

CLASSIFICAÇÃO MORFOLÓGICA DE AREIAS RECICLADAS POR ANÁLISE DE IMAGENS

Otávio da Fonseca Martins Gomes ¹

Paulo Roberto Lopes Lima ²

Daisiana Frozi Brisola ³

Bruna Maria da Cunha Gomes ⁴

Ariella Vianna Fontes ⁵

Sidnei Paciornik ⁶

Resumo

Os resíduos de construção e demolição (RCD) tornaram-se, em todo mundo, um dos principais problemas ambientais das cidades. A classificação e separação das partículas de RCD constituem-se na principal dificuldade para sua reciclagem. O presente trabalho propõe uma metodologia para a classificação morfológica de partículas de areias recicladas de RCD que consiste em um típico sistema de classificação supervisionada. Ele utiliza parâmetros de forma, tamanho e textura para discriminar partículas de RCD provenientes de argamassa, cerâmica e concreto, observadas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura. O sistema de classificação foi testado com relativo sucesso, a taxa de acerto total atingiu 73,96% e as taxas de acerto para as classes argamassa e cerâmica foram maiores que 80%. A principal limitação encontrada foi o reconhecimento da classe concreto, e o melhor resultado obtido para sua taxa de acerto foi de apenas 56,30%.

Palavras-chave: Areias; Resíduos; Análise de imagem; Classificação.

MORPHOLOGICAL CLASSIFICATION OF RECYCLED SANDS THROUGH IMAGE ANALYSIS

Abstract

Construction and demolition waste (CDW) has become one of the most important environmental problems in large and medium-sized cities around the world. Classification and segregation of CDW particles constitute the main difficulties for their recycling. The present paper proposes a methodology for morphological classification of particles of recycled sands from CDW that consists in a typical supervised classification procedure. It uses size, shape and texture description parameters to discriminate between CDW particles from mortar, ceramic and concrete observed with scanning electron microscopy technique. The classification system reaches a reasonable success. The total success rate obtained is 73.96% and the success rates for mortar and ceramic are greater than 80%. The main limitation is the recognition of the concrete particles; the best result obtained for its success rate is 56.30%.

Key words: Sand; Waste; Image analyse; Classification.

¹Engenheiro Químico, D.Sc., Tecnologista pleno, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Av. Pedro Calmon, 900, Cep 21941-908, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: ogomes@gmail.com

²Engenheiro Civil, D.Sc., Professor Titular, DT/Universidade Estadual de Feira de Santana – UEFS, Av. Transnordestina, Cep 44036-900, Feira de Santana, BA, Brasil. E-mail: lima.prl.uefs@gmail.com

³Engenheira Química, Mestranda, Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225, Cep 22453-900, CP 38008, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: daisiana@gmail.com

⁴Arquiteta, Mestranda, Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225, Cep 22453-900, CP 38008, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: brunamaria.arq@gmail.com

⁵Bolsista de Iniciação Científica, Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, Av. Pedro Calmon, 900, Cep 21941-908, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: ariellafontes@gmail.com

⁶Engenheiro Eletrônico e Físico, D.Sc., Professor Associado, Departamento de Engenharia de Materiais – DEMa, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio, Rua Marquês de São Vicente, 225, Cep 22453-900, CP 38008, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. E-mail: sidnei@puc-rio.br

I INTRODUÇÃO

A crescente quantidade de resíduos sólidos oriundos da construção civil em cidades de médio e grande porte tem sido fonte de preocupação em todo o mundo devido a aspectos ambientais, econômicos e até mesmo sociais.^(1,2) No Brasil, os resíduos de construção e demolição (RCD) representam cerca de 50% dos resíduos sólidos urbanos, sendo cerca de 90% de origem mineral.⁽³⁾ Assim, a reutilização e reciclagem desse tipo de resíduo têm despertado grande interesse.

A substituição de agregados naturais por agregados obtidos de RCD é uma das mais promissoras alternativas. No entanto, agregados reciclados ainda não são largamente empregados, devido, principalmente, à heterogeneidade de sua composição. As principais dificuldades da reciclagem de RCD são a classificação e a separação dos constituintes dos resíduos.

O presente trabalho propõe uma metodologia para a classificação morfológica de areia reciclada de RCD, baseada em microscopia eletrônica de varredura (MEV) e análise digital de imagens, capaz de distinguir partículas provenientes de diferentes materiais. Foram analisadas amostras de areias recicladas produzidas através da britagem de RCD de argamassa, cerâmica e concreto, a fim de se buscar parâmetros quantitativos que sirvam de atributos em um sistema de classificação automática.

Sistemas de análise de imagens podem facilmente segmentar seções de partículas de RCD, através de seus níveis de intensidade, em imagens adequadas adquiridas ao MEV. O desafio está em compor ou projetar um conjunto de características que agrupe partículas da mesma classe, aceitando sua variabilidade intrínseca, e que, ao mesmo tempo, propicie a discriminação entre as classes. Na prática, uma única característica raramente é suficiente neste tipo de problema. Assim, no presente estudo de caso, diversos parâmetros descritores de forma, tamanho e textura foram testados no sistema de classificação.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Seleção e Preparação de Amostras

Três amostras de areias produzidas a partir de RCD de argamassa, cerâmica e concreto, respectivamente, foram classificadas em série de peneiras. Aliquotas representativas das frações de 125 μm a 250 μm e de 250 μm a 500 μm de cada amostra foram embutidas a frio em resina epóxi, lixadas e polidas de acordo com a preparação metalográfica tradicional. Por fim, os seis corpos de prova foram recobertos com carbono, com metalizador Bal-Tec SCD 005, para tornarem-se condutores, adequados à análise ao MEV.

2.2 Aquisição de Imagens

Um MEV LEO S440 com platina motorizada foi empregado para a aquisição automática das imagens. Para cada amostra, foram adquiridos 70 campos regularmente espaçados, utilizando-se o detector de elétrons retro-espalhados.⁽⁴⁾ Esse detector gera imagens com contraste por número atômico médio, em amostras polidas, propiciando uma boa discriminação entre as partículas de areia e a matriz de resina epóxi dos corpos de prova.

O aumento utilizado foi de 100 \times para as amostras com granulometria entre 500 μm e 250 μm , e de 200 \times , para as amostras entre 250 μm e 125 μm , resultando em resoluções de 3,07 $\mu\text{m}/\text{pixel}$ e 1,54 $\mu\text{m}/\text{pixel}$, respectivamente. Assim, no total, foram adquiridas 420 imagens (1.024 \times 768 pixels) e 17.756 partículas. A Figura 1 apresenta imagens típicas de areias recicladas de RCD de argamassa, cerâmica e concreto, obtidas como descrito.

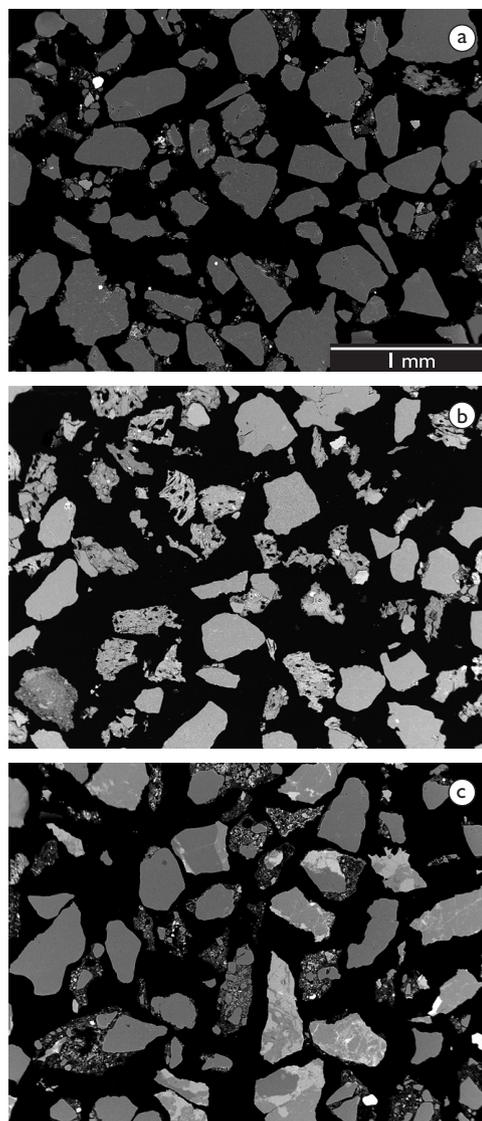


Figura 1. Imagens típicas de areias recicladas de RCD de: a) argamassa; b) cerâmica; e c) concreto.

2.3 Análise de Imagens

O procedimento de análise de imagens, assim como o projeto e teste do sistema de classificação, foi realizado através de uma rotina implementada no software Zeiss KS 400. A rotina foi essencialmente composta pelas seguintes etapas: segmentação das partículas; preenchimento de buracos; separação de partículas que se tocam; pós-processamentos lógico e morfológico;⁽⁵⁾ extração de atributos; e classificação.

A segmentação das partículas foi feita através da limiarização⁽⁵⁾ do histograma de níveis de intensidade das imagens. O cuidadoso ajuste das condições operacionais do MEV garantiu a reprodutibilidade do brilho e contraste das imagens adquiridas. Assim, o limiar de intensidade foi estabelecido interativamente e, então, fixado para todas as imagens. Nessa operação de segmentação, os pixels com intensidade acima do limiar tornam-se brancos, representando as partículas, enquanto os pixels do fundo ficam pretos.

A etapa de preenchimento de buracos visa mitigar a ocorrência de erros de fragmentação de partículas na etapa seguinte do processamento, pois buracos e poros podem nuclear falsos divisores na operação de separação das partículas que se tocam.

As etapas de separação das partículas que se tocam e de pós-processamento lógico e morfológico são fundamentais para a correta delimitação das partículas e, conseqüentemente, para a medição dos parâmetros de forma, tamanho e textura. A separação das partículas

foi realizada pelo método dos divisores de águas.⁽⁶⁾ No pós-processamento, foram eliminados objetos espúrios, partículas muito pequenas e partículas nas bordas da imagem.

A Figura 2 apresenta as imagens resultantes das etapas de processamento de um campo típico de uma amostra de areia reciclada de RCD de concreto: a) imagem original; b) segmentação; c) preenchimento de buracos; d) separação de partículas que se tocam (com as linhas de separação sobrepostas em cinza); e e) imagem final, pronta para a realização das medições.

A extração de atributos consistiu na medição de parâmetros descritores de forma, tamanho e textura de cada partícula obtida.

Não existe uma definição universal para forma. Geralmente, a forma de um objeto está relacionada a algum padrão e a análise ocorre de modo comparativo. Na análise de imagens, a forma é geralmente caracterizada pela quantificação da diferença entre um dado objeto e uma forma de referência. Tradicionalmente, são utilizados fatores de forma adimensionais, obtidos a partir de medidas geométricas básicas, como perímetro, área, etc. Em geral, tais fatores variam entre 0 e 1, onde o valor máximo representa a forma perfeita e o valor mínimo corresponde a uma forma irregular.⁽⁷⁾

A Tabela 1 lista os fatores de forma utilizados no presente trabalho e suas definições. Os parâmetros solidez e convexidade visam expressar o quão convexa é a partícula. A circularidade e o fator de forma circular quantificam a diferença entre a forma da partícula e um círculo. A razão de aspectos denota o alongamento da

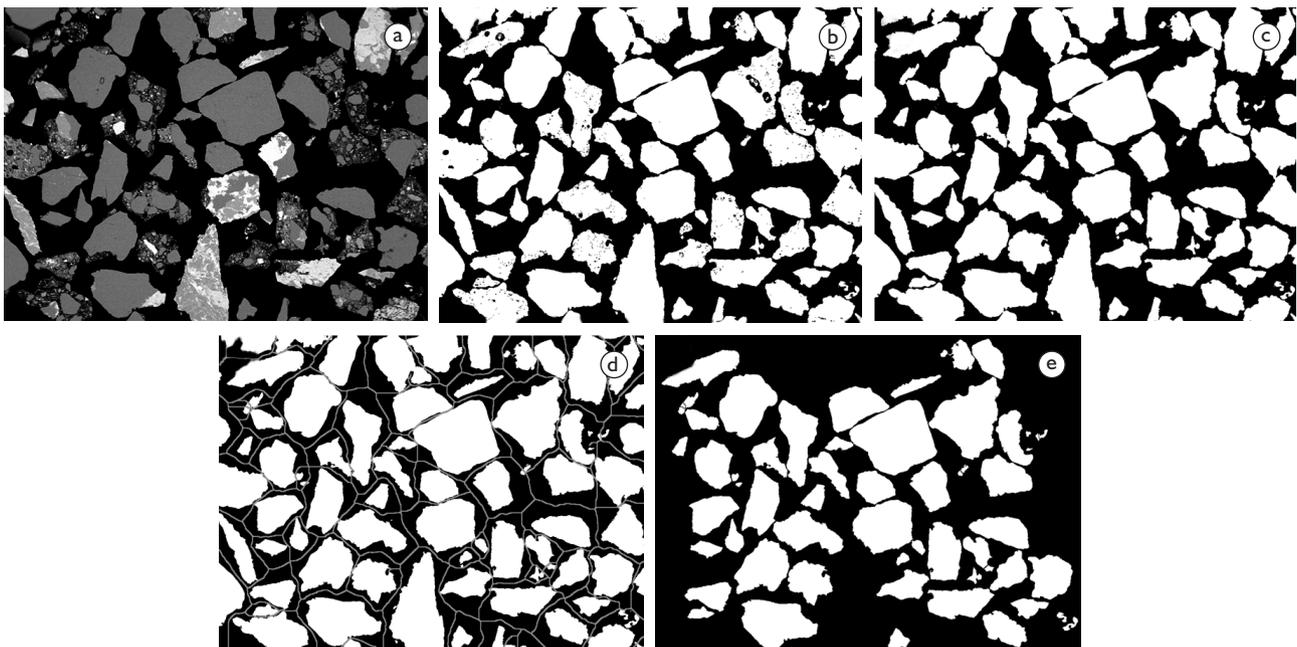


Figura 2. Imagens das etapas de processamento: a) imagem original; b) segmentação; c) preenchimento de buracos; d) separação de partículas (com as linhas de separação sobrepostas em cinza); e e) imagem final.

partícula. Cabe ressaltar que a convexidade e o fator de forma circular são também sensíveis à suavidade do contorno da partícula, devido a suas definições serem baseadas em medidas de perímetro.

Tabela 1. Fatores de forma

Nome	Definição*
Solidez	$S = \frac{A}{A_c}$
Convexidade	$Conv = \frac{P}{P_c}$
Fator de forma circular	$FFC = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P^2}$
Circularidade	$C = \frac{4 \cdot A}{\pi \cdot F_{max}^2}$
Razão de aspectos	$RA = \frac{F_{min}}{F_{max}}$

Notação: A: área, A_c : área convexa, P: perímetro, P_c : perímetro convexo, F_{min} : Feret mínimo, F_{max} : Feret máximo.

Foram utilizados também parâmetros de tamanho. Forma e tamanho são propriedades muito correlatadas,⁽⁸⁾ de modo que a adição de parâmetros de tamanho no conjunto de características pode ser capaz de melhorar o desempenho de um sistema de classificação de formas de objetos.⁽⁷⁾ Os parâmetros de tamanho empregados foram área e calibre máximo (Feret máximo).

Embora não exista nenhuma definição formal para textura, pode-se dizer que a textura em uma imagem denota características intuitivas acerca do interior de objetos, como suavidade, homogeneidade e regularidade. A visão humana é capaz de reconhecer texturas facilmente, mas computacionalmente avalia-se textura a partir da variação dos níveis de intensidade.

Existem diversos métodos para caracterização de textura em imagens e uma das abordagens mais simples é a utilização de medidas estatísticas de ocorrência dos níveis de intensidade, tais como média e desvio padrão. Vale ressaltar que não se trata de textura metalográfica, que possui um significado completamente diferente, pois está ligada à distribuição de orientações cristalográficas dos cristalitos em materiais policristalinos. Os dois contextos estão relacionados, mas são dificilmente comparáveis.

No presente trabalho, a textura foi avaliada através da média e do desvio padrão dos níveis de intensidade das partículas e também dos chamados parâmetros de Haralick,⁽⁹⁾ que são medidas estatísticas da coocorrência de níveis de intensidade em pixels vizinhos. Especificamente, foram usados os onze primeiros parâmetros de Haralick.

A classificação foi supervisionada.⁽¹⁰⁾ Os parâmetros de forma, tamanho e textura foram utilizados como características e um classificador de Bayes⁽¹⁰⁾ foi empregado para reconhecer as três classes de areia reciclada (argamassa, cerâmica e concreto). O classificador foi treinado e validado com as próprias imagens das amostras, em um procedimento de auto-validação.⁽¹¹⁾ Foram realizados quatro treinamentos, variando-se as características usadas: parâmetros de forma; de forma e tamanho; de textura; e todos os parâmetros medidos.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta os resultados da validação do sistema de classificação. Ela apresenta as taxas de acerto obtidas na classificação das partículas de areia reciclada nos quatro diferentes treinamentos. A segunda, a terceira e a quarta colunas exibem, respectivamente, as taxas de acerto dos treinamentos em que o conjunto de características foi composto pelos parâmetros de forma, forma e tamanho, e textura. Na última coluna, as taxas de acerto referem-se ao treinamento realizado utilizando-se todos os parâmetros testados.

Tabela 2. Resultados da validação

Classe	Taxa de acerto (%)			
	Forma	Forma e tamanho	Textura	Todos os parâmetros
Argamassa	55,00	55,60	80,94	80,91
Cerâmica	37,65	43,82	83,67	82,85
Concreto	40,26	40,15	52,02	56,30
Total	44,47	46,77	72,95	73,96

Usando somente parâmetros de forma no conjunto de características, a taxa de acerto total foi muito baixa (44,47%). A adição de parâmetros de tamanho a esse conjunto de características também não foi capaz de propiciar uma melhora significativa na taxa de acerto (46,77%). Esses resultados indicam que não há diferença de forma relevante entre as classes de partículas.

Por outro lado, ao empregarem-se somente os parâmetros de textura, como conjunto de características, a taxa de acerto total obtida foi bem mais elevada (72,95%). Além disso, as taxas de acerto para as classes argamassa e cerâmica ficaram acima de 80%. De fato, como pode ser observado na Figura 1, as partículas das diferentes classes têm textura claramente diversa.

Utilizando-se todos os parâmetros testados, como características, a taxa de acerto total atingiu 73,96% e as taxas de acerto para as classes argamassa e cerâmica, apesar de uma pequena queda, mantiveram-se altas, acima de 80%. Todavia, a taxa de acerto para classe concreto subiu, mas ainda permaneceu muito baixa (56,30%).

A Tabela 3 apresenta a matriz de confusão⁽¹⁰⁾ do sistema de classificação com o conjunto de características formado por todos os parâmetros testados. A segunda linha mostra como as 6.155 partículas de areia reciclada de RCD de argamassa foram classificadas: 4.945 foram corretamente classificadas como argamassa e as demais foram erroneamente classificadas como cerâmica (534) e concreto (633). A terceira e a quarta linha referem-se, do mesmo modo, respectivamente, às partículas de areia reciclada de RCD de cerâmica e concreto.

Tabela 3. Matriz de confusão

Classe	Argamassa	Cerâmica	Concreto	Total
Argamassa	4.945	534	633	6.155
Cerâmica	415	5.035	627	6.132
Concreto	1.182	1.208	3.079	5.469
Total	6.542	6.777	4.339	17.756

Conforme mostrado na Tabela 3, o erro na classificação das partículas de concreto ocorre devido ao sistema atribuir a elas tanto a classe argamassa quanto a classe cerâmica.

4 CONCLUSÃO

Um sistema automático de classificação de partículas de areia reciclada de RCD foi desenvolvido e testado com relativo sucesso. A taxa de acerto total atingiu

73,96% e as taxas de acerto para as classes argamassa e cerâmica foram maiores que 80%.

Os parâmetros de forma foram insuficientes para diferenciar as classes. O uso de parâmetros de textura foi fundamental para o bom desempenho do sistema de classificação.

A principal limitação encontrada foi o reconhecimento da classe concreto. O melhor resultado obtido para sua taxa de acerto foi baixa (56,30%).

O teste de outros parâmetros de textura pode vir a melhorar o desempenho do sistema de classificação. Os parâmetros de Haralick baseiam-se na coocorrência de tonalidades em pares de pixels, e seus valores dependem da distância entre estes pixels. No presente estudo essa distância foi mantida em 1 pixel. É possível que o uso de distâncias maiores leve a um aumento das taxas de acerto, dependendo da escala típica associada à textura de cada um dos materiais. Além disso, outras medidas de textura, tais como aquelas baseadas em *wavelets*⁽¹²⁾, também podem ser testadas.

A metodologia empregada no presente trabalho pode ser aplicada ao estudo de outros materiais em que seja necessário algum tipo de classificação de partículas.

Agradecimentos

Daisiana Frozi Brisola e Ariella Vianna Fontes agradecem ao programa PIBIC/CNPq e ao CETEM pelas bolsas de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

- MOTTA, R. S. *Estudo laboratorial de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil para aplicação em pavimentação de baixo volume de tráfego*. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 50, n. 1, p. 71-81, Mar. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2006.05.010>
- ANGULO, S. C. *Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos*. 2005. 167 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.
- GOLDSTEIN, J. I. et al *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis: a text for biologists, materials scientists and geologists*. 2. ed. New York: Plenum, 1992.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. *Digital image processing*. 2 ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2002.
- BEUCHER, S.; LANTUÉJOL, C. Use of watersheds in contour detection. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON IMAGE PROCESSING, REAL-TIME EDGE AND MOTION DETECTION/ESTIMATION, 1979, Rennes, France. *Proceedings...* Rennes: CCETT/INSA/IRISA, 1979. p. 2.1-2.12. (IRISA Report, 132)
- GOMES, O. D. M.; PACIORNIK, S. Automatic classification of graphite in cast iron. *Microscopy and Microanalysis*, v. 11, n. 4, p. 363-71, 2005. PMID:16079020. <http://dx.doi.org/10.1017/S1431927605050415>
- WOJNAR, L. Analysis and interpretation. In: ASM INTERNATIONAL. *Practical guide to image analysis*. Materials Park, 2000. Chap. 7, p. 145-202.

- 9 HARALICK, R. M.; SHANMUGAM, K.; DINSTEN, I. Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, v. 3, n. 6, p. 610-21, 1973. <http://dx.doi.org/10.1109/TSMC.1973.4309314>
- 10 DUDA, R. O.; HART, P. E.; STORK, D. G. *Pattern classification*. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 2001.
- 11 TOUSSAINT, G. T. Bibliography on estimation of misclassification. *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 20, n. 4, p. 472-9, July 1974. <http://dx.doi.org/10.1109/TIT.1974.1055260>
- 12 TEIXEIRA, G. N.; FEITOSA, R. Q.; PACIORNIK, S. Towards automatic painting authentication. In: IAPR WORKSHOP ON MACHINE VISION APPLICATIONS, 2002, Nara, Japão. *Proceedings ... 2002*. Nara: Nara-ken New Public Hall, 2002. v. 1, p. 530-3.

Recebido em: 05/11/2010

Aceito em: 06/09/2011