar valor às gemas lapidadas.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG).

#### REFERÊNCIAS

- [1] R. Webster, *Gems: Their Sources, Descriptions and Identification*. Vol. 2. Londres: Butterworth & Co. Ltd., 2002.
- [2] Instituto Brasileiro de Gemas e Metais Preciosos - IBGM. <http://www.ibgm.com.br>, 2004.
- [3] Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC. <http://www.desenvolvimento.gov.br>, 2004.
- [4] M.B.S. Teixeira. Design de Jóias. In: C. Castañeda et alli. *Gemas de Minas Gerais*. Belo Horizonte: Sociedade Brasileira de Gemologia - Núcleo Minas Gerais(SBG-MG), 2001
- [5] T. Hemphill et alli, "Modeling the appearance of the round brilliant cut diamond: an analysis of brilliance", *Gems & Gemology*, vol. 34, No. 3, pp. 158-183, 1998.
- [6] J.M. Sasián, P. Yantzer & T. Tivol, "The Optical Design of Gemstones", *Optics and Photonics News*, vol. 14, No. 4, pp. 24-31, 2003.
- [7] S. Haykin, *Redes Neurais, princípios e práticas*. Porto Alegre: Bookman. 2001.
- [8] A.K. Jain, J. Mao & K.M. Mohiuddin, "Artificial Neural Networks: A tutorial", *IEEE Computer*, vol. 29, No. 3, pp. 56-63, 1996.