

Electromagnetic Launching System as an Alternative to Non-Destructive Sonic Wave Generation for Steel Bar Length Determination

I. Silva, M. Bonfim, and, V. Faro

Abstract— Soil nailing system is widely used along highways in Brazil. Non-destructive techniques have been used to estimate the length of installed soil nails. Sonic Echo and Impulse Response techniques evaluate the bar length using sonic wave propagation. The methods are similar and consists in generate an impact with a hammer. Results may be affected by this non-standard procedure. This paper aims to propose an automated sound wave generation in order to carried out tests quickly, with reproducibility and without operator dependence. An electromagnetic launching system was developed, which uses a projectile in place of the hammer, and the electromagnetic force instead of human force. The sound data was received by a microphone and sent to the computer by a microcontroller, making the system compact and portable. Projectile output speed optimization and impact reproducibility were analyzed. Nails length were obtained by both time and frequency domain data analysis. Results showed high reproducibility under the same initial condition. Propagation velocity presented a relative error less than 1% for steel bar with length of 1 m.

Index Terms— Bar length evaluation, Electromagnetic launcher, Non-destructive technique, Sonic wave.

I. INTRODUÇÃO

Técnicas não destrutivas visando à obtenção do comprimento e da integridade de elementos inclusos no solo provenientes de obras de contenção e fundação são utilizadas na área da Engenharia Civil [1]-[4]. Há diversos métodos designados para este fim, tais como o *Pile Integrity Test* [5] e *Parallel Seismic* [6], no caso de fundações e, *Sonic Echo* [7], *Impulse Response* [8], *Time Domain Reflectometry* [9], entre outros, para elementos de contenção.

A verificação da condição estrutural dos componentes supracitados se torna importante para avaliar se a obra cumpre com os requisitos de segurança e se os deslocamentos se mostram aceitáveis. Pode-se ainda apresentar a necessidade de aferir se o comprimento do elemento executado segue o descrito em projeto. Tais verificações se assumem de extrema importância para o desempenho da obra. A investigação quanto

à integridade dos elementos de fundação e de contenção deve ser realizada, uma vez que só é possível descobrir alterações em sua estrutura através dos ensaios não destrutivos. Salienta-se que nestes componentes pode ocorrer a contaminação da calda de cimento deixando o material menos resistente, o estrangulamento do bulbo e/ou vazios em sua seção transversal, diminuindo sua capacidade de carga. E, para analisar a integridade do elemento, é primordial obter primeiramente seu comprimento.

As técnicas sônicas, como é o caso do *Sonic Echo* e *Impulse Response*, empregadas usualmente em elementos de contenção, originam ondas de tensão por meio de um operador, o qual com o uso de um martelo de mão realiza o impacto no objeto ensaiado [3], [7]-[12]. O sucesso do resultado do ensaio depende do local da geração da onda sônica, força e ângulo do impacto. Dessa forma, torna-se importante um sistema que padronize o modo com que essa onda é originada, diminuindo a significativa interferência do operador na execução do ensaio. Tais fatores podem ser controlados através do uso de um sistema eletromagnético de lançamento.

Posto isto, este trabalho tem como objetivo descrever o desenvolvimento de um sistema de lançamento eletromagnético capaz lançar um projétil com o intuito de gerar uma onda sônica, criada pelo impacto em uma barra metálica. Visando à sua portabilidade e relevância prática, o sistema concebido possui pequenas dimensões e a capacidade de gerar a onda sônica sem a interferência do operador. Através da análise da reflexão desta onda sônica, pode-se determinar o comprimento da barra sem a necessidade de ter acesso à sua extremidade oposta, problema prático e cuja solução é o objetivo final do sistema. Ao longo do texto é apresentado o desenvolvimento do circuito, a realização da medição da velocidade atingida pelo projétil e o procedimento para obtenção do comprimento de uma barra de aço a partir do intervalo de tempo ou de frequência da propagação da onda sônica.

II. LANÇADORES ELETROMAGNÉTICOS

Lançadores eletromagnéticos são dispositivos que convertem energia eletromagnética em energia cinética com o intuito de movimentar um projétil [13] [14] e eles têm exibido grande uso devido à capacidade essencial de lançar materiais com velocidades mais altas que armas e foguetes químicos lançáveis [15]. Os sistemas de lançadores eletromagnéticos são divididos em duas categorias: *railguns* e *coilguns*. *Railguns* apresentam dois trilhos paralelos, um condutor que entra em contato com os trilhos e fornece a corrente entre eles e o projétil que será

Este trabalho foi financiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

I.G. Silva, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil (isa.grossisilva@gmail.com).

M. J. C. Bonfim, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil (marliob@eletrica.ufpr.br).

V. P. Faro, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, Paraná, Brasil (vitorpereirafaro@gmail.com).

lançado [16]. *Coilguns* são formados por uma ou mais bobinas e um projétil a ser lançado. A bobina é conectada a um circuito elétrico [17] e enrolada em uma estrutura não condutora. Devido ao pequeno contato físico entre a bobina e o projétil, a resistência ao atrito é mínima [18].

Em relação ao sistema *coilgun* este pode ser dividido em dois tipos. O *reluctance coilgun* é baseado na relutância do circuito magnético formado pela bobina e o projétil confeccionado com material ferromagnético de baixa coercitividade. Desta forma, utilizam-se as propriedades atrativas do material ferromagnético do projétil para gerar aceleração. O outro tipo, *induction coilgun*, fundamenta-se na indução de uma corrente elétrica no interior do projétil. Esta indução gera uma força de aceleração repulsiva provinda das correntes parasitas (*Foucault*) presentes no projétil quando o circuito é acionado [16] [19]. Ao compará-los, o *reluctance coilgun* requer correntes mais baixas e necessita de circuitos mais simples que o *induction coilgun* [20].

O sistema de lançamento eletromagnético desenvolvido neste trabalho é do tipo *reluctance coilgun*, composto por uma bobina enrolada sobre um carretel plástico e um projétil cilíndrico maciço de “ferro doce”, como ilustrado na Fig. 1. Através da aplicação de um pulso de corrente de alta intensidade e curta duração na bobina, o projétil é acelerado para o interior da bobina adquirindo energia cinética. O projétil usado é de material ferromagnético de baixa coercitividade, possibilitando fácil alinhamento dos domínios magnéticos com o campo magnético aplicado pela bobina. Dessa forma, um pequeno campo magnético é capaz de gerar uma força magnética considerável [21] [22]. A energia cinética resultante do movimento do projétil provém da energia potencial armazenada em um capacitor sob a forma de uma tensão elétrica. O pulso de corrente que circula pela bobina é originado pela descarga deste capacitor através de uma chave eletrônica [23]. Este pulso de corrente, por sua vez, gera um pulso de campo magnético, responsável pela propulsão do projétil. De modo a aumentar a eficiência de transferência de energia do pulso de campo magnético para o projétil, este deve possuir diâmetro próximo ao da bobina e comprimento maior ou igual a três vezes seu diâmetro [24].

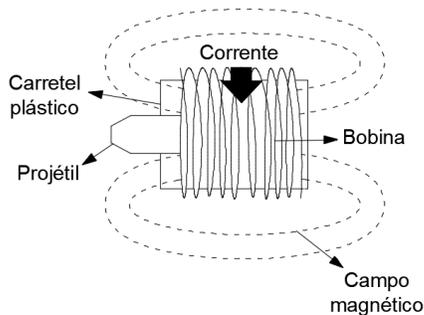


Fig. 1. Partes constituintes de um *reluctance coilgun*

III. TÉCNICAS PARA OBTENÇÃO DO COMPRIMENTO DO ELEMENTO ENSAIADO

Com o intuito de se obter o comprimento e a integridade de componentes inclusos no solo têm-se os métodos destrutivos e

não destrutivos. O método destrutivo mais conhecido é o de arrancamento que tem como principal função a determinação da resistência ao cisalhamento da interface solo-grampo [25], neste caso a unidade de análise é removida do solo e seu comprimento é aferido. Este tipo de ensaio apresenta a desvantagem do alto custo e que o elemento ensaiado se torna inativo, diminuindo a segurança da estrutura, por isso, não é feito em todos seus componentes. No caso do uso das técnicas não destrutivas, por não causar danos ao elemento, todos estes podem ser ensaiados. O ensaio é executado em um curto intervalo de tempo em cada elemento, cerca de 15 minutos [10] e o custo por objeto ensaiado é relativamente baixo.

Como já mencionado, há diversos métodos não destrutivos utilizados para verificação da integridade e comprimento dos componentes inclusos no solo. Focando nas técnicas denominadas *Sonic Echo* e *Impulse Response*, as quais utilizam a propagação da onda sônica no elemento, há três tipos de ondas originadas a partir da onda de tensão em um sólido elástico, são elas: as ondas primárias (ondas P), as secundárias (ondas S) e as de superfície do tipo *Rayleigh* (ondas R) [26].

Ondas do tipo P são chamadas de primárias, compressionais ou longitudinais, é a primeira forma de propagação da onda. Esse tipo de onda se propaga em meio do tipo sólido, líquido e gasoso e a partícula se movimenta paralelamente à direção de propagação. A velocidade desse tipo de onda pode ser calculada em elementos longos que causam esforço lateral de Poisson [11], como exposto em (1).

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

Onde V_p corresponde a velocidade da onda primária (m/s), E ao módulo de elasticidade (Pa) e ρ a massa específica (kg/m^3) do objeto ensaiado. Dessa forma, um material mais rígido terá maior velocidade de propagação em relação a outro de menor rigidez, se mantida a mesma massa específica.

Ondas do tipo S, também denominadas de secundária, cisalhante ou transversal, referem-se à segunda forma de propagação das ondas, cuja velocidade pode ser calculada conforme (2) [11], onde V_s equivale a velocidade da onda secundária (m/s) e G ao módulo cisalhante do material (Pa).

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

Nesse caso, a partícula se desloca perpendicularmente à direção de propagação da onda. Ondas do tipo S se propagam apenas em elementos sólidos, já que meios líquidos e gasosos não suportam forças cisalhantes.

Ondas do tipo *Rayleigh* têm a propagação pela superfície do material e possuem a amplitude diminuída à medida que permeia no material. Essa onda provém da interferência das ondas do tipo P e S, provocando vibrações no sentido contrário ao da propagação da onda. Conforme exposto por Finno *et al.* [26] sua velocidade pode ser calculada em uma relação com a

velocidade da onda cisalhante, como exposto em (3), onde V_r é a velocidade da onda tipo *Rayleigh* e ν é o coeficiente de Poisson do material.

$$V_r = \frac{0,862 + 1,14\nu}{1 + \nu} V_s \quad (3)$$

Por (3) se constata que, caso o coeficiente de Poisson seja considerado variável de 0 a 0,5, a velocidade da onda *Rayleigh* é 0,862 a 0,955 da onda cisalhante.

Com a geração da onda sônica se sucedem esses três tipos de propagação. No entanto, a onda P, por ter velocidade maior que as demais, é identificada de forma mais nítida e é a utilizada nos ensaios sônicos para a determinação do comprimento e integridade dos elementos.

O comprimento L de um componente pode ser obtido como apresentado em (4) ou (5), dependendo do método usado. O ensaio *Sonic Echo* tem a análise dos dados no domínio do tempo e (4) fornece o comprimento do elemento neste caso. Para o *Impulse Response*, os dados obtidos são plotados no domínio da frequência, fazendo-se, então, uso de (5) para definir o comprimento do objeto ensaiado. Nestas equações, V_p é a velocidade de propagação da onda sônica no elemento e Δt e Δf são o intervalo de tempo e de frequência, respectivamente, necessários para a onda percorrer todo o seu comprimento. Os intervalos de tempo Δt e de frequência Δf são definidos entre os picos ou os vales gerados pelos gráficos resultantes dos ensaios.

$$L = \frac{V_p \Delta t}{2} \quad (4)$$

$$L = \frac{V_p}{2\Delta f} \quad (5)$$

Alguns autores apresentaram em seus estudos o erro obtido com a execução dos ensaios *Sonic Echo* ou *Impulse Response*. Cheung [7] ensaiou 30 elementos nos quais 16 apresentaram erro menor que 10%, 8 com erro maior ou igual a 10% e em 6 casos o resultado se apresentou inconclusivo. Ni *et al.* [27] relataram erro de até 10% em sua pesquisa. Lo, Ni e Huang [28] concluíram que o maior erro foi em torno de 9%. Klingmüller e Kirsch [29] ressaltam que esses métodos sônicos têm precisão de $\pm 5\%$ na determinação do comprimento do componente ensaiado. Rausche, Likins e Hussein [5] afirmam que caso a velocidade de propagação da onda necessite ser estimada, como usualmente ocorre, o erro na determinação do comprimento é de $\pm 15\%$.

Ensaio do tipo *Sonic Echo* e *Impulse Response* têm a geração da onda sônica por meio do impacto de um martelo de mão executado por um operador e, assim, há variação da força, ângulo e da posição inicial do martelo. A alteração dessas variáveis dificulta a reprodutibilidade do ensaio, acarretando na presença de um erro inerente ao mesmo.

O sistema desenvolvido neste trabalho tem a característica da padronização da força, da distância e do ângulo inicial do elemento que gera a onda sônica. Com isso, há a redução da interferência do operador na execução do ensaio e as mesmas

condições iniciais do ensaio são sempre asseguradas.

IV. CIRCUITO DESENVOLVIDO

O sistema desenvolvido consiste em passar uma corrente elétrica por uma bobina, gerando um campo magnético em seu interior. Importante ressaltar que a intensidade de campo é proporcional à corrente elétrica que circula pela bobina, sendo uma variável facilmente controlável através dos parâmetros elétricos do circuito. Em sequência, o campo magnético gera uma força magnética que atua sobre o projétil de material ferromagnético colocado no interior da bobina. O projétil é acelerado ao longo da distância percorrida dentro da bobina, entrando em choque com a barra com uma determinada velocidade por forma a gerar a onda mecânica.

O *coilgun* pode ser compreendido como um sistema RLC (Fig. 2), porém devido à presença do resistor haverá perdas de energia em forma de calor. Para compensar isso torna-se necessário a presença de uma fonte variável no tempo (U). No primeiro momento a energia utilizada pelo sistema é obtida através da fonte de corrente contínua, apresentada pela posição 1. Neste momento a chave é considerada fechada de forma a possibilitar o carregamento do capacitor (C). Para a realização do ensaio, aciona-se o botão ou comando cuja função é abrir a chave (posição 2) para que haja o descarregamento do sistema, transmitindo a energia no menor tempo possível para a bobina. Assim, gera-se um pico de corrente que cria um campo e uma força magnética que age sobre o projétil ferromagnético de modo a impulsioná-lo na direção desta força. Perotoni e Mergl [23] salientam que o pulso da corrente elétrica deve ser encerrado antes que o dispositivo passe pela metade do comprimento da bobina para não haver força de frenagem sobre ele, pois no momento em que o projétil ultrapassa a metade da bobina a força magnética muda de sentido, passando a frenar o objeto, diminuindo sua velocidade. Esta situação é complexa por abranger materiais magnéticos que apresentam comportamento não linear e por ter movimento com aceleração variável envolvido [23]. Esta verificação é realizada observando o descarregamento do capacitor e onde está localizado o centro da bobina.

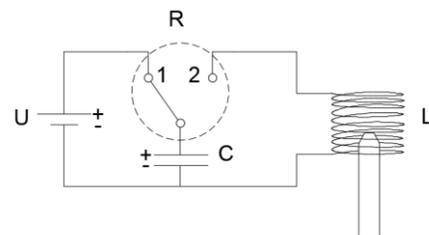


Fig. 2. Sistema RLC-U utilizado.

Um diagrama esquemático do sistema de lançamento eletromagnético pode ser visto na Fig. 3. Observa-se que a barra é excitada pelo sistema propulsor conectado ao circuito e que a aquisição de dados se dá por meio de um microfone fixado a barra e ligado ao sistema de processamento de dados. O circuito é composto por um capacitor, uma chave de descarga, uma bobina e um projétil.

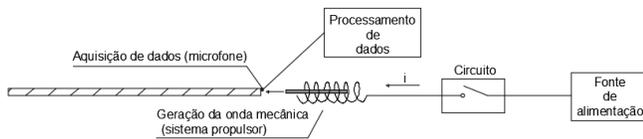


Fig. 3. Diagrama esquemático do sistema de lançamento eletromagnético.

As especificações do sistema elétrico, da bobina e do projétil, utilizados no desenvolvimento do equipamento, podem ser observadas nas Tabelas I, II e III, respectivamente.

TABELA I
ESPECIFICAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO

R	Indutância da bobina	32,18 mH
L	Resistência	50 Ω
C	Capacitância	47 μ F
U	Tensão do capacitor	180 V

TABELA II
ESPECIFICAÇÕES DA BOBINA

Diâmetro do fio	0,36 mm
Número de voltas	1450
Comprimento	25 mm
Diâmetro externo	27 mm
Diâmetro interno	21 mm

TABELA III
ESPECIFICAÇÕES DO PROJÉTEL

Massa	12,76 g
Comprimento	39 mm
Diâmetro da ponta	3,57 mm
Diâmetro do corpo	7,76 mm

Os sinais gerados pelo impacto mecânico do projétil na barra são captados através do uso de um microfone, o qual é ligado a um microcontrolador que transforma os sinais captados em um gráfico a ser visto na tela do computador. O microfone é envolto em um ímã para facilitar sua fixação no elemento metálico. Este sistema eletromagnético de propulsão é exposto na Fig. 4, onde se observa que não há dependência do operador para a realização do impacto e recepção dos dados. A ejeção do projétil é efetuada apenas com um comando acionado através do computador.

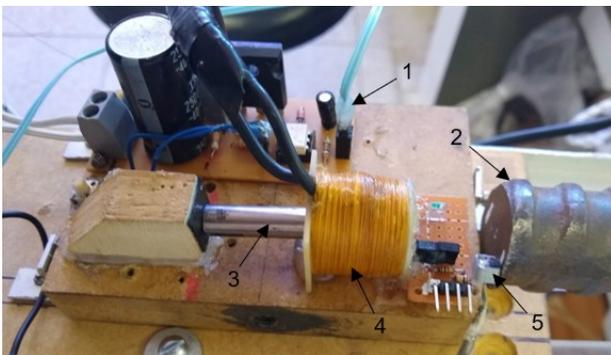


Fig. 4. Disposição do sistema de lançamento eletromagnético na barra: 1 - circuito de acionamento; 2 - barra de aço; 3 - projétil; 4 - bobina; 5 - microfone.

Para averiguar a existência de forças de frenagem provenientes da corrente elétrica após a passagem do projétil pelo centro da bobina, fez-se a medição do tempo necessário

para que o capacitor descarregue por completo, pois se houver carga nele, existirá corrente passando pela bobina. Com o uso de um capacitor de 47 μ F se obteve o gráfico mostrado na Fig. 5.

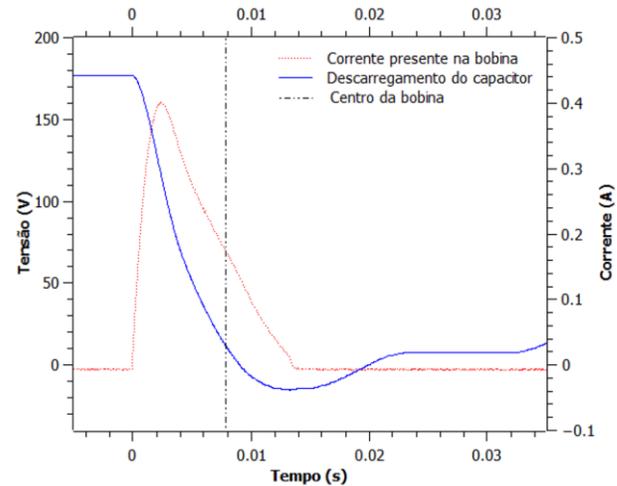


Fig. 5. Exposição da forma de descarregamento do capacitor e da corrente passante na bobina.

O capacitor é considerado descarregado quando a tensão medida nele é nula e, como observado pelo gráfico mostrado na Fig. 5 isso ocorre próximo a 0,0091 s. Desse modo, o capacitor é praticamente descarregado antes do projétil alcançar a metade da bobina, marcado no tempo de aproximadamente 0,0080 s. A corrente máxima passante pela bobina é alcançada no tempo de 0,0024 s, porém ainda se encontra presente depois da passagem do projétil pelo centro da bobina, o que gera uma pequena força de frenagem. No entanto, esta é de magnitude muito inferior à gerada pela aceleração, motivo pelo qual se decidiu manter tal capacitor no sistema.

V. MEDIÇÃO DA VELOCIDADE ALCANÇADA PELO PROJÉTEL

A velocidade atingida pelo projétil é fortemente dependente da posição inicial deste elemento no interior da bobina [23]. Por esta razão, fez-se medição da velocidade variando milímetro a milímetro a localização do dispositivo ferromagnético na bobina. A configuração foi montada conforme apresentado na Fig. 6 na qual se observa o sistema de medição de velocidade com o fotodiodo, o diodo e a régua graduada para controlar a posição inicial do projétil. A posição mostrada pela Fig. 6 é considerada de 0 mm que é quando o projétil está exatamente no início da bobina. Assim, as medições nas demais posições iniciais foram realizadas com a colocação do projétil cada vez mais inserido no interior da bobina.

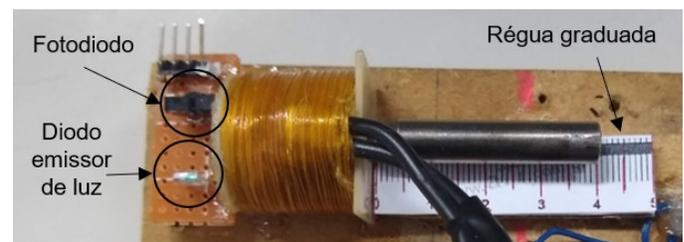


Fig. 6. Instrumentação realizada para a medição da velocidade ponto a ponto.

Para a instrumentação do sistema do presente estudo foi utilizado um diodo emissor de luz com comprimento de onda de 920 nm (infravermelho), que a torna invisível ao olho humano, e dois fotodiodos como receptores desta luz (Fig. 6). O procedimento consiste em medir o tempo necessário para que o projétil percorra a distância fixa de 4,65 mm existente entre os fotodiodos. Foi possível medir a velocidade de saída e de retorno do projétil com o uso desta configuração. Com o auxílio de um osciloscópio de dois canais, mediu-se a tensão nos fotodiodos, que é de ~ 5 V quando não há interrupção do feixe de luz e ~ 0 V quando o feixe é interrompido pelo projétil. Como exemplo de um resultado obtido no osciloscópio tem-se a Fig. 7, na qual se destaca a obtenção do intervalo de tempo de saída e de retorno do projétil. Ao analisar a Fig. 7 se constata que o tempo de saída é aproximadamente 60% do tempo de retorno, mantendo-se essa mesma proporção para a velocidade de saída e de retorno.

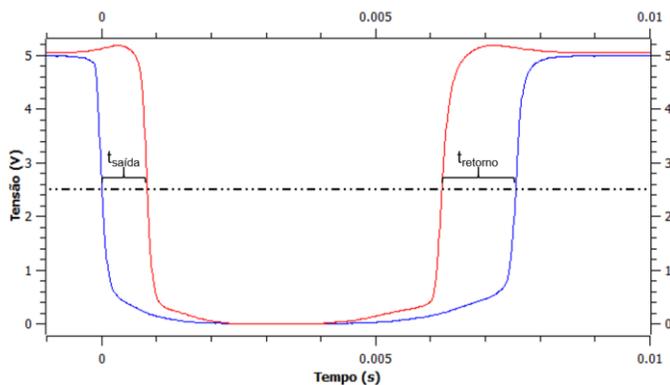


Fig. 7. Resultado obtido com a passagem do projétil pelos fotodiodos com o uso do osciloscópio.

Com a variação da posição inicial do projétil, foi calculada sua velocidade alcançada em cada ponto e o resultado é mostrado na Fig. 8. Por esta figura se verifica a melhor posição inicial do projétil dentro da bobina como forma de obter a maior velocidade. Assim, o intervalo entre 10 e 15 mm do projétil inserido na bobina fornece as máximas velocidades, as quais estão entre 5,50 e 6,20 m/s.

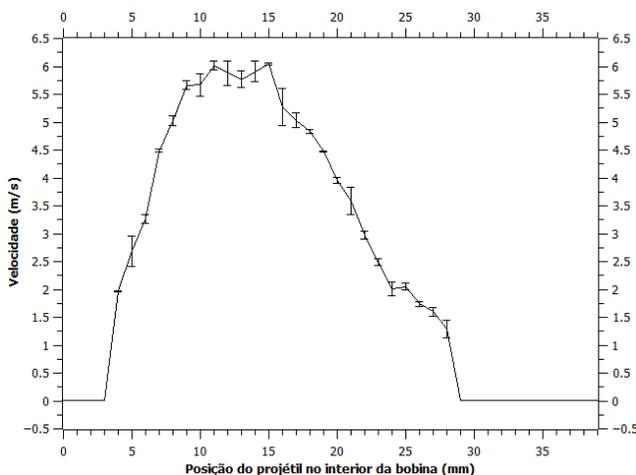


Fig. 8. Medição da velocidade de acordo com a posição inicial do projétil na bobina.

A fim de aumentar a confiabilidade dos dados, foram realizadas três medições para cada posição inicial. As barras de erro da Fig. 8 são relativas ao desvio padrão dessas leituras efetuadas, tornando possível notar que houve variação da velocidade considerando um mesmo ponto de saída. O desvio padrão máximo dos tempos medidos foi de 7,95 ms com coeficiente de variação máximo de 16,09% e para as velocidades médias calculadas o desvio padrão máximo foi de 0,33 m/s e coeficiente de variação de 11,34%. Como os coeficientes de variação resultaram em porcentagens baixas, então a aquisição de dados foi considerada satisfatória.

Determinado o intervalo de posição inicial que o projétil deve estar para que se alcance as maiores velocidades, foi adicionado um aparato de apoio para que ele permaneça nesse intervalo no início do ensaio.

VI. RESULTADOS DA MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE UMA BARRA DE AÇO

A velocidade de propagação da onda sônica longitudinal na barra de aço foi calculada por meio do uso de (1) e das propriedades do material ($\rho = 7850$ kg/m³ e $E = 210$ GPa [30]), resultando em 5172 m/s. A barra ensaiada possuía comprimento de 1 m. O deslocamento do projétil entre a bobina e a barra foi fixado em 20 mm.

Com o sistema de lançamento eletromagnético caracterizado, a onda sônica gerada no elemento fornece resultados repetitivos, como visto na Fig. 9. Por esta figura se observa que, através da combinação de cinco gráficos providos da mesma condição inicial de ensaio, as respostas de propagação da onda sônica no objeto ensaiado foram muito semelhantes entre si, garantindo a reprodutibilidade da técnica. As técnicas sônicas convencionais, utilizando um martelo acionado manualmente, não discorrem sobre a reprodutibilidade nos trabalhos apresentados, pois tanto a força inicial quanto o ângulo de incidência do impacto não são controlados, ocasionando diferenças significativas entre cada onda sônica gerada.

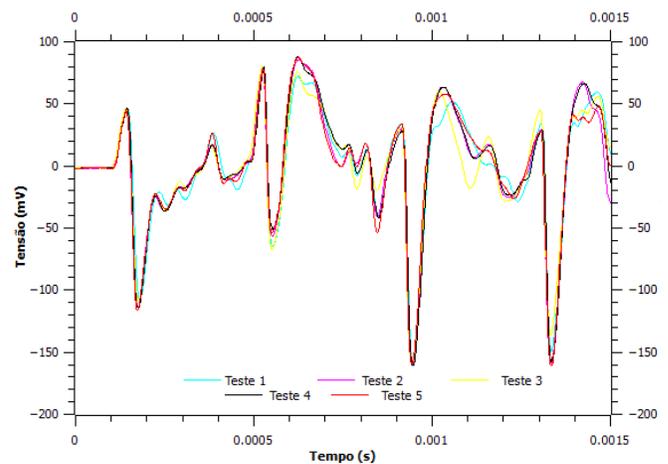


Fig. 9. Resultados gráficos expondo a reprodutibilidade do ensaio.

A captação desta onda foi feita por um microfone de eletreto conectado a um microcontrolador, que converte os dados analógicos em digitais, seguido do computador, onde o

resultado é exibido. Com isso, o gráfico do resultado dos ensaios foi gerado e o comprimento da barra pôde ser calculado. Os resultados dos ensaios realizados são mostrados nas Figs. 10 e 11. A Fig. 10 expõe os dados no domínio do tempo e se utiliza o algoritmo FFT (*Fast Fourier Transform*) para transformá-los no domínio da frequência, conforme mostrado na Fig. 11.

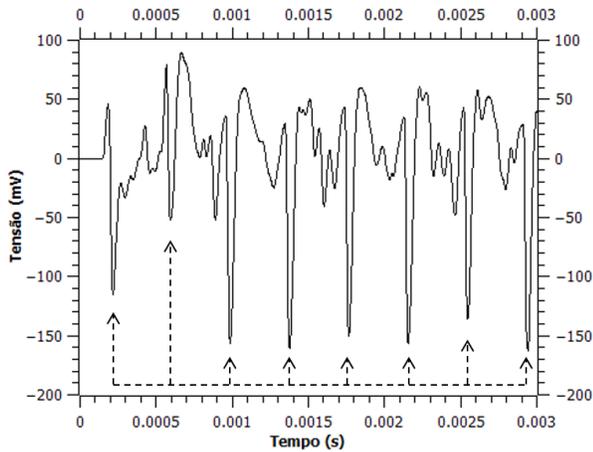


Fig. 10. Resultado do ensaio no domínio do tempo.

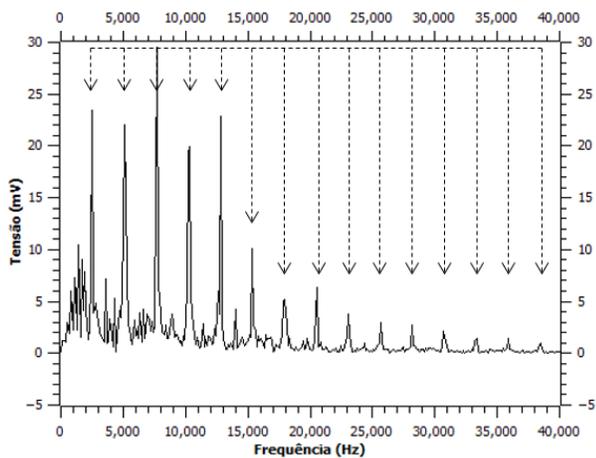


Fig. 11. Resultado do ensaio no domínio da frequência.

Os vales e picos selecionados para o cálculo do intervalo de tempo e frequência são apontados nas Figs. 10 e 11 respectivamente. Devido à baixa atenuação da onda sônica em um meio maciço de elevada massa específica, como é o caso da barra de aço, observam-se diversas reflexões sinalizadas pelas setas presentes nessas figuras. Tais reflexões se devem à diferença de impedância acústica existente no final do elemento pela mudança brusca dos meios barra-ar, possibilitando a obtenção do comprimento do objeto ensaiado.

Ao analisar o resultado da Fig. 10, da qual foram retirados os intervalos de tempo, fazendo-se uso de (4), da velocidade teórica de propagação da onda na barra de aço que foi calculada igual a 5172 m/s e que a barra ensaiada apresentava 1 m de comprimento, o comprimento médio resultou em 1,0074 m e erro calculado foi de 0,74%. Em relação ao resultado da Fig. 11, de onde se extraíram os intervalos de frequência, o comprimento médio foi de 0,9981 m e o erro de -0,19% ao utilizar (5) e demais considerações descritas anteriormente. Ao

comparar esses dois resultados, conclui-se que ao se utilizar os dados no domínio da frequência a exatidão foi maior. Assim, o sistema de lançamento eletromagnético se mostrou satisfatório para a geração da onda sônica no elemento de aço, da mesma forma que a obtenção de seu comprimento.

Com o intuito de comparar os resultados obtidos com o sistema de lançamento eletromagnético, objeto do presente estudo, com a técnica atual que fornece a onda sônica ao componente através de um martelo de mão, analisou-se o trabalho de Yu, Kim e Lee [12]. Estes autores ensaiaram diferentes elementos em laboratório, dentre estes estão as barras de aço. O resultado realizado na barra de aço de 1 m de comprimento ensaiado ao ar é mostrado na Tabela IV, na qual também consta o resultado obtido pelos autores do presente estudo.

TABELA IV
RESULTADO DOS AUTORES VERSUS YU, KIM E LEE [12]

Dados	Os autores	Yu, Kim e Lee [12]
ρ (kg/m ³)	7850	7850
E (GPa)	210	209,011
Vp teórica (m/s)	5172	5160
L (m)	1,000	1,000
Δt gráfico (μ s)	388,5	390
V calculada (m/s)	5148	5128
L calculado (m)	1,005	1,006
Erro (%)	0,5%	0,6%

Por meio da Tabela IV se observa que as barras ensaiadas por ambos os autores possuem mesmo valor de massa específica e os módulos de elasticidade pouco se divergiram, fornecendo velocidade teórica semelhante, a qual foi calculada com uso de (1). Em ambos os trabalhos o intervalo de tempo (Δt) foi retirado de um gráfico no domínio do tempo obtido com a técnica em questão e a velocidade calculada foi, então, obtida por uso de (4) e com o comprimento de 1 m. Para o comprimento calculado se utilizou a velocidade teórica e o intervalo de tempo gráfico. Constata-se que o erro das duas técnicas foi baixo, menor que 1%, expondo sua efetividade. Porém, destaca-se a reprodutibilidade dos resultados fornecidos pelo sistema eletromagnético de propulsão, algo não obtido pelos autores supracitados.

VII. CONCLUSÃO

A caracterização não destrutiva de estruturas inclusas no solo provenientes de obras de contenção e fundação é de grande importância na Engenharia Civil. Neste trabalho foi desenvolvido e caracterizado um sistema de lançamento eletromagnético com o intuito de se gerar uma onda sônica no objeto a ser ensaiado. A onda sônica é proveniente do impacto de um projétil metálico na superfície do objeto a ser ensaiado. A propulsão do projétil é originada da força magnética proporcionada por uma bobina, por onde circula uma corrente pulsada. Este pulso de corrente foi otimizado em termos de sua amplitude e largura temporal, de modo a possibilitar leituras da

onda sônica através de um microfone, com grande repetibilidade e baixo ruído. Foi desenvolvido um sistema de aquisição dos dados do microfone conectado ao computador, o que possibilita a aquisição do sinal do microfone digitalizado, facilitando o uso do sistema tanto em laboratório quanto em campo. O sistema de propulsão conta também com um detector óptico para leitura da velocidade do projétil, o que possibilita a otimização da sua posição em relação à bobina, de modo a obter-se a máxima transferência de energia e consequentemente máxima velocidade. A reprodutibilidade dos resultados é evidenciada com a apresentação de várias medições sobrepostas na mesma condição inicial do ensaio. Esta reprodutibilidade está associada ao fato que o sistema de propulsão lança o projétil sempre nas mesmas condições de posição e velocidade e é apresentada como o diferencial deste estudo, dado que os demais trabalhos sobre a técnica *Sonic Echo* usam um martelo acionado por um operador, gerando dispersão nos dados entre cada medição, pois não se tem controle da velocidade e posição do martelo no objeto ensaiado [3] [7] [8] [10]-[12]. A determinação do comprimento de barras de aço usando o sistema desenvolvido fornece erro menor que 1%, revelando que esta é uma técnica reprodutível e de alta precisão e exatidão.

REFERÊNCIAS

- [1] J. Seitz, "Low strain integrity testing of bored piles". *Application of Stress-Wave Theory on Piles-2 nd Int. Conf.*, Swedish Pile Commission, Stockholm, pp. 94-102, 1985.
- [2] O. Klingmüller. "Sonic echo pile integrity testing and quality control". *Ground Engineering*, vol. 26, no. 10, 1993.
- [3] W. M. Cheung, D. O. K. Lo, "Interim report on non-destructive tests for checking the integrity of cement grout sleeve of installed soil nails". Geo Report 176, Geotechnical engineering office, Hong Kong, 2005.
- [4] B. Zima, M. Rucka, "Non-destructive inspection of ground anchors using guided wave propagation". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, vol. 94, pp. 90-102, 2017.
- [5] F. Rausche, G. Likins, M. Hussein, "Formalized procedure for quality assessment of cast-in-place shafts using sonic pulse echo methods". *Transportation Research Record*, pp. 30-38, 1994.
- [6] L. D. Olson, F. Jalinoos, M. F. Aouad, "Determination of Unknown Subsurface Bridge Foundations", Report submitted to NCHRP, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 129-148, 1995.
- [7] W. M. Cheung; "Non-destructive tests for determining the lengths of installed steel soil nails". Geo Report 133. Geotechnical engineering office, Hong Kong, 2003.
- [8] S. T. Liao, C. K. Huang, C. Y. Wang, "Sonic echo and impulse response tests for length evaluation of soil nails in various bonding mediums". *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, no. 7, pp. 1025-1035, 2008.
- [9] C. F. Lee, O. Arup, "Review of Use of Non-Destructive Testing in Quality Control in Soil Nailing Works". Geo Report 219, Geotechnical engineering office. Hong Kong, 2007.
- [10] P. W. Jayawickrama, Y. Tinkey, J. Gong, J. Turner, "Non-Destructive Evaluation of Installed Soil Nails". Report No. FHWA/TX 07, 262 p. Texas Department of Transportation. Texas, 2007.
- [11] J. S. Lee, "Geo-characterization using waves - Principle to application". In: *ICSMGE 2017 - 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 245-264, 2017.
- [12] J. D. Yu, N. Y. Kim, J. S. Lee, "Nondestructive Integrity Evaluation of Soil Nails Using Longitudinal Waves". *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 144, no. 11, pp. 1-14, 2018.
- [13] J. Castillo, N. Gama, D. Amaya, "Projectile accelerator prototype using electromagnetic fields", *Research Journal of Applied Sciences*, vol. 13, pp. 59-66, 2018.
- [14] S. Guan, D. Wang, X. Guan, D. Guo, S. Wang, B. Liu, "Current Sharing Analysis of Coil for Electromagnetic Launching", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, pp. 2393-2398, 2019.
- [15] H. D. Fair, "The science and technology of electric launch", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 37, no. 1, pp. 25-32, 2001.
- [16] F. Daldaban, V. Sari, "The optimization of a projectile from a three-coil reluctance launcher". *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, vol. 24, pp. 2771-2778, 2016.
- [17] B. Marder, "A coilgun design primer", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 29, p. 701-705, 1993.
- [18] Y. Hu, Y. Wang, Z. Yan, M. Jiang, L. Liang, "Experiment and Analysis on the New Structure of the Coilgun With Stepped Coil Winding". *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 46, pp. 2170-2174, 2018.
- [19] B. S. Go, D. V. Le, M. G. Song, M. Park, I. K. Yu, "Design and electromagnetic analysis of an induction-type coilgun system with a pulse power module", *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 47, pp. 971-976, 2019.
- [20] W. G. Slade, "A simple unified physical model for a reluctance accelerator", *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 41, no. 11, pp. 4270-4276, 2005.
- [21] N. B. Ekrem, A. G. Olabi, T. Prescott, A. Rafferty, M. S. J. Hashmi, "An overview of magnetostriction, its use and methods to measure these properties", *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 191, pp. 96-101, 2007.
- [22] D. Ensminger, F. B. Stulen, "Ultrasonics: data, equations and their practical uses", CRC press, vol. 1, 2008, p. 376.
- [23] M. B. Perotoni, M. Mergl, "Desenvolvimento e análise de um Protótipo Coilgun", *Revista Brasileira de Ensino de Física*, vol. 38, no. 2, pp. 2305-1-9, 2016.
- [24] K. Chan, G. Clark, D. Helmlingerl, D. NG, "Electromagnetic Coil Gun: Final Report. Capstone Design – Electronics". Department Of Electrical And Computer Engineering, Rutgers School Of Engineering, p. 17, 2013.
- [25] G. W. E. Milligan, K. Tei, "The pull-out resistance of model soil nails". *Soils and Foundations*, vol. 38, no. 2, pp. 179-190, 1998.
- [26] R. J. Finno, S. L. Gassman, P. W. Osborn, "Non-destructive evaluation of a deep foundation test section at the Northwestern University national geotechnical experimentation site". A Report Submitted to the Federal Highway Administration Office, Northwestern University, Illinois, 1997.
- [27] S. H. Ni, L. Lehmann, J. J. Charn, K. F. Lo, "Low-strain integrity testing of drilled piles with high slenderness ratio". *Computers and Geotechnics*, vol. 33, no. 6-7, pp. 283-293, 2006.
- [28] K. F. Lo, S. H. Ni, Y.H. Huang, "Non-destructive test for pile beneath bridge in the time, frequency, and time-frequency domains using transient loading". *Nonlinear Dynamics*, vol. 62, no. 1-2, pp. 349-360, 2010.
- [29] O. Klingmüller, F. Kirsch, "A Quality and Safety Issue for Cast-in-Place Piles-25 Years of Experience with Low-Strain Integrity Testing in Germany: From Scientific Peculiarity to Day-to-Day Practice", *Current Practices and Future Trends in Deep Foundations*, pp. 202-221, 2004.
- [30] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, Rio de Janeiro, 2014.



Isabela Grossi da Silva formada em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Paraná (2017) e mestranda do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil pela Universidade Federal do Paraná na área de Geotecnia. O enfoque da pesquisa de mestrado relaciona-se com ensaios não destrutivos em solo grampeado. No ano de 2018, participou de um projeto de pesquisa com ênfase em métodos não destrutivos para avaliação da integridade de contenções de solo grampeado e cortina atirantada. Desde 2016, participa do Grupo de Estudo em Geotecnia da Universidade Federal do Paraná (GEGEO-UFPR).



Marlio José do Couto Bonfim Professor Associado 3 da Universidade Federal do Paraná - UFPR. Possui doutorado em Physique de la Matière et du Rayonnement – Université Joseph Fourier - Grenoble I (2000), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas (1992) e graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (1989). Tem experiência na área de Instrumentação eletrônica, Medidas elétricas e magnéticas, Microeletrônica, atuando principalmente nos seguintes temas: Instrumentação Científica, Medidas em altas frequências, geração de campos magnéticos pulsados, Compatibilidade Eletromagnética.



Vítor Pereira Faro Professor Adjunto da Universidade Federal do Paraná - UFPR. Pós Doutorado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2015), Doutor em Engenharia pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2014), mestrado em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra, Portugal (2009) e graduação em Engenharia Civil pela Universidade de Coimbra (2009). Tem experiência na área de Geotecnia, Comportamento de Materiais Geotécnicos, Interação Solo-Estrutura, Estabilidade de Taludes, Mapeamento de Risco Geotécnico, Modelos Geomecânicos.