
CONCEPÇÃO DE UM INCLINÔMETRO ÓPTICO PARA MONITORAMENTO DE ESTRUTURAS

LUIZ FELIPE COSTA DOS SANTOS^{1,2}

MARCOS SANTANA FARIAS²

PAULA DEBIASI¹

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ¹

Instituto de Tecnologia - IT

Departamento de Engenharia, Seropédica, RJ

l.felipe@hotmail.com

pauladebiasi@yahoo.com

Instituto de Engenharia Nuclear²

Departamento de Instrumentação e Confiabilidade Humana, Rio de Janeiro – RJ

msantana@ien.gov.br

RESUMO - As estruturas de engenharia estão sujeitas a esforços e realizam movimentos de forma natural. A partir do momento em que esses movimentos ultrapassam os limites toleráveis tais estruturas devem ser monitoradas. O monitoramento não impede que o movimento ocorra, mas, indica o risco e minimiza os danos. Esse monitoramento pode ser realizado por diversos tipos de sensores, dentre os quais se destacam os de atuação contínua, por permitirem a avaliação em tempo real além de gerar grande volume de dados. O monitoramento remoto contínuo minimiza a necessidade de equipes de campo em áreas de risco e possui algumas vantagens em relação aos métodos geodésicos convencionais no que diz respeito ao custo e à automação. Neste trabalho foi desenvolvido um inclinômetro óptico, de baixo custo e precisão compatível com a dos equipamentos comerciais, baseado em sistema de visão artificial. A metodologia empregada baseia-se na fusão dos conceitos de Prumo e de Visão Artificial para gerar um sistema capaz de medir a verticalidade de um elemento construtivo a partir do comprimento do fio de prumo e do deslocamento do mesmo com resolução da ordem de 2,5". Os testes iniciais demonstram que o sistema tem boa resolução e precisão.

ABSTRACT - The engineering structures are subject to efforts and perform movements in a natural way. From the moment that these movements exceed tolerable limits such structures must be monitored. The monitoring does not prevent the movement to occur, but indicates the risk and minimize the damage. This monitoring can be accomplished by several types of sensors, among which the continuous action sensor stands out, by allowing real-time assessment and generating large volumes of data. The continuous remote monitoring minimizes the need for field staff in areas of risk and has some advantages over conventional surveying methods with regard to cost and automation. This work proposes the development of an optical inclinometer with low cost and accuracy compatible with that of commercial equipment, based on artificial vision system. The methodology is based on the fusion of concepts of plummet to artificial vision to generate a system capable of measuring the verticality of a building element from the length of the plumb line and the displacement of the same, with a resolution of about 2,5". Initial tests show that the system has good resolution and accuracy.

1 INTRODUÇÃO

Para garantir a vida útil de estruturas civis nos eventos onde as deformações ou movimentos são críticos, a redução de riscos se realiza através de ações de segurança preventiva. A detecção de movimentos 3D permite identificar a eminência de risco ou a possibilidade de acidentes. De acordo com LONG, HENDERSON e MONTGOMERY (2001) o monitoramento intermitente de estruturas civis, apoiado no uso de testes apropriados, representa a única solução

prática até o presente momento, para o conhecimento da perda de durabilidade dos materiais componentes de um elemento estrutural. Para essa finalidade foram desenvolvidos diversos métodos de observação que empregam equipamentos baseados em diferentes princípios de funcionamento.

As técnicas e equipamentos utilizados no monitoramento dependem muito das características morfológicas da estrutura, do tipo de carregamento imposto, além do tipo de resultado que se quer obter. Segundo KRELLING (2006) equipamentos com essas características podem ser empregados no monitoramento geodésico e/ou geotécnico de estruturas, isto é, aplicável à medição de deslocamentos em uma estrutura de construção civil. Sua principal aplicação poderia ser o monitoramento de barragens, podendo ser estendida a outras áreas.

O dispositivo proposto neste projeto tem seu princípio de funcionamento baseado em um prumo e na visão artificial. Através da fusão desses conceitos é possível mediar a própria inclinação ou sua variação de acordo com o referencial adotado. O prumo é um instrumento inventado pelos astrônomos do Egito Antigo cerca de 3000 a. C. que é utilizado na construção civil para verificar a verticalidade de elementos construtivos.

Os sistemas de Visão Artificial, também conhecidos como Visão de Máquina, integram independentemente da complexidade e da aplicação, a captura de uma imagem por uma câmera e a interpretação dos dados por um controlador dedicado ou computador para que uma decisão seja tomada. Diversas aplicações na indústria se desenvolveram usando esses sistemas, principalmente nos processos de automação na inspeção de peças. Segundo BIANCHI (2001), a Visão Artificial é definida como sendo um sistema composto por uma estrutura na qual uma imagem passaria por três processos distintos e sequenciais:

A primeira etapa, de implementação física, é responsável pela aquisição da imagem, ou seja, a etapa sensorial e perceptiva do processo de visão. Na segunda etapa, de algoritmo e tipo de representação, a problemática é como a informação vinda dos sensores pode ser representada de forma que seja útil para o usuário da imagem. E finalmente na terceira etapa, da teoria computacional teríamos o que Marr define como o objetivo da visão, sobre a qual devem existir teorias sobre como utilizar as representações para se atingir os objetivos desejados. Dessa forma pode se dizer que as principais operações realizadas por um sistema de visão artificial são o processamento, a análise e interpretação de imagens. O processamento de imagens fornece subsídios para a interpretação, facilitando a identificação e extração de informações contidas nas imagens. Através da Fotogrametria, ciência e tecnologia que consiste em obter informações confiáveis através de imagens adquiridas por sensores, é possível utilizar as imagens processadas para obter medidas. A partir das medidas de deslocamento, conhecendo-se o raio do pêndulo são determinados os ângulos.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O software foi desenvolvido em linguagem gráfica G, que deriva do C++, no ambiente de programação LabVIEW, em conjunto com o módulo de visão Imaq Vision. Os principais campos de aplicação do LabVIEW são a realização de medições e a automação. A programação é feita de acordo com o modelo de fluxo de dados, o que oferece a esta linguagem vantagens para a aquisição de dados e para a sua manipulação. A idéia central foi criar um sistema de visão artificial capaz de detectar um ponto luminoso em uma imagem, para que assim fosse possível o cálculo do ângulo de inclinação.

O software desenvolvido realiza a captura e o processamento da imagem para extrair medidas do resultado deste processamento. Logo, para que seja feita a detecção da projeção do laser na imagem é necessário extrair um único plano de cores da imagem colorida, fazer a equalização do histograma, realizar a limiarização e a filtragem de partículas. Após realizar essas operações a imagem de saída possui apenas o fundo e o alvo de interesse, do qual são calculadas as coordenadas do centro de massa.

2.1 Desenvolvimento do Software

O software calcula os ângulos utilizando o deslocamento e o raio do pêndulo pela expressão:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{r}{d} \quad (1)$$

Onde:

θ = ângulo em questão

r = raio do pêndulo

d = deslocamento do pêndulo

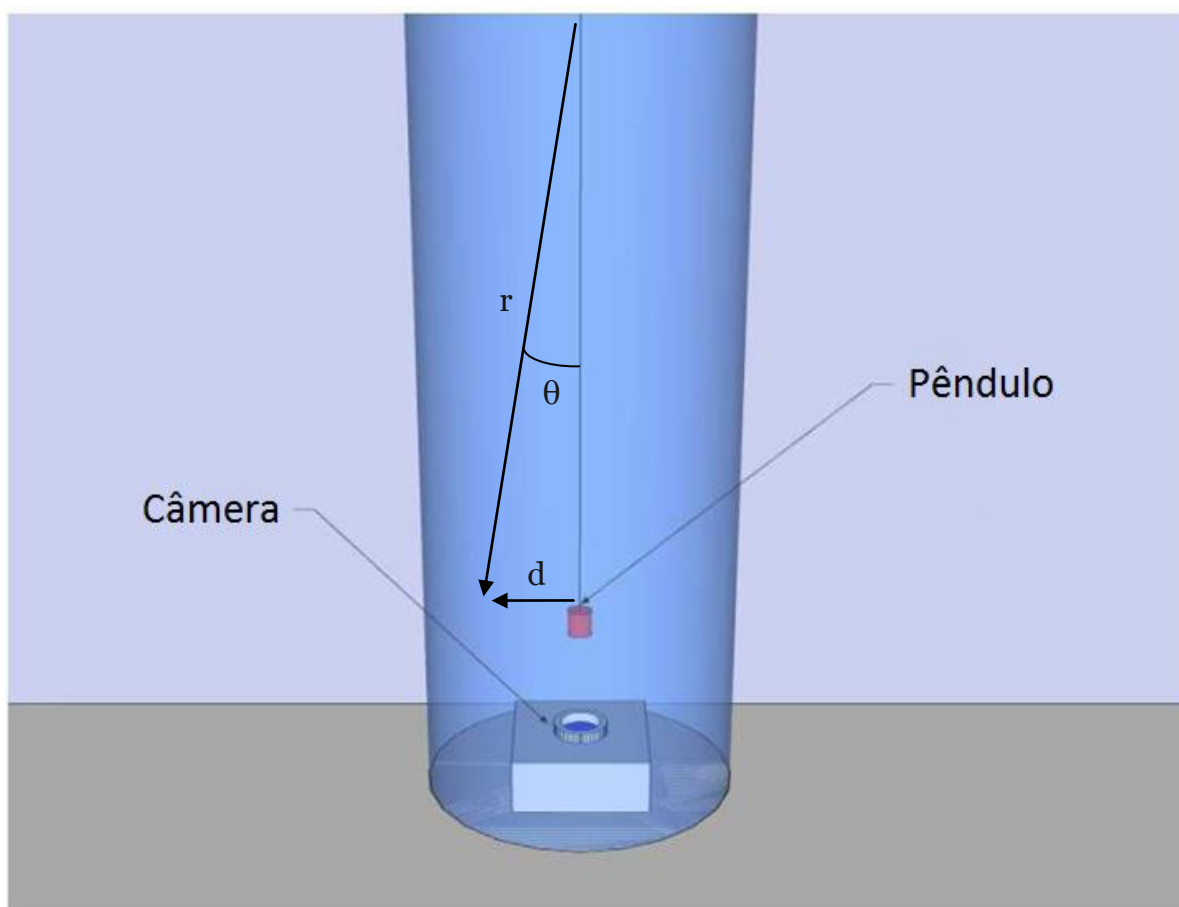


Figura 1 – Representação esquemática do protótipo.

Cada ciclo do software ocorre em um tempo da ordem de décimos de segundo, então se todas as leituras fossem armazenadas seria gerado um volume de dados extremamente grande e desnecessário, uma vez que em um período tão pequeno o movimento é imperceptível e muitas leituras se repetiriam. Para que isso não ocorra existe um controle de frequência de aquisição, que pode ser ajustado conforme a necessidade.

Na tela principal do software o usuário tem acesso a dois indicadores que mostram as inclinações nos eixos X e Y, uma representação de um nível de bolha e aos botões de ação, como é ilustrado na figura 2.

Para realizar as operações de detecção do alvo e determinação dos ângulos é necessário conhecer alguns parâmetros tais como o tamanho do pixel, distância focal da câmera, raio do pêndulo, plano de cores, dimensões do filtro de partículas, entre outros. Tais parâmetros apenas necessitam ser fornecidos uma vez, tendo em vista que o sistema é montado em um tubo vedado à passagem de luz e as dimensões são fixas. O acesso a essas constantes se dá por meio de uma tela auxiliar, ilustrada a seguir através da figura 3.

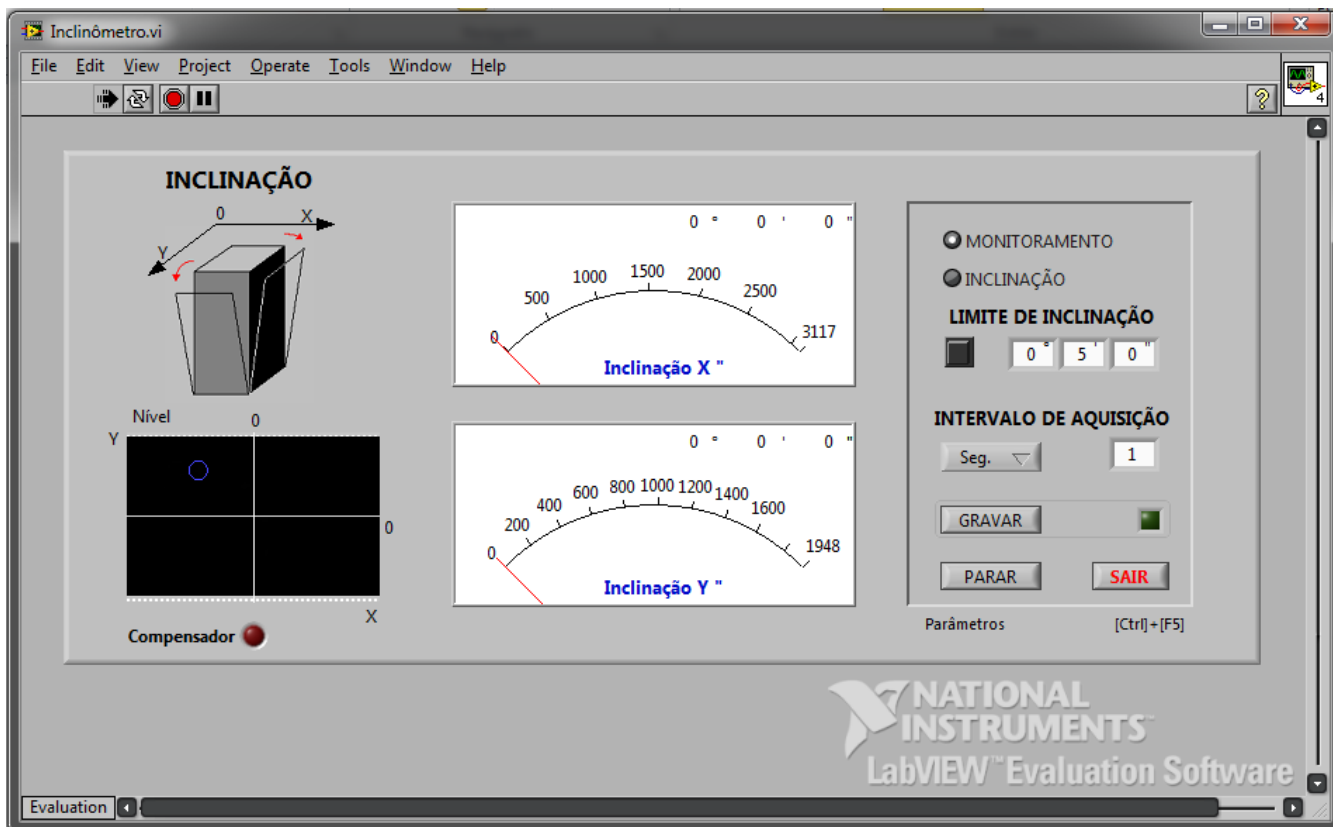


Figura 2 – Tela principal do software.

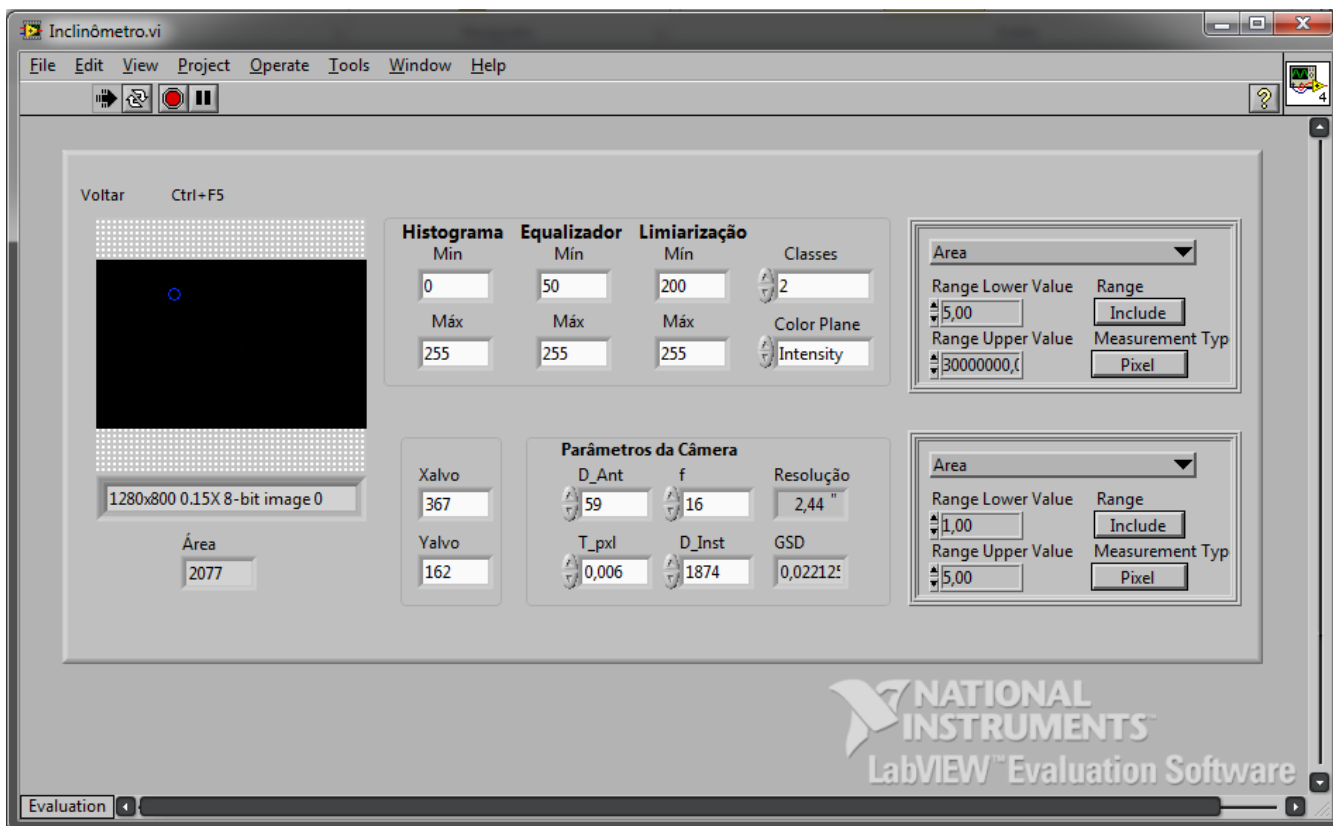


Figura 3 – Tela auxiliar do software.

3 EXPERIMENTOS

Para os ensaios foram utilizados uma câmera USB uEye modelo UI-1220, que possui pixel de $6\mu\text{m}$ e CCD de 640×480 equipada com uma lente Pentax com distância focal de 16mm (FIGURA 4), acoplada ao fundo de um tubo que sustenta o prumo, compondo o protótipo, e um notebook HP ENVY, com processador Core i7 Q720 de 7,2 Ghz, 8 GB de memória RAM e sistema operacional Windows 7 de 64 bits.



Figura 4 – Câmera e lentes utilizadas.

Os experimentos foram elaborados de forma que permitissem comparar valores lidos com os reais, para tanto o equipamento foi acoplado a uma base afixada à parede que possibilita impor um movimento controlado (Figura 13). Tal movimento origina um ângulo usado para a calibração.

Através do software desenvolvido foram realizadas 100 observações, tendo em vista que os resultados obtidos pelo equipamento seguem uma distribuição Gaussiana foi usado o Critério de Chauvenet para eliminação de valores discrepantes. Para tanto são armazenados uma série de observações, calcula-se o desvio médio e o desvio padrão. O desvio de cada um dos pontos é comparado com o desvio padrão, conforme os valores da Tabela 1, que mostra a razão entre máximo desvio aceitável (d_{max}/σ) e o desvio padrão em função do número de leituras. Assim se elimina os pontos discrepantes. Para a apresentação dos dados finais, um novo valor médio e um novo desvio padrão são calculados, sem incluir os pontos eliminados.

Número de leituras (n)	Razão d_{max}/σ
5	1,65
10	1,96
15	2,13
25	2,33

50	2,57
100	2,81
300	3,14

Tabela 1 - Razão em relação ao número de leituras.

Não ocorreram pontos discrepantes e foi dado prosseguimento aos experimentos impondo uma variação de 1mm, em X, à 1,75m do eixo, o que equivale a um ângulo de $1'57,87''$.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O processamento da série de observações realizadas gerou os dados a partir da qual, foi feita a análise estatística, resultando em um Desvio Padrão de $0,43''$ no eixo X e $0,41''$ em Y. O gráfico apresentado na Figura 05 representa a distribuição espacial dos dados que ocorre em um intervalo de $2''$.

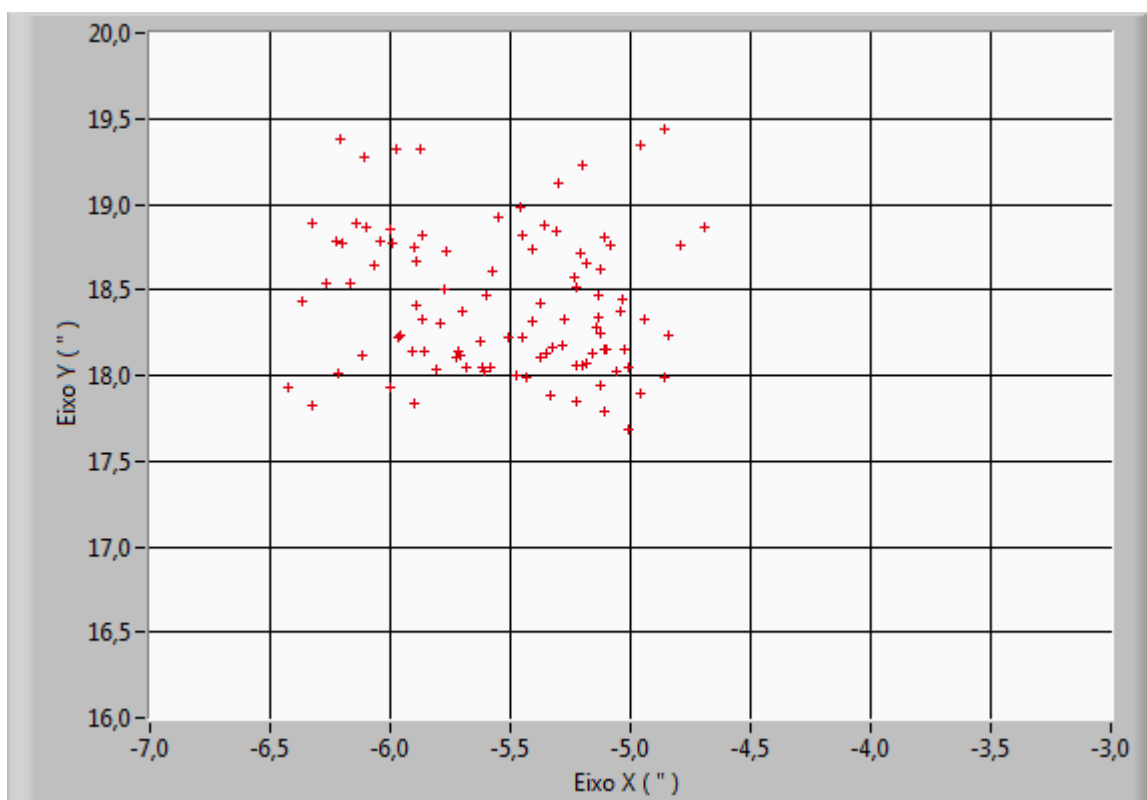


Figura 5 – Distribuição espacial dos dados.

5 CONCLUSÕES

Os inclinômetros mais precisos do mercado possuem resolução entre $2''$ e $4''$, entretanto possuem alto nível de ruído, enquanto o sistema desenvolvido possui resolução de $2,5''$ e precisão de $0,5''$. Através desses resultados foi possível concluir que o projeto atendeu ao seu propósito tendo em vista que os valores obtidos experimentalmente foram compatíveis com os calculados, e demonstraram que esse sistema possui atributos semelhantes aos dos equipamentos comerciais. A análise dos dados demonstrou que o sistema é preciso, pois as observações possuem um desvio padrão de $0,43''$, o que significa que estão bastante concentradas em torno da média.

Os experimentos demonstraram que o sistema é eficiente, mas, é necessário que seja empregada a metodologia de construção e, principalmente, de calibração adequada. Tomando essas precauções esse sistema seguramente terá uma significativa melhora, podendo ser empregado em situações reais.

Portanto, tendo em vista que existe atualmente no mercado câmeras e lentes com características técnicas muito superiores às empregadas, e que apesar da metodologia precária foi possível atingir resultados satisfatórios, foi demonstrado que é possível construir um equipamento superior aos comerciais por um baixo custo.

Esse sistema possui limitações por não permitir a avaliação de recalque, entretanto pode ser empregado para outros propósitos, como, por exemplo, em aplicações onde os movimentos a serem observados sejam de inclinação. Dentre essas aplicações podemos destacar o monitoramento de barragens, o que ressalta a importância desse projeto para a sociedade, tendo em vista que a matriz energética brasileira é predominantemente hidrelétrica. O monitoramento contínuo de barragens tem o potencial de prever situações extremas, nas quais tais estruturas devem ser parcialmente esvaziadas para diminuir o nível d'água e aliviar as tensões exercidas, e esse procedimento poderia ser executado com antecedência, minimizando os efeitos gerados nas localidades jusante.

Ainda nesse contexto, outra aplicação onde esse sistema poderia proporcionar grandes vantagens seria no monitoramento de torres de linhas de transmissão, que necessitam ser monitoradas devido à ação dos ventos e intempéries a que estão sujeitas. Devido ao fato dessas redes serem extensas e possuírem muitas torres localizadas em locais remotos o emprego desse sistema possibilitaria significativa redução de custos com deslocamento de equipes de campo e facilitaria a aquisição de dados que pode ser feita remotamente. Esse método poderia complementar os atuais, como a análise de imagens de satélites, usada na detecção da erosão, que pode ser potencialmente comprometedor a estabilidade dessas estruturas.

REFERÊNCIAS

BIANCHI, Reinaldo A. C., **Visão computacional aplicado ao controle de micro robôs**. FEI

KRELLING, P. C. L. . **Concepção de Inclinômetro Fóto Mecânico**. 2006.

LONG, A. E., HENDERSON, G. D., MONTGOMERY, F. R. **Why assess the properties of near-surface concrete?** Construction and Building Materials, n. 15, 2001.