

Monitoramento de Bate-Estacas Queda Livre: Mensuração Completa, Precisa e em Tempo Real com o Uso de Laser – Inclui Repique e Nega

Marcelo Antônio Batista

Geodigitus, Belo Horizonte, Brasil, marcelo@geodigitus.com.br

Crysthian Purcino Bernardes Azevedo

UFMG, Belo Horizonte, Brasil, purcino@etg.ufmg.br

RESUMO: O propósito deste trabalho será apresentar um protótipo totalmente funcional de um sistema de monitoramento completo para bate-estacas modelo de queda-livre ou gravidade. Utilizando um moderno sensor laser capaz de executar centenas de leituras de alta resolução por segundo, ambiciona-se obter medições ainda mais precisas dos parâmetros já acompanhados e ainda obter novos. Esse processo começa com a mensuração de inúmeros parâmetros durante a operação, passa pelo auxílio ao operador, apresentando informações valiosas de forma simples e direta, em tempo real, que podem ser tele monitoradas de qualquer lugar. Os dados coletados são enviados para o armazenamento em nuvem para posterior análise e geração dos relatórios de cravação que sintetizam todas as informações relevantes de maneira clara e elegante, através de gráficos e tabelas. Fazendo uso desta estrutura estabelecida e do know-how adquirido no uso de lasers para acompanhamento das operações em máquinas de fundação, planejou-se o processo de monitoramento em bate-estacas com leituras realizadas através de um único sensor. Este projeto possui, portanto, três frentes de inovação: (i) Monitoramento inédito de bate-estacas queda livre; (ii) Unificação de sensores para coleta de dados do conjunto martelo-estaca; (iii) Coleta mais frequente, mais precisa e a inclusão de novos parâmetros. A partir destes resultados coletados em diversas obras, a partir de uma parceria entre a empresa fornecedora deste equipamento e UFMG uma análise com a proposição de uma equação que correlacione dados obtidos no monitoramento visando uma simplificação na obtenção do repique a partir de medições de energia obtidas acima. Isto torna-se bastante útil do ponto de vista prático, pois elimina-se o uso de lápis e a presença de um operador em situação de risco nas proximidades do equipamento em operação.

PALAVRAS-CHAVE: Monitoramento, Fundações, Bate-estacas, Sensores.

1 INTRODUÇÃO

O monitoramento da operação de grandes máquinas de fundação tem sido bastante empregado com o desenvolvimento de novas tecnologias acessíveis na área de eletrônica, informática e internet. O processo de monitoramento se inicia com a medição de diversos parâmetros durante a operação, passa pelo auxílio ao operador apresentando informações em tempo real, que podem ser tele-monitoradas, e finaliza armazenando as informações do processo em servidor “cloud

computing” para posteriormente ser recuperado e embasar o engenheiro na elaboração do relatório final do serviço executado (ABNT, NBR 6122, 2010).

Entretanto, quando se considera as máquinas de cravação de estacas por percussão, ainda não há a disseminação de sistemas de monitoramento e automação. Nos bate-estacas “queda livre” que são basicamente um pilão acoplado à um guincho comandado manualmente pelo operador, sequer existe alternativa disponível no mercado para realizar um monitoramento. Para martelos com

acionamento mais sofisticado (como os hidráulicos), existem alternativas que funcionam utilizando principalmente sensores de proximidade para registrar posições de interesse pré-determinadas.

Essa abordagem requer vários sensores próximos ao pilão em cada um dos pontos de interesse, ou seja, requer que a máquina possua uma armação no entorno do pilão para fixar esses sensores e estes ficam bem próximos do movimento de operação da máquina, resultando em eventuais manutenções devido às vibrações intensas com consequente interrupções no serviço.

A necessidade de armação dedicada explica por que bate-estacas “queda livre” não possuem sistemas de monitoramento, pois são máquinas de estrutura bem simples. E a necessidade de manutenções é um dos motivos da baixa adoção de tais equipamentos. Mas há ainda um terceiro fator, que é o monitoramento limitado, ou seja, apesar da evolução dos sistemas de monitoramento, alguns procedimentos manuais importantes ainda são necessários.

O principal neste grupo é o “teste do lápis”, procedimento executado para medir o repique e a nega da estaca cravada através de percussão (Cintra e Aoki, 2010). Este procedimento é inclusive de alta periculosidade, pois requer um profissional posicionado ao lado do pilão enquanto este está operando. Além disso, possui baixa qualidade em termos de precisão e resolução devido ao processo manual.

Entretanto a utilização de sensores de alta performance e precisão permite o monitoramento completo do processo e utilizados de forma inovadora permite obter uma visão holística e contínua da operação.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos com um protótipo em estágio final de desenvolvimento de um sistema de monitoramento que utiliza um único sensor laser no lugar dos sensores de proximidade, obtendo assim o monitoramento constante do martelo. Além disso, obtém-se os dados necessários para a medição precisa e confiável do repique e nega através do uso deste sensor laser de alta performance. Finalmente, com maior simplicidade de instalação, este protótipo faz o monitoramento completo tanto para martelos hidráulicos como para bate-estacas de

queda-livre, sendo o método aplicável a qualquer equipamento que crave estacas por meio de percussão.

2 MONITORAMENTO VIA LASER

O monitoramento via sensor laser apresenta três frentes de inovação perante os sensores indutivos de proximidade usados anteriormente. Em primeiro lugar, permite o acompanhamento contínuo da posição do pilão. Em segundo lugar, a maior quantidade de dados com alta qualidade na medição permite determinar outros parâmetros de operação com excelente precisão e resolução. Por fim, retira-se os sensores de próximo do movimento da máquina, eliminando a manutenção desses sensores.

2.1 Medindo a posição do martelo

A instalação de um sensor laser no alto da torre de operação da máquina, com seu feixe incidindo em uma superfície refletora no topo do pilão, permite um monitoramento contínuo e permanente da posição do martelo.

Assim, muda-se o paradigma de operação, saindo de uma situação em que se marcam apenas os instantes em que o martelo se encontra em uma posição específica para uma nova situação que permite visualizar a posição do martelo continuamente.

Essa mudança de paradigma permite acrescentar uma nova gama de teorias da física e da estatística na operação, com o propósito de obter dados mais precisos sobre o processo assim como a medição de variáveis até então indisponíveis.

2.2 Parâmetros calculáveis

Abriu-se assim uma gama de oportunidades para o monitoramento. Com o uso de teorias da mecânica, como a conservação de energia e a relação entre posição no tempo e velocidade e aceleração, é possível a obtenção da velocidade instantânea do martelo em tempo real, obtenção da eficiência energética da máquina golpe a golpe, performance do sistema de elevação do pilão (hidráulico ou não) dentre outros, conforme as equações a seguir apresentam.

Posição é determinada por:

$$s(t) = \int v(t) \cdot dt = \iint a(t) \cdot dt \quad (1)$$

Eficiência de cada golpe por:

$$e = \frac{v_{MAX}^2}{2 \cdot g \cdot h} \times 100 \quad (2)$$

Força máxima aplicada à estaca no momento do repique (compressão máxima da estaca) por:

$$F_{MAX} = m \cdot a_{MAX} \quad (3)$$

Com um sensor laser capaz de executar centenas de leituras de alta resolução por segundo, é possível obter medições mais precisas dos parâmetros tradicionais e ainda obter os novos parâmetros com alta precisão. Ou seja, com dados mais precisos e de altíssima frequência, tem-se medições com precisão inédita, como a altura do golpe com resolução menor que um milímetro, a velocidade do martelo no momento exato do impacto ($\Delta t < 2\text{ms}$), o deslocamento preciso da estaca após cada golpe, a aceleração que a estaca gera no martelo no momento do repique, o repique do conjunto martelo-estaca e a nega, fornecida pelo deslocamento acumulado dos últimos dez golpes.

3 REPIQUE

A segunda meta do trabalho (a primeira foi a retirada dos sensores indutivos) foca especificamente na medição do repique. O propósito é comparar o repique mensurado utilizando duas técnicas diferentes para um martelo hidráulico de percussão. Deseja-se analisar os resultados obtidos através do tradicional “teste do lápis” em contrapartida aos dados colhidos através de um laser de alta performance e conferir a viabilidade deste substituir o primeiro.

Em teoria, a medição do repique através do sensor laser é tão boa quanto a qualidade do laser e o cuidado em sua instalação. As demais interferências que possam existir também estão presentes no teste do lápis, que ainda está sujeito ao erro humano e possui uma resolução,

na melhor das hipóteses, na casa de alguns milímetros, ou seja, uma resolução 10x pior que a medição do laser testado. Por fim, o teste do lápis ainda submete o operador a uma situação de risco, pois este deve se posicionar ao lado da estaca durante a operação.

Por fim, o interesse é também capturar o repique para todos os golpes, em tempo real, e substituir o teste do lápis.

4 METODOLOGIA

Fazendo uso de uma estrutura de monitoramento estabelecida e do *know-how* no uso de lasers para acompanhamento das operações em máquinas de fundação, planejou-se o processo de monitoramento em máquinas de fundação via percussão com leituras realizadas através deste único sensor.

4.1 Equipamentos utilizados

Um martelo “hidráulico” foi equipado com o sistema MHCControl+ da Geodigitus, que automatiza sua operação e ao mesmo tempo realiza o monitoramento. Este sistema foi equipado com um laser de alta performance capaz de realizar centenas de medições por segundo e com resolução e precisão de menos de 1 mm, além do apoio necessário via software para processar essas informações. Foi equipado, também, um martelo “queda livre” apenas com a função de monitoramento e comandado por um operador.

As estacas utilizadas são estacas para teste dos martelos, o que significa que já atingiram a nega 0, de modo que mesmo recebendo golpes com elevada energia não apresentam deslocamento observável.

Por fim, para o teste do repique utilizou-se o procedimento padrão, que consiste basicamente de um lápis e uma folha de papel, tudo executado por profissional experiente e com a montagem cuidadosa do apoio em solo plano.



Figura 1. Sensor laser instalado no alto do bate-estacas



Figura 2. Refletor no topo do pilão do martelo hidráulico

4.2 Monitoramento

Para auferir o potencial do monitoramento, foi montado um adaptador ligado a um analisador lógico que capturava o sinal bruto do sensor laser diretamente, ou seja, o sinal analisado neste trabalho se trata do sinal originado no laser, antes de ser processado pelo equipamento de monitoramento. O motivo para isso era capturar eventuais erros de leitura ou quaisquer outras inconsistências caso viessem a acontecer, uma vez que o computador possui rotinas específicas para manter a operação mesmo com eventuais imperfeições nas leituras.

4.3 Repique

Após uma rodada inicial de testes e conferência dos parâmetros e condições de operação, iniciou-se o procedimento padrão de “tirar a nega e repique”. Um profissional treinado

executou o procedimento de teste do lápis ao mesmo tempo em que o sistema de monitoramento registrou todo o movimento do pilão da máquina.

Ficou assim registrada a medição do repique por parte do operador e também registrado todo o movimento do martelo por parte do laser, através do qual se extraiu os valores medidos dos repiques.

5 RESULTADOS

5.1 Monitoramentos

As curvas de posição obtidas pelo monitoramento estão apresentadas abaixo. Cada uma é uma representação de dezenas de milhares de pontos medidos. Vale destacar que não houve presença de erros e inconsistências nas medições.

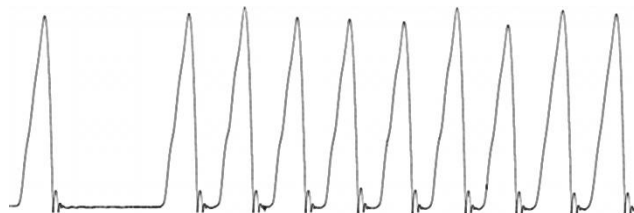


Figura 3. Monitoramento no bate-estacas “queda livre”



Figura 4. Monitoramento no martelo hidráulico

A figura abaixo mostra uma ampliação de um desses golpes, para ilustrar melhor a captura do laser, e a tabela seguinte indica medidas de referências, que foram feitas para todos os golpes. O ponto A representa a posição inicial da estaca no início do golpe, B é a altura máxima atingida pelo pilão e de onde começou a cair, D é a posição mínima atingida pelo conjunto estaca mais pilão e o ponto de maior compressão da estaca e o ponto E representa a posição após o término do golpe.

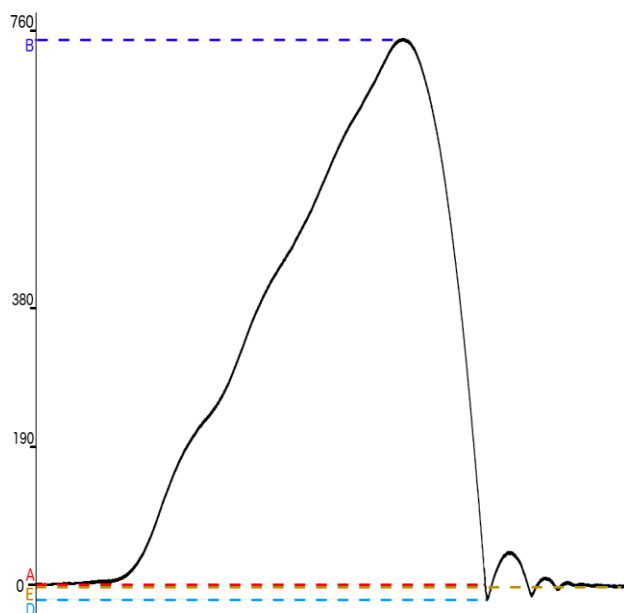


Figura 5. Exemplo de golpe monitorado do bate-estacas

Tabela 1. Parâmetros do golpe-exemplo do bate-estacas

Golpe – Bate-estacas	
Altura do golpe (mm) - AB	755,6
Velocidade do impacto (m/s)	3,506
Eficiência energética do golpe (%)	81
Deslocamento da Estaca (mm) - AE	2,5
Repique (mm) - ED	14,9

5.2 Repique

As figuras a seguir apresentam os repiques obtidos através do teste do lápis para o bate-estacas “queda livre” e o martelo hidráulico respectivamente.

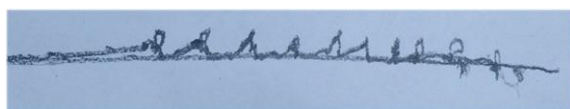


Figura 6. Teste do lápis do bate-estacas “queda livre”

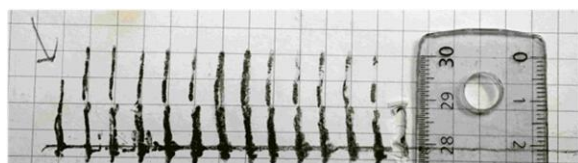


Figura 7. Teste do lápis do martelo hidráulico

Conforme a Tabela 1 apresentou, é possível calcular o repique do conjunto martelo-estaca utilizando o laser. A figura abaixo apresenta uma ampliação no rebote do golpe apresentado na Figura 5 para ilustrar melhor o

procedimento.

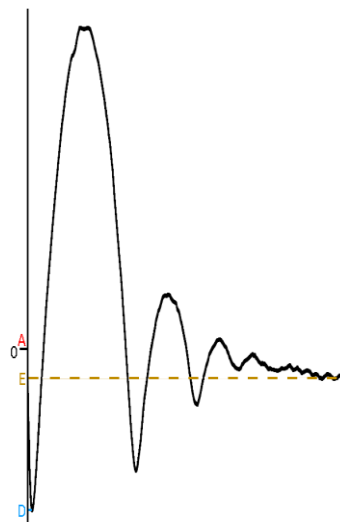


Figura 8. Curva do rebote de golpe do bate-estacas

As tabelas 2 e 3 abaixo apresentam os repiques calculados para ambos os monitoramentos.

Tabela 2. Repiques medido e calculados no “queda livre”

Golpe	Repique lápis (mm)	Repique laser (mm)
1	13	15,8
2	14	15,0
3	12	17,3
4	10	15,3
5	13	19,3
6	11	18,8
7	10	16,9
8	11	18,2
9	12	19,1
10	7	16,9

Tabela 3. Repiques medidos e calculados no “hidráulico”

Golpe	Repique lápis (mm)	Repique laser (mm)
1	15,1	19,6
2	22,6	25,7
3	22,8	25,7
4	21,7	26,0
5	22,3	25,4
6	22,2	26,2
7	21,8	25,2
8	22,2	25,4
9	22,2	25,6
10	22,1	26,1
11	21,8	25,5
12	21,9	25,0
13	21,9	26,1

6 ANÁLISE DOS RESULTADOS

No caso do bate-estacas “queda livre”, comparando os valores medidos pelo laser e a imagem do teste do lápis é possível afirmar que o sensor laser está conseguindo captar repiques reais da estaca. Parece ainda ser desprezível a influência da proteção colocada sobre o topo da estaca.

No caso do martelo hidráulico (figura 4), excluindo o primeiro golpe, a altura medida oscilou de 92,6 até 95,8 cm, com uma margem de erro de 0,5 mm, os repiques via laser oscilaram de 25,0 até 26,1 mm, e que os repiques com lápis oscilaram de 21,7 até 22,8 mm.

Sobre as medições via laser, é necessário apontar que elas possuem um erro de 0,5 mm para baixo e até 1 mm para cima, devido ao fato de o laser não necessariamente medir o mínimo absoluto, embora ele certamente mediu um valor bem próximo. Assim sendo, aproximar as medições para o intervalo 24,5 a 27,0 mm é razoável.

Já sobre as medições via lápis é extremamente complicado estipular a margem de erro. Tem-se a espessura do traçado do lápis como margem de erro, a possibilidade da mão do operador tremer e ainda do movimento relativo do conjunto solo e madeiras de apoio em relação a estaca. Assim sendo, a margem de erro pode ser de 20% ou ainda maior.

Vale destacar ainda que o teste do lápis é efetuado na base da estaca, de modo que uma seção de cerca de 1,5 m da estaca se encontrava acima do papel, sendo capturado pelo laser e justificando algum acréscimo na medição em relação ao teste do lápis.

7 CONCLUSÃO

Após todo o processo decorrido e os resultados apresentados, pode-se fazer as considerações finais acerca dos objetivos propostos. E ainda, serão apresentadas sugestões e possibilidades para a etapa final do desenvolvimento de protótipo para um produto final.

O experimento foi capaz de capturar dados significativos do repique de todos os golpes, comprovando sua viabilidade como substituto do teste do lápis. Esse recurso é interessante

pois permite um monitoramento contínuo e permanente do repique e ainda sem a exposição do trabalhador a risco. Os dados possuem a dimensão esperada, com baixíssima oscilação e margem de erro.

Está claro que a medição através do teste do lápis e via laser são de pontos ligeiramente diferentes, mas ainda próximos de modo que os resultados são estatisticamente equivalentes. Assim, com margem de segurança na parte do projetista, os valores obtidos via laser já são satisfatórios para uso imediato.

Caso seja de interesse do projetista, a medição com sensor laser permite determinar a força aplicada pelo martelo diretamente na estaca, que é exatamente o que o projetista almeja saber, ou seja, o uso do repique é um *proxy* desta.

Há ainda o monitoramento de bate-estacas queda-livre, uma vez que o projeto não requer uma estrutura para suportar diversos sensores próximos ao martelo. Ao final, o protótipo se mostrou bem-sucedido no monitoramento das máquinas em operação e é aplicável a todas aquelas de percussão. A qualidade do serviço está um patamar acima do prestado atualmente em martelos hidráulicos.

Há também a unificação de sensores para coleta de dados do conjunto martelo-estaca, com o sensor laser se mostrando apto para a função. O protótipo foi capaz de acompanhar a posição do martelo a todo momento e com isso medir a velocidade instantânea, a energia e o deslocamento da estaca. Também identificou exatamente quando o golpe começou e quando terminou. Sua instalação foi simples e distante das partes móveis, de modo que assegure sua proteção. Para o processo de monitoramento, o sensor laser é capaz de substituir os demais sensores no conjunto martelo-estaca.

Há a mudança de paradigma com a coleta frequente, mais precisa e a inclusão de novos parâmetros. As figuras com o movimento durante os golpes demonstram claramente a qualidade desta medição frequente e precisa, forma-se uma imagem da operação não mais absolutamente discreta, mas quase contínua. No que diz respeito a antigas medições, pode-se esperar melhor resolução e precisão dos resultados.

Por fim, em relação ao repique, obteve-se

êxito em sua medição. O repique pode ser apresentado ao operador imediatamente após cada golpe em tempo real.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos às empresas CZM e Novasolo por cederem espaço, máquinas e operadores para a realização dos experimentos. Agradecemos também à empresa Geodigitus por disponibilizar pessoal, equipamento, sensores e software para a realização de todas as medições.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 6122 (2010). *Projeto e Execução de Fundações*, ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 91 p.
- Cintra, J.C.A. e Aoki, N. (2010) *Fundações por Estacas projeto geotécnico*, 1nd ed., Oficina dos Textos, São Paulo, SP, Brasil, 96 p.