



2 0 2 5

Ensaio CSL em Elementos Moldados *in loco*: Procedimentos, Interpretação e Lições de Campo

Sandré Cyrre Lima

Engenheiro Civil, Geo Ensaios, Florianópolis (SC), Brasil, lima@geoensaios.com.br

Jorge William Beim

Diretor, JWB Consulting LCC, Cleveland (OH), EUA, jorgebeim@hotmail.com

Larissa de Brum Passini

Professora permanente, PPGEC UFPR, Curitiba (PR), Brasil, larissapassini@ufpr.br

RESUMO: Este artigo examina a aplicação do ensaio Crosshole Sonic Logging (CSL) na avaliação da integridade de estacas escavadas e paredes diafragma moldadas *in loco*. O CSL é uma técnica não destrutiva baseada na análise do tempo de chegada da primeira onda (FAT) e da energia relativa (ER), capaz de identificar anomalias como vazios, segregações e contaminações por lama. São abordados os fundamentos do método, cuidados executivos e critérios técnicos para classificação da integridade. Discutem-se limitações operacionais, bem como erros de execução e interpretação. Destaca-se a importância da análise integrada de perfis e do uso do gráfico waterfall, propondo-se a inclusão obrigatória do CSL nas normas nacionais para obras executadas em condições geotécnicas complexas.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas escavadas, Paredes diafragma, Ensaios de integridade.

ABSTRACT: This article examines the application of the Crosshole Sonic Logging (CSL) test for assessing the integrity of cast-in-place bored piles and diaphragm walls. CSL is a non-destructive technique based on the analysis of First Arrival Time (FAT) and Energy Ratio (ER), capable of identifying anomalies such as voids, segregation, and slurry contamination. The article addresses the method's theoretical principles, execution procedures, and technical criteria for integrity classification. Operational limitations and potential execution and interpretation errors are discussed. The importance of integrated profile analysis and the use of waterfall plots is highlighted, and the mandatory inclusion of CSL in national standards is proposed for projects executed under complex geotechnical conditions.

KEYWORDS: Bored piles, Diaphragm walls, Integrity tests, Structural integrity.

1 INTRODUÇÃO

Na construção de elementos moldados *in loco*, como estacas escavadas e paredes diafragma, a presença de fluidos estabilizantes, como lama bentonítica ou água, dificulta significativamente a inspeção visual da escavação, das paredes laterais, das armaduras e do lançamento do concreto. Mesmo na ausência desses fluidos, a avaliação direta dessas etapas é limitada devido à natureza não visível do processo construtivo, o que gera incertezas sobre a conformidade do elemento executado com as condições previstas em projeto. Esse cenário torna essencial o controle rigoroso da qualidade do concreto lançado, onde falhas internas podem comprometer o desempenho estrutural do elemento de fundação. Assim, além do monitoramento visual parcial durante a concretagem, é imprescindível a aplicação de métodos de ensaio não destrutivos para avaliar a integridade estrutural ao longo de todo o trecho escavado, permitindo identificar e localizar possíveis anomalias, como falhas de concretagem, segregações ou inclusões de material inadequado.

Dentre as técnicas disponíveis, o Cross Hole Sonic Logging (CSL) destaca-se por sua capacidade de detectar, com elevada sensibilidade, descontinuidades no interior do elemento, como vazios, segregações e contaminações por fluido estabilizante. O método CSL foi desenvolvido na França no final da década de 1960 pelo *Centre Experimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics (CEBTP)*. Sua primeira aplicação prática documentada ocorreu em 1969, no Reino Unido, quando o *Greater London Council (GLC)* realizou uma série de testes em estacas especialmente construídas para avaliar o potencial da técnica, conforme relatado por Turner (1997). Nos Estados Unidos, o método passou a ser adotado a partir dos anos 1970, sendo posteriormente consolidado em diretrizes da *Federal Highway Administration (FHWA)* e



2025

incorporado formalmente à norma ASTM D6760 a partir de 1996 (Jalinoos et al., 2005). No Brasil, o CSL começou a ser utilizado na década de 1990, com maior difusão a partir dos anos 2000 em obras de infraestrutura de grande porte. Embora ainda não seja exigido pela NBR 6122, o ensaio CSL é amplamente reconhecido como prática recomendada na verificação da integridade de estacas moldadas in loco.

A confiabilidade dos resultados obtidos por meio do CSL depende diretamente da adequada execução do ensaio em campo, incluindo a correta instalação e limpeza dos tubos, o tempo de cura do concreto, a calibração dos equipamentos e o processamento dos dados conforme critérios técnicos padronizados. Normas internacionais, como a ASTM D6760-16, e diretrizes recentes de diferentes órgãos e associações, em especial o *Deep Foundation Institute* (DFI), fornecem fundamentos objetivos para a classificação dos resultados e sua interpretação (Sellountou et al., 2019; Rosli & Hasbollah, 2023).

2 ENSAIO CSL - ASPECTOS TEÓRICOS

Consolidado como uma das ferramentas mais utilizadas na verificação da integridade de elementos de fundação moldados in loco — como estacas escavadas e painéis de parede diafragma — o ensaio CSL destaca-se por sua capacidade de avaliar, com eficiência, a continuidade, a homogeneidade e a qualidade do concreto, sem exigir escavações ou intervenções destrutivas nos elementos testados (Likins et al., 2004; Amir & Amir, 2009; Chernauskas & Hajduk, 2009). A execução do ensaio é regulamentada pela norma ASTM D6760-16, que estabelece critérios detalhados para a preparação do ensaio, o posicionamento dos tubos, a aquisição e o registro dos dados, conferindo ao procedimento elevado grau de padronização e rastreabilidade.

Essa combinação de confiabilidade técnica, baixo impacto à estrutura ensaiada e respaldo normativo sólido contribuiu para sua ampla aceitação em projetos de fundações profundas, especialmente em contextos geotécnicos onde a inspeção visual direta é inviável ou insuficiente. O método baseia-se na medição da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, geradas por um transdutor transmissor e captadas por um transdutor receptor, posicionados em tubos paralelos previamente embutidos na armadura do elemento e preenchidos com água para garantir o acoplamento acústico (Figura 1).

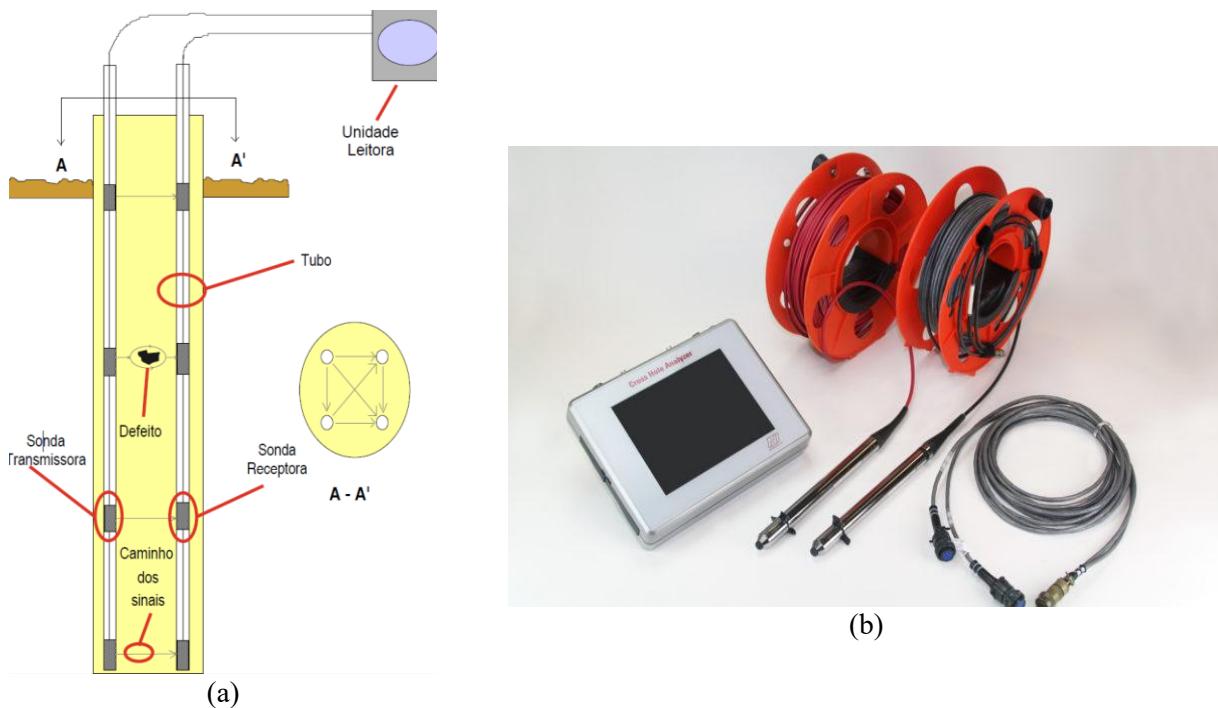


Figura 1 : (a) Esquema de funcionamento do ensaio CSL (Adaptado de Chernauskas & Hajduk (2009)) (b) Equipamento utilizado na coleta de sinais (Fonte: Arquivo pessoal dos autores)

2 0 2 5

Embora diferentes modos de propagação de onda possam estar presentes no concreto, o ensaio CSL utiliza exclusivamente as ondas do tipo P para monitoramento, escolha esta fundamentada em diversas vantagens inerentes a esse tipo de onda. Primeiramente, as ondas P apresentam velocidade de propagação significativamente maior que as ondas S — tipicamente entre 3600 e 4400 m/s em concretos homogêneos — o que reduz o tempo de trânsito entre os tubos e permite medições com maior resolução temporal (Figura 2). Além disso, sua baixa atenuação possibilita a detecção de sinais mesmo em grandes profundidades ou em regiões com pequenas heterogeneidades do concreto, assegurando maior confiabilidade ao processo. As ondas S, embora mais sensíveis a certas imperfeições, apresentam menor velocidade, maior dispersão e são fortemente afetadas por descontinuidades e interfaces, o que limita sua confiabilidade na propagação controlada entre tubos paralelos e demanda instrumentação mais complexa. Por esses motivos, o uso exclusivo das ondas P no ensaio CSL não apenas foi padronizado internacionalmente, como também assegura medições mais precisas e interpretações mais claras e robustas, reforçando a confiabilidade da técnica mesmo em condições estruturais desafiadoras.

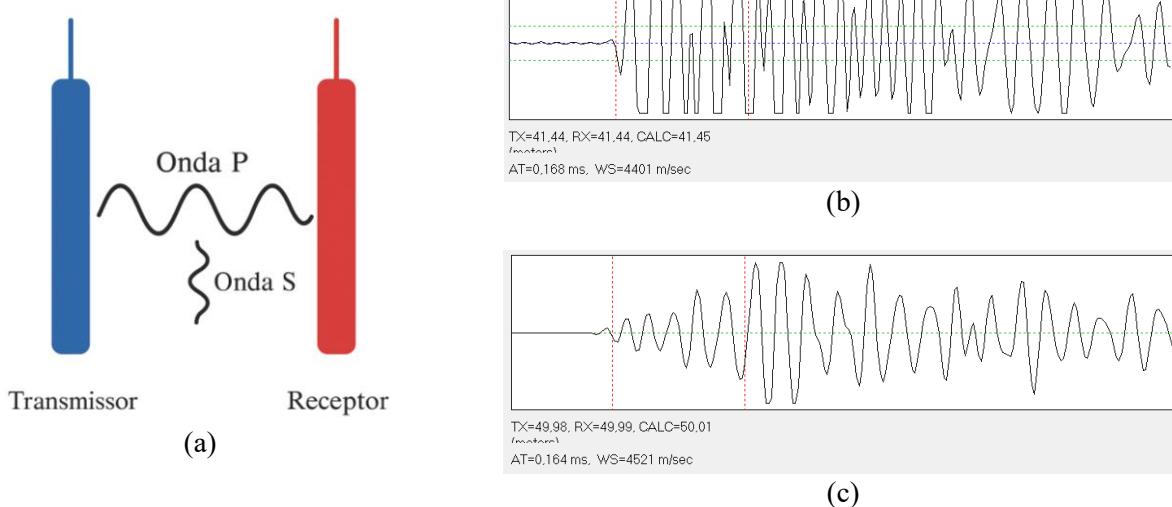


Figura 2 : (a) Forma de propagação das ondas P e S no ensaio CSL; (b) Sinal coletado indicando boa qualidade; (c) Sinal indicando redução no valor de ER e aumento no FAT, indicando ocorrência de provável falha/dano. (Fonte: Arquivo pessoal dos autores).

A propagação da onda ultrassônica no interior do concreto pode ser modelada, numa primeira aproximação, com base na teoria da elasticidade linear para meios contínuos e isotrópicos (Cheng, & Liang, 2024). A velocidade de propagação da onda de compressão (onda P), utilizada no ensaio CSL, está relacionada às propriedades físicas do material por:

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d (1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}} \quad (1)$$

- V_p : Velocidade da onda P [m/s]
 - E_d : Módulo de Elasticidade dinâmico do concreto [Pa]
 - ν : Coeficiente de Poisson
 - ρ : Densidade do concreto [kg/m^3]

Em (1) evidencia-se que a velocidade da onda está diretamente relacionada à rigidez e à densidade do meio, implicando que regiões com menor módulo dinâmico — como zonas segregadas, com presença de vazios ou contaminadas por lama — tendem a apresentar maiores atrasos no tempo de chegada da onda ao receptor, indicando a existência de potenciais falhas estruturais internas. A sensibilidade do ensaio CSL às variações mecânicas do concreto confere relevância aos seus principais parâmetros. O FAT (*First Arrival Time*) representa o tempo de chegada inicial da onda ultrassônica do emissor ao receptor, refletindo propriedades



2025

como rigidez e densidade. Variações ao longo do fuste indicam descontinuidades internas, como vazios ou zonas de concreto de baixa qualidade. Já o ER (*Energy Ratio*) expressa a energia relativa captada pelo receptor, sendo sensível à dissipação da onda. Valores baixos de ER sugerem atenuações relacionadas a fissuras, porosidade ou heterogeneidades. A análise conjunta de FAT e ER proporciona avaliação mais precisa da integridade de estacas moldadas in loco, sendo essencial ao controle tecnológico de fundações e paredes diafragma. Contudo, a interpretação exige bom acoplamento acústico entre o tubo e o concreto. Problemas de *debonding* (descolamento), quando o tubo não adere corretamente ao concreto, comprometem os resultados e não devem ser confundidos com falhas estruturais, sendo classificados como não conformidades segundo Adams et al. (2009). A prevenção de situações com as citadas anteriormente implica na utilização de tubos limpos (sem graxas ou óleos), com uma fixação adequada dos mesmos à armadura.

A interpretação visual se apoia no gráfico *waterfall*, que sobrepõe os sinais ultrassônicos captados entre dois tubos ao longo da profundidade. Cada linha representa a amplitude do sinal em função do tempo, permitindo identificar zonas de atenuação progressiva ou abrupta. Embora não represente a geometria da anomalia, o gráfico revela seus efeitos acústicos, sendo fundamental para diagnósticos visuais e comparações entre perfis CSL de um mesmo elemento (Figura 3).

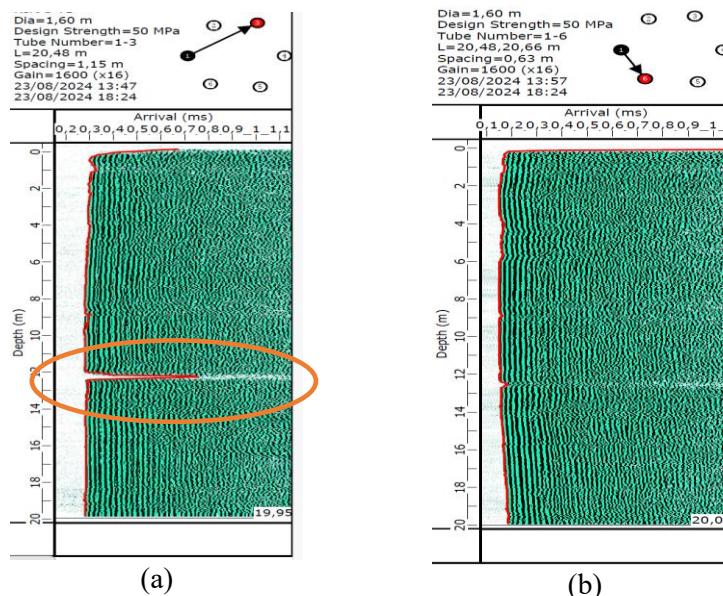


Figura 3 : Coleta de sinais do ensaio CSL (a) *Waterfall* indicando zona com provável falha/dano (b) *Waterfall* indicando perfil íntegro. (Fonte: Arquivo pessoal dos autores)

3 ENSAIO CSL – TÉCNICA EXECUTIVA E INTERPRETAÇÃO DOS SINAIS OBTIDOS

A execução adequada do ensaio CSL requer o cumprimento rigoroso de uma sequência de etapas que assegurem a confiabilidade dos resultados. O procedimento se inicia antes da fase de concretagem do elemento, com a instalação correta dos tubos de acesso, e se estende até a coleta e análise dos sinais ultrassônicos ao longo do fuste.

A primeira etapa consiste na instalação dos tubos de acesso, geralmente fabricados em PVC ou aço, com diâmetro interno de 38 mm a 50 mm, conforme especificado pela norma ASTM D6760-16. Esses tubos devem ser fixados de forma vertical, junto à armadura do elemento escavado, em número e posicionamento que garantam cobertura adequada da seção transversal, sendo a recomendação da Norma a adoção de pelo menos um tubo a cada 30 cm de diâmetro da estaca (Figura 4).

Em seguida, com o concreto já curado pelo tempo mínimo necessário (geralmente 5 a 7 dias, dependendo das condições ambientais e do traço do concreto utilizado), realiza-se o preparo das sondas e o ajuste do sistema de aquisição. O conjunto transmissor-receptor é conectado ao aparelho de registro e ao codificador de profundidade, que sincroniza o sinal com a posição vertical da sonda dentro dos tubos. A execução da coleta de dados ocorre com a emissão repetida de pulsos ultrassônicos a cada intervalo fixo de profundidade —

normalmente a cada 5 cm a 20 cm — até atingir a base ou o topo do elemento, dependendo do sentido de captação dos sinais escolhido pelo executor do ensaio. O sistema registra, para cada profundidade, a forma de onda recebida, o tempo de chegada da primeira onda (FAT) e a energia relativa do sinal (PDI, 2021). Durante a execução do ensaio CSL, é fundamental manter o controle rigoroso de alguns parâmetros operacionais essenciais, com destaque para a frequência do pulso ultrassônico a ser gerado. Essa frequência deve situar-se entre 20 e 60 kHz, sendo recomendável a adoção de valores intermediários, tipicamente em torno de 40 kHz, por proporcionarem um equilíbrio adequado entre resolução e penetração da onda.

Outro aspecto relevante é o registro preciso das características geométricas dos tubos instalados, inserindo no software seu comprimento total, os respectivos comprimentos efetivamente embutidos e acima do nível do concreto e a distância axial entre os tubos. Posteriormente à execução do ensaio, essas medidas dos comprimentos totais dos tubos, registradas manualmente, serão comparadas com os valores calculados pelo sistema via codificador de profundidade (Figura 5), devendo as diferenças observadas entre os registros manuais e obtidos via decodificador estarem dentro dos limites preconizados pela ASTM 6760-16.

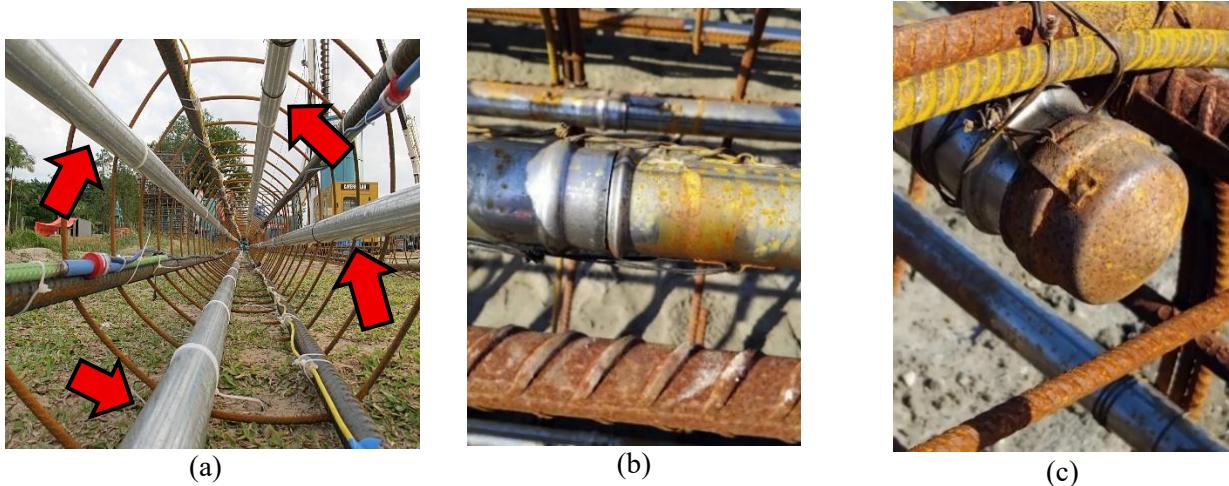


Figura 4: Vista da instalação dos tubos metálicos para execução de ensaios CSL (a) Instalação ao longo da armadura (b) Detalhe da fixação da emenda dos tubos CSL (c) Detalhe da fixação do cap na extremidade inferior do tubo CSL. (Fonte: Arquivo pessoal dos autores)

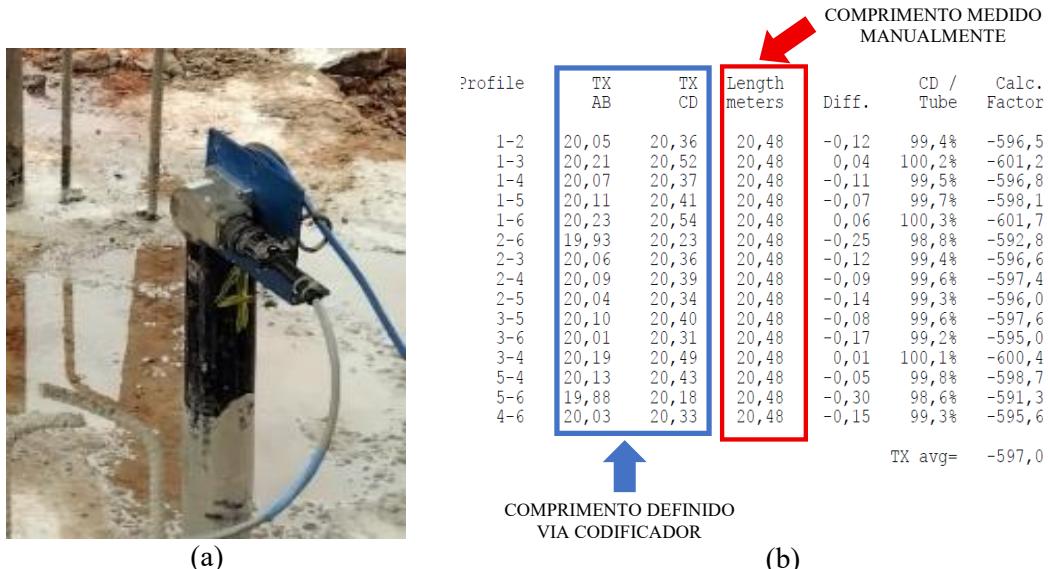


Figura 5: Caracterização geométrica no CSL — (a) Codificador de profundidade (b) Dados medidos manualmente x Dados definidos via Codificador (Fonte: Arquivo pessoal dos autores)

Além disso, o ensaio deve ser realizado sob condições estáveis de temperatura e umidade, preferencialmente em horários que minimizem variações térmicas no concreto e na água dos tubos, pois estas afetam a velocidade de propagação da onda e, consequentemente, os valores medidos de FAT e ER.



2025

Por fim, convém reforçar que, para que os dados adquiridos reflitam fielmente a integridade do concreto, é essencial que todas as etapas — da instalação dos tubos até a interpretação dos sinais — sejam conduzidas por equipe especializada, com domínio das especificações técnicas e dos cuidados de campo exigidos pelo ensaio. A adequada execução dos passos apresentados anteriormente é o alicerce da confiabilidade dos diagnósticos fornecidos pelo CSL.

Complementando-se a etapa de aquisição, a correta interpretação dos registros obtidos exige critérios técnicos definidos para a classificação da integridade do concreto. Essa avaliação é baseada, principalmente, em dois parâmetros extraídos para cada combinação de tubos: o tempo de chegada da primeira onda (FAT) e a atenuação da energia relativa (ER). Além da magnitude das anomalias, é fundamental considerar a quantidade de perfis CSL afetados por elas. Em um ensaio com múltiplos tubos, diferentes combinações de trajetos podem e devem ser analisadas, e a ocorrência repetida de sinais anômalos em dois ou mais perfis adjacentes na mesma profundidade indica maior probabilidade de que se trate de um defeito real e não de uma falha pontual ou erro operacional (Figura 6).

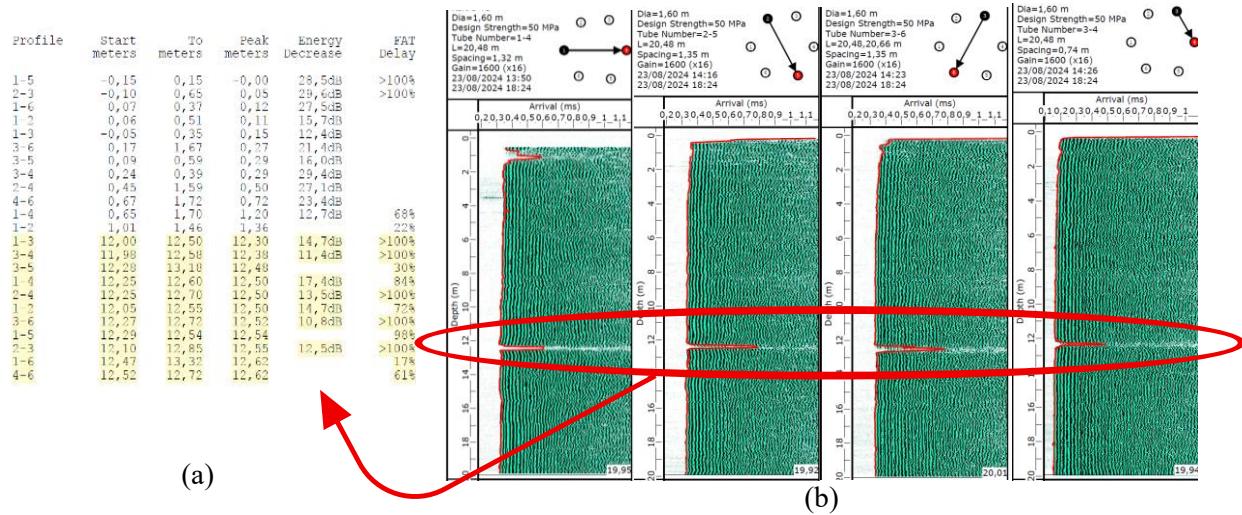


Figura 6: Output do software de análise do ensaio CSL indicando: (a) Zona com defeito destacada em amarelo (b) Alguns dos gráficos de waterfalls correspondentes às zonas identificadas em amarelo da Figura 6a. (Fonte: Arquivo pessoal dos autores)

A distinção entre falhas (*flaws*) e defeitos (*defects*) é um aspecto crítico no diagnóstico e na avaliação de elementos estruturais. Enquanto falhas são pequenas imperfeições localizadas, que não comprometem necessariamente o desempenho estrutural, defeitos representam irregularidades de maior severidade, como vazios ou grandes zonas de segregação, capazes de comprometer a transmissão de tensões, a capacidade de carga do elemento e sua durabilidade. Essa distinção é essencial para definir os critérios de aceitação e rejeição em projetos de fundações e contenções, uma vez que falhas, como microfissuras não interconectadas ou segregação leve de agregado, podem ser toleradas dentro dos limites de projeto, enquanto defeitos demandam ações corretivas imediatas, como reforço ou substituição do elemento estrutural. Portanto, compreender e aplicar corretamente os conceitos de falhas e defeitos é crucial para garantir não apenas a segurança e a durabilidade, mas também a viabilidade econômica das soluções de fundação e contenção adotadas, evitando intervenções desnecessárias ou comprometimento estrutural inadvertido.

4 ENSAIO CSL - LIMITAÇÕES E ERROS ASSOCIADOS

Apesar da simplicidade conceitual do ensaio CSL, diversos erros de execução e interpretação podem comprometer seriamente os resultados, levando a diagnósticos incorretos e, em alguns casos, até à reprovação indevida de fundações estruturalmente íntegras. Na Figura 7 estão ilustradas algumas das causas mais frequentes de falsos positivos: o desacoplamento dos tubos (*debonding*), a curvatura do eixo longitudinal dos tubos (*flambagem* ou *bending*) e a ocorrência de obstruções internas dos tubos CSL (Rohrbach et al, 2019).



2025

Além disso, o ensaio CSL possui limitações inerentes à sua metodologia, como a dependência da instalação prévia de tubos embutidos nas estacas e lamelas ainda em execução, inviabilizando sua aplicação em elementos estruturais já concluídos ou em estruturas antigas. Adicionalmente, a distância entre os tubos instalados exerce influência direta sobre a resolução e o alcance da detecção de anomalias. Quando os tubos são posicionados com espaçamentos amplos, o ensaio CSL perde sensibilidade a pequenos defeitos e a falhas periféricas, especialmente as localizadas nas bordas da armadura.

Outros problemas frequentemente negligenciados incluem erros de sincronização de posição relativa entre os transdutores transmissor e receptor, aceleração excessiva no deslocamento dos transdutores, falhas de calibração dos codificadores de profundidade e até a presença de bolhas de ar no interior dos tubos, que afetam diretamente a propagação do sinal. A utilização de cabos frouxos ou mal tracionados pode gerar perfis mais longos que o real, e a obstrução parcial dos tubos pode simular zonas de alta atenuação (Williams & Jones, 2008).

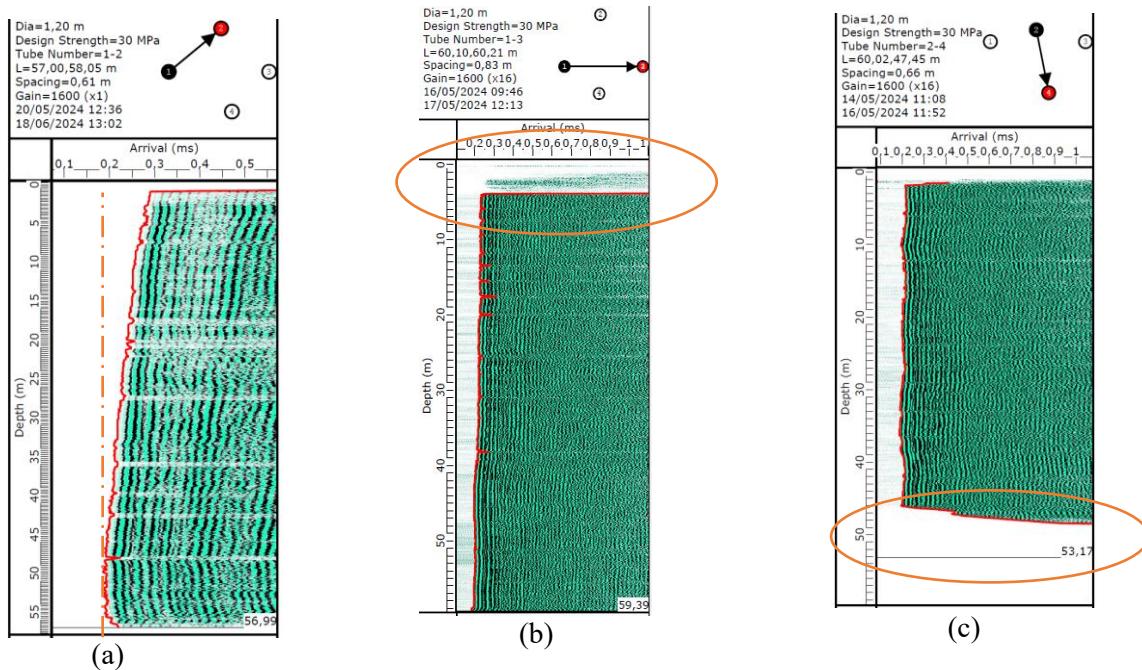


Figura 7: Resultados de ensaios CSL em diferentes estacas indicando: (a) Flambagem (*bending*) de um dos tubos CSL instalados (b) Desacoplamento (*debonding*), junto ao topo de um tubo CSL (c) Ensaio CSL executado em um tubo obstruído (Fonte: Arquivo pessoal dos autores)

5 CONCLUSÕES

O ensaio CSL consolidou-se como uma ferramenta essencial para a avaliação da integridade de elementos moldados in loco, oferecendo respostas objetivas e confiáveis mesmo em contextos de elevada complexidade geotécnica. Sua capacidade de identificar, com alta sensibilidade, descontinuidades internas — como vazios, segregações e contaminações por lama — torna-o particularmente eficaz em obras executadas com concretagem submersa ou inseridas em solos de baixa resistência e alta heterogeneidade, onde as incertezas de execução são mais acentuadas.

A robustez do método está ancorada não apenas em seus fundamentos físicos, mas também na interpretação técnica dos parâmetros FAT e ER, cuja análise integrada permite distinguir, com precisão, imperfeições pontuais de defeitos relevantes. Aliado ao recurso visual dos gráficos waterfall, o CSL transforma-se em um instrumento de diagnóstico confiável e alinhado com as boas práticas internacionais da engenharia de fundações. A análise dos resultados constitui uma etapa especialmente sensível à ocorrência de erros. Como o CSL fornece dados indiretos, como o tempo de chegada da onda (FAT) e a atenuação do sinal ER, esses parâmetros podem ser afetados por diversas variáveis que não estão necessariamente associadas a defeitos estruturais. Para assegurar interpretações confiáveis e minimizar erros, é fundamental adotar uma



abordagem meticulosa desde a fase de instalação dos tubos, garantindo sua verticalidade e sua correta fixação à armadura, não negligenciando o preenchimento completo dos tubos com água.

Diante desse cenário, é imperativo que a norma de fundações NBR 6122 evolua para refletir a maturidade técnica já consolidada na prática. A inclusão obrigatória de ensaios não destrutivos — como o CSL — em obras com solos desafiadores sob o ponto de vista geotécnico e concretagem submersa é uma recomendação técnica, necessária para elevar o padrão de confiabilidade e segurança das fundações no Brasil. Adotar essa exigência de forma normativa significa caminhar rumo a uma engenharia mais precisa, preventiva e comprometida com a excelência construtiva. O futuro das fundações profundas passa, indiscutivelmente, pela consolidação de métodos que tragam rastreabilidade, transparência e qualidade aos processos executivos — e o CSL é uma das ferramentas mais qualificadas para liderar esse avanço.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2020). NBR 6122:2020. Projeto de fundações. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2020. 151p.
- Adams, J. C., Hajduk, E. L., Halvarsson, P., Neumann, A. (2009). *A case history evaluation of CSL access tube debonding*. Contemporary Topics in Deep Foundations, 552-559. [https://doi.org/10.1061/41021\(335\)69](https://doi.org/10.1061/41021(335)69)
- Amir, J. M. and Amir, E. I. (2009). *Capabilities and limitations of cross-hole ultrasonic testing of piles*. Contemporary Topics in Deep Foundations, 131, 536-543. [https://doi.org/10.1061/41021\(335\)67](https://doi.org/10.1061/41021(335)67)
- ASTM International (2016). *ASTM D6760-16: Standard Test Method for Integrity Testing Concrete Deep Foundations by Ultrasonic Cross-hole Testing*. 7p.
- Cheng, H., & Liang, M. (2024). *Real-time monitoring of static elastic modulus evolution in hardening concrete through longitudinal-wave velocity changes retrieved by the stretching technique*. Construction and Building Materials, 453, 139086.
- Chernauskas, L. R.; Hajduk, E. L. (2009). *The use of crosshole tomography to evaluate drilled shaft repairs*. In: International Foundation Congress and Equipment Expo, Orlando. Contemporary Topics in Deep Foundations. Reston: ASCE, 2009. p. 560–567.
- Jalinoos, F.; Mekic, N.; Grimm, R. E.; Hanna, K. (2005). *Drilled shaft foundation defects: identification, imaging, and characterization*. Lakewood: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Central Federal Lands Highway Division. 137 p. (Publication No. FHWA-CFL/TD-05-007).
- Likins, G. E.; O'Neill, M. W.; Chen, C. (2004). *Cross-hole Sonic Logging: Reducing Uncertainties*. In: Proceedings of the International Deep Foundations Congress, GSP No. 124, ASCE, Orlando, Florida, pp. 1233–1247.
- Pile Dynamics Inc. – PDI (2021). *CHAMP-Q User Manual*. Cleveland: Pile Dynamics, Inc., 85 p.
- Rohrbach, M. A.; Kovacs, T. R.; Saidin, F. *Uncertainties in CSL test interpretations and recommendations toward a more efficient process*. Deep Foundations Institute, 2017.
- Rosli, N., Hasbollah, D. (2023). *A Review of Cross-Hole Ultrasonic Logging for Foundation Integrity Testing and Its Evaluation Criteria*. Construction, 3(2), 241–246. <https://doi.org/10.15282/construction.v3i2.9572>
- Sellountou, E. A.; Amir, J.; Canivan, G.; Chernauskas, L.; Hertlein, B.; Kandaris, P.; Kovacs, T.; Likins, G. (2019). *Terminology and Evaluation Criteria of Cross-hole Sonic Logging (CSL) as Applied to Deep Foundations*. Deep Foundations Institute (DFI), 23 p.
- Turner, M. J. *Integrity Testing in Piling Practice*. London: Construction Industry Research and Information Association (CIRIA), Report 144, 1997. 336 p
- Williams, H. T.; Jones, I. (2008). *Interpretation and misinterpretation of sonic logging test results*. In: Proceedings of the Fifth International Symposium on Deep Foundation on Bored and Augured Piles – BAP V, Ghent, Belgium, 8–10 September. p. 1–6.