

4º PRÊMIO TECNOLOGIA E DESENVOLVIMENTO METROFERROVIÁRIOS

CATEGORIA 3

IDENTIFICAÇÃO E MONITORAMENTO DE DORMENTES DE FERROVIAS

USANDO PROCESSAMENTO DE IMAGENS

INTRODUÇÃO

As ferrovias são um importante componente da economia global e um meio de transporte economicamente competente, ambientalmente eficiente, seguro e regular (Ballou, 1993; Bustamante, 1998; Ribeiro e Ferreira, 2002; e Caixeta-Filho e Martins, 2007). No Brasil, respondem pelo transporte de 40% da soja e 90% do minério de ferro, os dois maiores itens da balança comercial de exportação, respectivamente com 24% e 17% de participação em 2016 (ANTF, 2017 e Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços, 2017). No entanto, a segurança e eficiência da ferrovia estão intimamente relacionadas à disponibilidade e à confiabilidade de seus ativos. Sua inspeção e manutenção é dificultada fundamentalmente devido à dispersão geográfica, quantidade, peso e extensão dos ativos.

Em particular a condição dos ativos que compõem a superestrutura da via permanente pode causar restrições ou mesmo impedir uso de um trecho da ferrovia. Os motivos para tal podem ser inúmeros, como trilhos fraturados e tensionados, geometria da via, condições do lastro (limpeza e altura), condições dos dormentes (principalmente as condições físicas e o espaçamento) e o estado dos elementos de fixação (Soares, 2006). Para a inspeção de trilhos, lastro e AMVs há parâmetros bem determinados em termos de valores aceitáveis para identificar a qualidade desses itens, conforme Brina (1979), Profillidis (2000), ALL (2009) e VALE (2011). Os trilhos e os AMVs possuem parâmetros especificados de dimensões, geometria, topografia, peso, rigidez, elasticidade, etc. O lastro possui aspectos definidos de dimensões, rugosidade, lixividade, abrasão, elasticidade, etc. No entanto, para a avaliação da qualidade dos dormentes, principalmente de madeira, o julgamento pode ser subjetivo para algumas características. As normas internas dos operadores ferroviários e os cursos de formação de pessoal especializado em manutenção ferroviária apenas especificam que os dormentes devem manter as capacidades de sustentação da ferrovia, sem determinar parâmetros objetivos a serem observados. Os dormentes podem ser avaliados conforme a aparência visual externa, se apresentam fungos e insetos, se há rachaduras ou fraturas no dormente que comprometam a integridade; se a placa de fixação, parafusos e tirefonds estão soltos ou mal fixados, se os dormentes estão empenados, se estão ausentes ou mesmo se o barulho que emitem ao serem golpeados é incomum, indicando comprometimento do cerne do dormente de madeira. Os parâmetros mais afetados pela subjetividade são os que tratam da aparência externa (rachaduras nos dormentes de madeiras podem ser confundidos com os

nós naturais da madeira ou mesmo não interferir na integridade física do dormente) e o teste do som produzido ao golpear o dormente para validar o conteúdo sadio.

Estas avaliações subjetivas são orientações encontradas nas empresas e no meio acadêmico para inspecionar os dormentes. Apesar disso, normas regulamentam os dormentes quanto aos parâmetros de defeitos aceitáveis em dormentes de madeira novos, não para dormentes em uso. Algumas normas (ABNT, 2013) e (DNIT, 2016) definem parâmetros máximos de arqueamento, encurvamento, desquinado, saliência, fendilhamento nos topos, rachadura fora do topo, nós sadios, nós mortos, percentual de alborno e diferença de altura nas faces. Os itens mais interessantes para a inspeção visual da superfície dos dormentes são rachaduras fora do topo do dormente (faces menores), que devem ter comprimento máximo de 15 cm e abertura máxima de 2 cm e fora da zona de fixação; nós vivos, que não devem estar presentes na zona de fixação do trilho; e as dimensões dos nós mortos, que devem ser menores que 2 cm de diâmetro, menores que 5 cm de profundidade e a soma dos diâmetros de todos os nós deve ser inferior a 5 cm, além de não estarem presentes na região de fixação dos trilhos. Dormentes de aço e concreto não podem apresentar falhas construtivas e de geometria. Estes são parâmetros para o recebimento de dormentes novos. Estas normas não estabelecem parâmetros para a inspeção de dormentes em uso.

A AREMA (American Railway Engineering and Maintenance-of-Way Association), define em seu manual de boas práticas (AREMA, 2009) parâmetros para as fendas em dormentes de madeira: a largura não pode ser maior que 1/8" (3 mm) e/ou o comprimento deve ser menor que 4" (10 cm), para dormentes não tratados; e para dormentes tratados, a largura deve ser

menor que 1/4" (6 mm) e/ou o comprimento menor que a largura da face que apresenta a fenda.

Para manter os ativos em condições de utilização várias técnicas de inspeção são aplicadas. Entretanto nem todas são realizadas de forma automática. Mesmo nos casos em que a aquisição de dados para inspeção seja automática, normalmente a análise e classificação é feita manualmente por operários especializados. Dessa forma é possível priorizar os trechos da ferrovia que sofrerão manutenção. Em termos de inspeção dos ativos de superestrutura de Via Permanente, os trilhos, geometria e topologia da via geralmente são inspecionados de forma automática, mas o mesmo não ocorre entre eles os dormentes ou elementos de fixação. A inspeção dos dormentes, na maioria das ferrovias, é executada pelo inspetor que frequentemente caminha sobre a ferrovia, observando os aspectos visuais dos dormentes. Esta não é uma forma eficiente para avaliar centenas de quilômetros de ferrovia, além de permitir que a subjetividade da percepção humana influencie na avaliação da condição real da ferrovia. Algumas soluções têm sido propostas em termos de automatização da inspeção de dormentes, ainda com lacunas em termos de assertividade. Este trabalho trata de um método de inspeção automática de dormentes em ferrovias baseado em imagens, topologia dos elementos e heurísticas pré-definidas.

DIAGNÓSTICO

O monitoramento da condição da via permanente, em particular as condições dos dormentes, é oferecido como produto comercial por grandes fabricantes de equipamentos de monitoramento de manutenção ferroviária, como a Plasser e Theurer (AUER, 2013) e a RailVision (RAIL VISION EUROPE LTD, 201-?). Não há informação disponível e pública sobre o desempenho de plataformas comerciais quanto à avaliação da qualidade de dormentes. Portanto é dificultada a validação e a comparação de desempenho com outros métodos. Além disso, dado ao alto custo de aquisição do módulo de inspeção visual de elementos da via permanente, algumas ferrovias optam por não o adquirir, em detrimento do investimento em outros módulos, como o módulo de medição de geometria da via e de inspeção de trilhos, mais críticos operacionalmente. Isto impulsiona a pesquisa e o desenvolvimento de soluções próprias em parceria com instituições de pesquisa.

Esta demanda por pesquisa acadêmica é recorrente de tal forma que se nota uma série de publicações objetivando a inspeção de elementos da via permanente utilizando técnicas de visão computacional, processamento de imagens e reconhecimento de padrões. Por exemplo, o projeto desenvolvido pelo laboratório de visão computacional da University of Central Florida em parceria com a Florida Department of Transportation (Shah, 2010) propôs e desenvolveu uma série de equipamentos para detectar defeitos e realizar medidas da via permanente, como tamanho de bitolas (distância entre trilhos), corrugação em trilho, fratura em trilho, ausência de fixação, entre outros usando diferentes técnicas de processamento de imagens e visão computacional. A solução de medição de bitola, com uso de laser, apresentou ótimo desempenho, no entanto as demais medidas, geralmente baseadas em visão

5

computacional, apresentaram bom desempenho em ambientes controlados, com difícil implementação em ambiente operacional real.

Rubinsztein (2011) propõe em sua dissertação de mestrado o uso de reconhecimento de padrões usando o algoritmo de Viola-Jones (VIOLA; JONES, 2004) para identificação e localização de elementos de interesse na via. Neste trabalho os elementos de interesse procurados são os elementos de fixação. Não se preocupando com a identificação do tipo de elemento de fixação, apenas procurando localizá-lo, os resultados foram bem positivos: taxa de acerto de verdadeiro positivo de 98,5% e de falso positivo de 0,0000023%.

Em outra dissertação, Babenko (2009) propõe dois métodos para medir bitola da via, um usando apenas laser e outro usando apenas câmera de vídeo, e um terceiro método para identificar elementos de fixação e placas de apoio, detectando ausência ou defeito nesses elementos. A novidade neste trabalho é a classificação dos diferentes tipos de elementos de fixação (usando MACH Filter) e o uso de GPU (unidade de processamento gráfico dedicado), que torna a execução dos algoritmos mais rápida em 600 vezes se comparada à implementação em linguagem C e 8.000 vezes mais rápida se comparada a implementação no software Matlab.

Gibert, Patel e Chellappa (2015) propõem avaliar elementos de fixação em uma ferrovia americana com dormentes de concreto. Os autores qualificam os elementos em ausentes, quebrados e em bom estado. Os elementos em bom estado são ainda classificados em 5 tipos diferentes de fixações. Usavam-se características extraídas com HOG (Histogram of oriented gradients) e uma combinação de classificadores SVM (Suport vector machine). Alcançou-se 98% de acerto nas avaliações de qualificação (fixações ausentes e quebradas) e 1,28% de falso

6

positivo (falso alarme). As avaliações foram feitas em 85 milhas de ferrovia, que correspondia 203.287 dormentes. Os autores afirmam ser o maior conjunto de dados de dormentes na literatura, até então. Destes, 2.524 dormentes estavam não-inspecionáveis (cobertos pelo lastro ou outras estruturas ou AMVs) e não foram retirados dos testes. Isto corrobora com o compromisso de retratar as dificuldades de tratar automaticamente dados reais da operação ferroviária (ambientes expostos a ruído, sujeira, dificuldades de iluminação e ambiente não controlado). O número de fixações defeituosas é apenas 0,13% do total do conjunto de dados. Este desbalanceamento entre as classes pode trazer dificuldades na comparação de desempenho do algoritmo, conforme será apresentado a frente. A fim de comparar o desempenho do algoritmo proposto com outros métodos, os autores deste trabalho (Gibert, Patel e Chellappa) afirmaram que aplicaram o algoritmo de Babenko (2009) sobre o seu banco de dados e obtiveram resultado ligeiramente inferior para este algoritmo: 94,8% de acurácia.

Há alguns trabalhos que se propõem a avaliar as condições dos dormentes. Mohammad (2008), por exemplo, avaliou aspectos morfológicos da imagem dos dormentes como presença de rachaduras e o respectivo tamanho e forma para classificar os dormentes em bons ou ruins. Por sua vez, Yella et al. (2008) avaliaram a qualidade de 200 dormentes extraindo características de imagens dos dormentes assentados na via e uma estratégia de fusão de diferentes classificadores supervisionados (Multi-layer Perceptron, Radial basis Function Neural Network e Support Vector Machine). Já Yella, Gupta e Dougherty (2007) apresentaram um ensaio de impacto acústico para extrair características usando um microfone e um gravador eletrônico. Este método em particular tenta reproduzir a avaliação que o inspetor da via permanente utiliza ao golpear o dormente com uma ferramenta e avaliar

o som resultante. Esta é a avaliação utilizada quando o dormente não apresenta aspectos visíveis que comprometam sua qualidade. No entanto, em artigo posterior, Yella, Rahman e Dougherty (2010) avaliaram que a fusão dos dois métodos propostos, processamento das imagens dos dormentes e ensaio de impacto acústico não aumentou o desempenho de forma considerável, devendo atuar, portanto como avaliações complementares.

Outros autores propõem descobrir danos em dormentes ou no lastro avaliando a resposta da ferrovia a uma vibração induzida. Plenge e Lammering (2003) submeteram um segmento de ferrovia montado em laboratório à diversas frequências de vibração e perceberam que os dormentes foram bastante receptivos à frequência de 150 Hz. Essa frequência específica estava relacionada às características mecânicas do segmento (e comprovadas pelo modelo numérico). Variando algumas dessas características, a frequência de melhor receptividade para os dormentes variava. Portanto a determinação dessa frequência dependeria das condições da via. A dificuldade seria definir as frequências em uma situação real.

Lam, Hu e Wong (2014) propõem avaliar a resposta de um segmento real de ferrovia de dormentes de concreto, montada em laboratório, submetido ao impacto de um martelo instrumentado. A metodologia primeiro determina o modelo Bayesiano mais provável dentro de uma lista de candidatos pré-definidos baseado em um conjunto de medidas. Depois de definido o modelo, uma função de densidade de probabilidade (PDF) é definida e o comportamento ao impacto é estimado. O resultado desse impacto é avaliado por 20 segundos em cada dormente sensoriado, procurando identificar comportamentos que diferem dos modelos determinados, a fim de identificar regiões que apresentam o suporte do lastro danificado.

Wang, Zhang e Lie (2017) propõem induzir uma frequência na ferrovia que possui adjacente uma massa vibrante auxiliar em um ponto específico. Medidas da resposta de vibração são tomadas em vários dormentes e nesta massa vibrante auxiliar. Essas respostas seriam suficientes para determinar as características para modelagem do sistema. Os modelos teóricos de suporte da ferrovia para fixações, dormentes e lastro foram transformados em modelos reais em escala reduzida para teste experimental. Os testes experimentais permitiram identificar de forma diferenciada problemas como fixação ausente, lastro danificado, dormente laqueado (dormente suspenso) e a situação ideal de sustentação. Apesar dos resultados terem sido conduzidos apenas para os testes em escala reduzida, há muita expectativa de que os testes em campo reproduzam esses resultados em vista do que foi apresentado pelos artigos anteriores. Esse método é mais prático pois não é preciso determinar a priori informações de estruturas danificadas (este é objetivo do modelo) ou parâmetros de modelos de elementos finitos que representem a ferrovia.

Nota-se, então, uma grande variedade de técnicas e resultados, porém ainda permanece o desafio de se associar, a partir de novas técnicas, a contribuição científica existente à situação real que a operação ferroviária impõe. Em uníssono, muitos dos autores apresentam que há muitos estudos para avaliar os defeitos e o comportamento dos trilhos e do lastro, mas há poucos trabalhos avaliando dormentes.

Apesar de representar um trabalho essencialmente de engenharia, monitorar e identificar a condição dos dormentes de uma ferrovia também é, em sua essência, um trabalho de reconhecimento de padrões e classificação. Portanto, apresenta potencial para geração de

trabalhos acadêmicos quando envolve o emprego de técnicas de processamento de imagens, métodos de classificação e fusão de características para atingir o seu objetivo.

A contribuição científica deste trabalho, então, poderá ser alcançada no desenvolvimento de um novo método a ser aplicado assim como na comparação dos resultados com outros trabalhos publicados na área. Junte-se a isso, a avaliação dos resultados obtidos com sua aplicação em um ambiente ferroviário real.

Diante da importância da ferrovia e da dificuldade e subjetividade que é realizar a inspeção de dormentes, a proposta geral deste trabalho é realizar a tarefa de inspeção automática de dormentes utilizando técnicas de processamento de imagens, reconhecimento de padrões, fusão de características e heurísticas. Para tanto serão utilizadas imagens da ferrovia coletadas por veículos ferroviários.

A forma das amostras de dados disponíveis influencia bastante na forma da solução que será implementada. Como o recurso humano de inspeção de ferrovias é limitado, o conjunto de dados coletados não será pré-classificado. Não serão indicados por um especialista, previamente nas imagens, onde estão os dormentes, que tipo de dormente está presente e se existe algum defeito nos dormentes. Esta é uma avaliação de custo muito alto para a quantidade de imagens que se pretende utilizar. Portanto a solução a ser proposta deverá ser uma solução não supervisionada em termos de classificação.

Além disso, como o ambiente da aplicação é um ambiente não controlado, externo, influenciado pelas variações de iluminação e aleatoriedade do que poderá estar presente na imagem (além dos elementos da ferrovia, poderá haver vegetação, sujeira, terra, objetos

descartados como latas e pedaços de madeira, etc.) teme-se que a quantidade de imagens coletadas não seja suficiente para propor uma abordagem de aprendizagem de máquinas.

Os objetivos específicos são:

1. Contabilizar e inventariar os tipos de dormentes presentes em cada trecho ferroviário;
2. Identificar a condição dos dormentes nos trechos analisados;
3. Gerar um relatório com as informações pertinentes para atuação da manutenção da via permanente.

A solução foi implementada considerando heurísticas, fusão de características, reconhecimento de padrões e bordas. Primeiro identifica-se a posição dos trilhos na imagem em uma região de interesse (ROI), em seguida, por várias técnicas diferentes e independentes reconhecem-se características que indicam candidatos a dormentes. Faz-se a fusão desses candidatos de forma a alcançar a melhor posição dos dormentes, inclusive com a indicação de dormente não visível (visão obstruída) onde esperava-se encontrar algum dormente. Determina-se o tipo de dormente pela avaliação de textura de sua superfície exposta e pela classificação dos demais dormentes na imagem. Por fim, a avaliação de defeitos nos dormentes é feita pela procura de características dos defeitos mais comuns. Ao final todas as informações do tipo de dormente e dos defeitos encontrados são compiladas juntamente com a informação de posição GPS, marco quilométrico, data e hora da viagem em um relatório para uso das equipes de manutenção. A Figura 1 apresenta, de forma simplificada, o diagrama de tarefas do algoritmo até aqui apresentado.

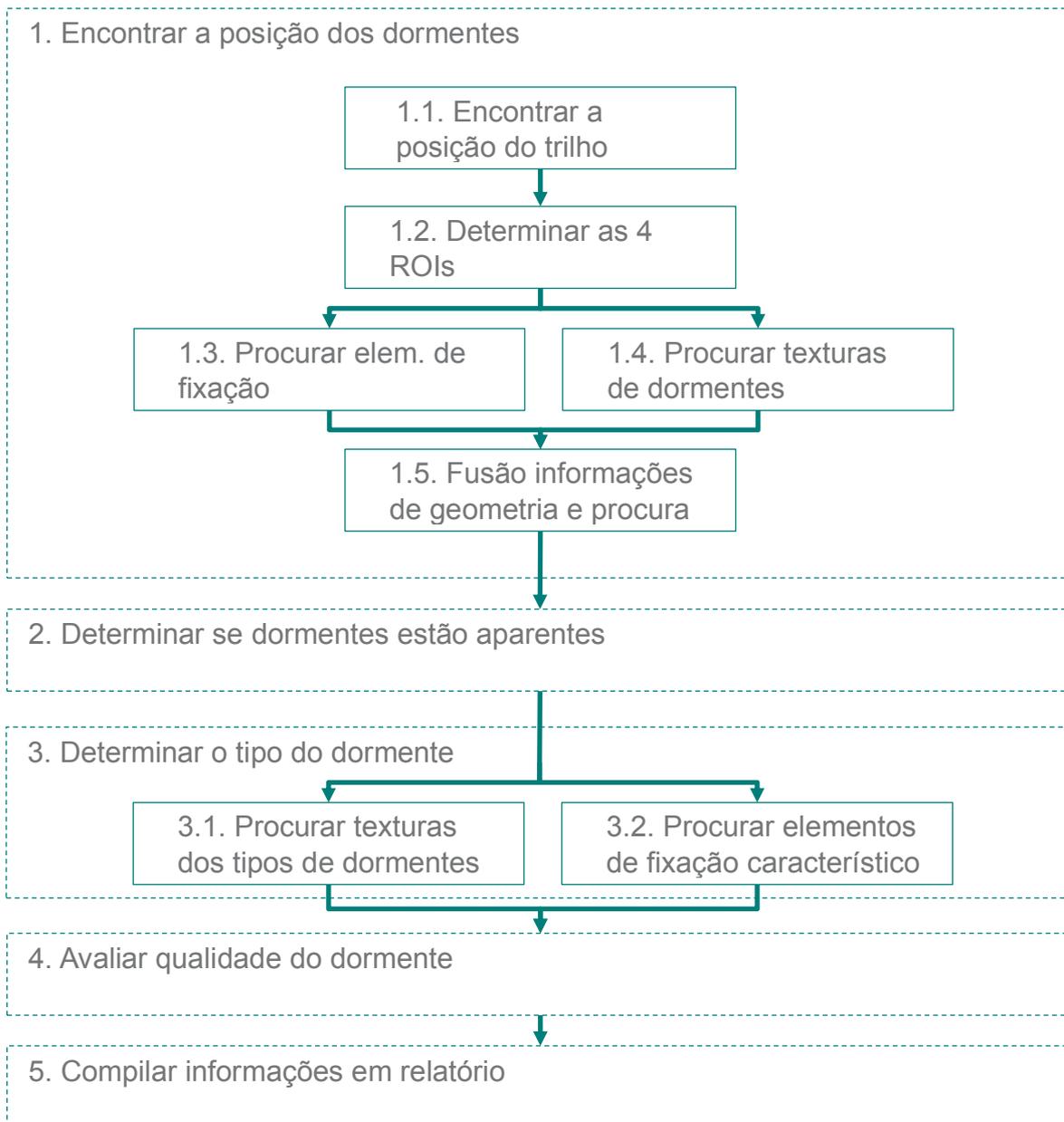


Figura 1 – Diagrama de tarefas do algoritmo.

O banco de imagens utilizado é formado por imagens obtidas com duas câmeras line scan (câmeras de varredura de linha) instaladas em um veículo ferroviária apontadas verticalmente para baixo de forma que o seu campo visual principal capture as superfícies horizontais dos trilhos (boletos), elementos de fixação (grampos, placas de fixação,

almofadas), parte dos dormentes e do lastro próximos aos trilhos. Para desenvolvimento do algoritmo foram utilizados dois conjuntos distintos de imagens. Ambos obtidos com o mesmo equipamento, mas de trechos ferroviários e momentos distintos, espaçados de meses de captura entre eles. O primeiro possuía 2.882 imagens, com 3.981 dormentes, sendo 71% dormentes de madeira e 29% de aço. O segundo conjunto possuía 7.234 imagens com 28.936 dormentes, sendo 17% de madeira e 83% de aço. Portanto o banco de imagens total era composto por 32.917 dormentes em operação ferroviária autêntica obtidos em condições de diversas de iluminação, limpeza da via, obstrução da visão dos dormentes e disposição do que era exibido (vegetação, lastro cobrindo os dormentes ou lastro coberto por graneis, etc.). Alguns exemplos de imagens do banco de dados são apresentados das Figuras 2 e 3. Nota-se nas imagens, a presença de uma faixa preta vertical que percorre toda imagem. Trata-se de um defeito no sistema de aquisição de imagens que se encontrava avariado. Também é possível perceber que a porção à direita do trilho direito é mais escura que as demais regiões da imagem. Considera-se como iluminação deficiente desta região, pois o sistema também se encontrava avariado à época. Nas imagens é possível, também, identificar que em alguns casos a superfície do dormente fica obstruída pelo lastro. Este fato dificulta a identificação do tipo de dormente, mas é contornado com algumas estratégias ao longo do algoritmo.



Figura 2 – Exemplo de imagem com dormentes de madeira.

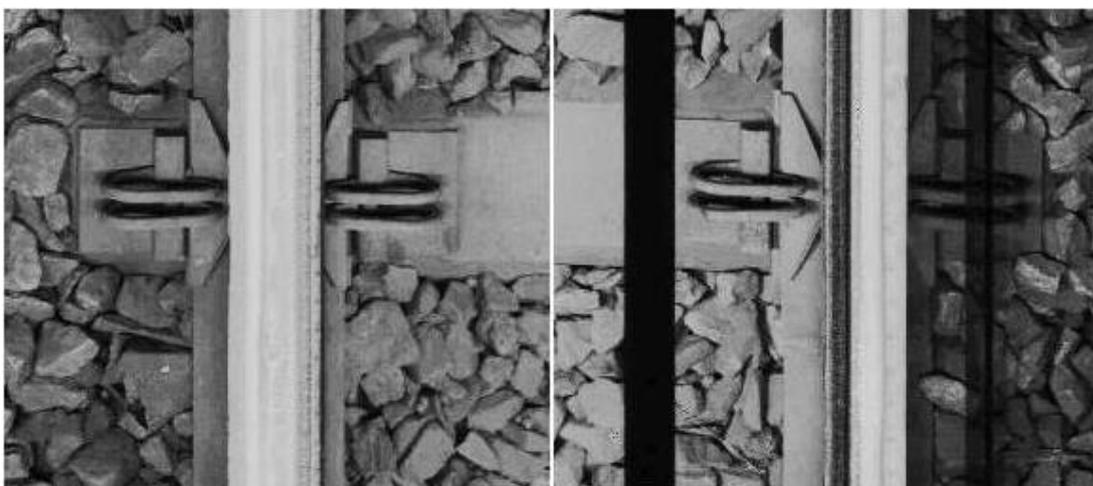


Figura 3 – Exemplo de imagem com dormente de aço.

A seguir serão apresentadas as etapas representadas na Figura 1 e discutidas sucintamente anteriormente. A primeira etapa trata de identificar a posição do dormente. Para tanto é preciso identificar a posição do trilho na imagem. Pois à direita e à esquerda de cada trilho são as regiões de interesse (Region of interest - ROI) que se encontram os possíveis dormentes visíveis. Dentre muitas técnicas de processamento de imagem testadas uma que se mostrou bastante robusta e de rápida resposta foi utilizar um filtro de Haar (Haar wavelets em Papageorgiou, Oren e Poggio (1998)) combinado com a representação por Imagens integrais (chamadas de Tabelas de Áreas Somadas em Crow (1984)). As características do filtro e a resposta (em vermelho) da posição horizontal do trilho são indicados na Figura 4.

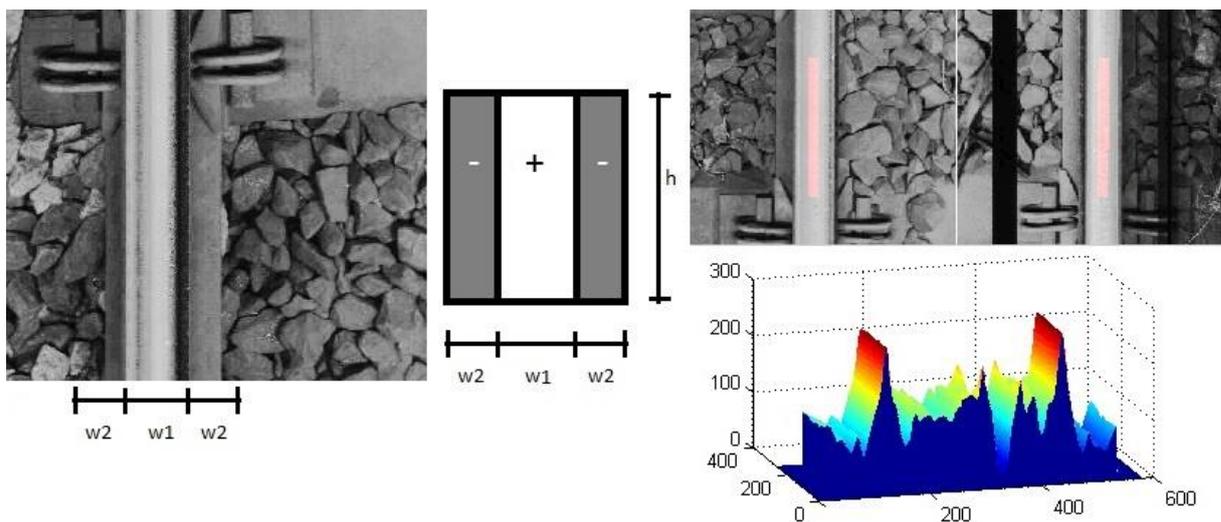


Figura 4 – Filtro de Haar para encontrar a posição do trilho, indicado em vermelho.

Uma vez identificada a posição do trilho, é possível, baseado na topologia e dimensão de componente conhecidos, identificar regiões de interesse (ROIs) onde as superfícies dos

dormentes poderão ser visualizadas. Haverá, portanto, 4 ROIs: à esquerda do trilho esquerdo (ROI 1); à direita do trilho esquerdo (ROI 2); à esquerda do trilho direito (ROI 3); e à direita do trilho direito (ROI 4). Ainda assim, baseado nas dimensões dos elementos é possível identificar uma sub-região mais próxima ao patim dos trilhos onde se encontram os elementos de fixação e as placas de apoio. Na Figura 5 estão indicados em vermelho a posição horizontal dos trilhos, em verde e em amarelo as 4 ROIs e apenas em amarelo a região que se encontram os elementos de fixação e placas de apoio

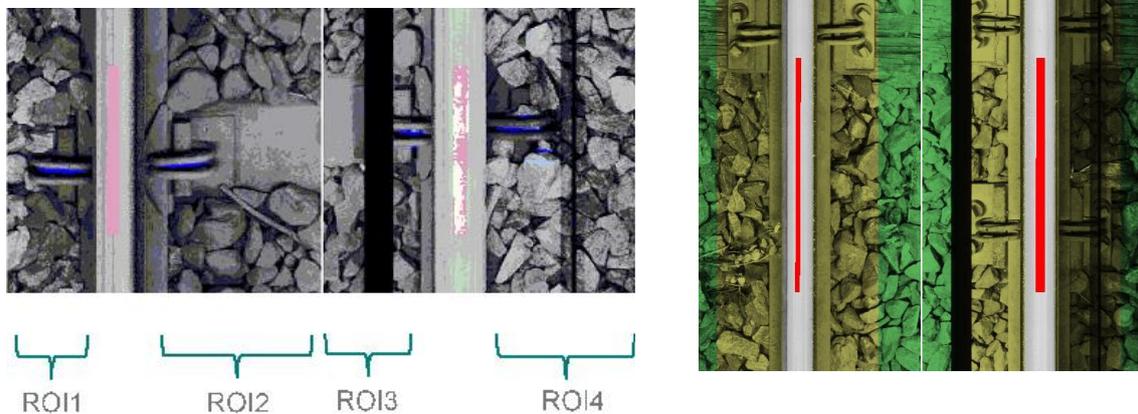


Figura 5 – Regiões de interesse identificadas

Os elementos de fixação são um importante indício da localização dos dormentes. Para identificá-los na sub-região de cada ROI, utilizou-se uma outra estrutura de filtro de Haar combinada com Imagem Integral. Na Figura 6 é apresentado o filtro de Haar característico e as posições dos elementos de fixação identificadas em vermelho na imagem e em um gráfico à parte.

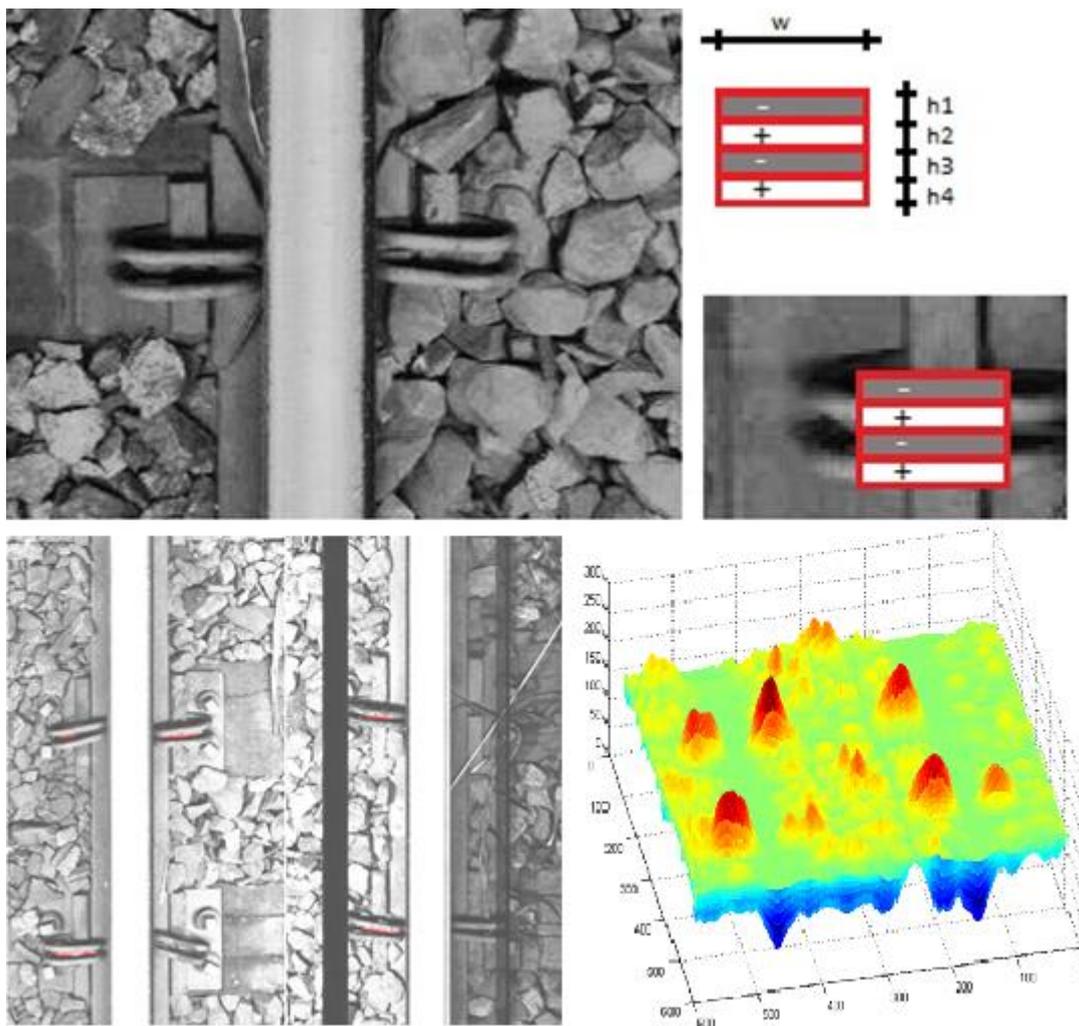


Figura 6 – Filtro de Haar característico e elementos de fixação identificados em vermelho

Outra técnica empregada para procura da posição dos dormentes é a avaliação de texturas. Pode-se diferenciar a superfície exposta dos dormentes das demais estruturas nas ROIs pela entropia ou pela ausência de bordas horizontais. A Entropia avalia a quantidade de energia presente em determinada região, que é baixa em regiões uniformes, sem rugosidade (MADASU; YARLAGADDA, 2007). Dessa forma, ao avaliar a região correta, baixa entropia pode significar presença de superfície uniforme, como dormentes e alta entropia pode

significar superfícies rugosas e com alto contraste, como a brita do lastro ou vegetação. A Figura 7 apresenta a identificação da posição de dormentes por entropia.

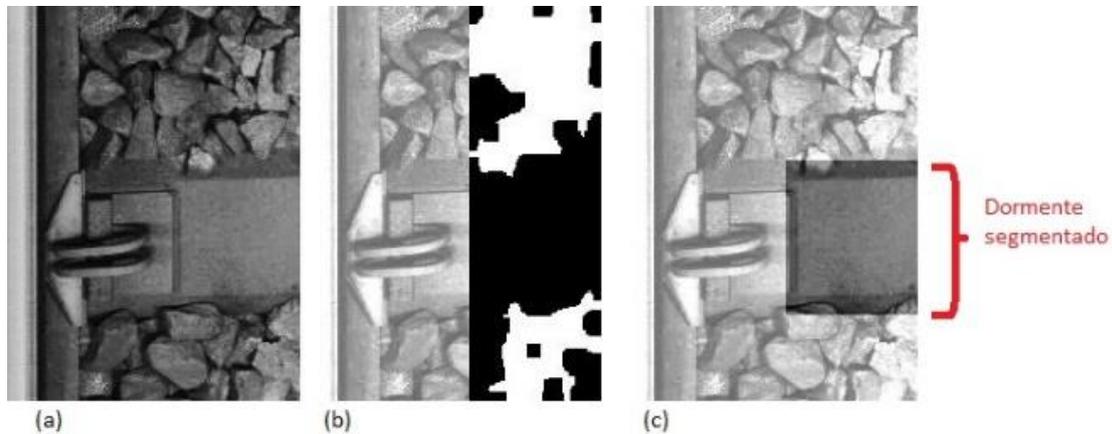


Figura 7 – Posição do dormente identificado por avaliação de entropia

Outra forma de identificar a posição dos dormentes foi implementada ao avaliar a presença de bordas verticais. No caso de estruturas naturais e aleatórias, como a brita do lastro ou vegetação, há presença de bordas em todos os sentidos. Quando a superfície de dormentes de aço é avaliada, não são esperadas bordas verticais ou horizontais. Para dormentes de madeira, não são esperadas bordas verticais, apenas bordas horizontais, que geralmente compõem os nós naturais da madeira. Portanto, a ausência de bordas verticais são indícios de presença de dormente aparente. A Figura 8 apresenta a segmentação da posição dos dormentes pela avaliação de bordas utilizando um filtro Borda Sobel Vertical, um filtro comum em técnicas de processamento de imagens (GONZALEZ; WOODS, 2007).

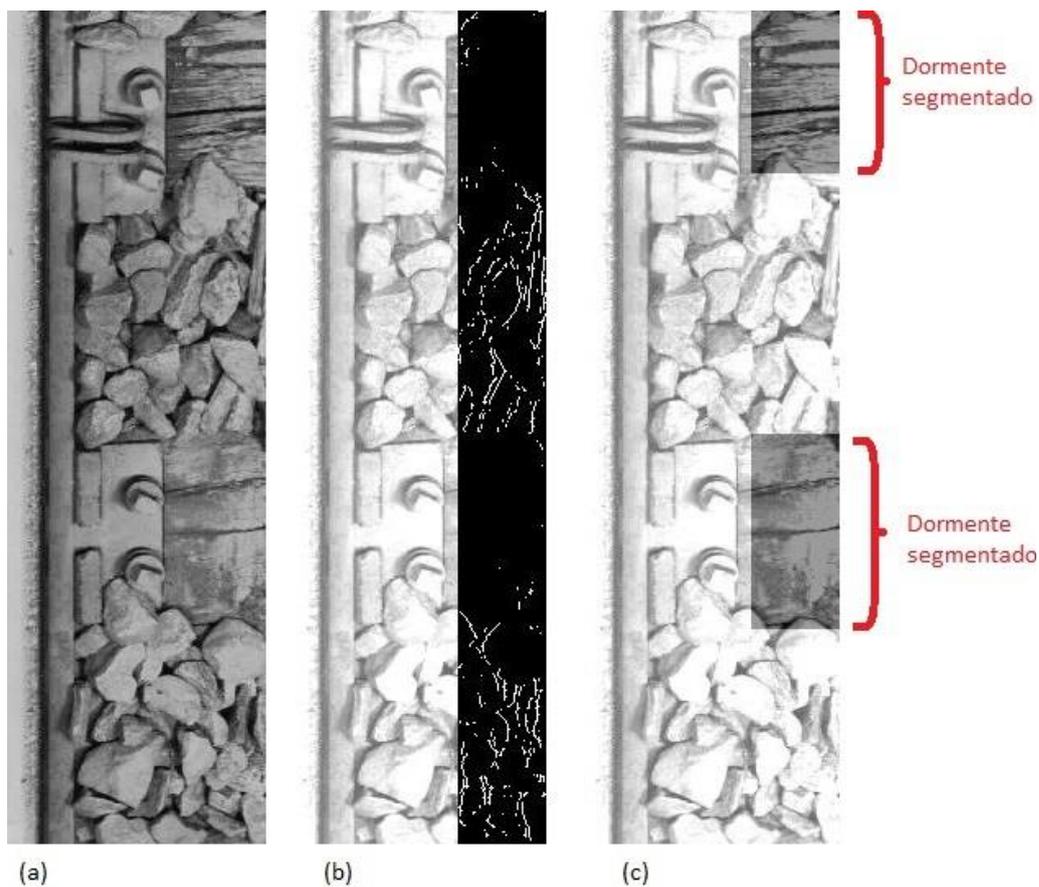


Figura 8 – Segmentação da posição de dormentes por borda

É notório que estas técnicas (avaliação da fixação, entropia e borda) quando avaliadas individualmente podem não ter uma resposta satisfatória. Por exemplo, a Figura 8 apresenta dormentes sem fixação, que não responderiam bem a avaliação da fixação e a Figura 6 apresenta dormentes encobertos por brita, sem superfície visível, não responderiam bem as avaliações de textura. No entanto ao realizar a fusão dessas informações, juntamente com outros parâmetros de topologia, das respostas de outros ROIs do mesmo dormente e de outros dormentes na mesma imagem obtêm-se ótimas respostas para as prováveis posições dos dormentes. Um dormente pode possuir até 3 indicativos de posição (elementos de fixação, entropia e borda) para cada um dos 4 ROIs, portanto são 12 indicativos da posição

correta do dormente. Além disso se houver mais dormentes na imagem eles também contribuem para fortalecer as respostas corretas entre si, em rede. Essa fusão, que congrega informações de forma não-linear, permite que boas respostas, quando combinadas resultem em um produto melhor. A acurácia de cada etapa individual e a evolução após a fusão é apresentada mais à frente. A Figura 9 apresenta nas curvas em amarelo as prováveis posições dos dormentes, resultado da fusão das respostas de fixação (curvas azuis/ciano), entropia (vermelho) e borda (verde). Os picos das curvas em amarelo são as prováveis posições dos dormentes na imagem.

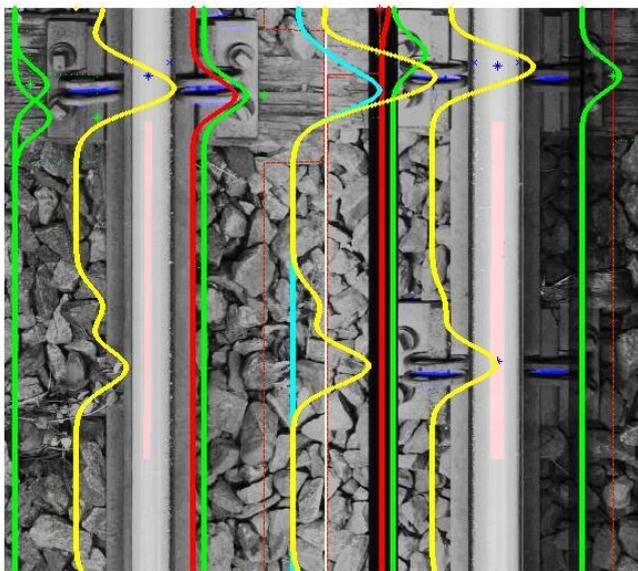


Figura 9 – Fusão de respostas para provável posição dos dormentes

Uma vez identificado a provável posição dos dormentes é possível avaliar se, em cada ROI da imagem, o dormente está visível ou não. As técnicas utilizadas são as mesmas para avaliação

de textura: Entropia e borda vertical. Esta avaliação serve apenas para desconsiderar uma possível região que não possui informação útil para identificar o tipo de dormente.

Isto posto, o próximo passo é identificar o tipo de dormente presente na imagem. Como pode-se supor, há uma diferença entre dormentes de superfícies bem uniformes, como aço e concreto, e dormentes de madeira. No dormente de madeira há, geralmente presença de bordas horizontais, decorrente dos nós naturais da madeira. Portanto uma das técnicas utilizadas é avaliar a presença de borda horizontal na superfície do dormente identificado.

A outra técnica utilizada foi procurar aspectos únicos, como por exemplo, a presença de almofadas isolantes, apenas presente nos dormentes de aço. Estes elementos possuem uma forma característica sobre o patim do trilho. Sua presença indica dormente de aço, mas nada se pode afirmar por sua ausência, visto que poderia haver almofada, mas esta poderia estar encoberta pelo lastro, como ocorreu em alguns casos. A Figura 10 apresenta uma imagem com a almofada identificada, e, portanto, a presença de dormente de aço. A Figura 11 apresenta uma imagem de dormente de madeira em que não foi identificada a presença de almofada isolante.

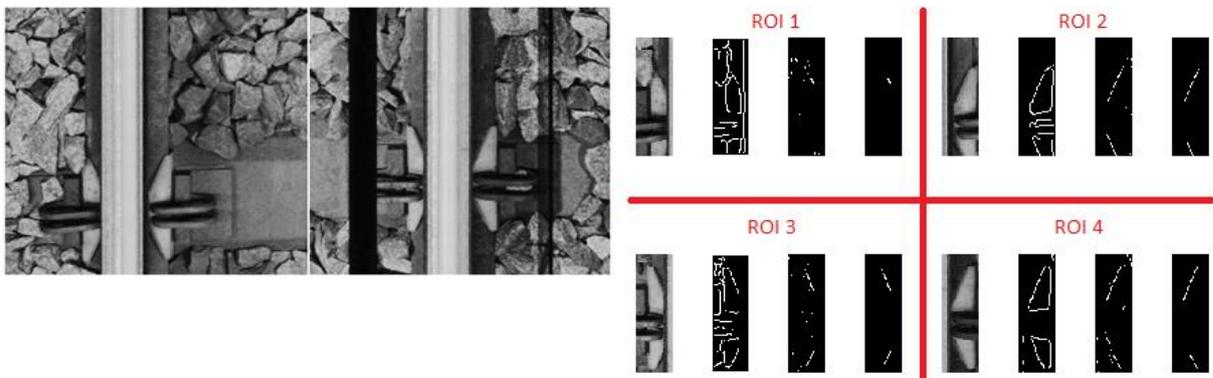


Figura 10 – Almofada isolante presente e segmentada

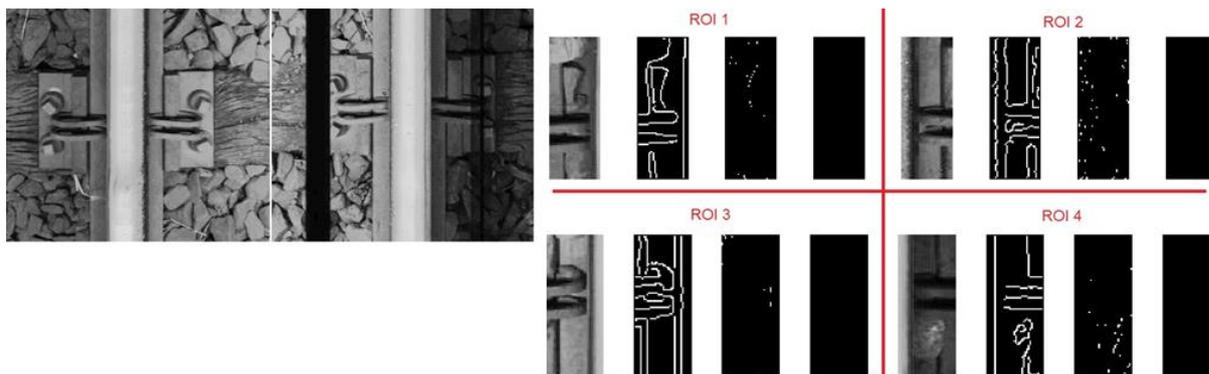


Figura 11 – Almofada isolante não presente

Dessa forma, fazendo a fusão das informações apresentadas é possível determinar com boa acurácia o tipo de dormente presente nas imagens: Dormentes de madeira ou de aço. Também foi possível identificar que regiões os dormentes estavam oclusos por outras estruturas como brita ou vegetação.

A proposta para avaliar a qualidade aparente dos dormentes de madeira é baseada na superfície aparente dos dormentes. Por tanto, é feita uma avaliação sobre as rachaduras e fendas visíveis. Estes itens são avaliados quanto a critérios morfológicos e de tamanho e compõem um ranking de acordo com os critérios atingidos. É utilizada uma escala de cores para posicionar os defeitos em níveis de severidade. Na Figura 12 é apresentado uma imagem com dormentes com defeito e também a imagem com os defeitos identificados automaticamente: Na cor ciano, os defeitos mais brandos e em vermelho os defeitos mais severos).



Figura 12 – Defeitos em dormente de madeira e defeitos identificados em cores (ciano e vermelho)

Para os defeitos aparentes em dormente de aço, de todas as imagens do banco de dados (6.874 imagens e 25.160 dormentes de aço) apenas uma apresentou defeito aparente (Figura 13). O defeito se apresentou como uma trinca no sentido transversal.



Figura 13 – Defeito em dormente de aço

No entanto uma única imagem não é suficiente para extrair atributos que caracterizem defeitos nestes dormentes. Pela natureza aleatória que as formas podem se apresentar facilmente poderiam ser confundidas com outros elementos como vegetação, sombras de pedras, galhos, óleos e líquidos sobre os dormentes provenientes dos vagões (Figura 14).

Todos estes exemplos foram percebidos no banco de dados. Inevitavelmente, a quebra de dormentes de aço causa outro atributo na via que facilmente é percebido por outros sensores. A quebra parcial ou total de um dormente de aço causa abertura de bitola. Ditosamente este item é controlado com bastante rigor em ferrovias de forma automática dada a sua importância para a segurança. Portanto o problema não ficará descoberto e potencialmente negligenciado.

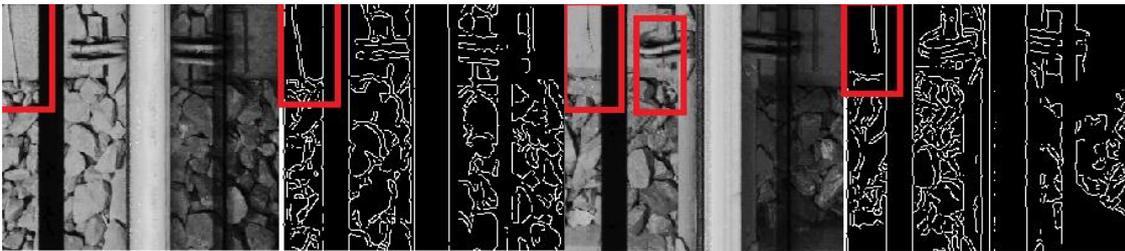


Figura 14 – Exemplos de imagens que poderiam ser confundidas com o defeito em aço

Por fim, como último objetivo, as informações de inventário dos dormentes pro trecho, o tipo de dormentes e as informações de qualidade são agrupadas com as informações de posição GPS e marco quilométrico da ferrovia, data e hora da aquisição de dados em um relatório. Este relatório é utilizado pelas equipes de manutenção para planejamento e priorização das ações de manutenção dos trechos críticos. Além disso, funciona como historiador e monitoramento da condição dos dormentes ao longo do tempo.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

A avaliação de desempenho do algoritmo deu-se nas duas funcionalidades propostas: identificar o tipo do dormente da imagem e se há defeito no dormente. A identificação do tipo de dormente é bem clara, mesmo para leigos, devido às experiências pregressas e a forma esperada dos dormentes. Além disso, como as imagens com um mesmo tipo de dormente estão agrupadas numa sequência ao longo da via (na maior parte das vezes), é fácil separar o conjunto de imagens pelo tipo de dormente, mesmo para um conjunto de 3.000 ou 7.000 imagens. No entanto, a identificação dos defeitos é definida por um público especialista que, com base em experiência, determina a ausência ou presença de defeitos e sua gravidade. Principalmente por causa dessa avaliação especializada não é possível avaliar todo o conjunto de dados para determinar a assertividade do algoritmo. Para tanto, foi calculada um número de amostras e definido um conjunto de amostras aleatórias a serem avaliadas e que poderão indicar o desempenho do sucesso do algoritmo. A tabela 1 apresenta as características dos 2 conjuntos de dados.

Tabela 1 – Características dos conjuntos de imagens

Conjunto de imagens	Nº imagens	Nº dormentes	Madeira	Aço
Conjunto 1	2.882	3.981	71%	29%
Conjunto 2	7.234	28.936	17%	83%

As métricas mais comuns para a avaliação do desempenho de classificadores são Acurácia, Sensitividade, Especificidade e Precisão. Nos dois conjuntos de dados há proporções bem diferentes de dormentes de madeira e de aço. Para conjuntos não balanceados, neste caso,

apenas a métrica de acurácia não é suficiente para avaliação de desempenho. É preciso avaliar também em outras métricas.

O desempenho do algoritmo para a avaliação do tipo de dormente encontra-se na Tabela 2.

Tabela 2 – Desempenho para a análise do tipo de dormente

Conjunto de imagens	Acurácia	Sensitividade	Especificidade	Precisão	Pred.Neg.
Conjunto 1	96%	97%	94%	98%	93%
Conjunto 2	97%	98%	96%	84%	100%

Tomando como hipótese a pergunta "O dormente visualizado é de madeira?", o significado das métricas, para este teste é apresentado a seguir:

- **Acurácia:** Indica a taxa de acerto do tipo de dormente entre todos os dormentes do conjunto;
- **Sensitividade:** Indica a taxa de acerto dos dormentes indicados corretamente como madeira dentre todos os dormentes que realmente são de madeira;
- **Especificidade:** Indica a taxa de acerto dos dormentes indicados corretamente como aço dentre todos os dormentes que realmente são de aço;
- **Precisão:** Indica a taxa de acerto dos dormentes indicados corretamente como madeira dentre todos os dormentes que o algoritmo indicou como de madeira;
- **Valor preditivo negativo:** Indica a taxa de acerto dos dormentes indicados corretamente como aço dentre todos os dormentes que o algoritmo indicou como de aço.

Todos os índices foram satisfatórios, ficando acima de 93%, com exceção da Precisão do Conjunto 2, com 84%. Em particular este conjunto de dados possui uma iluminação mais

deficitária que o outro Conjunto, o que dificulta perceber os dormentes de madeira como madeira devido ao baixo contraste de imagem, uniformizando-a.

O desempenho do algoritmo para avaliação do tipo de dormente encontra-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Desempenho para a análise de defeito em dormente de madeira

Conjunto de imagens	Acurácia	Sensitividade	Especificidade	Precisão	Pred.Neg.
Conjunto 1	86%	80%	88%	60%	95%
Conjunto 2	93%	92%	93%	67%	99%

A Acurácia fica acima de 86% nos dois conjuntos, mas assim como o teste anterior, as classes são desbalanceadas e, portanto, esta não é a melhor métrica. A Sensitividade, que avalia o quanto o algoritmo acertou dentre os dormentes que realmente possuíam defeito, ficou entre 80% e 92%. A Especificidade, que traz a porcentagem de acerto dentre os dormentes verdadeiramente sem defeito, alcançou índices de 88% e 93%, respectivamente para os Conjuntos 1 e 2. Ou seja, quando há defeitos reais, a taxa de acerto é alta. Este é um parâmetro importante pois direciona a ação das equipes de manutenção para evitar eventos catastróficos. A métrica de Precisão, que representa a proporção entre as respostas corretas de todos os dormentes que o algoritmo apontou com defeito foi de 60% e 67%, respectivamente. Este indicador, quando apresenta valor baixo indica que o algoritmo está indicando defeitos onde realmente não há. Apesar de ser o indicador com o menor valor, há de se considerar que parte da confusão da resposta ocorre quando há outros materiais (como brita e vegetação) dispostos de forma aleatória sobre os dormentes de madeira, causando sombras que se assemelham às rachaduras na madeira, ocasionando os erros. Este indicador é apenas custoso, mas não catastrófico, uma vez que levaria a indicação de

defeitos em dormentes que na verdade não são defeituosos. Isso no máximo, levaria a troca (ou a inspeção humana) desnecessária de dormentes em bom estado. Quando comparado aos poucos artigos disponíveis e que apresentam métricas de desempenho, a implementação deste trabalho alcança valores semelhantes ou melhores em métricas importantes. Na Tabela 4 é apresentado o desempenho de Yella, Rahman e Dougherty (2010). Neste caso, o desempenho alcançou resultado pior em Sensitividade (a métrica catastrófica) e resultado melhor em Precisão (a métrica custosa).

Tabela 4 – Desempenho para a análise de defeito em dormente de madeira na literatura

Conjunto de imagens	Acurácia	Sensitividade	Especificidade	Precisão	Pred.Neg.
Conjunto 1	86%	57%	97%	89%	85%

CONCLUSÕES

Entende-se que os objetivos propostos foram atingidos. Foi possível identificar o tipo de dormente de cada imagem, foi possível identificar, na maior parte dos casos, os defeitos em dormente de madeira e com as informações disponíveis é possível entregar um relatório com dados úteis para priorizar e planejar a manutenção dos dormentes da ferrovia. Isto foi atingido, como premissa, utilizando apenas técnicas de processamento de imagens para se gerar uma classificação não supervisionada e sem aprendizagem de máquina. Estas duas premissas se fizeram necessárias pois o custo para pré-classificar o banco de dados de amostras é muito alto.

O tipo de dormente foi estimado com uma acurácia superior a 96% e demais métricas com desempenhos igualmente interessantes (conforme Tabela 2). Isto num cenário sujeito a variabilidade de uma operação ferroviária real. Com condições de dormentes encobertos pelo lastro, vegetação, sujeira, ausência de fixação ou na presença de outros elementos da via permanente, como AMVs e travessões que mudam completamente os padrões de dormentes visualizados na imagem. Para uma avaliação humana, esses itens não representam qualquer empecilho, visto que a complexa máquina humana faria uso de muita informação disponível, inclusive experiências pregressas e os trechos adjacentes da ferrovia, para identificar o tipo de dormente. No entanto a proposta é justamente classificar automaticamente sem intervenção humana. Para o algoritmo desenvolvido, não foi implementado (mas poderia sem qualquer dificuldade) considerar a classificação da imagem do trecho anterior para identificar o tipo de dormente da imagem atual. Seria como estimar o estado atual, considerando informações do estado anterior e mais a interferência das entradas.

A identificação dos defeitos em dormentes ocorreu apenas nos dormentes de madeira. Nos dormentes de aço, pelos motivos que já foram descritos, não houve repetibilidade do defeito superficial que permitisse identificar suas características majoritárias. Havia apenas uma única imagem em todo o conjunto de imagens. Para os dormentes de madeira foi possível obter, conforme a Tabela 3, acurácia superior a 86%. Como a incidência de dormentes com defeitos e sem defeitos não são quantitativamente balanceadas, a acurácia não é o melhor parâmetro para consideração de desempenho. Contudo, as demais métricas alcançaram valores entre 80% e 99%. A exceção foi a Precisão que assumiu valores entre 60% e 67%. Via de regra, Precisão significa a taxa de acerto de todos os itens que o algoritmo indicou como possuindo

defeito. Ou seja, ele foi permissivo com o que era apontado como defeito, havia alguns que não eram realmente defeito. Por outro lado, a Sensitividade (recall), que indica a taxa de defeitos apontada pelo algoritmo entre todos os itens que realmente possuíam defeitos ficou entre 80% e 92%. Assim sendo, o algoritmo toleraria a indicação de alguns dormentes não defeituosos de verdade, mas não deixaria de indicar grande parte dos dormentes realmente defeituosos.

A indicação de defeitos de dormentes, que possui três graduações de confiabilidade de defeito (a depender de quais características de defeitos são atendidas), o tipo de dormente da imagem e a informação da posição na via a que se refere a imagem serão compiladas em um relatório que ajudará as equipes de manutenção da ferrovia em priorizar e planejar as atividades. Poderá ainda ser utilizado para cruzar dados com outros relatórios a fim de identificar problemas que afetam outras estruturas da ferrovia. Por exemplo, ausência de suporte nos dormentes podem causar mudança da geometria da via.

Para trabalhos futuros, em termos de objeto a ser avaliado, planeja-se adaptar o algoritmo também para analisar defeitos em dormentes de concreto. Estes dormentes apresentam fraturas na superfície, perdem massa ou fragmentam-se, principalmente devido a acidentes. Outros elementos podem ser também incluídos, como outros tipos de fixações e AMVs. Os AMVs, em particular, são estruturas que sofrem muito com o impacto e frequentemente devem passar por inspeções.

Em termos de técnicas e ferramentas, poderiam ser implementados algoritmos de aprendizagem de máquina com um banco de dados maior e com os objetos previamente classificados e rotulados. Talvez, a primeira indicação de classificação do banco de dados

maior poderia originar-se do algoritmo proposto neste trabalho e apenas nos casos de dúvida (ou pouca certeza), recorrer à avaliação especialista. Assim seria possível implementar um algoritmo supervisionado e com aprendizagem de máquina.

Poderia também utilizar lógica Fuzzy para classificar as gradações de defeitos. A régua é bem definida por parâmetros quantitativos, mas assim como a avaliação subjetiva humana, a graduação simbólica da saída do algoritmo pode ser um conjunto de regras flexíveis. Ao menos manteria o objetivo deste algoritmo de quantificar o que hoje é avaliado de forma subjetiva pelo homem.

Por fim uma boa contribuição do trabalho é estabelecer parâmetros para a avaliação de defeitos em dormentes de madeira. Até então esta avaliação é subjetiva e poderia variar entre diferentes indivíduos. Com o acompanhamento automático, completo e temporal dos trechos ferroviários é possível historiar e analisar a evolução da vida dos ativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMÉRICA Latina Logística. Especialização em engenharia ferroviária - ALL: 2.3 Falhas em trilhos. 02 mar. 2009, 27 jun. 2009. 60 p. ALL. Notas de aula.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTADORES FERROVIÁRIOS. Informações gerais. ANTF. Brasília, on-line. [2017]. Disponível em: <<http://www.antf.org.br/informacoes-gerais/>>. Acesso em: 16 fev. 2017.

AMERICAN RAILWAY ENGINEERING AND MAINTENANCE-OF-WAY ASSOCIATION. MANUAL FOR RAILWAY ENGINEERING: Chapter 30 Ties. Landover, Maryland, USA: AREMA, 2009. v. 4.

PREVISÃO DA BALANÇA COMERCIAL PARA 2017 [da] Associação de Comércio Exterior do Brasil – AEB. Rio de Janeiro, 2017. Anual. Disponível em <http://www.aeb.org.br/noticias/downloads/1956_AEB%20-%20BALAN%C3%87A%20COMERCIAL%202017.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7511: Dormentes de madeira — Requisitos e métodos de ensaio. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. 24 p.

AUER, Florian. Multi-function Track Recording Cars. Rail Technology Review, [S.l.]: DVV Media Group, v. 53, n. 3/4, p.32-36, Mar. 2013. Disponível em: <https://www.plassertheurer.com/pdf/publications/32_36_Auer.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2015.

BABENKO, Pavel. Visual inspection of railroad tracks. 2009. 113 f. Tese (Doctor of Philosophy in the School of Electrical Engineering and Computer Science), College of Engineering and Computer Science, University of Central Florida, Orlando, Florida, 2009. Disponível em: <http://crcv.ucf.edu/papers/theses/Babenko_Pavel.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2014.

BALLOU, Ronald H. Logística Empresarial: Transporte, administração de materiais, distribuição. São Paulo: Atlas, 1993. 388 p. ISBN 978-85-224-0874-0.

BRINA, Helvécio Lapertosa. Estradas de ferro: Via permanente. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1979. 260 v. ISBN 85-216-0011-9.

BUSTAMANTE, José de Carvalho. Capacidade dos modos de transporte. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 1998. Notas de aula.

CAIXETA-FILHO, José Vicente; MARTINS, Ricardo Silveira. Gestão Logística do Transporte de Cargas. São Paulo: Atlas, 2007. 296 p.

CROW, Franklin C. Summed-Area Tables for Texture Mapping. Acm Siggraph Computer Graphics, Minneapolis, MN, USA, v. 18, n. 3, p.207-212, July 1984. Disponível em: <<http://www.florian-oeser.de/wordpress/wp-content/2012/10/crow-1984.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

DEPARTAMENTO DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. PROCEDIMENTO DE INSPEÇÃO DE MATERIAL PIM-014: Dormente de Madeira para Via Férrea. [S.l.:s.n.], 2016. 46 p. Disponível

em: <<http://www.dnit.gov.br/ferrovias/instrucoes-e-procedimentos/procedimentos-para-inspecao/pim-014-dormente-de-madeira.pdf/view>>. Acesso em: 09 fev. 2016.

GIBERT, Xavier; PATEL, Vishal M.; CHELLAPPA, Rama. Robust Fastener Detection for Autonomous Visual Railway Track Inspection. 2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision, [S.l.], p.694-701, Jan. 2015. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wacv.2015.98>.

Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/269337999_Robust_Fastener_Detection_for_Autonomous_Visual_Railway_Track_Inspection>. Acesso em: 16 mar. 2017.

GONZALEZ, Rafael C.; WOODS, Richard E. Digital Image Processing. 3rd ed. Upper Saddle River, New Jersey, EUA: Prentice Hall, 2007. 954 p.

LAM, Heung Fai; HU, Qin; WONG, Man Tat. The Bayesian methodology for the detection of railway ballast damage under a concrete sleeper. Engineering Structures, [S.l.], v. 81, p.289-301, Dec. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.08.035>. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029614005069>>. Acesso em: 16 mar. 2017.

MADASU, Vamsi Krishna; YARLAGADDA, Prasad. An in Depth Comparison of Four Texture Segmentation Methods. 9th Biennial Conference Of The Australian Pattern Recognition
34

Society On Digital Image Computing Techniques And Applications (dicta 2007), Glenelg, South Australia, p.366-372, Dec. 2007. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/dicta.2007.4426820>. Disponível em: <<http://eprints.qut.edu.au/12743/1/12743.pdf>>. Acesso em: 14 dez. 2016.

MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA, COMÉRCIO EXTERIOR E SERVIÇOS (Brasil). Balança comercial: Janeiro-dezembro 2016. Exportação: 2016/2015. Produtos por Fator Agregado: acumulado. Brasília: MDIC. 2017. Anual. Disponível em < <http://www.mdic.gov.br/comercio-exterior/estatisticas-de-comercio-exterior/balanca-comercial-brasileira-acumulado-do-ano?layout=edit&id=2205>>. Acesso em: 09 jan. 2017.

MOHAMMAD, Sajjad Pasha. Machine Vision for Automating Visual Inspection of Wooden Railway Sleepers. 2008. 51 f. Dissertação (Masters in Computer Science), Department Of Computer Science, Dalarna University, Borlange, Sweden, 2008. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:518382/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

PAPAGEORGIU, Constantine P.; OREN, Michael; POGGIO, Tomaso. A general framework for object detection. Sixth International Conference On Computer Vision (ieee Cat. No.98ch36271), Cambridge, MA, USA, p.555-562, Feb. 1998. Narosa Publishing House. <http://dx.doi.org/10.1109/iccv.1998.710772>. Disponível em:

<https://www.researchgate.net/publication/3766402_General_framework_for_object_detection>. Acesso em: 10 ago. 2014.

RAIL Vision. Tie (sleeper) grading. Rail Vision Europe Ltd. [201-?]. Disponível em: <http://www.rail-vision.co.uk/system/files/Tie_Grading.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2017

PLENGE, Michael; LAMMERING, Rolf. The Dynamics of Railway Track and Subgrade with Respect to Deteriorated Sleeper Support. In: POPP, Karl; SCHIEHLEN, Werner. System Dynamics and Long-Term Behaviour of Railway Vehicles, Track and Subgrade. Heidelberg, Berlin: Springer, 2003. p. 295-314. (Lecture Notes in Applied Mechanics, vol 6). DOI: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-45476-2_18.

PROFILLIDIS, Vassilios A. Railway Engineering. 2nd ed. Wiltshire, UK: Antony Rowe Ltd, 2000. 291 p. ISBN-13: 9780754612797 ISBN: 0754612791.

RIBEIRO, Priscilla Cristina Cabral; FERREIRA, Karine Araújo. Logística e transportes: uma discussão sobre os modais de transporte e o panorama brasileiro. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 12., 2002, Curitiba. [Artigos completos]. Curitiba: ABEPRO, 2002. p. 1 - 8. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/228780462_LOGISTICA_E_TRANSPORTES_UMA

_DISCUSSAO_SOBRE_OS_MODALIS_DE_TRANSPORTE_EO_PANORAMA_BRASILEIRO>. Acesso em: 16 mar. 2017.

RUBINSZTEJN, Yohann. Automatic Detection of Objects of Interest from Rail Track Image. 2011. 110 f. Dissertação (Master of Science in the Faculty of Engineering and Physical Sciences), School of Computer Science, University of Manchester, [Manchester, UK], 2011. Disponível em: <https://studentnet.cs.manchester.ac.uk/resources/library/thesis_abstracts/MSc11/FullText/RubinszteinYohann-fulltext.pdf>. Acesso em: 09 jan. 2015.

SHAH, Mubarak. Automated Visual Inspection/Detection of Railroad Track. Orlando, Florida: [s.n.], 2010. 55 p. (8). Relatório final de projeto (University of Central Florida Contract No: BD550, RPWO #8). Disponível em: <https://ntl.bts.gov/lib/33000/33700/33758/FDOT_BD550-08_rpt.pdf>. Acesso em: 03 jan. 2015.

SOARES, Leonardo Souza. Procedimentos para Determinação da Velocidade Máxima Autorizada. 2006. 181 f. Monografia (Especialização) - Curso de Especialista em Transporte Ferroviário de Carga, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <<http://transportes.ime.eb.br/etfc/monografias/MON027.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2014.

VALE. Rotinas do inspetor de superestrutura de via permanente. 08 ago. 2011, 12 ago. 2011. 207 p. VALE. Notas de aula.

VIOLA, Paul; JONES, Michael J.. Robust Real-Time Face Detection. International Journal Of Computer Vision, Hingham, MA, USA, v. 57, n. 2, p.137-154, May 2004. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1023/b:visi.0000013087.49260.fb>. Disponível em: <<http://www.vision.caltech.edu/html-files/EE148-2005-Spring/pprs/viola04ijcv.pdf>>. Acesso em: 10 ago. 2014.

WANG, Longqi; ZHANG, Yao; LIE, Seng Tjhen. Detection of damaged supports under railway track based on frequency shift. Journal of Sound and Vibration, [S.l.], v. 392, p.142-153, Mar. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2016.11.018>.

YELLA, Siril et al. Classifier Fusion for condition monitoring of wooden railway sleepers. Engineerit: Measurement & instrumentation, [S.l.], n. 11, p.32-35, May 2008. Disponível em: <http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/AutT_other.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2014.

YELLA, Siril; GUPTA, Narendra K.; DOUGHERTY, Mark. Automating condition monitoring of wooden railway sleepers. EngineerIT: Measurement & instrumentation, [S.l.], n. 5, p.68-71,

Oct. 2007. Disponível em: <[http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/MeasTech_Automating condition.pdf](http://www.ee.co.za/wp-content/uploads/legacy/MeasTech_Automating%20condition.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2014.

YELLA, Siril; RAHMAN, Asif Shaik; DOUGHERTY, Mark. Pattern recognition for classifying the condition of wooden railway sleepers. 2010 International Conference On Multimedia Computing And Information Technology (MCIT), [S.l.], p.61-64, Mar. 2010. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/mcit.2010.5444850>.