

Sistema baseado em visão computacional para identificar níveis de deterioração em barras de aço

Computer-vision-based system to identify deterioration levels in steel bars

RESUMO

Sistemas computacionais que trabalhem com reconhecimento de padrões têm sido aplicados a problemas para substituir ou auxiliar especialistas humanos em processos repetitivos, monótonos e demorados, cujos trabalhos demandam altos níveis de experiência e os resultados estão sujeitos a fatores físicos e subjetivos. Este artigo apresenta um sistema para identificar diferentes níveis de deterioração em barras de aço por meio de visão computacional. Para isso, foram empregados ferramentais amplamente conhecidos na área de aprendizagem de máquina. As melhores taxas de acerto compreendem 79,2% usando o descritor LBP e algoritmo de aprendizagem de máquinas SVM.

PALAVRAS-CHAVE: Construção civil. Defesa civil. Segurança pública. Automação.

ABSTRACT

Computer systems that apply pattern recognition have been used for problems to replace or assist human specialists in repetitive, monotonous and time-consuming processes, whose demands high levels of experience, and results can be influenced by physical and subjective aspects. This paper presents a system to identify different levels of deterioration in steel bars using computer vision. To do that, tools widely known in the machine learning area were employed. The best achieved recognition rates are 79.2% by using the LBP descriptor and SVM machine learning algorithm.

KEYWORDS: Construction. Civil defense. Public safety. Automation.

Guilherme Dias Almanza
guilherme.almanza@hotmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Mathias Ronaldo Kapp
mathiaskapp98@gmail.com
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Marcos Vinícius Schlichting
mvinicius@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Wilson Leobet
wleobet@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Carlos Eduardo Tino Balestra
carlosbalestra@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Fabio Alexandre Spanhol
faspanhol@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Jefferson Gustavo Martins
martins@utfpr.edu.br
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Toledo, Paraná, Brasil

Recebido: 19 ago. 2020.

Aprovado: 01 out. 2020.

Direito autoral: Este trabalho está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.



INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras é um dos principais problemas relacionados a degradação de estruturas de concreto armado no mundo, chegando a envolver até 50% dos recursos financeiros investidos em construção civil para a reabilitação de estruturas degradadas (MEHTA e MONTEIRO, 2008). Muitos dos problemas relacionados à corrosão das armaduras têm alguma relação com as características do concreto, cuja função é oferecer uma dupla proteção ao aço (física e química). Primeiramente, tem-se a proteção física com a separação do aço e do meio externo. Já a proteção química é decorrente do elevado pH da solução presente nos poros do concreto e consequente formação de uma película passivadora que envolverá o aço no interior do concreto protegendo-o (FIGUEIREDO e MEIRA, 2012).

A corrosão pode ser definida basicamente como a deterioração de um metal (ou liga) a partir do contato de sua superfície com o meio no qual este esteja inserido. O processo envolve reações de oxidação e de redução (redox) que convertem o metal ou componente metálico em óxidos ou hidróxidos expansivos (SILVA; PEREIRA; CODARO, 2015). Segundo Cunha, Helene e Lourenço. (2013), tal problema consome direta ou indiretamente uma parcela significativa do produto interno bruto (PIB) de uma nação industrializada (algo em torno de 3% a 4%). Além das perdas financeiras, as consequências mais graves são possíveis danos corporais e até mesmo perdas de vidas humanas.

Dentre os fatores que influenciam o processo de corrosão do aço imerso no concreto estão: o coeficiente de difusão do concreto, a relação água/cimento, a espessura de revestimento, a presença e a quantidade de adições, a umidade relativa, o pH do concreto e a temperatura de exposição (ANDRADE, 2001; GU e BEAUDOIN, 1998). Além dos custos envolvidos devido a degradação destas estruturas, o risco em termos de colapsos estruturais merece atenção. Nos últimos anos, têm sido recorrentes os casos de colapsos de estruturas devido à corrosão de armaduras. Para citar dois casos de grande repercussão na mídia nacional, destacam-se o colapso parcial de um viaduto na cidade de Brasília em 2018 (VIADUTO, 2018) e a interdição do acesso à Rodovia Presidente Dutra, na cidade de São Paulo em 2019 (PREFEITURA, 2019). Portanto, estudos pertinentes ao melhor entendimento dos processos de degradação de estruturas devido a corrosão são necessários com vistas a edificar estruturas mais seguras e duráveis.

As Figuras 1 e 2 ilustram a ação da corrosão, a partir da qual se tem a perda de seção na região anódica devido à dissolução do ferro (Figura 1). Comumente, identifica-se a ocorrência das duas situações concomitantemente (Figura 2): fissuras acompanhadas de manchas corrosivas (CASCUDO, 1997). A perda de seção provoca a redução de aderência entre aço e concreto, a redução da capacidade estrutural da peça e externamente o surgimento de manchas. Caso o concreto esteja muito úmido, os óxidos serão gerados a uma velocidade constante e podem emigrar através da rede de poros, aparecendo na superfície sob a forma de manchas marrom-avermelhadas, mas não apresentando fissuras (Figura 2(a)). As tensões internas expansivas provenientes dos produtos da corrosão (situados na região anódica) provoca a deterioração da ferragem e o destacamento da camada de revestimento (Figura 2(b-c)) (ANDRADE, 2001; LOPES *et al.*, 2018).

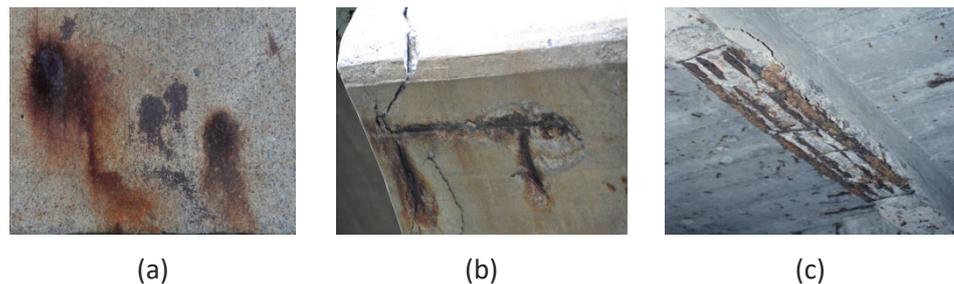
Quando se observa o estado de corrosão, pode-se constatar o surgimento de fissuras paralelas às armaduras; fragmentação e destacamento do cobrimento e, no estado avançado, o lascamento do concreto. Logo, quando há indicações externas do processo corrosivo, normalmente parte da armadura já se encontra comprometida, pois, a manifestação é tão somente o afloramento deste. Outra importante característica deste cenário é o fato de que, em sua maior parte, as inspeções para avaliar o grau de corrosão são realizadas visualmente por especialistas humanos. Tais avaliações demandam altos níveis de experiência por ser um fator decisivo para uma correta avaliação do estado de deterioração da estrutura. Dentre as possíveis ferramentas a serem empregadas, tem-se filmadoras, máquinas fotográficas, lupas e binóculos (ABNT, 2014).

Figura 1 – Barra de aço: (a) original; (b) perda de seção devido à corrosão.



Fonte: Autoria própria (2020).

Figura 2 – Efeitos da corrosão na camada de cobrimento de concreto: (a) manchas; (b) fissuras e rachaduras; (c) destacamento total.



Fonte: Autoria própria (2020).

Diante do exposto, este artigo foca o desenvolvimento de um sistema baseado em visão computacional para identificar níveis de deterioração em barras de aço. Este tem o objetivo de reduzir fatores inerentes ao ser humano que influenciam nas inspeções realizadas para avaliar o grau de corrosão em barras de aço em estruturas de concreto armado. Tal influência compreende questões como subjetividade do especialista humano e características do processo (repetitivo, monótono e demorado), além de requerer alto grau de concentração. Este conjunto de exigências sobrecarrega o profissional que realiza a inspeção e o leva a possíveis distrações e baixas taxas de acerto (CONNERS *et al.*, 1997; PHAM e ALCOCK, 1997; RADOVAN *et al.*, 2001).

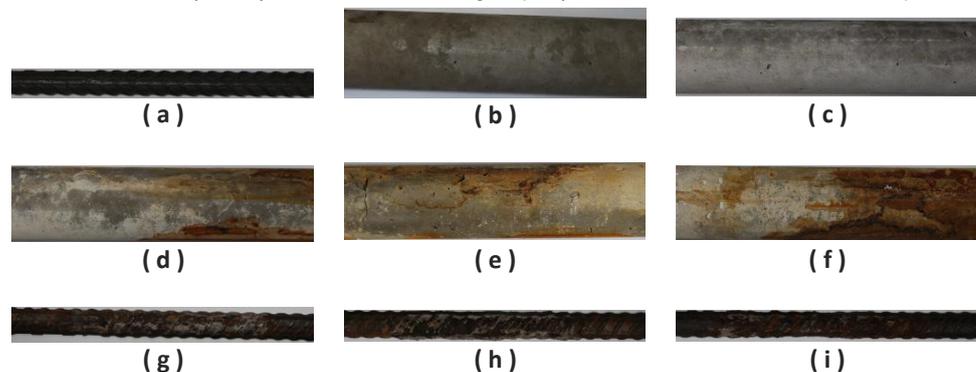
MATERIAIS E MÉTODOS

Sistemas computacionais que trabalhem com reconhecimento de padrões geralmente apresentam as seguintes etapas: aquisição da base de dados, pré-processamento, segmentação, extração de características e classificação. A construção da base de imagens envolveu 24 (vinte e quatro) amostras, sendo que

6 (seis) delas formando o grupo de controle (referências isentas de corrosão) e outros três grupos de seis barras foram submetidos a processos de aceleração de corrosão por períodos de 24, 48 e 72 horas (Figura 3).

Para a construção da base de imagens foram utilizadas barras de aço CA-50 da marca Gerdau com 12,5 mm de diâmetro. Cada amostra é caracterizada por um comprimento com aproximadamente 25 cm, sendo que todas foram obtidas de barras pertencentes a um mesmo lote de fabricação (Figura 3(a)). O segundo passo compreendeu o recobrimento de 2 cm dos corpos de prova de aço com concreto para simular o contexto real das estruturas nas edificações (Figura 3(b)). O traço de concreto utilizado tinha a proporção 1 : 1,49 : 2,77 : 0,65 (Cimento : Areia : Brita : Água). Cada amostra tinha 10 cm de suas extremidades cobertas por fita isolante para garantir que a corrosão ocorresse apenas na parte central da amostra. Um fio elétrico foi conectado às barras com o objetivo de permitir o ensaio de aceleração da corrosão. Depois, a amostra foi inserida em um cano de PVC com diâmetro nominal de 50 mm e 25 cm de comprimento. Este cano de PVC foi preenchido com concreto de tal forma que a cobertura se mantivesse homogênea em termos de espessura da camada de cobrimento (2 cm). As amostras permaneceram sob cura por 28 dias para o processo de hidratação do cimento (Figura 3(c)). Seguiu-se com o processo de aceleração de corrosão das amostras com os corpos de concreto foram parcialmente imersos em um tanque de água com 3,5% (concentração próxima a água do mar) de cloreto de sódio (NaCl) e foram submetidos ao ensaio de aceleração da corrosão através da condução de eletricidade. Os três grupos de corpos de concreto foram mantidos por três diferentes períodos de tempo no tanque, sendo estes 24, 48 e 72 horas (Figura 3(d-f)), o que gerou diferentes níveis de corrosão (Figura 3(g-i)). Depois de cessado o processo de aceleração de corrosão, os corpos de concreto, bem como as barras internas depois de extraídas e limpas com solução ácida, foram submetidos a uma coleta de imagens para compor a base. Para cada amostra de barra (Figura 3(a)), foram capturadas 5 (cinco) imagens abrangendo a diferentes perspectivas da superfície dos corpos de concreto e também da barra depois de extraída, num total de 120 imagens para cada caso. No presente estudo foram consideradas as imagens relativas às barras.

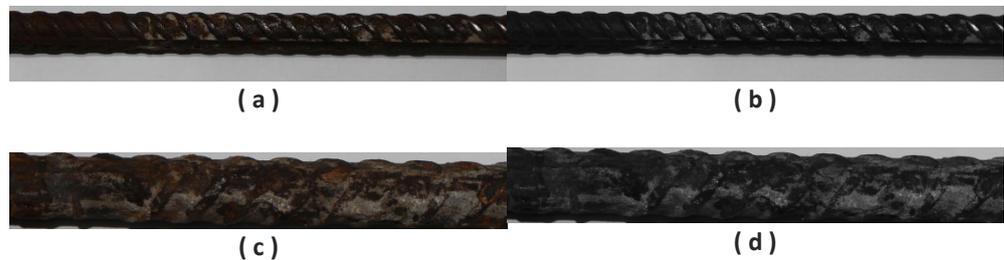
Figura 3 – Processo de construção da base de imagens: (a) barra original; (b) corpo de concreto envolvendo a barra original; (c) corpo de concreto envolvendo a barra após 28 dias de cura do concreto; (d-f) corpos de concreto envolvendo a barra após o processo de aceleração (respectivamente 24, 48 e 72 horas); (g-i) barras retiradas dos corpos de concreto após o processo de aceleração (respectivamente 24, 48 e 72 horas).



Fonte: Autoria própria (2020).

A Figura 4 ilustra as etapas de pré-processamento e segmentação, sendo que a primeira (Figura 4(b)) aplica operações para realçar as características importantes no processo de diferenciação das classes existentes no problema. Nesta etapa, utilizou-se principalmente da biblioteca OpenCV para converter a base toda em escala de cinza. A segmentação (Figura 4(c-d)) compreende a próxima etapa do processo e busca separar apenas a região de interesse da imagem original. Nesta etapa utilizou-se a técnica de limiarização para destacar a barra de aço na imagem e a função *findContours* da biblioteca OpenCV para identificar a barra de aço. Esta função retorna os contornos de todos os possíveis objetos presentes na imagem. Ao final, selecionou-se os pontos do maior contorno e recortou-se a área de interesse (Figura 4(c-d)).

Figura 4 – Processo de reconhecimento de padrões: (a) barra após o processo de aceleração; (b) pré-processamento com conversão para níveis de cinza; (c-d) segmentação.



Fonte: Autoria própria (2020).

A etapa de Extração de Características busca representar a imagem por meio de um vetor numérico de medidas. Nesta etapa, foram utilizados os descritores LBP (Local Binary Pattern) e SURF (Speed-Up Robust Feature). Boas referências para estes descritores podem ser encontradas em Martins (2014).

Para a definição dos conjuntos de treinamento e teste, dividiu-se a base de imagens em 3 partes (*folds*), os quais mantinham a representatividade das classes pertencentes ao problema em questão. Foram realizadas 3 execuções, sendo que em cada execução uma parte era usada como conjunto de teste e os outros dois eram utilizados como conjunto de treinamento. Os resultados finais são expressos pela média e desvio padrão das taxas de classificações corretas das três execuções.

Na fase de classificação, foram utilizados diferentes algoritmos, sendo que o que apresentou os melhores resultados foi o SVM (*Support Vector Machine*, baseada na *libsvm*). Para definir seus parâmetros de execução, utilizou-se da estratégia de busca gulosa, a qual testa combinações dos parâmetros de cada algoritmo de classificação na tentativa de identificar o melhor arranjo e otimizar as taxas finais de reconhecimento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Quadros 1 e 2 apresentam os resultados obtidos até o momento, isto é, a média e desvio padrão (DP) das taxas de classificações corretas das três execuções utilizando variações dos descritores LBP e SURF. As taxas de

classificações corretas são obtidas pela razão entre as predições corretas totais e o número de amostras.

Quadro 1 – Taxas de classificações corretas para o Descritor LBP.

Versão do LBP	P	R	Média	DP
riu2	8	1	69,2	4,7
	8	2	73,3	6,2
	16	2	79,2	2,4
	24	3	72,5	8,2
u2	8	1	35,8	20,9
	8	2	67,5	12,4
	16	2	50,8	26,3
	24	3	52,5	22,5

Fonte: Autoria própria (2019).

Quadro 2 – Taxas de classificações corretas para o Descritor SURF.

Versão do SURF	Medida	Média	DP
64	-	66,7	5,1
	# Pontos	52,5	2,0
	Média	61,7	2,4
	Desvio Padrão	70,8	1,2
	Obliquidade	47,5	15,9
	Curtose	46,7	9,4
128	-	60,8	1,2
	# Pontos	52,5	2,0
	Média	58,3	7,7
	Desvio Padrão	61,7	6,6
	Obliquidade	49,2	17,8
	Curtose	34,2	13,0

Fonte: Autoria própria (2019).

Do Quadro 1 tem-se que o melhor resultado dentre as variações do descritor LBP foi obtido por LBPriu2, a qual alcançou 79,2% (DP=2,4), tendo sido esta a melhor taxa de reconhecimento geral. Já do Quadro 2, tem-se a taxa de 70,8% (DP=1,2) para a variante do SURF com 64 atributos e momento estatístico Desvio Padrão. Tais taxas de reconhecimento se mostram bastante interessantes diante das dificuldades que um especialista enfrenta ao tentar identificar visualmente o nível de corrosão nas barras, conforme ilustrado na Figura 5, a seguir.

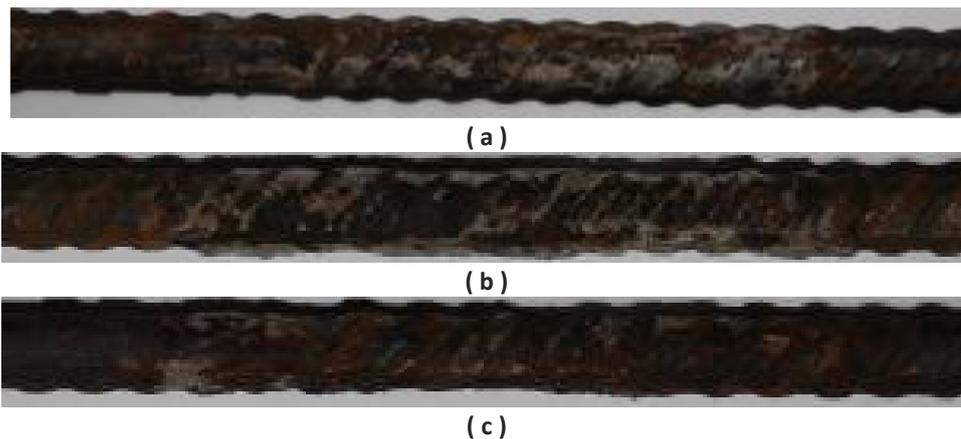
CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após finalizada a pesquisa, a melhor combinação de descritor e algoritmos de aprendizagem foi LBPriu2 e SVM, com 79,2% (DP=2,4). Outra alternativa para a continuação deste projeto consiste no uso de imagens da camada de concreto (reboco) que recobre as barras. Neste caso, não seria necessário ter acesso às barras de aço para realizar a identificação de uma possível deterioração nas mesmas.

Além do exposto, os trabalhos futuros focarão novos descritores, algoritmos de aprendizagem, estratégias de validação e também a seleção e combinação de modelos, com o intuito de obter resultados cada vez mais expressivos. Uma alternativa para a concatenação dos vetores de características realizada neste

trabalho, poderia ser a construção de modelos independentes a partir dos vetores de características de cada momento estatístico. A partir destes, poder-se-ia selecionar e combinar alguns destes modelos. Um estudo comparativo de ambas as abordagens foi apresentada por Martins, Oliveira e Sabourin (2012), o qual demonstrou a superioridade desta nova abordagem.

Figura 5 – Exemplos de barras retiradas dos corpos de concreto após o processo de aceleração: ampliação das imagens da Figura 3(g-i), retiradas dos corpos de concreto após o processo de aceleração (respectivamente 24, 48 e 72 horas).



Fonte: Autoria própria (2020).

O estudo desse caso, em particular, trouxe grande conhecimento de uma área em ascensão, a qual envolve conhecimentos em programação, estatística, geometria, entre outros. Além disso, por ser uma área interdisciplinar, a mesma exige grande dedicação e interesse, que geraram resultados válidos, em termos científicos, e que possam servir de referência para estudos futuros.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos docentes Dr. Jefferson Gustavo Martins, Dr. Fabio Alexandre Spanhol e Dr. Carlos Eduardo Tino Balestra pela oportunidade e orientação, bem como o apoio incondicional dos técnicos de laboratório Marcos Vinícius Schlichting e Wilson Leobet. Sem este suporte, não seria possível o desenvolvimento do projeto.

REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ANDRADE, J. J. de O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras**: iniciação por cloretos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação Em Engenharia Civil (PPGEC). Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 2001.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto**. Goiânia: PINI e UFG, 1997.

CONNERS, R. W.; KLINE, D. E.; ARAMAN, P. A.; DRAYER, T. H. Machine vision technology for the forest products industry. **Computer**, v. 30, n. 7, p. 43-48, 1997.

CUNHA, M.; HELENE, P.; LOURENÇO, M. **Corrosão em estruturas de concreto armado**: teoria, controle e métodos de análise. Elsevier Brasil, 2013.

FIGUEIREDO, E. P.; MEIRA, G. Corrosão das armaduras das estruturas de concreto. Boletín Técnico 6. **Asociación Latino americana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción**. Mexico, 2012.

GU, P.; BEAUDOIN, J. J. Obtaining effective half-cell potential measurements in reinforced concrete structures. Construction Technology Update No. 18. **National Research Council of Canada, Institute for Research in Construction**. Ottawa, 1998.

LOPES, F. L. C.; MONTEIRO, M. D. S.; MELO, H. C. S.; SIQUEIRA, L. M.; LOPES, F. L. G. Análise quantitativa da perda de massa por oxidação em barras de aço carbono CA-50: uma proposta metodológica para a contextualização do estudo da corrosão em cursos de engenharia civil/IFS. **Simpósio De Engenharia De Produção De Sergipe**, 10, São Cristóvão, SE, 2018. p. 440 - 452.

MARTINS, J.G.; OLIVEIRA, L.E.S.; SABOURIN, R. Combining textural descriptors for forest species recognition. In **IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society**, p. 1483-1488, 2012.

MARTINS, J.G. **Identificação de Espécies Florestais utilizando Seleção Dinâmica de Classificadores no Espaço de Dissimilaridade**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Informática do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2014.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P. **Concreto**: Microestrutura, Propriedades e Materiais. 3.ed. São Paulo: IBRACON, 2008.

PHAM, D. T.; ALCOCK, R. J. Automated visual inspection of birch wood boards. **IEE Colloquium on Artificial Intelligence in Manufacturing**, p. 1-4, 1997.

PREFEITURA de SP interdita ponte que leva à Dutra pela Marginal Tietê. **G1 SP**, São Paulo - SP, 23 de jan. de 2019. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2019/01/23/prefeitura-de-sp-interdita-ponte-que-leva-a-dutra-pela-marginal-tiete.ghtml>. Acesso em: 20 de jun. de 2019.

RADOVAN, S.; GEORGE, P.; PANAGIOTIS, M.; MANOS, G.; ROBERT, A.; IGOR, D. An approach for automated inspection of wood boards. **International Conference on Image Processing**, 1, p. 798-801, 2001.

SILVA, M. V. F., PEREIRA, M. C., CODARO, E. N. Corrosão do aço-carbono: uma abordagem do cotidiano no ensino de química. **Química Nova**, v. 38, n. 2, p. 293-296. São Paulo, 2015.

SPANHOL, F. A. **Automatic Breast Cancer Classification From Histopathological Images: A Hybrid Approach**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Informática do Setor de Ciências Exatas da Universidade Federal do Paraná, Curitiba-PR, 2018.

VIADUTO da Galeria dos Estados desaba e abre cratera no Eixão Sul. **Correio Braziliense**, Brasília - DF, 06 de fev. de 2018. Disponível em: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/cidades/2018/02/06/interna_cidadesdf,658118/parte-do-viaduto-da-galeria-dos-estados-desaba-no-centro-de-brasilia.shtml. Acesso em: 20 de jun. de 2019.