

CLASSIFICAÇÃO ÓPTICA DE LASCAS DE QUARTZO POR REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS ATRAVÉS DE APRENDIZADO COMPETITIVO

E. Fujiwara, M. F. M. Santos, E. Ono, L. Filogônio, C. K. Suzuki

Laboratório de Materiais e Dispositivos Fotônicos

Universidade Estadual de Campinas, FEM, DEMA, 13.083-970, Campinas, SP,
Brasil, {fujiwara, suzuki}@fem.unicamp.br

RESUMO

Pós de quartzo processados a partir de lascas são necessários na fabricação de vidros de sílica para indústria de alta tecnologia, sendo que a transparência das amostras influi diretamente nas propriedades ópticas do vidro. Contudo, a classificação das lascas no Brasil é realizada em garimpos de forma manual e subjetiva, comprometendo a produtividade e qualidade do produto. Neste contexto, foi desenvolvida uma metodologia para classificação óptica deste material utilizando algoritmos de redes neurais artificiais. Imagens de diferentes amostras submetidas à luz transmitente foram pós-processadas e, posteriormente, os histogramas de cores foram fornecidos como entrada para as redes, que através de rotinas inteligentes de aprendizado competitivo, promovem a discriminação automática em grupos. Os resultados demonstram que esta classificação é proporcional à transparência das amostras e, portanto, relativa à concentração de fraturas e inclusões fluidas. Ademais, constatou-se que a presente metodologia é compatível à graduação manual, além de reduzir ambiguidades na classificação.

Palavras-chave: quartzo, vidro de sílica, processamento mineral, redes neurais artificiais.

INTRODUÇÃO

Pós de quartzo obtidos a partir de lascas (fragmentos extraídos por meio de lascamento de blocos de quartzo natural) são essenciais na manufatura de vidros de sílica. Estes vidros são empregados, por exemplo, na fabricação de cadinhos para

processamento de silício destinado à indústria de células solares, bem como em bulbos de lâmpadas halógenas para desinfecção de água e tubos para produção de fibras ópticas^(1,2).

No Brasil, as lascas de quartzo são tipicamente classificadas artesanalmente em garimpos de acordo com o seu aspecto visual, considerando uma escala de transparência que varia de “primeira” (mais transparente e com maior valor agregado) à “quinta” (mais opaca). Esta característica é decorrente da concentração de defeitos, fraturas e inclusões fluidas no material, de forma que pós de quartzo processados a partir de lascas com graduações superiores propiciam a fusão de vidros de sílica com melhores propriedades ópticas⁽³⁾. Contudo, os critérios de classificação adotados nos garimpos são extremamente subjetivos, comprometendo a padronização e reprodutibilidade da seleção. Não obstante, uma vez que são realizados de forma manual, estima-se um considerável prejuízo em virtude de erros operacionais e demora no tempo de classificação.

Neste contexto, técnicas de processamento de imagens baseadas em algoritmos inteligentes têm sido aplicadas com sucesso na análise de amostras minerais, viabilizando, por exemplo, a identificação de seus constituintes por meio de coloração, textura ou padrões característicos^(4,5), figurando como uma alternativa simples, de baixo custo e relativamente precisa para a atividade de mineralogia.

Em trabalhos anteriores, foi demonstrada a viabilidade da utilização de um sistema de classificação óptico baseado em redes neurais artificiais (RNA) onde a graduação das lascas é atribuída de acordo com os critérios manuais de seleção⁽⁶⁾. Embora os resultados tenham sido promissores, esta técnica ainda é influenciada por critérios subjetivos, o que pode acarretar em erros de classificação ou ambiguidades.

Na presente pesquisa, é proposta a utilização de RNA com treinamento competitivo (não supervisionado) para graduação de lascas de quartzo com base nos histogramas de imagem obtidos por análise óptica. Em adição ao estudo dos parâmetros das redes neurais, é apresentada uma comparação entre esta técnica e os métodos de classificação usuais.

METODOLOGIA

Amostras de quartzo

Neste trabalho, foram consideradas lascas de quartzo de diferentes graduações, variando da mais transparente (primeira) a mais opaca (quinta), conforme ilustrado na Figura 1. As amostras apresentavam dimensões aproximadamente iguais, com massa média de 21,10 g. Previamente à realização das análises, as lascas foram limpas com água para remoção de resquícios de terra ou outros materiais originalmente agregados na etapa de extração. Entretanto, não foi aplicado nenhum processamento químico ou mecânico (tais como polimento ou tratamento termoquímico) adicional nas amostras.

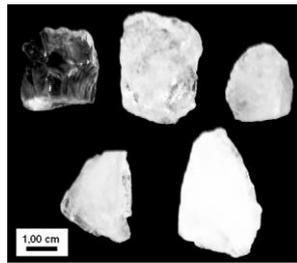


Figura 1. Exemplos de lascas de quartzo estudadas.

Análise óptica de lascas

O aparato experimental é representado na Figura 2. A amostra a ser analisada é posicionada sobre uma placa de vidro transparente com espessura de ~4 mm. Uma fonte de luz contínua com emissão na região do vermelho é instalada logo abaixo à placa de suporte, fazendo com que a amostra seja diretamente atingida pela radiação proveniente da fonte. A intensidade luminosa transmitida através da lasca é detectada por meio de uma câmera CCD com resolução de 2,1 MP, instalada perpendicularmente à placa de vidro, a uma distância fixa de ~65 cm em relação à superfície do suporte. Para eliminar os efeitos de iluminação externa, o aparato foi montado no interior de uma câmara escura, fazendo com que praticamente toda a radiação luminosa visível capturada pela câmera seja somente oriunda da fonte de luz.

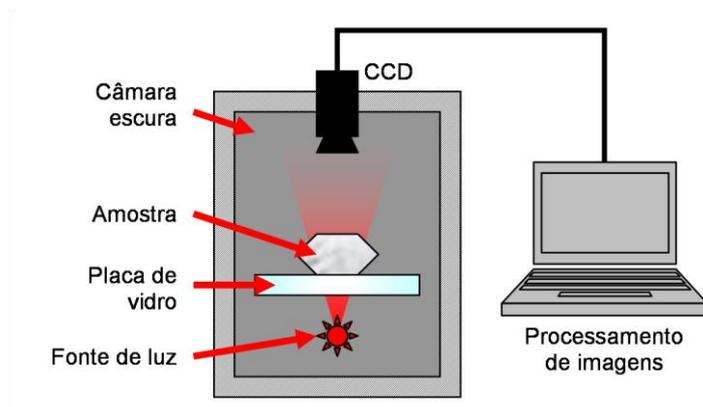


Figura 2. Aparato experimental para aquisição de imagens das lascas.

As imagens adquiridas pelo CCD foram processadas por meio de uma rotina elaborada na plataforma MATLAB, Mathworks, através de conversão em escala de cinza e normalização com base nos seus histogramas. Finalmente, foram definidas regiões de interesse nas imagens tratadas, delimitadas por quadrados de 200×200 pixels compreendidos na superfície da amostra. Devido à variação quanto à distribuição de trincas e inclusões fluidas bem como na espessura, optou-se por utilizar 3 regiões de interesse distintas para cada lasca, de forma a obter um resultado mais homogêneo. Adicionalmente, foi calculada a intensidade luminosa transmitida, considerando a média de valores compreendidos em cada região de interesse.

Classificação de lascas através de aprendizado competitivo

Redes neurais artificiais consistem de ferramentas para modelagem computacional compostas por elementos adaptativos interligados – ou neurônios artificiais – que viabilizam a realização de processamento paralelo de dados. Assim, analogamente ao cérebro humano, as RNAs apresentam capacidade para armazenamento exponencial de “conhecimento”, de forma que este conhecimento é adquirido através de um processo de aprendizagem, sendo que as conexões entre neurônios (pesos) são modificadas e utilizadas para armazenamento das informações processadas⁽⁷⁾.

Em adição às vantagens proporcionadas pelas redes neurais artificiais, tais como processamento não linear, robustez a dados ruidosos, paralelismo e capacidade de generalização, uma característica interessante deste tipo de ferramenta computacional é a possibilidade de treinamento não supervisionado,

como, por exemplo, algoritmos de aprendizado competitivo, no qual partindo de um conjunto de dados para treinamento, os pesos são ajustados iterativamente de acordo com padrões e correlações reconhecidos nos vetores de entrada⁽⁸⁾. Assim, é possível estabelecer grupos para classificação de dados automaticamente, sem intervenção do usuário.

Utilizando as funções do Neural Network Toolbox disponíveis no MATLAB, foram implementadas redes neurais com treinamento competitivo de acordo com o modelo de Kohonen⁽⁹⁾, de sorte que os dados de entrada eram constituídos dos histogramas normalizados de cada lasca (vetores de 256 elementos). Com o intuito de avaliar o desempenho das redes, foram variados a quantidade de neurônios da camada competitiva (relativo ao número de classificações) e o número máximo de épocas durante o treinamento.

Análises complementares

A classificação realizada pela metodologia proposta também foi comparada com outras técnicas, visando estabelecer uma correlação com os critérios de graduação usuais.

Para o cálculo da densidade das lascas, foi realizado um ensaio baseado no princípio de Arquimedes, no qual a propriedade almejada é estimada com base na relação entre a massa da amostra medida no ar e submersa em água⁽¹⁰⁾. Deste modo, foi utilizada uma balança analítica Shimadzu com sensibilidade de $\sim 10^{-4}$ g e todas as medições foram realizadas à temperatura ambiente ($\sim 25^\circ\text{C}$).

Finalmente, foram realizados ensaios de inspeção visual, semelhantes aos realizados em garimpos. Neste caso, as amostras foram apresentadas em ordem aleatória a quatro profissionais diferentes, solicitando que estes separassem as lascas de acordo com a sua graduação usual (de primeira à quinta).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta os histogramas normalizados característicos de lascas com diferentes níveis de transparência, considerando uma única região de interesse. A amostra que apresentou o maior valor de intensidade transmitida normalizada (1,00) corresponde a uma lasca de primeira, enquanto que o histograma relativo ao menor valor de intensidade (0,30) é atribuído a uma amostra tipicamente classificada

como sendo uma lasca de quinta. Observa-se que os picos de frequência são deslocados para tons mais claros na escala de cinza com o aumento da transparência da lasca, uma vez que a intensidade luminosa transmitida através da amostra é maior. No caso de lascas mais opacas, a atenuação da luz proveniente da fonte ao atravessar a lasca é mais pronunciada, gerando uma imagem com menor luminosidade.

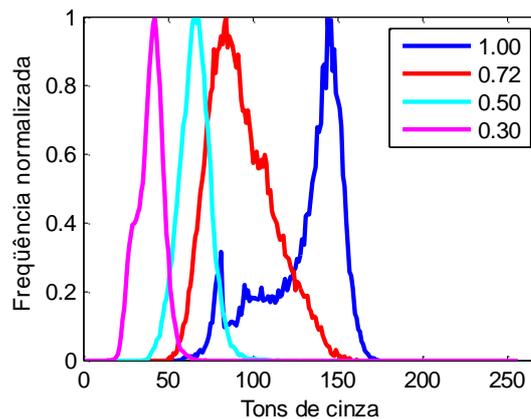


Figura 3. Histograma de imagens para lascas com diferentes intensidades transmitidas normalizadas (valores indicados na legenda).

Os histogramas obtidos foram processados e classificados de acordo com as RNAs. Para melhor visualização dos resultados, as classes definidas pelas redes neurais foram convertidas em valores de 0 a 1, com posterior cálculo da média para as três regiões de interesse, enquanto que as lascas foram ordenadas de acordo com a intensidade transmitida normalizada. Conforme ilustra a Figura 4, constata-se uma boa correlação entre a intensidade e a classificação obtida pelas redes neurais, o que era esperado uma vez que o processo de graduação é baseado nos histogramas das imagens, sendo que os grupos próximos a 0 e 1 correspondem a amostras mais transparentes e opacas, respectivamente.

Em relação ao número de neurônios na camada competitiva, observa-se que a rede projetada com 5 neurônios apresentou uma melhor correlação entre intensidade e classificação da RNA. Contudo, os casos com 4 e 6 neurônios também apresentaram resultados satisfatórios. Ademais, os dados foram ajustados corretamente mesmo considerando um número reduzido de épocas para treinamento da rede. Os gráficos demonstram que, em geral, lascas com maior intensidade transmitida são graduadas mais facilmente em comparação às amostras menos transparentes. Conforme evidenciado nos histogramas da Figura 3, as

amostras com intensidade média entre 0,30 e 0,72 apresentaram picos de frequência em tonalidades relativamente próximas, enquanto que o histograma da lasca com maior intensidade normalizada foi caracterizado por um deslocamento pronunciado para tons próximos a 150 em escala de cinza, o que explica a variação no desempenho da classificação por RNA.

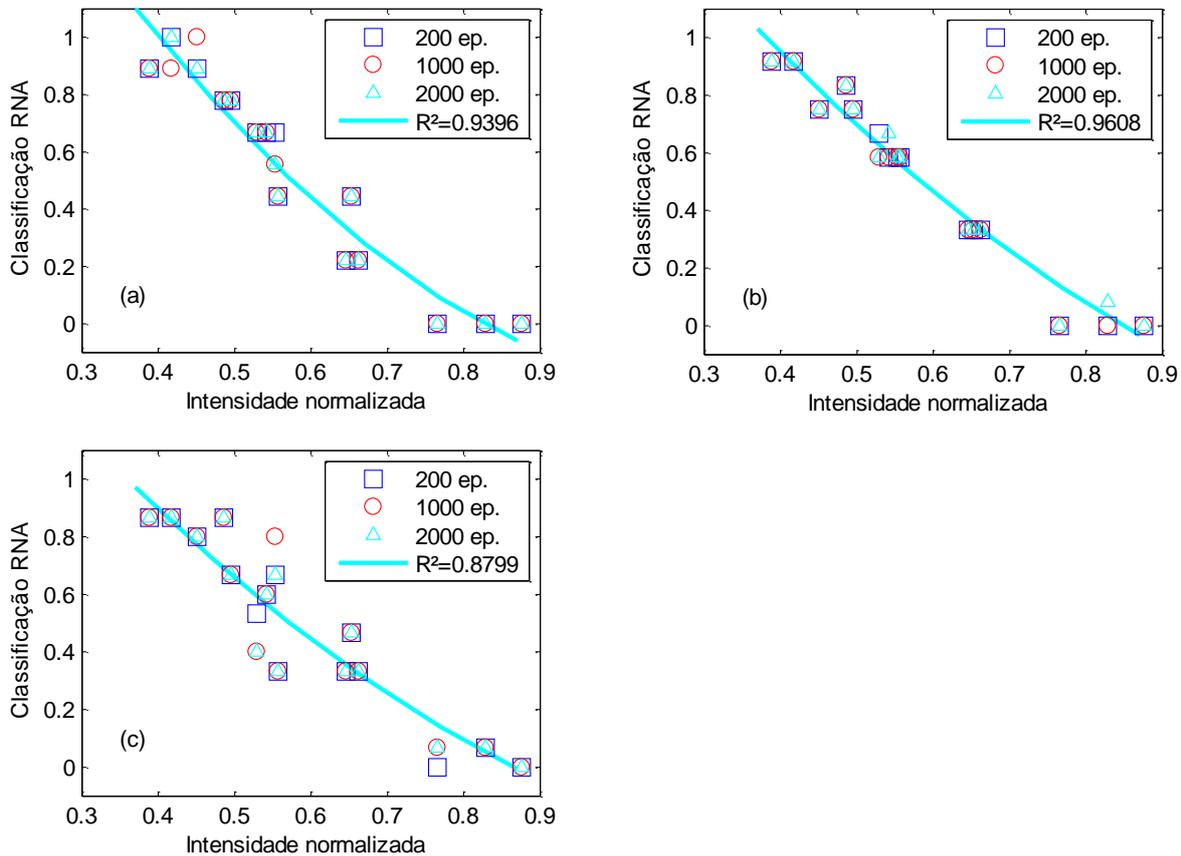


Figura 4. Correlação entre intensidade transmitida normalizada e classificação de lascas obtida por RNA para (a) 4, (b) 5 e (c) 6 neurônios na camada competitiva, variando o número de épocas. Ajustes de curva por funções polinomiais de segundo grau.

No que tange à densidade das lascas, embora trabalhos anteriores tenham demonstrado que amostras opacas tendem a apresentar valores menores nesta propriedade devido à concentração acentuada de fraturas e inclusões⁽¹⁰⁾, não foi observada nenhuma correlação entre densidade e classificação retornada pela RNA, vide Figura 5, mesmo em amostras com características visualmente distintas (grupos 0 e 1, por exemplo) ou variando o número de neurônios na camada competitiva, sendo que, em geral, houve variação em torno de um valor médio de 2,63 g/cm³. Este resultado pode ser justificado porque no trabalho relatado anteriormente⁽¹⁰⁾, as medidas de densidade foram realizadas considerando lascas de uma mesma jazida, enquanto que na presente pesquisa, foram estudadas amostras coletadas de jazidas

de várias localidades diferentes. Ainda que o estudo da densidade possa ser refinado considerando um número muito maior de amostras, a dificuldade na automação deste tipo de medição praticamente inviabiliza sua aplicação na graduação de lascas em larga escala, ao contrário do processo de classificação óptica proposto.

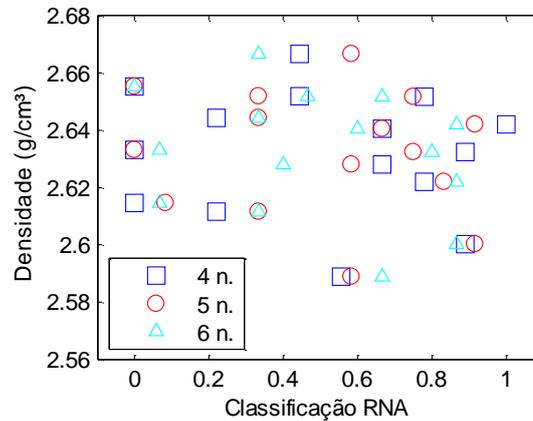


Figura 5. Comparação entre densidade das lascas e a classificação obtida por RNA, variando o número de neurônios. Não foi observada correlação entre esses parâmetros.

Finalmente, a Figura 6 apresenta a comparação entre a classificação obtida pela RNA (projetada com 5 neurônios e treinada com 2000 épocas) e a graduação manual realizada por 4 profissionais diferentes, de acordo com critérios usuais praticados por garimpeiros. Observa-se que lascas de primeira e segunda são facilmente identificadas tanto pelo software quanto pelos garimpeiros, sendo estas caracterizadas pela baixa concentração de fraturas e inclusões. Em contrapartida, nota-se uma discrepância na classificação de lascas mais opacas, sendo que os profissionais tendem a atribuir graduações variando entre terceira e quinta, de forma que a escala definida pela RNA situa estas amostras entre 0,6 e 1,0.

Os desvios observados na classificação manual são decorrentes principalmente da possível variação no grau de transparência das lascas, sendo que uma mesma amostra pode apresentar regiões com concentrações diferentes de fraturas e inclusões. Conforme explanado anteriormente, a metodologia proposta contorna este problema através da análise de regiões de interesse distintas, garantindo uma análise mais homogênea das amostras. Outro aspecto a ser ressaltado é a variação dos critérios de classificação de acordo com o know-how ou região de atuação de cada profissional, o que também explica os desvios na seleção de lascas, principalmente as de terceira e quarta.

Contudo, em linhas gerais, constata-se na Figura 6 que a classificação realizada pela RNA apresenta certa correspondência com o critério de graduação manual, mesmo realizando um treinamento não-supervisionado da rede neural, o que comprova a confiabilidade da metodologia proposta como uma técnica complementar ou mesmo em substituição aos procedimentos de seleção subjetivos.

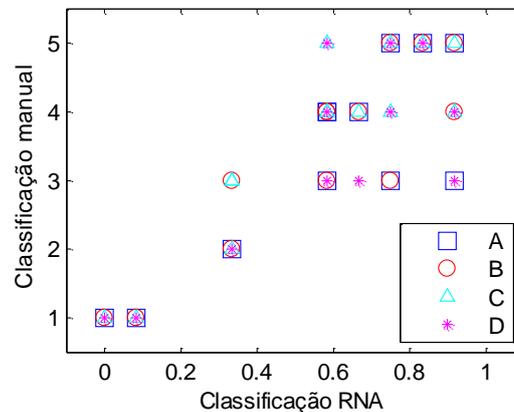


Figura 6. Correlação entre a classificação obtida por RNA e a graduação manual de lascas. As amostras foram analisadas por quatro profissionais diferentes (A, B, C e D).

CONCLUSÃO

A classificação óptica por redes neurais artificiais com treinamento competitivo mostrou-se uma técnica eficiente para classificação de lascas de quartzo. Particularmente, a graduação retornada pela RNA com cinco neurônios na camada competitiva apresentou uma boa correlação com a transparência da amostra. Esta classificação também se apresentou compatível com os critérios de seleção manuais realizados por diferentes profissionais, demonstrando a viabilidade da aplicação desta metodologia na prática. Desenvolvimentos futuros incluem a integração desta técnica a sistemas automáticos para separação de lascas em larga escala, proporcionando ganhos significativos à indústria de quartzo e seus derivados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP, CNPq e Capes pelo apoio financeiro. E. Fujiwara agradece a bolsa da FAPESP.

REFERÊNCIAS

1. KOIDE, M.; TAKEI, S.; SATO, T.; MATUSITA, K. Preparation of silica glass by pulsed electric current method. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, v.110, n.1285, p.867-869, 2002.
2. MACALUSO, A.; MITCHELL, D.; SANDERS, R. Direct effects of UV-B radiation on the freshwater heterotrophic nanoflagellate *Paraphysomona sp.* *Appl. Environ. Microb.*, v.75, n.15, p.4525-4530, 2009.
3. SUZUKI, C.K.; SANTOS, M.F.M.; ONO, E.; FUJIWARA, E.; TORIKAI, D.; SHINOHARA, A.H. Strategic high quality quartz supply for fusion into silica glass. In: VARSHNEYA, A.K.; SCHAEFFER, H.A.; RICHARDSON, K.A.; WIGHTMAN, M.; PYE, L.D. (Eds.) *Processing, Properties, and Applications of Glass and Optical Materials: Ceramic Transactions v.231*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2012. p.69-74.
4. PEREZ, C.A.; ESTÉVEZ, P.A.; VERA, P.A.; CASTILLO, L.E.; ARAVENA, C.M.; SCHULZ, D.A.; MEDINA, L.E. Ore grade estimation by feature selection and voting using boundary detection in digital image analysis. *Int. J. Miner. Process.*, v.23, n.1-4, p.28-36, 2011.
5. BAYKAN, N.A.; YILMAZ, N. Mineral identification using color spaces and artificial neural networks. *Comput. Geosci.*, v.36, n.1, p.91-97, 2010.
6. PAULA, F.D.; FUJIWARA, E.; SANTOS, M.F.M.; ONO, E.; SUZUKI, C.K. Método para classificação de lascas de quartzo baseado em visão computacional e algoritmos de redes neurais artificiais. In: 56º CONGRESSO BRASILEIRO DE CERÂMICA, Curitiba, PR, 2012. Anais. São Paulo, ABC, 2012, p.95-106.
7. BASHEER, I.A.; HAJMEER, M. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. *J. Microbiol. Meth.*, v.43, n.1, p.3-31, 2000.
8. AHALT, S.C.; KRISHNAMURTHY, A.K.; CHEN, P.; MELTON, D.E. Competitive learning algorithms for vector quantization. *Neural Networks*, v.3, n.3, p.277-290, 1990.
9. DEMUTH, H.; BEALE, M. *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB*. Natick: Mathworks, 2000.
10. HUMMEL, D.C.A.; IWASAKI, H.; IWASAKI, F.; SUZUKI, C.K. Determinação de densidade em lascas de quartzo. *Cerâmica*, v.32, n.202, p.269-272, 1986.

OPTICAL CLASSIFICATION OF QUARTZ LASCAS BY ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS BASED ON COMPETITIVE LEARNING

ABSTRACT

Quartz powders obtained from processed quartz lascas are required on the manufacturing of silica glasses for high technology industries, being the optical properties of glasses critically affected by the transparency of quartz pieces. However, lascas classification in Brazil is performed by miners in a manual and subjective way, yielding to productivity and quality losses. In this research, an optical classification methodology based on artificial neural networks (ANN) is proposed. Images of various lascas subjected to transmitted light were processed and then their color histograms were used as the input to the ANN. The networks were trained with competitive learning and designed to automatically sort the quartz samples in groups. According to the results, ANN classification is proportional to transparency of samples, and therefore related to cracks and fluid inclusion concentrations. Moreover, besides present methodology is compatible to the manual procedures, it also reduces classification errors due to ambiguities.

Key-words: quartz, silica glass, mineral processing, artificial neural networks