XXII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
XI Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
24 a 28 de agosto de 2026 – Brasília/DF
DOI: 10.47094/COBRAMSEG2026.5/47

Controle Executivo e de Qualidade na Execução de Cortina de Estacas Secantes para Contenção de Contaminantes

Max Gabriel Timo Barbosa
Diretor Técnico, SCO Engenharia Geotécnica, Brasília, Brasil, max.barbosa@sco.eng.br
Davi Martins de Aragão
Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil
Ana Clara da Ponte Cervo
Engenheira Ambiental, SCO Engenharia Geotécnica, Brasília, Brasil
Luana de Sousa Balieiro
Universidade de Brasília, Brasília, Brasil

RESUMO: Barreiras hidráulicas executadas por meio de cortinas de estacas secantes têm sido empregadas para contenção de fluxo subterrâneo e confinamento de contaminantes em áreas industriais e minerárias. Nesses sistemas, o desempenho hidráulico da barreira depende fundamentalmente da continuidade geométrica da cortina e da adequada sobreposição entre estacas adjacentes. Em maciços heterogêneos, compostos por solos residuais, depósitos aluvionares e rocha fraturada, o controle executivo da obra torna-se um fator crítico para garantir a estanqueidade do sistema.
Este trabalho apresenta a metodologia de controle executivo e de qualidade aplicada na execução de uma cortina de estacas secantes destinada à contenção hidráulica de um lago de rejeitos minerários desativado. O pioneiro sistema de controle adotado integrou verificações geométricas, hidráulicas e estruturais, incluindo perfilagem ótica digital dos furos, ensaios magnetométricos de verticalidade, ensaios de permeabilidade do tipo Lugeon e, preliminarmente, ensaios de integridade estrutural do tipo PIT.
Os resultados obtidos indicaram que a integração dessas técnicas permitiu verificar de forma robusta a continuidade da cortina e a conformidade geométrica das estacas executadas, reduzindo significativamente as incertezas associadas ao processo construtivo. O trabalho discute a contribuição do controle geométrico para o desempenho hidráulico da barreira e propõe um modelo integrado de gestão da qualidade aplicável à execução de obras geotécnicas com elevada exigência ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Estacas secantes, barreiras hidráulicas, controle executivo, controle de qualidade geotécnico, perfilagem ótica, verticalidade de estacas.

ABSTRAC: Hydraulic barriers constructed using secant pile walls have been adopted for groundwater control and containment of contaminants in mining and industrial environments. In such systems, the hydraulic performance of the barrier depends fundamentally on the geometric continuity of the wall and the adequate overlap between adjacent piles. In heterogeneous ground conditions, including residual soils, alluvial deposits, and fractured rock, construction control becomes a critical factor to ensure the hydraulic integrity of the barrier.
This paper presents the executive control and quality assurance methodology applied during the construction of a secant pile cutoff wall designed to contain contaminants around a mining tailings pond. The adopted control system integrated geometric, hydraulic, and structural verification techniques, including optical borehole profiling, magnetometric verticality testing, Lugeon permeability tests, and, preliminarily, pile integrity testing (PIT).
The results indicate that the combined use of these techniques enabled a robust verification of pile geometry and wall continuity, significantly reducing uncertainties associated with the construction process. The study discusses the relationship between geometric control and hydraulic performance and proposes an integrated quality management framework applicable to geotechnical works with stringent environmental requirements.

KEYWORDS: Secant piles, hydraulic barriers, construction control, geotechnical quality assurance, borehole optical profiling, pile verticality.

1 INTRODUÇÃO

A contenção hidráulica de contaminantes em áreas industriais e minerárias representa um dos principais desafios da engenharia geotécnica contemporânea. Em diversos empreendimentos, especialmente aqueles associados à mineração e ao gerenciamento de rejeitos, a migração de água subterrânea pode atuar como vetor de transporte de contaminantes, exigindo a implantação de sistemas de geoconfinamento capazes de reduzir ou interromper o fluxo subterrâneo.

Entre as soluções geotécnicas disponíveis, as cortinas de estacas secantes têm sido amplamente empregadas para a formação de barreiras hidráulicas contínuas. Essa técnica consiste na execução sequencial de estacas adjacentes com sobreposição parcial entre si, formando um elemento contínuo de baixa permeabilidade no interior do maciço.

Embora a concepção dessas estruturas esteja bem estabelecida na prática da engenharia geotécnica, o desempenho hidráulico da barreira depende de forma crítica da continuidade geométrica da cortina, especialmente da manutenção da secância entre estacas primárias e secundárias. Pequenos desvios de verticalidade ou variações no diâmetro efetivo das perfurações podem resultar na formação de descontinuidades hidráulicas, criando caminhos preferenciais de fluxo.

Tradicionalmente, o controle executivo baseia-se em verificações topográficas, controle de verticalidade e ensaios hidráulicos, que podem ser insuficientes para garantir a rastreabilidade geométrica completa da cortina em projetos com elevada exigência ambiental.

Neste contexto, o presente trabalho apresenta a experiência de execução de uma cortina de estacas secantes destinada à contenção hidráulica de um lago de rejeitos minerários desativado. O artigo tem como objetivo discutir a metodologia de controle executivo e de qualidade adotada durante a execução da obra, com ênfase na integração entre diferentes técnicas de verificação geométrica e hidráulica.

2 REVISÃO DE LITERATURA E ESTADO DA PRÁTICA

Cortinas de estacas secantes têm sido amplamente utilizadas como sistemas de contenção e barreiras hidráulicas em escavações profundas, obras subterrâneas e estruturas de contenção ambiental. O sistema consiste na execução de estacas sobrepostas, denominadas primárias e secundárias, de forma a produzir um elemento contínuo capaz de resistir a pressões de solo e água e, em muitos casos, funcionar também como elemento estrutural permanente (Trivedi & Mazzo, 2013). Tal solução apresenta elevada adaptabilidade às condições geotécnicas e restrições geométricas (Ho et al., 2016).

A literatura técnica destaca que o desempenho de cortinas de estacas secantes depende fortemente de aspectos construtivos, especialmente relacionados ao controle de verticalidade, posicionamento e sobreposição entre estacas. Pequenas variações geométricas podem comprometer a continuidade da parede ou reduzir sua espessura efetiva ao longo da profundidade (Bobba et al., 2010).

Além do controle geométrico, a gestão de riscos construtivos é apontada como um fator crítico para o sucesso de obras com estacas secantes. De acordo com Suckling et al. (2009), os riscos associados a esse tipo de estrutura envolvem simultaneamente aspectos de segurança, confiabilidade de projeto, riscos construtivos e riscos comerciais, sendo fundamental a participação do empreiteiro especializado nas fases iniciais de planejamento da obra.

Em aplicações ambientais e de contenção de fluxo subterrâneo, paredes secantes também são utilizadas como barreiras hidráulicas para redução da migração de contaminantes ou controle de percolação. Diretrizes internacionais indicam que a seleção do sistema construtivo deve considerar condições geotécnicas locais, requisitos de desempenho da barreira e limitações operacionais da obra (Deep Foundations Institute, 2021).

Apesar da ampla utilização, há lacuna na sistematização de procedimentos de controle executivo, especialmente em aplicações ambientais

3 FRAMEWORK DE CONTROLE EXECUTIVO E DE QUALIDADE

Foi desenvolvido um framework de controle executivo voltado à garantia da continuidade geométrica da cortina.

Esse framework baseia-se em quatro pilares principais:

1. Controle geométrico da execução
2. Controle de posicionamento e verticalidade
3. Verificação da interseção entre estacas
4. Inspeção e validação da continuidade da cortina

A Figura 1 apresenta o fluxograma conceitual do sistema de controle adotado.



Figura 1. Framework aplicado à execução de cortina de estacas secantes.

3.1 Controle geométrico e posicionamento

O controle inicial da execução baseou-se na implantação topográfica precisa da parede e na utilização de mureta guia para garantir o posicionamento das estacas primárias e secundárias. Desvios geométricos podem comprometer a sobreposição entre estacas.

3.2 Controle de sobreposição entre estacas

A continuidade da cortina depende da interseção adequada entre estacas primárias e secundárias. A literatura demonstra que pequenas variações de verticalidade podem alterar significativamente o grau de sobreposição ao longo da profundidade da parede.

Dessa forma, o controle executivo incluiu:

- verificação sistemática de verticalidade durante a perfuração
- análise geométrica das estacas executadas
- rastreabilidade de cada elemento da parede

3.3 Métodos de verificação testados

Durante a execução da obra, diferentes métodos de verificação foram avaliados com o objetivo de confirmar a continuidade da cortina.

Inicialmente foi testado o uso de ensaios do tipo Pile Integrity Test (PIT) como ferramenta de controle da integridade das estacas. Entretanto, verificou-se que a aplicação desse método apresentava limitações significativas para a avaliação da continuidade entre elementos sobrepostos, sendo mais adequado para identificação de defeitos estruturais em estacas isoladas.

Dessa forma, sua utilização como ferramenta principal de verificação da continuidade da cortina mostrou-se limitada.

3.4 Estratégias de controle adotadas

Diante dessas limitações, foram adotadas duas estratégias principais para melhoria do controle executivo, o uso de centralizadores e o uso de perfilagem ótica.

3.4.1 Uso de centralizadores

Foi desenvolvido um sistema específico de centralização da armadura com o objetivo de garantir o posicionamento adequado do elemento estrutural dentro da estaca secundária.
Esse sistema reduziu significativamente o risco de excentricidades e contribuiu para maior uniformidade da seção final da cortina.

3.4.2 Perfilagem ótica

Também foi adotado o uso de perfilagem ótica em furos secundários e terciários, permitindo a inspeção direta da geometria interna das estacas e da interface entre elementos.
Essa metodologia possibilitou avaliar:

- continuidade geométrica da parede
- presença de eventuais vazios
- qualidade da interseção entre estacas

A utilização combinada dessas ferramentas mostrou-se mais eficaz para o controle da execução quando comparada ao uso isolado de ensaios indiretos.

4 METODOLOGIA EXECUTIVA

A cortina de estacas secantes analisada neste trabalho foi executada como parte de um sistema de contenção associado ao controle do fluxo subterrâneo em área de disposição de rejeitos minerários. O objetivo da solução foi criar uma barreira contínua no subsolo por meio da execução de estacas sobrepostas, garantindo a interceptação de possíveis caminhos preferenciais de fluxo.

A metodologia executiva adotada foi estruturada com base em critérios de controle geométrico, rastreabilidade da execução e verificação da continuidade da cortina, conforme o framework conceitual apresentado anteriormente.

4.1 Geometria da cortina

A cortina foi composta por estacas executadas em sequência alternada entre elementos primários e secundários. As estacas primárias foram executadas inicialmente e posteriormente interceptadas pelas estacas secundárias, formando um sistema contínuo de sobreposição entre elementos.

Esse arranjo forma uma parede contínua cuja espessura depende da geometria e da interseção entre estacas. A Figura 2 apresenta a seção típica da cortina de estacas secantes adotada no empreendimento, ilustrando o arranjo geométrico entre estacas primárias e secundárias e a formação da parede contínua.

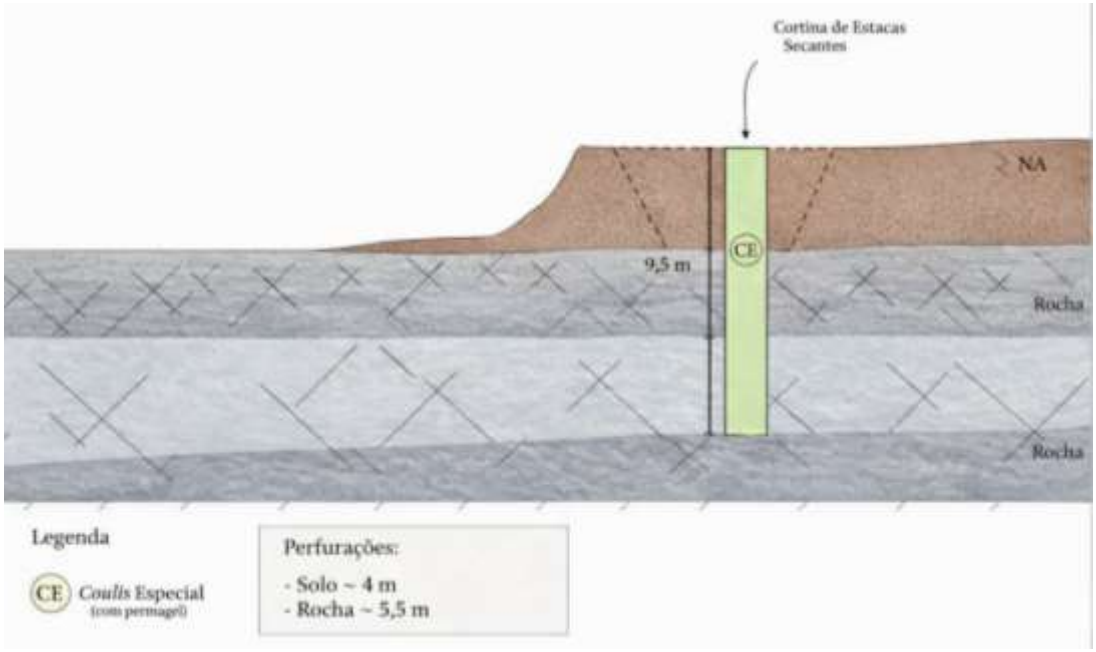


Figura 2. Seção típica da cortina de estacas secantes mostrando a interseção entre estacas primárias e secundárias.

4.2 Sequência executiva

A execução da cortina seguiu uma sequência construtiva típica para esse tipo de solução, iniciando-se pela execução das estacas primárias e posteriormente pela execução das estacas secundárias, que interceptam parcialmente os elementos previamente executados. A sequência executiva foi definida para garantir a adequada interceptação entre estacas.

A sequência executiva adotada encontra-se ilustrada na Figura 3.

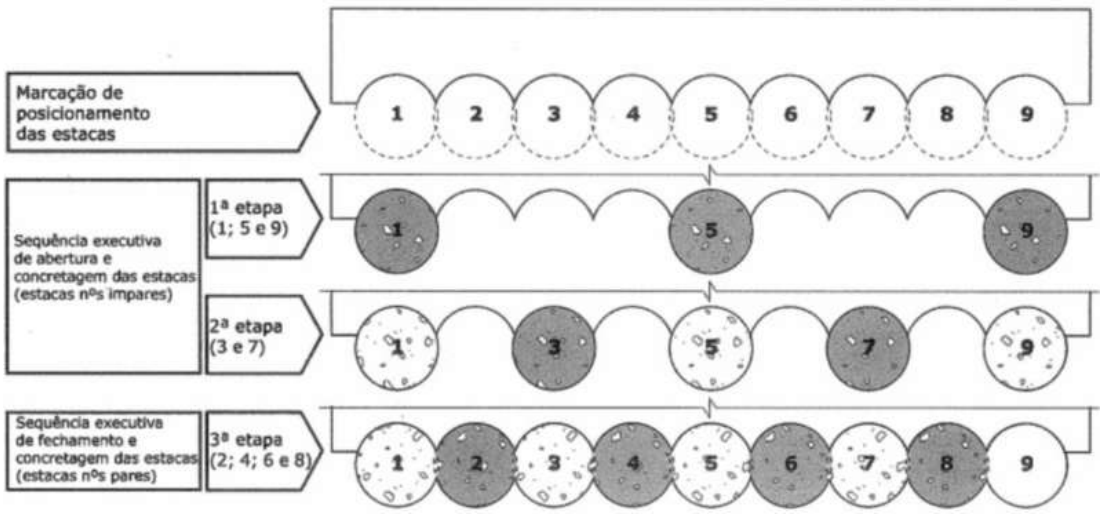


Figura 3. Sequência executiva típica da cortina de estacas secantes com execução inicial das estacas primárias e posterior execução das estacas secundárias (ABEF, 2012).

4.3 Controle geométrico da execução

O controle geométrico das estacas foi realizado por meio de levantamento topográfico sistemático e monitoramento da verticalidade durante a perfuração.

A verticalidade das estacas constitui um dos principais fatores que influenciam o grau de sobreposição entre elementos primários e secundários. Pequenos desvios podem resultar em redução significativa da espessura efetiva da parede em determinadas profundidades.

Por essa razão, procedimentos de controle geométrico foram adotados ao longo de toda a execução da cortina, incluindo a verificação do posicionamento das estacas e o monitoramento dos desvios de verticalidade.

4.4 Métodos de verificação da continuidade da cortina

Durante a execução da obra foram avaliados diferentes métodos para verificação da continuidade da cortina e da qualidade geométrica das estacas.

Inicialmente foram realizados ensaios de integridade do tipo Pile Integrity Test (PIT), com o objetivo de avaliar possíveis descontinuidades ou defeitos estruturais nas estacas executadas. Entretanto, verificou-se que esse método apresenta limitações para avaliação da continuidade entre estacas sobrepostas, sendo mais adequado para identificação de anomalias em estacas isoladas.

Diante dessas limitações, foi adotada a utilização de perfilagem ótica em furos selecionados, permitindo a inspeção direta da geometria interna das estacas antes da concretagem. Esse procedimento permitiu avaliar a geometria interna das perfurações e verificar eventuais irregularidades no fuste das estacas. A Figura 4 apresenta um exemplo de perfilagem ótica realizada em um dos furos executados na cortina.



Figura 4. Exemplo de perfilagem ótica realizada em furo da cortina de estacas secantes.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Controle de verticalidade das estacas

O controle de verticalidade das estacas constituiu um dos principais aspectos de verificação durante a execução da cortina. Os dados permitiram avaliar os desvios ao longo da profundidade. A Figura 5 apresenta o perfil médio de desvio das estacas, de acordo com a profundidade.

Os resultados indicaram que os desvios observados permaneceram dentro das tolerâncias adotadas para a obra, permitindo manter a sobreposição mínima projetada entre estacas primárias e secundárias ao longo da profundidade.

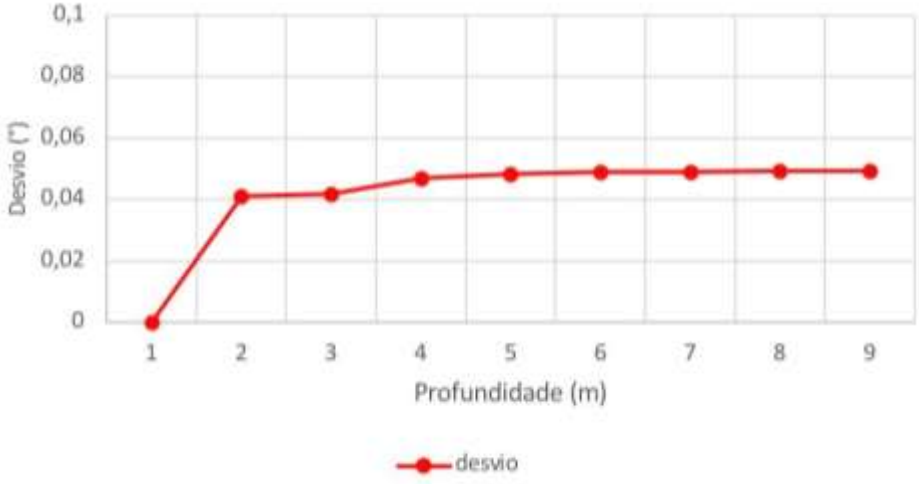


Figura 5. Perfil médio de desvio, em graus, de acordo com a profundidade, em metros, da estaca

5.2 Inspeção da geometria interna das estacas

A utilização da perfilagem ótica permitiu a inspeção direta da geometria interna das perfurações antes da concretagem das estacas.

Essa técnica possibilitou identificar irregularidades locais no fuste das estacas e verificar a condição geométrica dos furos executados, contribuindo para aumentar a confiabilidade do processo executivo.

A aplicação desse método mostrou-se particularmente útil para complementar os procedimentos tradicionais de controle geométrico da execução.

5.3 Ensaios hidráulicos

Como parte do programa de verificação do desempenho da cortina, foram realizados ensaios de permeabilidade do tipo Lugeon em trechos selecionados.

A Figura 6 apresenta um exemplo de resultados obtidos nesses ensaios, que se mostraram sem absorção de água em qualquer estágio.



Figura 6. Resultados de ensaios de permeabilidade tipo Lugeon realizados na cortina.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou as práticas de controle executivo e de qualidade adotadas na execução de uma

cortina de estacas secantes aplicada à contenção hidráulica em área de rejeitos minerários. A partir da experiência obtida na obra analisada, podem ser destacadas as seguintes conclusões principais:

1. A execução de cortinas de estacas secantes com função hidráulica exige elevado controle geométrico durante a perfuração, uma vez que desvios de verticalidade podem comprometer a sobreposição entre estacas e afetar a continuidade da barreira.
2. O monitoramento sistemático da verticalidade das estacas mostrou-se fundamental para garantir a manutenção da secância entre elementos primários e secundários ao longo da profundidade da cortina.
3. Os ensaios de integridade do tipo PIT apresentaram limitações para avaliação da continuidade entre estacas sobrepostas, sendo mais adequados para verificação de integridade estrutural de estacas isoladas.
4. A utilização de perfilagem ótica em furos selecionados demonstrou ser uma ferramenta eficaz para inspeção direta da geometria interna das perfurações e verificação das condições de execução antes da concretagem.
5. Os resultados obtidos nos ensaios hidráulicos do tipo Lugeon indicaram comportamento compatível com o desempenho esperado da barreira, não sendo observados indícios de caminhos preferenciais de fluxo nos trechos investigados.
6. A integração entre controle geométrico da execução, inspeção direta das perfurações e verificação hidráulica do maciço permitiu estabelecer um sistema estruturado de controle de qualidade, contribuindo para aumentar a confiabilidade da execução de cortinas de estacas secantes em obras geotécnicas com elevado rigor ambiental.

Os resultados indicam que o controle executivo integrado reduz incertezas na execução de cortinas de estacas secantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Associação Brasileira de Empresas de Engenharia de Fundações e Geotecnia – ABEF (2012). Manual de Execução de Fundações. 3ª ed., Editora Pini, São Paulo, SP, Brasil.

ASTM International (2006). ASTM D5882: Standard test method for low strain integrity testing of deep foundations. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Bobba, R., Gault, H.W., Vannoy, B.B. (2010). Secant pile barrier wall overlap, thickness and position at the U.S. Army Corps of Engineers Wolf Creek Dam. In: Proceedings of the ASCE GeoFlorida Conference, West Palm Beach, USA.

Caputo, F., Caputo, A., Libano, D. (2009). UHE Peixe Angical: Secant Cutoff Wall in Uncertain Geology. Deep Foundations Magazine, Winter 2009.

Deep Foundations Institute – DFI (2021). Guidelines for Selecting Cutoff Wall Systems. Deep Foundations Institute, Hawthorne, NJ, USA.

Ho, C.E., Daugiala, A., Ebanks, N. (2016). Installation of secant pile wall in rock adjacent to fragile building. In: Proceedings of the Deep Foundations Institute Annual Conference.

Suckling, T.P., Wren, C.J., Troughton, V.M. (2009). Secant pile walls – a consistent approach to risk management. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering.

Suroor, H., Galagoda, M., McGhee, C. (2008). Design and construction of circular secant pile walls in soft clays. In: Proceedings of the 6th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, Missouri University of Science and Technology.

Trivedi, K.H., Mazzo, A. (2013). Secant pile walls – design, construction and case history. In: Proceedings of the Deep Foundations Institute Conference.